

УДК 664.8.047

ТЕОРЕТИЧНИЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ КІНЕТИКИ СУШІННЯ КОЛОЇДНИХ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ЯК ОБ'ЄКТІВ СУШІННЯ

Давиденко Б.В.¹, докт. техн. наук, Самойленко К.М.², канд. техн. наук¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, старший науковий співробітник, e-mail: bdavydenko@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8738-7612>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: katernasamoilenkoittf@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5169-4466><https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.5>

В статті наведено теоретичний та експериментальний аналіз кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Для визначення характеристик процесу конвективного сушіння, крім експериментальних досліджень, виконано чисельне моделювання даного процесу, яке виконується на основі розв'язання системи рівнянь тепломасопереносу в колоїдних капілярно - пористих матеріалах. Розрахункова модель може застосовуватись для наближеного визначення основних характеристик процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

The article provides a theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of colloidal capillary-porous materials. To determine the characteristics of the convective drying process, in addition to experimental studies, numerical modeling of this process was performed, which is performed on the basis of the numerical solution of the system of heat and mass transfer equations in colloidal capillary-porous materials. The calculation model can be used for the approximate determination of the main characteristics of the drying process of colloidal capillary-porous materials.

Бібл. 10, рис. 11.

Ключові слова: тепломасоперенос, сушіння, колоїдні капілярно-пористі матеріали, культивовані гриби *Pleurotus eryngii*.

Постановка проблеми. Сушіння рослинної сировини (колоїдних капілярно-пористих матеріалів) з метою переробки на сухі продукти відноситься до енергоємних процесів. На процеси сушіння витрачається в світі близько 10-12 % всієї енергії.

Враховуючи нині ситуацію в енергетичному секторі України, нагальна потреба в удосконаленні та розробці енергоефективних теплотехнологій зневоднення рослинної сировини є актуальною та на часі, які б забезпечували мінімальні витрати енергії та високу якість кінцевого продукту.

Виробництво та переробка рослинної сировини належить до стратегічно важливих напрямків розвитку сільськогосподарського виробництва, що не лише гарантує продовольчу безпеку держави, але також забезпечує сировиною харчову та переробну промисловість. Наразі популярності набирають сушені харчові продукти (натуральні харчові порошки, або у вигляді стружки, шматочків, чипси і т.д.), які можуть використовуватись як і в виробничих масштабах при виробництві продуктів швидкого приготування, так і в роздрібній доступності із метою полегшення

приготування їжі та заміни синтетичних приправ, які є дуже шкідливими.

В грибній індустрії на світовому харчовому ринку все більш актуальними є культивовані гриби *Pleurotus eryngii*, які в найбільших масштабах вирощуються в Європі, Близькому Сході, Китаї та цінуються високим вмістом білку, вуглеводів, ненасиченими жирними кислотами, вітамінами та іншими поживними речовинами. Вони також мають низький вміст жиру з високою харчовою та лікувальною цінністю, що призводить до його високої цінності. Також багаті полісахаридами і мають хороші терапевтичні ефекти, такі як їх активність проти вірусів і гіпоглікемії та здатність знижувати рівень холестерину, сприяти кишковому травленню, запобігати серцево-судинним захворюванням і підвищувати імунітет [1]. Полісахариди грибів мають різноманітну біологічну активність, включаючи антиоксидантну, антигіперліпідемічну, протипухлинну, імунорегуляторну та бактеріостатичну [2].

Одним із способів переробки харчових продуктів є сушіння, що є, порівняно із іншими способами, найдешевшим та широко застосовується для продовжен-

ня терміну придатності в тому числі і культивованих грибів, які мають короткотривалий термін зберігання у свіжому вигляді.

Важливою умовою при розробці таких технологій отримання сухих харчових продуктів є зберегти біологічно активні речовини на високому рівні та максимально можливо знизити енерговитрати на процес переробки. При цьому вирішальну роль відіграє механізація, автоматизація та інтенсифікація виробничих процесів.

Сушіння є складним процесом, який передбачає безперервний тепло- та масообмін, він може супроводжуватися значними змінами якісних показників, хімічного складу, структурних властивостей продукту тощо. Основними характеристиками є збереження кольору, усадка матеріалу та здатність до відновлювання.

Важливо, з метою оптимізації витрат енергії при зневодненні та підбору раціонального обладнання, окрім експериментальних досліджень, виконувати теоретичний розрахунковий аналіз тепломасообміну на основі математичних моделей.

Аналіз досліджень і публікацій. Як видно з літературних джерел [3, 4, 5], задля збереження та продовження терміну зберігання культивованих грибів *Pleurotus eryngii* іноземні науковці постійно досліджують кінетику конвективного сушіння при різних температурних параметрах 40, 50, 60, 70 і 80 °C та різної товщини досліджуваних зразків 4, 8 і 12 мм із постійною швидкістю повітря 2 м/с; метод індивідуальної швидкої заморозки, що використовується для виробництва високоякісних заморожених продуктів шляхом заморожування окремого шматка продукту окремо від інших продуктів; дослідження різних методів зневоднення – природне, сублімаційне, вакуумне, інфрачервоне, мікрохвильове. У кожного із цих методів є відповідні недоліки. Із якісних характеристик це – колір, коефіцієнт усадки, коефіцієнт регідратації, міцність, хрусткість, мікроструктура, поживні компоненти та вільні амінокислоти тощо.

Аналіз літературних даних щодо існуючого математичного моделювання колоїдних капілярно – пористих матеріалів, а саме культивованих грибів *Pleurotus eryngii* показав, що даний напрям має обмежену кількість інформації і тому потребує поглибленого вивчення та є актуальним напрямком досліджень.

Мета роботи. Провести теоретичний та експериментальний аналіз кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів з метою інтенсифікації процесу зневоднення, а саме визначення енергоефективних режимних параметрів.

