

УДК 532.516:536.24

**КОНВЕКТИВНО-КОНДЕНСАЦІЙНИЙ СПОСІБ СУШІННЯ  
ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Н. М. Сорокова, кандидат технічних наук*

*Ю. Ф. Снежкін, член-кореспондент НАН України*

*Р. О. Шапар, кандидат технічних наук*

*Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ*

*e-mail: [ittf\\_ntps@ukr.net](mailto:ittf_ntps@ukr.net)*

**Анотація.** Наведено спосіб зневоднення термолабільних матеріалів у прямоточній стрічковій сушарці, який передбачає зміну температури та вологовмісту сушильного агента та дозволяє скоротити час сушіння і забезпечити енерго- та ресурсозбереження. Викладено математичну модель і чисельний метод розрахунку динаміки тепломасопереносу, фазових перетворень і усадки за сушіння колоїдних капілярно-пористих тіл у прямоточній стрічковій сушарці.

**Ключові слова:** *конвективно-конденсаційний спосіб сушіння, термолабільні матеріали, математичне моделювання, безперервна сушка, стрічкова сушарка*

Створення ефективних сушильних технологій передбачає зниження енергоспоживання шляхом інтенсифікації процесу зневоднення за збереження високої якості готової продукції. Інтенсифікація сушіння за рахунок підвищення температури теплоносія ефективна у тих випадках, коли вплив підвищених температур не призводить до незворотних якісних змін таких матеріалів. Більшість вологих пористих тіл відносяться до термолабільних матеріалів і їх температура не повинна перевищувати деякого гранично допустимого значення  $T^*$ . Прямоточні сушильні установки забезпечують найсприятливіші умови сушіння термолабільних матеріалів [1], оскільки сушильний агент при максимальній температурі контактує з вологим тілом,

підігріваючи його до температури мокрого термометра, яка зазвичай нижче  $T^*$ , а по мірі висушування матеріалу знижується температура теплоносія, що як правило, виключає перегрівання матеріалу вище гранично допустимої для нього температури  $T^*$ , але і знижує інтенсивність проходження процесу. За цих умов вологовміст сушильного агента може зростати досить суттєво, що не тільки сповільнює швидкість сушіння, але часто не дозволяє досушити продукт до низької кінцевої вологості. Осушка теплоносія на заключному етапі зневоднення інтенсифікує випаровування рідини з поверхневих шарів матеріалу, але це в свою чергу призводить до різкого зниження його температури, що робить доцільним додатково підвищувати температуру сушильного агента.

**Мета досліджень** – створення високоефективної технології зневоднення термолабільних матеріалів у прямоточній стрічковій сушарці, що передбачає зміну температури і вологовмісту сушильного агента.

**Матеріали та методика досліджень.** Запропонований авторами конвективно-конденсаційний спосіб безпереного сушіння термолабільних матеріалів [2] включає два етапи. На першому етапі в камеру подається сушильний агент із заданою швидкістю  $w_{c0}$ , вологовмістом  $d_{c0}$ , тиском  $P_{c0}$  і температурою  $T_{c0}$ , яка суттєво вище гранично допустимої  $T^*$  для даного матеріалу. Параметри сушильного агента повинні бути обрані таким чином, щоб температура мокрого термометра  $T_m$  була нижче  $T^*$ . Перший етап сушіння завершується, коли температура на зовнішній границі тіла наближається до значення  $T^*$ , а парціальний тиск пари  $P_{nc}$  в сушильному агенті і відповідно вологовміст  $d_c$  досягає значення, за якого зміна вологовмісту матеріалу на його поверхні практично не спостерігається. На другому етапі подається сушильний агент, попередньо осушений до низького вологовмісту і нагрітий до достатньо високої температури. Ця температура вибирається максимально можливою, але такою, щоб її вплив не допустив перегрівання тіла на другому етапі вище значення  $T^*$ . З технічної точки зору організувати сушіння за запропонованим способом можна за наявності в сушарці двох робочих зон.

**Результати досліджень.** Реалізація запропонованого конвективно-конденсаційного способу сушіння передбачає наявність графіків зміни вологовмісту і температури сушильного агента. Ці графіки повинні визначатися залежно від виду матеріалу, його геометричних і теплофізичних характеристик, початкових значень температури і вологовмісту, від швидкості, температури і вологості сушильного агента, швидкості стрічки і геометричних параметрів сушильної камери. Раціональний шлях їх отримання базується на застосуванні математичного моделювання, оскільки експериментальний спосіб визначення пов'язаний зі значними труднощами. В [3] представлена математична модель динаміки тепломасопереносу, фазових перетворень і усадки при сушінні колоїдних капілярно-пористих тіл у прямоточній стрічковій сушарці, адекватність якої підтверджується зіставленням розрахункових і експериментальних даних. Вона будувалась на базі рівняння переносу субстанції  $W$  (маси компонентів, імпульсу, енергії) отриманого в роботі [4]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(W\mathbf{w}) = -\text{div} \mathbf{j}_W + I_W - \frac{W}{1 + \varepsilon_V} \left[ \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_V \mathbf{w}) \right]. \quad (1)$$