Матеріали та методи досліджень. Для експериментальних досліджень свіжі культивовані гриби *Pleurotus eryngii*, сортовані за формою, зрілістю і розміром були придбані в мережі супермаркетів у м. Київ від торгової марки «Esthetic foods». Усі зразки грибів доставили в лабораторію та зберігали при температурі $4 \pm 0,5$ °C і відносній вологості 95 % у холодильнику перед експериментом. Початкова вологість становила $88 \% \pm 1,4 \%$. Усі зразки, використані для сушіння, були придбані з однієї партії.

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів. Визначальними процесами при сушінні є тепломасоперенос, як вказано вище. Від його інтенсивності залежить не лише ефективність сушіння, а й економічність використання матеріальних та енергетичних ресурсів.

При виборі раціональних режимів зневоднення з метою оптимізації енерговитрат, важливо виконувати розрахунковий аналіз тепломасообміну на основі математичних моделей. Тож, із застосуванням математичної моделі тепломасопереносу А.В. Ликова було побудовано відповідний чисельний алгоритм для моделювання цього процесу.

Розрахункові дослідження тепломасопереносу в колоїдному капілярно-пористому матеріалі, що відносяться до процесів конвекційного сушіння рослинної сировини виконуються на основі чисельного розв'язання системи рівнянь [78], до якої входять:

- рівняння переносу вологи

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \text{div}(a_m \cdot \text{grad}(U)) + \text{div}(a_m \delta_t \cdot \text{grad}(T)) \quad (1)$$

- рівняння переносу енергії

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) + r\varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (2)$$

де U , кг/м³ - питомий вологовміст матеріалу (сумарна маса рідкої вологи та водяної пари в одиниці об'єму матеріалу); T , К - температура; τ , с - час; a_m , м²/с - коефіцієнт дифузії вологи в капілярно-пористому матеріалі; δ_t , кг/(м³К) - термоградієнтний коефіцієнт; c , Дж/(кгК) - ефективна теплоємність матеріалу; ρ , кг/м³ - ефективна густина матеріалу; λ - ефективна теплопровідність матеріалу; r , Дж/кг - питома теплота випаровування; ε - коефіцієнт фазового перетворення, який характеризує відношення потоку водяної пари до сумарного потоку рідкої вологи та потоку пари. Його величина змінюється в межах від 0 до 1.

Чисельні дослідження виконуються для випадку конвекційного сушіння зразка колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Даний процес передбачає підвід теплоти конвекцією від розігрітого повітряного потоку до матеріалу, що висушується. Зразок матеріалу, що має форму прямокутного паралелепіпеда, розміщується в сушильній камері, у яку подається розігрітий теплоносіє.

Задача тепломасопереносу розглядається в наближеній одновимірній постановці. Процес вважається симетричним відносно площини симетрії прямокутного зразка. Для випадку відносно малої товщини зразка d , а також при невисоких градієнтах температури, переносом вологи термодифузиею можна знехтувати. За даних припущень систему рівнянь (1), (2) доцільно представити у вигляді

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial U}{\partial x} \right); \quad (3)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + r\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (4)$$

де x - напрямок від площини симетрії зразка, де $x=0$, до поверхні тепломасообміну, для якої $x=d/2$.

Граничні умови до рівнянь (3), (4) на поверхні тепломасообміну мають вигляд:

$$-a_m \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=d/2} = \beta(C_{v,w} - C_{v,\infty}); \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=d/2} = \alpha(T_w - T_\infty) + r(1 - \varepsilon_w)\beta(C_{v,w} - C_{v,\infty}) \quad (6)$$

де $C_{v,w}$ - відносна концентрація водяної пари в теплоносії біля поверхні тепломасообміну; $C_{v,\infty}$ - відносна концентрація водяної пари в теплоносії на значній відстані від поверхні; T_w - температура поверхні тепломасообміну; T_∞ - температура теплоносія на значній відстані від поверхні; α , Вт/(м²К) - коефіцієнт тепловіддачі; β , кг/(м²с) - коефіцієнт масовіддачі.

Граничні умови на площині симетрії мають вигляд

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (8)$$

Умова (5) встановлює рівність між сумарним потоком рідкої та пароподібної вологи, що надходить до поверхні з середини матеріалу, та потоком, що видаляється з поверхні матеріалу та надходить до теплоносія. В правій частині виразу (5) міститься різниця між відносною концентрацією водяної пари у повітрі біля поверхні тепломасообміну ($C_{v,w}$) та відносною концентрацією водяної пари в теплоносії на значній відстані від цієї поверхні ($C_{v,\infty}$). Величина $C_{v,\infty}$ має бути відомою з початкових умов задачі, так само як і температура теплоносія T_∞ . Величина $C_{v,w}$ визначається в ході розв'язання задачі в залежності від вологісного стану поверхні матеріалу. Як запропоновано в [6], у випадку, коли вологовміст матеріалу біля поверхні масообміну перевищує величину максимального гігроскопічного вологовмісту, концентрація водяної пари визначається з умов для насиченої пари, що відповідають температурі цієї поверхні. Якщо вологовміст матеріалу біля поверхні менший за максимальне гігроскопічне значення, концентрація водяної пари визначається з ізотерми сорбції за величинами вологовмісту матеріалу біля поверхні та температури цієї поверхні.

Ізотерми сорбції зазвичай представляються у вигляді експериментально визначеної залежності рівноважної концентрації рідини у зразку W від відносної вологості повітря $\varphi = p_v/p_{v,s}$. Для її застосування при розв'язанні системи рівнянь (3), (4) цю залежність доцільно перебудувати у вигляді залежності рівноважного питомого вологовмісту матеріалу U від відносної концентрації водяної пари у повітрі $C_{v,w} = \rho_{v,w}/(\rho_{v,w} + \rho_{a,w})$. Для цього за величиною питомого вологовмісту на поверхні U_w визначається відносна концентрація вологи у матеріалі

$$W_w = \frac{U_w}{U_w + m_c/V}, \quad (9)$$

де m_c - маса сухого матеріалу; V - об'єм зразка.

За значеннями W_w та температури поверхні T_w по ізотермі сорбції визначається відповідна величина відносної вологості повітря φ . Далі відповідне значення відносної концентрації водяної пари в повітрі розраховується за формулою:

$$C_{v,w} = \frac{1}{1 + \left(\frac{p_0}{\varphi p_{v,s}(T_w)} - 1 \right) \frac{R_v}{R_a}}, \quad (10)$$

де p_0 - тиск у пароповітряній суміші, p_v - парціальний тиск водяної пари, $p_{v,s}$ парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі T_w , R_v , R_a - газові сталі для водяної пари та сухого повітря відповідно.

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні тепломасообміну визначається з відповідного рівняння подібності, що враховує режим течії теплоносія. У випадку, коли горизонтальний плоский зразок омивається турбулентним повітряним потоком, для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі можна скористатися рівнянням [7]:

$$Nu_l = 0,037 Re_l^{0,8} Pr^{0,43} (Pr_a / Pr_w)^{0,25} \quad (11)$$

де $Nu_l = \frac{\alpha l}{\lambda_a}$ - осереднене по поверхні теплообміну довжиною l число Нуссельта, $Re = \frac{u_\infty l}{\nu_a}$ - число Рейнольдса; $Pr = \frac{\nu_a}{\alpha_a}$ - число Прандтля для повітря, u_∞ - швидкість незбуреного повітряного потоку; ν_a - кінематичний коефіцієнт в'язкості для повітря.

Коефіцієнт масовіддачі β можна за аналогією між теплопереносом та масопереносом визначити з наближеного співвідношення

$$\beta \approx \frac{\alpha}{C_a} \quad (12)$$

На відміну від граничних умов теплообміну третього роду на поверхні сухого матеріалу, граничні умови (6) для вологого матеріалу враховують теплоту випаровування рідкої вологи з поверхні. Ця теплота визначається другою складовою, що входить у праву частину виразу (6). Коефіцієнт фазового перетворення $\mathcal{E}_w$ на поверхні тепломасообміну, що входить до граничної умови (6), визначає співвідношення між потоком водяної пари, що надходить до поверхні з середини зразка, до сумарного потоку пари та рідкої вологи. Якщо поверхня перезволожена, як це в ряді випадків має місце на початковій стадії сушіння, коефіцієнт $\mathcal{E}_w$ можна прийняти рівним нулю. Це означає, що водяна пара утворюється лише на самій поверхні тепломасообміну і не надходить до поверхні з середини зразка.

На заключній стадії сушіння, коли поверхня майже висушена, а випаровування здійснюється в глибинних шарах зразка, коефіцієнт $\mathcal{E}_w$ матиме значення, близьке до одиниці. Це означає, що до поверхні тепломасообміну волога з середини зразка надходить лише у вигляді водяної пари. В цьому випадку фазового перетворення на самій поверхні не відбувається.

У цілому ж точне визначення величини $\mathcal{E}_w$ може бути достатньо проблематичним. В першому наближенні можна прийняти $\mathcal{E}_w = 0$, коли відносна вологість матеріалу біля поверхні тепломасообміну перевищує максимальне гігроскопічне значення, яке відповідає $\phi = 100\%$ і температурі поверхні матеріалу. Якщо відносна вологість матеріалу біля поверхні менша за максимальну гігроскопічну вологість, можна припустити, що значення $\mathcal{E}_w \sim 1$.

Для чисельного розв'язання системи рівнянь (3), (4) з граничними умовами (5) - (8) застосовується метод скінчених різниць. Для його використання розрахункова область $0 \leq x \leq d/2$ розподіляється на m кроків довжиною $\Delta x = d/(2m)$. В середині кожного кроку визначаються розрахункові вузли, у яких записуються дискретні аналоги диференціальних рівнянь (3), (4). Таким чином будується різницева розрахункова сітка. Скінчено-різницеві рівняння складаються за неявною часовою схемою [8] і мають вигляд:

$$\frac{U_{k,i} - U_{k-1,i}}{\Delta \tau} = \frac{1}{\Delta x} \left((a_m)_{k-1,i+1/2} \frac{U_{k,i+1} - U_{k,i}}{\Delta x} - (a_m)_{k-1,i-1/2} \frac{U_{k,i} - U_{k,i-1}}{\Delta x} \right); \quad (12)$$

$$\begin{aligned} (C\rho)_{k-1,i} \frac{T_{k,i} - T_{k-1,i}}{\Delta \tau} &= \frac{1}{\Delta x} \left((\lambda)_{k-1,i+1/2} \frac{T_{k,i+1} - T_{k,i}}{\Delta x} - (\lambda)_{k-1,i-1/2} \frac{T_{k,i} - T_{k,i-1}}{\Delta x} \right) + \\ &+ \frac{r_{k-1,i} \mathcal{E}_{k-1,i}}{\Delta x} \left((a_m)_{k-1,i+1/2} \frac{U_{k,i+1} - U_{k,i}}{\Delta x} - (a_m)_{k-1,i-1/2} \frac{U_{k,i} - U_{k,i-1}}{\Delta x} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

де k - номер поточного дискретного кроку за часом; $k-1$ - номер попереднього кроку за часом; i - номер кроку за просторовою змінною x ($1 \leq i \leq m$), $\Delta\tau$ - крок за часом. Дробові індекси при коефіцієнтах рівнянь означають, що відповідна величина визначається, як напівсуми величин, що відносяться до сусідніх вузлів сітки.