Густина потоку  $\mathbf{j}_W$  субстанції  $W$  включає дифузійну і фільтраційну складові:  $\mathbf{j}_W = \mathbf{j}_W^{\pi} + \mathbf{j}_W^{\phi}$ . Для пористого тіла густини дифузійних потоків енергії і маси його компонентів  $\psi$  (рідини  $\psi = ж$ , пари  $\psi = п$ , повітря  $\psi = в$ ):  $\mathbf{j}^{\pi} = -\lambda \nabla T + \sum_{\psi} E_{\psi} \mathbf{j}_{\psi}^{\pi}$  і  $\mathbf{j}_{\psi}^{\pi} = -D_{\psi} (\nabla U_{\psi} + \delta_{\psi}^T \nabla T)$ , де  $T$  – температура,  $E_{\psi}$ ,  $D_{\psi}$ ,  $U_{\psi}$ ,  $\delta_{\psi}^T$  – внутрішня енергія, коефіцієнт дифузії, об'ємна концентрація, відносний коефіцієнт термодифузії компонента  $\psi$ . Густини фільтраційних потоків знаходяться за формулами:  $\mathbf{j}_ж^{\phi} = U_ж \mathbf{w}_ж$ ,  $\mathbf{j}_п^{\phi} = U_п \mathbf{w}_п$ ,  $\mathbf{j}_в^{\phi} = U_в \mathbf{w}_в$ . Швидкості фільтрації рідкої і газової фаз визначаються за законом Дарсі  $\mathbf{w}_{\psi} = -K_0 K_{\psi} \nabla P_{\psi} / \eta_{\psi}$  ( $\psi = ж, г$ ), де  $K_0$  – загальна проникність середовища,  $K_{\psi}$  – відносна проникність,  $\eta_{\psi}$  – динамічний коефіцієнт в'язкості. За наявності фільтрації компоненти  $\psi$  зв'язаної речовини переміщуються зі швидкістю  $\mathbf{w} = \mathbf{w}_L + \mathbf{w}_{\psi}$ , де  $\mathbf{w}_L$  – швидкість стрічки. Треба зазначити, що фільтраційний перенос проявляється при температурах вологого матеріалу вищих за 100 °С [5].

За нормальних умов режим роботи стрічкової сушарки є сталим, тобто в кожній точці камери температура і об'ємні концентрації компонентів пористого матеріалу залишаються незмінними в часі і процеси тепломасообміну та усадки є стаціонарними ( $\partial W/\partial t = 0$ ,  $\partial \varepsilon_V/\partial t = 0$ ). Швидкість переміщення матеріалу  $w_L$  в апараті постійна. Зазвичай товщина зневодненого шару  $X_M$  істотно менше довжини  $Z$  і ширини  $Y$  стрічки. З урахуванням прийнятих припущень система, що описує тепломасоперенос при безперервному дифузійному сушінні колоїдного капілярно-пористого матеріалу, має такий вигляд:

$$w_L \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{\text{ж}} \left( \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial x} + \delta_{\text{ж}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] - I_V - \frac{U_{\text{ж}}}{1 - \varepsilon_V} w_L \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}, \quad (2)$$

$$w_L \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{\text{п}} \left( \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial x} + \delta_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + I_V - \frac{U_{\text{п}}}{1 - \varepsilon_V} w_L \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}, \quad (3)$$

$$c_{\text{эф}} w_L \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \sum c_{\psi} D_{\psi} \left( \frac{\partial U_{\psi}}{\partial x} + \delta_{\psi} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - L_V, \quad \psi = \text{ж, п, в}, \quad (4)$$

$$c_{\text{эф}} = c_{\text{т}} U_{\text{т}} + c_{\text{ж}} U_{\text{ж}} + c_{\text{п}} U_{\text{п}} + c_{\text{в}} U_{\text{в}}, \quad \lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{т}} U_{\text{т}} / \rho_{\text{т}} + \lambda_{\text{ж}} U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}} + \lambda_{\text{п}} U_{\text{п}} / \rho_{\text{п}} + \lambda_{\text{в}} U_{\text{в}} / \rho_{\text{в}}.$$

Коефіцієнти дифузії для рідкої і газової фаз знаходяться за формулами:  $D_{\text{ж}} = \gamma_{D_{\text{ж}}} [\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}$ ,  $D_{\text{п}} = D_{\text{в}} = \gamma_{D_{\text{п}}} T^{3/2} / P_{\text{г}}$ , де  $A_D$  – енергія активації для процесу дифузії;  $\gamma_{D_{\text{ж}}}$ ,  $\gamma_{D_{\text{п}}}$  – дифузійні коефіцієнти. Формула М.І. Нікітенко для  $D_{\text{ж}}$  [6] в граничних випадках переходить у формулу Арреніуса для твердих тіл і в формулу Ейнштейна для рідких середовищ.