Граничні умови (5)-(8) також представляються в скінчено-різницевій формі:

$$-(a_m)_{k-1,m+1/2} \frac{U_{k,m+1} - U_{k,m}}{\Delta x} = \beta [C_{v,w}(U_{k-1,m+1/2}; T_{k-1,m+1/2}) - C_{v,\infty}] \quad (14)$$

$$-(\lambda)_{k-1,m+1/2} \frac{T_{k,m+1} - T_{m,i}}{\Delta x} = \alpha \left[\left(\frac{T_{k,m+1} + T_{m,i}}{2} \right) - T_{\infty} \right] + r(1 - \varepsilon_w) \beta [C_{v,w}(U_{k-1,m+1/2}; T_{k-1,m+1/2}) - C_{v,\infty}]; \quad (15)$$

$$U_{k,0} = U_{k,1} \quad (16)$$

$$T_{k,0} = T_{k,1} \quad (17)$$

Система різницевих рівнянь (12), (13) з граничними умовами (14)-(17) розв'язується методом прогонки [8]. Початковими умовами до нестационарних рівнянь (12), (13) є вихідні розподіли температури T та питомого вологовмісту U . Для розв'язання задачі задаються також швидкість u_{∞} , температура T_{∞} та відносна вологість теплоносія ϕ_{∞} . Коефіцієнти дифузії a_m , теплопровідності λ , теплоємності c , а також густина ρ і теплота випаровування r , що входять до рівнянь (12)-(17) зазвичай залежать від вологовмісту та температури матеріалу, тобто від невідомих величин, що входять до цих рівнянь. Тому значення цих коефіцієнтів визначаються за величинами $U_{k-1,i}$ та $T_{k-1,i}$, що відносяться до попереднього часового кроку. Надалі значення цих коефіцієнтів уточнюються.

За наведеним методом виконується чисельне моделювання процесу конвекційного сушіння зразка ККПМ товщиною $d=10$ мм та площею поверхонь, з яких видаляється волога, $F=1000$ мм². Швидкість повітряного потоку в сушильній камері $u_{\infty}=3,5$ м/с, його температура $T_{\infty}=60$ °С, відносна вологість $\phi_{\infty}=4,7$ %. За цих умов $C_{v,\infty}=0,0057$. Початкова маса зразка $m_0=9,786$ г. Його початкова температура $T_0=26,6$ °С. Маса сухого матеріалу $m_c=1,41$ г. Початковий питомий вологовміст складає $U_0=837,6$ кг/м³. Теплофізичні властивості зразка приймаються такими, як рекомендовано в [9]. Залежності рівноважного вологовмісту рослинної сировини від відносної вологості повітря (криві сорбції) були визначені експериментально.

За наведеними вихідними даними крім розрахункових досліджень проведено також експериментальні дослідження з метою порівняння їх результатів. Експеримент з висушування досліджуваного зразка проводився протягом 90 хв.

Для виконання розрахунків будується різницева сітка, що містить $m=100$ кроків на половині товщини зразка $d/2$. Крок за часом складає $\Delta\tau=1$ с. В результаті чисельного моделювання одержано розподіли по товщині зразка температури (рис. 1) та питомого вологовмісту (рис. 2) в різні моменти часу.

Як видно з рис. 1 та 2, найбільш інтенсивно зміна у часі температури та питомого вологовмісту відбувається на поверхні тепломасообміну ($x=5$ мм).

Зміну у часі температури та вологовмісту на поверхні тепломасообміну наведено на рис. 3 та 4 відповідно. На рис. 3 наведено також порівняння результатів розрахунків за наведеною моделлю (крива 2) з результатами експерименту (крива 1). Як видно з цього рисунку, збіг результатів розрахунків температури поверхні з результатами експерименту достатньо задовільний.

З рисунку також видно, що найбільш інтенсивна зміна температури поверхні відбувається протягом перших 20 хв. Найбільш інтенсивна зміна вологовмісту поверхні відбувається протягом перших 30 хв.

За визначеною величиною питомого вологовмісту розраховується також зміна у часі сумарної маси вологи у досліджуваному зразку $m_w(\tau)$.

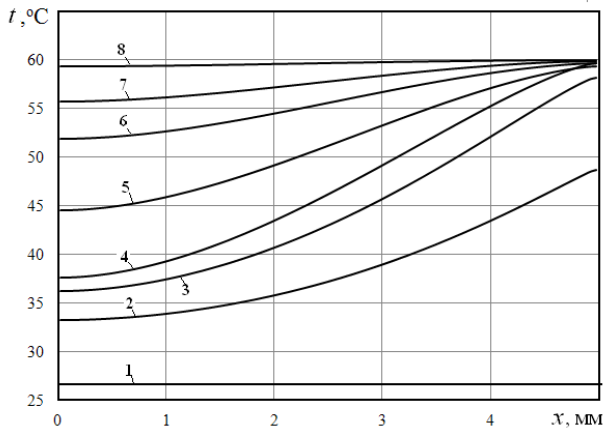


Рис. 1. Розподіл температури по товщині зразка в різні моменти часу при сушінні:

1 – початковий; 2 – $\tau=10$ хв.; 3 – 20 хв.; 4 – 30 хв.; 5 – 40 хв.; 6 – 50 хв.; 7 – 60 хв.; 8 – 90 хв.

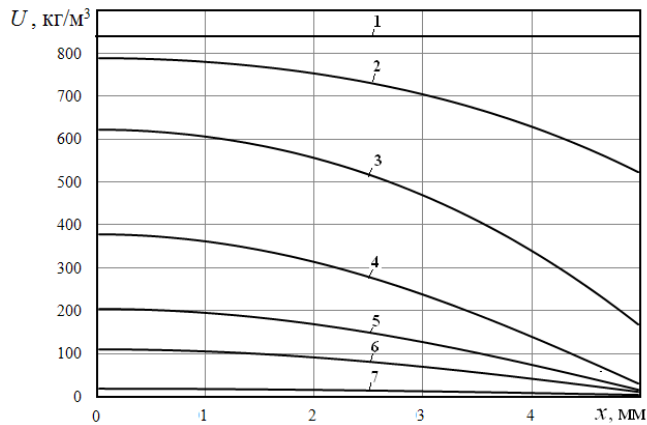


Рис. 2. Розподіл вологовмісту по товщині зразка в різні моменти часу при сушінні:

1 – початковий; 2 – $\tau=10$ хв.; 3 – 20 хв.; 4 – 30 хв.; 5 – 40 хв.; 6 – 50 хв.; 7 – 80 хв.

$$m_w = F \cdot \int_0^{d/2} U(x) dx \quad (18)$$

На рис. 5 наведено залежність цієї величини від часу (крива 2) та зміну у часі сумарної маси води у досліджуваному зразку, що отримана з експериментальних досліджень (крива 1). Як видно з порівняння цих кривих, на початкові стадії сушіння ($\tau < 25$ хв.) маса води в зразку, що одержана з розрахунків, менша, ніж та, що визначена з експерименту. На наступній стадії сушіння розрахункове значення маси води стає меншим, ніж експериментальне.

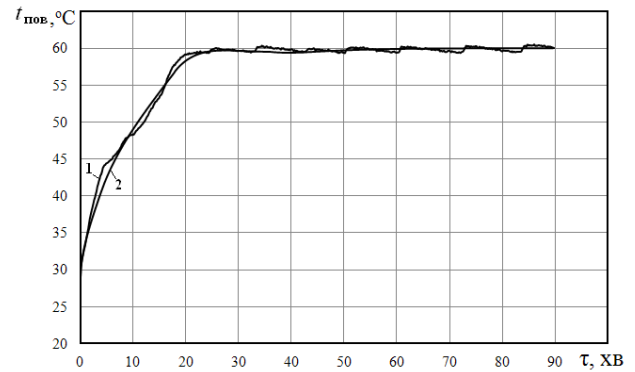


Рис. 3. Зміна у часі температури поверхні зразка: 1 – експеримент; 2 – розрахунок за моделлю

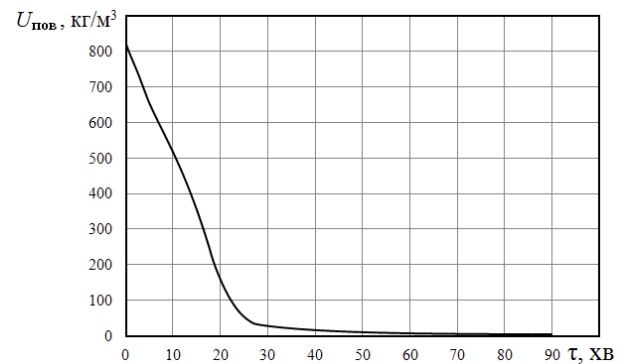


Рис. 4. Зміна у часі вологовмісту на поверхні зразка

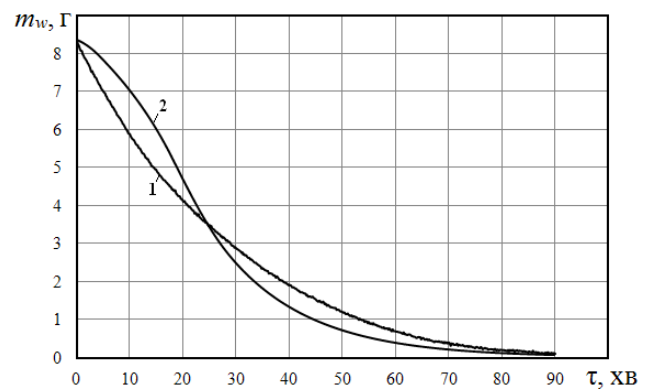


Рис. 5. Зміна у часі маси води у зразку, що досліджується:

1 – експеримент; 2 – розрахунок за моделлю

Визначається також зміна у часі відносної концентрації води у зразку $w(\tau)$:

$$w = \frac{m_w}{m_w + m_c} \quad (19)$$

Зміну у часі значень цієї величини, що отримані з розрахунків та з експерименту, представлено на рис. 6.

З порівняння розрахункових та експериментальних даних випливає, що за даною чисельною моделлю процес сушіння на початковій стадії протікає дещо повільніше, ніж це випливає з експерименту. Надалі інтенсивність висушування матеріалу, що визначається з розрахунків, виявляється більшою, ніж та, що одержана з експерименту.

За результатами розрахункових досліджень визначається також швидкість конвекційного сушіння досліджуваного зразку $\frac{dm_w}{d\tau}$.

Залежність цієї величини від часу наведено на рис. 7. Як видно з рисунку, на початковій стадії сушіння швидкість цього процесу зростає. Найбільша швидкість сушіння зразка $\frac{dm_w}{d\tau} = 0,275$ г/хв спостерігається при $\tau = 20$ хв. Далі швидкість сушіння починає спадати.

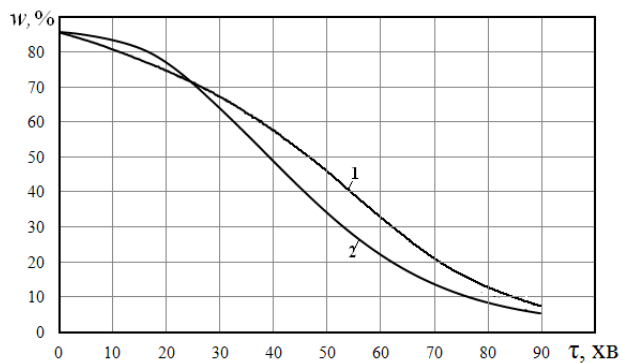


Рис. 6. Зміна у часі відносної концентрації вологи у зразку:

1 – експеримент; 2 – розрахунок за моделлю

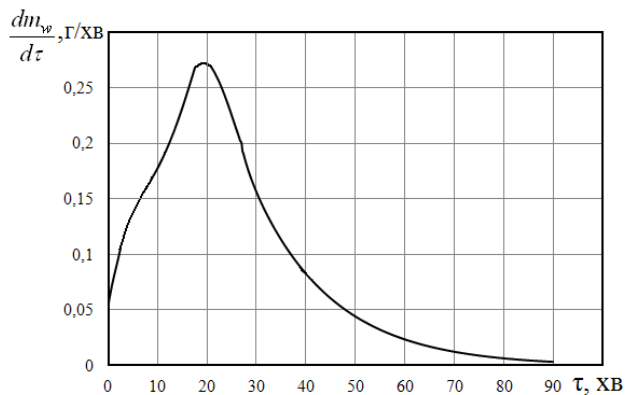


Рис. 7. Залежність від часу швидкості сушіння досліджуваного зразка

Даний характер зміни у часі швидкості сушіння пояснюється тим, що, як випливає з залежності (5), густина потоку маси з поверхні зразка зростає зі збільшенням відносної концентрації водяної пари $C_{v,w}$ біля цієї поверхні. Ця величина збільшується з ростом температури поверхні $t_{пов}$ та зменшується зі зниженням відносної концентрації вологи на поверхні $w_{пов}$.

Оскільки в процесі конвекційного сушіння водночас зростає температура поверхні і зменшується її вологовміст, величина $C_{v,w}$ залежатиме від того, який саме з цих двох параметрів суттєвіше на неї впливає в даний момент часу. Таким чином, від початку сушіння величина $C_{v,w}$ зростає і при $\tau = 20$ хв набуває максимального значення, а далі з часом починає спадати.

Швидкість зміни у часі відносної вологості зразка $\frac{dW}{d\tau}$ має аналогічний характер (рис. 8). Але максимального значення $\frac{dW}{d\tau} = 1,54$ %/хв. ця величина набуває при $\tau = 38$ хв.

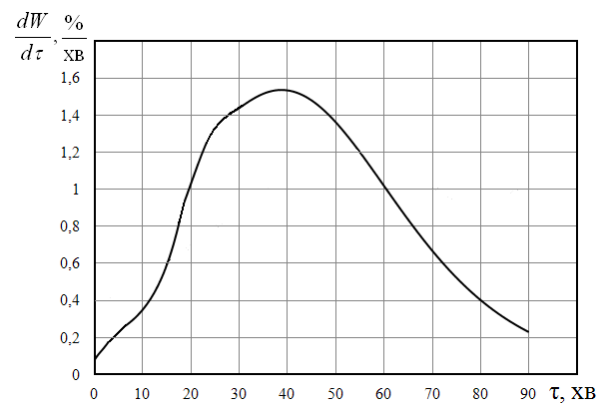


Рис. 8. Залежність від часу швидкості зміни відносної вологості зразка

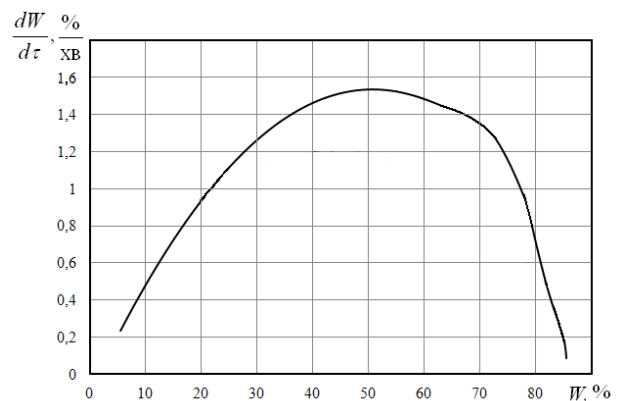


Рис. 9. Залежність швидкості зміни відносної вологості зразка від величини відносної вологості

За результатами розрахункових досліджень будується також залежність швидкості сушіння $\frac{dW}{d\tau}$ від величини самої відносної вологості (крива сушіння). Ця залежність наведена на рис. 9. Як видно з рисунку, максимального значення $\frac{dW}{d\tau} = 54 \text{ \%}/\text{хв}$ дана величина набуває при $W=51\%$.

Порівняння результатів чисельного моделювання процесів конвекційного сушіння досліджуваного зразка з експериментальними результатами показало їх достатньо задовільне якісне узгодження. Водночас спостерігається певна розбіжність у кількісних показниках даних результатів. Отже, розглянута розрахункова модель може бути використана для наближеного визначення характеристик процесу сушіння рослинної сировини, зокрема часу.

Для визначення характеристик процесу конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів, крім чисельного моделювання даного процесу також були проведені експериментальні дослідження кінетики сушіння культивованих грибів *Pleurotus eryngii*.

На рис. 10 представлена порівняльна характеристика режимів зневоднення з метою визначення найбільш ефективних.

Найменший час сушіння 75 хв відповідає режиму сушіння із температурою теплоносія 100°C (крива 4,4'). Проте, як відомо, при цьому руйнуються всі біологічно активні речовини досліджуваних зразків. Комбінований

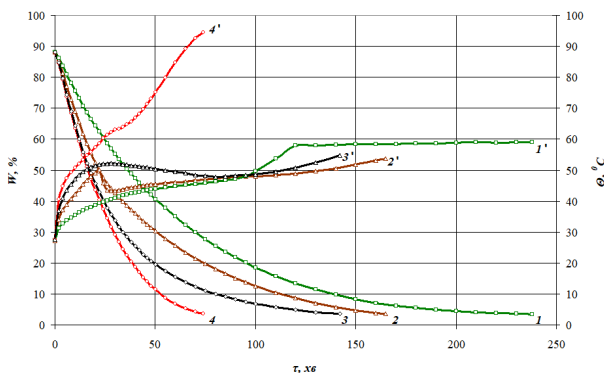


Рис. 10. Вплив різних режимів на тривалість сушіння грибів *Pleurotus eryngii*

$v = 3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$

1,1' – конвективне сушіння 60°C ;

2,2' – комбіноване сушіння $100\text{Вт}+60^\circ\text{C}$;

3,3' – конвективне двоступеневе сушіння $100/60^\circ\text{C}$;

4,4' – конвективне сушіння 100°C

метод в даному випадку – це поєднання інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) 100Вт та конвективного 60°C в одному режимі (крива 2,2'). На початку процесу було одночасно увімкнено два види енергоносії.