Тиск парогазової суміші  $P_{\text{г}} = P_{\text{п}} + P_{\text{в}}$  за відсутності фільтрації є постійним і рівним тиску зовнішнього середовища  $P_{\text{с}}$ . Парціальний тиск пари  $P_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} R_y T / \mu_{\text{п}}$ , а густина в порах  $\rho_{\text{п}} = U_{\text{п}}(x, t) / \Psi_{\text{г}}$ . Об'ємна частка газової суміші  $\Psi_{\text{г}} = 1 - \Psi_{\text{т}} - \Psi_{\text{ж}}$ , де  $\Psi_{\text{т}} = 1 - \Pi$  і  $\Psi_{\text{ж}} = U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}}$  – об'ємні частки твердої і рідкої фаз. Парціальний тиск повітря  $P_{\text{в}} = P_{\text{с}} - P_{\text{п}}$ , а густина та об'ємна концентрація:  $\rho_{\text{в}} = P_{\text{в}} \mu_{\text{в}} / (R_y T)$ ,  $U_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} \Psi_{\text{г}}$ .

Відносна об'ємна деформація  $\varepsilon_V$  при відомих значеннях функцій  $T$  і  $U_{\psi}$  ( $\psi = \text{ж, п}$ ), знаходиться на основі рівняння термоконтраційного деформування [7], рішення якого для тіл найпростішої геометрії може бути отримано аналітично. Для пластини  $0 < x_1 < H$ , деформування якої пов'язано з симетричним щодо її середньої площини  $x_1 = H/2$  розподілом концентрації

компонентів і температури уздовж осі  $x_1$ , аналітичне рішення має вид

$$\varepsilon_{11} = N(1 + \nu_{\Pi}) / (1 - \nu_{\Pi}) - 2\nu_{\Pi}\varepsilon_{22} / (1 - \nu_{\Pi}), \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \frac{1}{H} \int_0^H N dx_1, \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = 0, \quad \nu_{\Pi} —$$

коефіцієнт Пуассона;  $N$  — термоконцентраційна

$$\text{функція: } N = \beta_T (T - T_0) + \sum_{\Psi} \beta_{x\Psi} (U_{\Psi} - U_{\Psi 0}); \quad \beta_T = (\partial x / \partial T) / x; \quad \beta_{x\Psi} = (\partial x / \partial U_{\Psi}) / x.$$

Визначивши компоненти  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) тензора деформації, знаходимо функцію

$$\varepsilon_V(t) = [1 + \varepsilon_{11}(t)][1 + \varepsilon_{22}(t)][1 + \varepsilon_{33}(t)] - 1.$$

Інтенсивність фазових перетворень на зовнішній границі тіла [6] пропорційна різниці потоків рідини, що випаровується і конденсується:

$$I = \gamma_c \left( \frac{\rho_r}{RT} \exp \left( \frac{U_{\Psi}}{RT} - 1 \right) - \varphi_c \exp \left( \frac{U_{\Psi}}{RT} - 1 \right) \right), \quad \gamma_c = \varepsilon \rho_{ж} \delta^* / 4. \quad (5)$$

Тут  $\varepsilon$  — коефіцієнт випромінювання;  $\delta^*$  — середня довжина дифузійного перескоку активованої частинки в конденсованому шарі;  $\varphi_T$  — вологість парогазової суміші, якій згідно ізотермі сорбції відповідає об'ємна концентрація рідини  $U_{ж}$  в даній точці тіла. Значення  $\varphi_T$  може бути визначено за формулою, що отримана в [8] для рівноважної товщини шару конденсату  $\delta$  на поверхні твердого тіла, яке знаходиться в середовищі з параметрами  $\varphi$  і  $P_{\Pi}$ :  $\delta = \delta^* \bar{\delta} = \delta^* (1 - \sqrt{1 - P_{\Pi} / P_H}) = \delta^* (1 - \sqrt{1 - \varphi})$ , де  $\bar{\delta} = \delta / \delta^*$  при  $0 < \delta < \delta^*$  і  $\bar{\delta} = 1$  при  $\delta > \delta^*$ , звідки  $\varphi_T = \bar{\delta}(2 - \bar{\delta})$ . Тиск насичення  $P_H$  визначається за формулою М.І. Нікітенко [8], яка добре узгоджується з табличними даними:  $P_H = N_p \sqrt{T} [\exp(A / RT) - 1]^{-1}$ ,  $N_p = \text{const}$ .

Питома інтенсивність випаровування в порах тіла знаходиться за формулою, яка впливає з (5) за умови локальної термодинамічної рівноваги:

$$I_V = \gamma_c \left( \frac{\rho_r}{RT} \exp \left( \frac{U_{\Psi}}{RT} - 1 \right) - \varphi_T \right) S. \quad (6)$$

Для знаходження площі  $S$  контакту рідинної і газової фаз у частково заповнених рідиною порах в елементарному об'ємі тіла отримана формула [3]:

$$S = \frac{2\sqrt{1 - \varphi_T}}{\rho_{ж} \delta^*} \frac{\partial U_{ж}}{\partial \varphi_T}. \quad (7)$$

Похідна  $\partial U_{ж}/\partial \varphi_T$  визначається шляхом диференціювання рівняння ізотерми адсорбції. Якщо ізотерма задана у вигляді  $U_{ж} = U_{\max} \varphi_T^g$ ,  $g = \text{const}$ , то  $\partial U_{ж}/\partial \varphi_T = U_{\max} g \varphi_T^{g-1}$ .