При досягненні температури матеріалу 50°C на 20 хв, джерело ІЧВ було вимкнено. При цьому спостерігається різке зниження температури матеріалу, яка вже на 27 хв процесу становила 43°C .

Далі нагрів матеріалу відбувається поступово. Тривалість сушіння при комбінованому методі становить 160 хв та при цьому відбувається інтенсифікація процесу сушіння у 1,5 р у порівнянні із режимом 60°C .

При режимі конвективного двоступеневого сушіння $100/60^\circ\text{C}$ (крива 3,3') на початку процесу температура теплоносія становила 100°C , температура матеріалу $20-22^\circ\text{C}$. Температуру теплоносія тримали аж до поки температура матеріалу не досягнула 48°C .

Далі температура теплоносія була знижена до 60°C , проте температура матеріалу продовжувала зростати по інерції до 53°C , оскільки зниження температури теплоносія відбувається через певний проміжок часу поступово. Далі температура матеріалу повільно знижується аж до 49°C на 85 хв із подальшим зростанням до кінця процесу. За весь період експерименту температура матеріалу не перевищувала 55°C . Як видно з графіку, цей режим є найбільш оптимальним, оскільки відбувається інтенсифікація в 1,7 р. швидше, ніж режим 60°C .

Як видно із кривих швидкості сушіння (рис. 11), найбільша швидкість процесу у режимів 100°C та $100/60^\circ\text{C}$ (криві 3 та 4) становить $2,6-2,7 \text{ \%}/\text{хв}$. А швидкість сушіння при комбінованому $2,2\text{ \%}/\text{хв}$. При

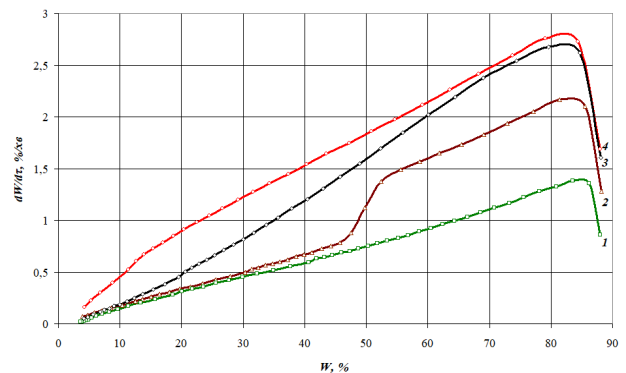


Рис. 11. Вплив різних режимів на швидкість сушіння грибів *Pleurotus eryngii* $v=3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$

1 – конвективне сушіння 60°C ;

2 – комбіноване сушіння $100\text{Вт}+60^\circ\text{C}$;

3 – конвективне двоступеневе сушіння $100/60^\circ\text{C}$;

4 – конвективне сушіння 100°C

чому, швидкість сушіння конвективного двоступеневого 100/60°C є значно вища, ніж комбінованого методу (криві 2, 3 на рис. 11).

Незворотність термодинамічних процесів, що відбуваються під час сушіння призводить до незворотних змін не лише на рівні розсіювання енергії, але і в самому зневодненому матеріалі. До основних характеристик, що достатньо об'єктивно дають оцінку якості сушеної продукції і відповідно правильності підбора режимів зневоднення слід віднести: залишковий вологовміст продукції, гігроскопічні властивості, значення відновлення, втрата вітамінів при зневодненні, колір тощо [10].

Найбільш важливим показником якості сушеної продукції є її здатність до відновлення та коефіцієнт набухання - це показник якості, що показує наскільки харчовий продукт здатен відновлюватись після сушіння та дорівнює відношенню об'єму набухлої породи до її максимально первісного об'єму.

Тому, після експериментальних досліджень кінетики сушіння культивованих грибів *Pleurotus eryngii*, важливо було дослідити регідраційні властивості досліджуваного матеріалу. Найнижчий показник коефіцієнту набухання культивованих грибів *Pleurotus eryngii* є при конвективному режимі зневоднення 100 °C – 4,45 % та при режимі ІЧВ 100 Вт на конвективному сушильному стенді – 4,3 %. При режимі 60 °C коефіцієнт набухання становить 5,09%, а при ефективних режимах комбінованому інфрачервоно-конвективному 100 Вт + 60 °C, конвективному двохстадійному 100/60 °C близько 6,11 %.

Висновки. Теоретичний та експериментальний аналіз кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів як об'єктів сушіння показує, що застосовуючи чисельне моделювання шляхом моделі А.В. Ликова, можливо задовільно описати процес тепломасопереносу, а також результати розрахунку можна застосовувати для орієнтовного визначення параметрів зневоднення.