На вході в сушильну камеру всі фізичні параметри сушильного агента вважаються відомими. Визначення середніх значень температури  $T_c$ , тиску  $P_c$ , об'ємних концентрацій пари  $U_{сп}$  і повітря  $U_{св}$  в теплоносії в перетині  $z$  за довжиною каналу проводилося за балансним рівнянням для елементарного об'єму  $\Delta V = S_c \Delta z$  [3], де  $S_c$  – площа перерізу каналу,  $S_c = XY$ ,  $X$  – висота каналу.

Зміна тиску  $\Delta P_c$  в перетині  $z$  визначається за рівнянням Бернуллі для течії газу в каналі  $\Delta P_c = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{c3}$ , де  $\Delta P_{c1} = \lambda_{тр} U_c w_c^2 \Delta z / 2d_{\text{екв}}$  – втрати напора на тертя потоку на стінках каналу;  $\Delta P_{c2} = \zeta U_c w_c^2 / 2$  – втрати, викликані місцевими опорами;  $\Delta P_{c3} = \rho g \Delta z$  – статичний напір потоку. Коефіцієнт тертя  $\lambda_{тр}$  залежить від режиму течії газу [9]:  $\lambda_{тр} = 64/\text{Re}$  при  $\text{Re} < 2320$ ,  $\lambda_{тр} = 64/\text{Re} + 0,136/\text{Re}^{0,18}$  при  $\text{Re} = 2320 - 10^6$ . Еквівалентний діаметр  $d_{\text{екв}} = 2S_c / \Pi_c = XY / (X+Y)$ , де  $\Pi_c = 2(X+Y)$  – периметр перетину каналу. Якщо місцевими опорами можна знехтувати, диференціальне рівняння втрати напора в каналі приймає вигляд:

$$\frac{dP_c}{dz} = -\lambda_{тр} \rho_c \frac{w^2}{2d_{\text{екв}}} + \rho_c \cos(g, z). \quad (8)$$

Середня температура теплоносія  $T_c$  у перетині  $z$  знаходиться з рівняння балансу енергії, записаного для елементарного об'єму  $dV = S_c dz$  каналу:

$$dq_c / dz = [\alpha - \gamma_{пс} \left( \dot{V}_{п|_{v=0}} - \rho_{пс} \Psi_{г} \bar{c}_{п} \right) - \gamma_{вс} \left( \dot{V}_{в|_{v=0}} - \rho_{вс} \Psi_{г} \bar{c}_{в} \right)] (T_c - T|_{v=0}) - LI_c Y, \quad (9)$$

де  $q_c$  – потік енергії через перетин  $z$  каналу,  $q_c(z) = [G_{пс}(z)c_{п} + G_{вс}(z)c_{в}] T_c(z)$ .

Середня швидкість  $w_c$  сушильного агента в перетині  $z$  каналу, відповідно до рівнянь стану і нерозривності для пари і повітря, знаходиться за формулою:

$$w_c(z) = \left[ \frac{G_{пс}(z)}{\mu_{п}} + \frac{G_{вс}(z)}{\mu_{в}} \right] \frac{RT_c(z)}{P_c(z)S_c}. \quad (10)$$

Зміни витрати повітряної і парової складових сушильного агента через перетин  $z$  розраховуються з рівняння балансу маси для кожного компонента:

$$dG_{вс}(z)/dz = \gamma_{вс} \left[ \dot{V}_{в}(z, X) - \rho_{вс}(z) \Psi_{г} \bar{Y} \right], \quad dG_{пс}(z)/dz = \gamma_{пс} \left[ \dot{V}_{п}(z, X) - \rho_{пс}(z) \Psi_{г} \bar{Y} \right], \quad (11)$$

де  $\rho_{\text{пс}}$ ,  $\rho_{\text{вс}}$  – парціальні густини пари і повітря в агенті,  $\rho_{\text{пс}} = U_{\text{пс}}$ ,  $\rho_{\text{вс}} = U_{\text{вс}}$ .

Витрати повітряної  $G_{\text{вс}}(z)$  і парової  $G_{\text{пс}}(z)$  складових теплоносія через перетин  $z$

$$G_{\text{вс}}(z) = w_c S_c \rho_{\text{вс}}(z), \quad G_{\text{пс}}(z) = w_c S_c \rho_{\text{пс}}(z). \quad (12)$$

Загальна витрата теплоносія  $G_{\text{с0}}$  через перетин  $z = 0$  вважається заданою

$$G_{\text{с0}} = G_{\text{пс0}} + G_{\text{вс0}} = w_{\text{с0}} S_{\text{с0}} (U_{\text{пс0}} + U_{\text{вс0}}), \quad (13)$$

а витрата  $G_c$  через довільний перетин  $z$  дорівнює сумі витрат  $G_{\text{пс}}(z)$  та  $G_{\text{вс}}(z)$ :

$$G_c(z) = G_{\text{пс}}(z) + G_{\text{вс}}(z) = w_c S_c [\rho_{\text{пс}}(z) + \rho_{\text{вс}}(z)]. \quad (14)$$

Загальна витрата матеріалу  $G_{\text{м0}}$  на вході в канал в перетині  $z = 0$  буде

$$G_{\text{м0}} = G_{\text{т0}} + G_{\text{ж0}} + G_{\text{п0}} + G_{\text{в0}} = w_L S_M (U_{\text{т0}} + U_{\text{ж0}} + U_{\text{п0}} + U_{\text{в0}}), \quad (15)$$

де  $S_M = X_M Y$  – площа перерізу шару матеріалу,

а загальна витрата  $G_M(z)$  матеріалу через перетин  $z$  дорівнює

$$G_M(z) = w_L S_M [\bar{U}_T(z) + \bar{U}_J(z) + \bar{U}_P(z) + \bar{U}_B(z)], \quad (16)$$

де  $\bar{U}_\psi(z)$  – середня об'ємна концентрація компонента  $\psi$  тіла в перетині  $S_M$ .

Якщо поверхні  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $y = Y_M$  матеріалу і  $x = X_M + X$ ,  $y = 0$ ,  $y = Y$  каналу непроникні, то сумарна витрата матеріалу і сушильного агента в довільному перетині  $z$  системи матеріал - сушильний агент залишається незмінною, тобто  $G_M(z) + G_c(z) = G_{\text{м0}} + G_{\text{с0}} = \text{const}$ , а витрата пари теплоносія через перетин  $z$  каналу згідно рівняння балансу маси представляється виразом:

$$G_{\text{пс}}(z) = w_c S_c \rho_{\text{пс}}(z) = G_{\text{м0}} + G_{\text{с0}} - G_M(z) - G_{\text{вс}}(z). \quad (17)$$

Парціальні густини пари  $\rho_{\text{пс}}$  і повітря  $\rho_{\text{вс}}$  в перетині  $z$  знаходяться за рівняннями нерозривності для кожного компонента:

$$\rho_{\text{пс}}(z) = G_{\text{п}}(z) / \bar{V}_c(z) S_c, \quad \rho_{\text{вс}}(z) = G_{\text{в}}(z) / \bar{V}_c(z) S_c. \quad (18)$$

Парціальні тиски пари  $P_{\text{пс}}$  і повітря  $P_{\text{вс}}$  визначаються за рівняннями стану:

$$P_{\text{пс}}(z) = R \rho_{\text{пс}}(z) T_c(z) / \mu_{\text{п}}, \quad P_{\text{вс}}(z) = R \rho_{\text{вс}}(z) T_c(z) / \mu_{\text{в}}. \quad (19)$$

Умови тепломасообміну на границі  $x = X_M$  контакту зневодненого матеріалу і сушильного агента представляються у вигляді:

$$D_{\text{ж}} \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial v} \Big|_{v=0} = -I, \quad (20)$$

$$D_{\text{п}} \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial v} \Big|_{v=0} = I - \gamma_{\text{пс}} \left( U_{\text{п}} \Big|_{v=0} - \rho_{\text{пс}} \Psi_{\text{г}} \right), \quad (21)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial v} \Big|_{v=0} = \alpha(T_{\text{с}} - T \Big|_{v=0}) - LI - [\gamma_{\text{пс}} \left( U_{\text{п}} \Big|_{v=0} - \rho_{\text{пс}} \Psi_{\text{г}} \right) + \gamma_{\text{вс}} \left( U_{\text{в}} \Big|_{v=0} - \rho_{\text{вс}} \Psi_{\text{г}} \right)] (T_{\text{с}} - T \Big|_{v=0}). \quad (22)$$

Рішення системи диференціальних рівнянь (2) – (4), що замикаються рівняннями (5) – (22) може бути проведено чисельним методом на базі тришарової явної різницевої схеми М.І. Нікітенко [7] і процедури розщеплення алгоритму за фізичними факторами [3]. Різницеві апроксимації рівнянь (2) – (4) в декартових координатах  $x = x_1, y = x_2, z = x_3$  на нерівномірній різницевої сітці  $x_{i+1}^n = x_i^n + h_{x,i+1}^n$  ( $i = 0, 1, \dots, I$ ),  $y_{m+1}^n = y_m^n + h_{y,m+1}^n$  ( $m = 0, 1, \dots, M$ ),  $z = nl$  ( $n = 0, 1, \dots$ ;  $l > 0$ ) згідно з вказаною схемою мають вигляд:

$$\left( +\Omega_T \bar{\delta}_z T^n - \Omega_T \delta_z T^{n-1} = \frac{1}{W_L c_{\text{эф}}} \left\{ \sum_{k=1}^3 \mathbf{1}_{x_k} \left( c_{\text{эф}} \delta_{x_k} T \right) - LI_V \right\}, \quad (23)$$

$$c_{\text{эф}} = c_{\text{т}} \bar{U}_{\text{т}} + c_{\text{ж}} \bar{U}_{\text{ж}} + c_{\text{п}} \bar{U}_{\text{п}} + c_{\text{в}} \bar{U}_{\text{в}},$$