Щодо експериментальних досліджень сушіння та якісних характеристик культивованих грибів *Pleurotus eryngii*, рекомендовано при сушінні культивованих грибів використовувати комбінований інфрачервоно-конвективний режим зневоднення, при якому якісні показники мають високі значення. Отже, теоретичний розрахунок дозволяє найбільш раціонально підійти до експериментальних досліджень та переробки культивованих грибів *Pleurotus eryngii* із подальшим використанням в харчовій промисловості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Yuxi Guo, Xuefeng Chen, Pin Gong, Ruotong Wang, Zhuoya Qi, et al. (2023) Advances in Postharvest Storage and Preservation Strategies for *Pleurotus eryngii*. *Foods*, 12, 1046 p. <https://doi.org/10.3390/foods12051046>
2. Zhang, B.; Li, Y.; Zhang, F.; Linhardt, R.J.; Zeng, G.; Zhang, A. (2020) Extraction, structure and bioactivities of the polysaccharides from *Pleurotus eryngii*: A review. *Int. J. Biol. Macromol.* 150, p. 1342–1347. [CrossRef]
3. Rui-Lin Yang, Qin Li & Qing-Ping Hu (2020) Physicochemical properties, microstructures, nutritional components, and free amino acids of *Pleurotus eryngii* as affected by different drying methods. *Scientific Reports* 10:121 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56901-1>
4. He Liu, Junhua Jiao, You Tian, Jia'ao Liu, Pei Yuan, and Xuehong Wu (2022) Drying kinetics of *Pleurotus eryngii* slices during hot air drying. *Open Physics*; 20: p. 265–273. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0029>
5. Tong Lil . Jo-Won Lee1 . Li Luo1 . Jongkee Kim2 . BoKyung Moon (2018) Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on the quality preservation of *Pleurotus eryngii*. *Appl Biol Chem*, 61(3), p. 257–265.
6. Dolinskiy A. A., Dorfman A. Sh., Davydenko B. V. (1991) Conjugate heat and mass transfer in continuous processes of convective drying. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1991.V.34, № 11. P. 2883–2889.
7. Михеев М.А., Михеева И.М. (1977) Основы теплопередачи. М. «Энергия», 320 с.
8. Калиткин Н.Н. (1978) Численные методы. М. «Наука». 1978. 512 с.
9. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. (1980) Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. М.: «Пищевая промышленность», 288 с.
10. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О. (2007) Тепломасообмінні процеси під час одержання каротиновмісних порошків. Київ: ВД «Академпериодика». 162 с.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DRYING KINETICS OF COLLOID CAPILLARY-POROUS MATERIALS AS DRYING OBJECTS

Davydenko B.V.¹, Samoilenko K.M.²

*Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str.,
Kyiv, 03057, Ukraine*

¹Dr. Sci. (Engin.), e-mail: bdavydenko@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8738-7612>

²PhD (Engin.), katernasamoilenkoitf@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5169-4466>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.5>

Considering the current situation in the energy sector of Ukraine, the urgent need to improve and develop energy-efficient thermal technologies for dehydration of plant raw materials is urgent and timely, which would ensure minimal energy consumption and high quality of the final product. The processing of vegetable raw materials into dried products is important for the sustainable development of the food industry. Cultivated *Pleurotus eryngii* mushrooms, which are valued for their high content of protein, carbohydrates, unsaturated fatty acids, vitamins and other nutrients, etc., are increasingly relevant in the mushroom industry on the world food market.

It is important, in order to optimize energy consumption during dehydration and to select rational equipment, in addition to experimental studies, to perform theoretical calculation analysis of heat and mass transfer based on mathematical models.

The article provides a theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of colloidal capillary-porous materials. To determine the characteristics of the convective drying process, in addition to experimental studies, numerical modeling of this process was performed, which is performed on the basis of the numerical solution of the system of heat and mass transfer equations in colloidal capillary-porous materials. The calculation model can be used for the approximate determination of the main characteristics of the drying process of colloidal capillary-porous materials.

Ref. 10, fig. 11.

Keywords: heat and mass transfer, drying, colloidal capillary-porous materials, cultivated mushrooms *Pleurotus eryngii*.

1. Yuxi Guo, Xuefeng Chen, Pin Gong, Ruotong Wang, Zhuoya Qi, et al. (2023) Advances in Postharvest Storage and Preservation Strategies for *Pleurotus eryngii*. *Foods*, 12, 1046 p. <https://doi.org/10.3390/foods12051046>

2. Zhang, B.; Li, Y.; Zhang, F.; Linhardt, R.J.; Zeng, G.; Zhang, A. (2020) Extraction, structure and bioactivities of the polysaccharides from *Pleurotus eryngii*: A review. *Int. J. Biol. Macromol.* 150, p. 1342–1347. [CrossRef]

3. Rui-Lin Yang, Qin Li & Qing-Ping Hu (2020) Physicochemical properties, microstructures, nutritional components, and free amino acids of *Pleurotus eryngii* as affected by different drying methods. *Scientific Reports* 10:121 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56901-1>

4. He Liu, Junhua Jiao, You Tian, Jia'ao Liu, Pei Yuan, and Xuehong Wu (2022) Drying kinetics of *Pleurotus eryngii* slices during hot air drying. *Open Physics*; 20: p. 265–273. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0029>

5. Tong Lil . Jo-Won Leel . Li Luo1 . Jongkee Kim2 . BoKyung Moon (2018) Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on the quality preservation of *Pleurotus eryngii*. *Appl Biol Chem*, 61(3), p. 257–265.

6. Dolinskiy A. A., Dorfman A. Sh., Davydenko B. V. (1991) Conjugate heat and mass transfer in continuous processes of convective drying. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1991.V.34, № 11. P. 2883–2889.

7. M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. (1977) Fundamentals of heat transfer. M. "Energy", 320 p. (in rus).

8. Kalitkin N.N. (1978) Numerical methods. M. "Science". 1978. 512 p. (in rus).

9. Ginzburg A.S., Gromov M.A., Krasovskaya G.I. (1980) Thermophysical characteristics of food products. Directory. M.: "Food Industry", 288 p. (in rus).

10. Sniezshkin Yu.F., Petrova Zh.O. (2007) Heat and mass exchange processes during the production of carotene-containing powders. Kyiv: VD "Akademperiodika". 162 p. (in Ukr).

Отримано 31.01.2024

Received 31.01.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024