$$\left( +\Omega_{\text{ж}} \bar{\delta}_z \bar{U}_{\text{ж}} - \Omega_{\text{ж}} \delta_z U_{\text{ж}}^{n-1} = \frac{1}{W_L} \sum_{k=1}^3 \mathbf{1}_{x_k} \left( \mathbf{0}_{\text{ж}} \delta_{x_k} U_{\text{ж}} \right) + \delta_{x_k} \left( \mathbf{0}_{\text{ж}} \delta_{\text{ж}}^T \delta_{x_k} T \right) - I_V, \quad (24)$$

$$\delta_z \bar{U}_{\text{ж}} = \frac{\bar{U}_{\text{ж}}}{1 + \varepsilon_V} \delta_z \varepsilon_V, \quad (25)$$

$$\left( +\Omega_{\text{п}} \bar{\delta}_z U_{\text{п}}^n - \Omega_{\text{п}} \delta_z U_{\text{п}}^{n-1} = \frac{1}{W_L} \sum_{k=1}^3 \mathbf{1}_{x_k} \left( \mathbf{0}_{\text{п}} \delta_{x_k} U_{\text{п}} \right) + \delta_{x_k} \left( D_{\text{п}} \delta_{\text{п}}^T \delta_{x_k} T \right) - I_V, \quad (26)$$

$$\delta_z \bar{U}_{\text{п}} = \frac{\bar{U}_{\text{п}}}{1 + \varepsilon_V} \delta_z \varepsilon_V. \quad (27)$$

Ваговий параметр  $\Omega$  усуває обмеження на крок за часом,  $\Omega \geq 0$ .

В різницевих рівняннях (23) – (27) сіткові функції  $W_{im}^n, W_{im}^{n-1}, \bar{W}_{im}^{n+1}$  ( $W = T, U_{\text{ж}}, U_{\text{п}}, \varepsilon_V$ ) для вузлової точки  $(x_i, y_m, z)$  записані для спрощення без нижніх індексів:  $W = W_{im}^n, W^{n-1} = W_{im}^{n-1}$  і  $\bar{W} = \bar{W}_{im}^{n+1}$ . Похідні для випадку двовимірної задачі  $W = W(x, y)$  визначаються різницевими співвідношеннями:

$$\delta_z W = (W_{im}^{n+1} - W_{im}^n) / l; \quad \delta_{x_1} W = (W_{i+1}^n - W_{i-1}^n) / 2h_x; \quad \delta_z \bar{W} = (\bar{W}_{im}^{n+1} - W_{im}^n) / l;$$

$$\delta_{x_1} \left( \mathbf{0}_{\text{ж}} \delta_{x_1} W^n \right) = \mathbf{1}_{i+1}^n + D_i^n \left( W_{i+1}^n - W_i^n \right) - \mathbf{0}_i^n - D_{i-1}^n \left( W_i^n - W_{i-1}^n \right) / 2h_x^2, \quad i = 1, 2, \dots, I.$$



Похибка апроксимації рівнянь (2) – (4) різницевиими рівняннями (23) – (27) має порядок  $l + h_x^2 + h_y^2$ . Необхідні умови стійкості рівнянь виду (23), (24), (26) знаходяться методом умовного завдання деяких шуканих функцій системи, запропонованим в [7]. Умова стійкості для рівняння (24) представляється так:

$$l \leq (1 + 2\Omega_{ж}) \left[ 2D_{ж} \sum_{k=1}^3 h_k^{-2} \right]^{-1}.$$

Різницеві апроксимації диференціальних рівнянь (8), (9), (11) мають вигляд:

$$P_c^{n+1} = P_c^n - \lambda_{тр} \rho_c^n (w^n)^2 / (2d_{екв}) + \rho_c^n \cos(\mathbf{g}, \mathbf{z}), \quad (28)$$

$$T_c^{n+1} = \left\langle T_c^n (G_{пс}^n c_{п} + G_{вс}^n c_{в}) + h_x Y \{ \alpha - \gamma_{пс} (\rho_{пл}^n - \rho_{пс}^n \Psi_{гІ}^n) \underline{\xi}_{п} - \right. \\ \left. - \gamma_{вс} (\rho_{вл}^n - \rho_{вс}^n \Psi_{гІ}^n) \underline{\xi}_{в} \right\rangle (T_c^n - T_I^n) - LI_c \rangle / (G_{пс}^n c_{п} + G_{вс}^n c_{в}). \quad (29)$$

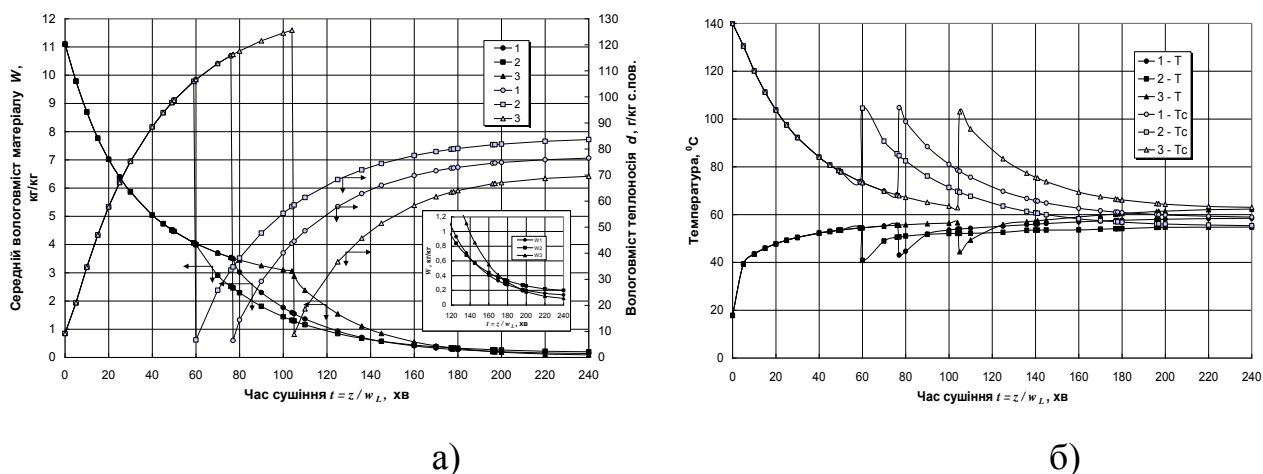
$$G_{вс}^{n+1} = G_{вс}^n + \gamma_{вс} (\rho_{вл}^n - \rho_{вс}^n \Psi_{гІ}^n) Y, \quad G_{пс}^{n+1} = G_{пс}^n + \gamma_{пс} (\rho_{пл}^n - \rho_{пс}^n \Psi_{гІ}^n) Y. \quad (30)$$

Конвективно-конденсаційний спосіб сушіння реалізується так. Визначається товщина шару матеріалу, що підлягає сушінню. За довідковими даними і шляхом вимірювання знаходяться його фізичні характеристики, гранично допустима температура, вихідні температура і вологість. Здається витрата, тиск, вологовміст і температура сушильного агента на вході в сушильну камеру. На основі представленої математичної моделі шляхом чисельного моделювання знаходяться графіки зміни температури і вологовмісту сушильного агента, виходячи з того, щоб тривалість процесу була мінімальною і температура на поверхні висушуваного шару не перевищувала гранично допустимого значення  $T^*$ . Ці графіки разом із зазначеними вихідними параметрами визначають режим сушіння термолабільного матеріалу в стрічкової сушарці.

Як приклад було проведено розрахунок динаміки і кінетики сушіння шару столового буряка, що симетрично обдувається сушильним агентом у прямоточній стрічковій сушарці за таких вихідних параметрів [10]:  $U_{ж0} = 886,5$  кг/м<sup>3</sup>;  $T^* = 60$  °С;  $T_{с0} = 140$  °С;  $w_{с0} = 5,5$  м/с;  $P_{с0} = 103$  кПа;  $P_{пс0} = 1,5$  кПа;  $w_L = 5 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $\Pi = 0,924$ ;  $\lambda_{т} = 0,13$  Вт/(м·К);  $c_{т} = 1465$  Дж/(кг·К);  $\rho_{т} = 1050$  кг/м<sup>3</sup>;  $\beta_x =$

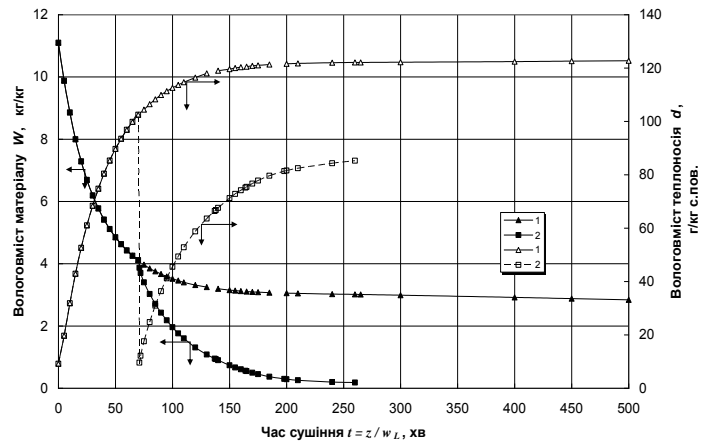
$0,037$ ;  $\gamma_{Dж} = 0,75 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\gamma_{Dж} = 0,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $A = A_D = 0,4206 \cdot 10^8 \text{ Дж/кмоль}$ .  
Рівноважний вологовміст буряка [11] досить добре описуються рівнянням  $W_p = 0,5 W_{\max} [\varphi / (1 - \varphi)]^{2/3}$ . Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі використовувалось рівняння [10]:  $Nu = 0,0296 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr / Pr_{ct})^{0,25}$ .

На рис.1 наведені графіки зміни середнього вологовмісту теплоносія  $d_c$  і столового буряка  $W$  (а), температур теплоносія  $T_c$  і поверхні шару  $T|_{v=0}$  (б), сушіння якого проводиться конвективно-конденсаційним способом для випадків закінчення першого етапу сушіння при досягненні парціального тиску пари  $P_{nc}$  в сушильному агенті значень 15 кПа (криві 1), 16 кПа (криві 2), 17 кПа (криві 3), його осушення до  $P_{nc} = 1$  кПа і додаткового підігрівання до  $T_c = 105^\circ\text{C}$  на другому етапі. Зменшення вологовмісту теплоносія на другому етапі призводить до інтенсивного випаровування вологи з поверхневих шарів матеріалу і як наслідок – до досить різкого зниження їх температури. Основним параметром, що інтенсифікує зневоднення, є температура матеріалу, тому доцільно додатково нагрівати осушений теплоносій на початку другого етапу.



**Рис. 1. Графіки зміни вологовмісту (а) і температури (б) теплоносія і на поверхні шару столового буряка товщиною  $H = 12,5$  мм при конвективно-конденсаційному сушінні в прямоточній стрічковій сушарці**

Збільшення тривалості першого етапу сушіння (криві 2, 3) дозволяє досушити пористий шар до більш низького рівноважного вологовмісту  $W_p$  на другому етапі, однак у випадку 3 має місце підвищення температури поверхні матеріалу вище  $T^*$ , що погіршує якість готового продукту. Отже, раціональним є вибір режимних параметрів теплоносія згідно умов отримання графіків 2.



**Рис. 2. Графіки зміни вологовмісту теплоносія і шару столового буряка товщиною  $H = 12,5$  мм при зневодненні в прямоточній стрічковій сушарці конвективним (1) і конвективно-конденсаційним (2) способом**

Необхідно зазначити, що висушити високовологий термолабільний матеріал у прямоточній стрічковій сушарці до низького рівноважного вологовмісту без додаткового осушування і підігрівання сушильного агента не є можливим. На рис. 2 показані графіки зміни середніх значень вологовмісту теплоносія і шару столового буряка товщиною  $H = 12,5$  мм при його зневодненні в стрічковій сушарці з прямотечею конвективним і конвективно-конденсаційним способом за режимом 2, за яким тиск пари  $P_{пс}$  в сушильному агенті досягає значення 16 кПа на першому етапі, а потім осушується до  $P_{пс} = 1$  кПа та нагрівається до  $T_c = 105$  °C на другому етапі.

### Висновки

Розроблено новий конвективно-конденсаційний спосіб сушіння термолабільних матеріалів, який проводиться в два етапи. На першому етапі здійснюється поступове підвищення температури тіла до граничнодопустимого значення  $T^*$  при обдуванні його повітрям з початковими температурою, яка істотно вище  $T^*$  для даного матеріалу, і вологовмістом, рівним вологовмісту навколишнього середовища. На другому етапі матеріал обдувають сушильним агентом з початковими парціальним тиском не вище 1 кПа і такою

температурою, що на поверхні тіла температура не перевищує  $T^*$ , що сприяє ефективному видаленню зв'язаної вологи з внутрішніх шарів матеріалу. Цей спосіб забезпечує отримання якісного висушеного продукту при зменшенні часу та енерговитрат на проведення процесу [2].

### **Список літератури**

1. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / Рудобашта С.П. – М.: Химия. – 1980. – 248 с.
2. Пат. 109241 Україна, МКВ А23В 7/02, F26В 3/02, А23L 3/40. Спосіб сушіння термолабільного матеріалу / Ю.Ф. Снежкін, Н.М. Сорокова, Р.О. Шапар; заявл. 21.07.2014; опубл. 27.07.2015. Бюл. №14.
3. Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена / [Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н., Кольчик Ю.Н.]. – К.: Наукова думка, 2014. – 743 с.
4. Никитенко Н.И. Математическое моделирование тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки с целью оптимизации процесса сушки термолабильных материалов / Н.И. Никитенко, Ю.Ф. Снежкин, Н.Н. Сороковая // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, – № 1. – С. 74 – 87.
5. Лыков А.В. Теория сушки / Лыков А.В. – М.: Энергия, 1968. – 372 с.
6. Никитенко Н.И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах / Н.И. Никитенко // Инженерно-физический журнал. – 2000. – Т. 73. – № 4. – С. 851 – 860.
7. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса / Н.И. Никитенко. – К.: Наукова думка, 1983. – 352 с.
8. Никитенко Н.И. Исследование динамики испарения конденсированных тел на основе закона интенсивности спектрального излучения частиц / Н.И. Никитенко // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75. – № 3. – С. 128 – 134.
9. Шлипченко З.С. Насосы, компрессоры и вентиляторы / З.С. Шлипченко – К.: Техника, 1976. – 368 с.

10. Исаченко В.П. Теплопередача / Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

11. Гинзбург А.С. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов / Гинзбург А.С., Громов М.А. – М.: Агропромиздат, 1987. – 273 с.

## **КОНВЕКТИВНО-КОНДЕНСАЦИОННЫЙ СПОСОБ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Н. Н. Сороковая, Ю. Ф. Снежкин, Р. А. Шапарь*

**Аннотация.** *Представлен способ обезвоживания термолабильных материалов в прямоточной ленточной сушилке, предусматривающий изменение температуры и влагосодержания сушильного агента и позволяющий сократить время сушки и обеспечить энерго- и ресурсосбережение. Изложены математическая модель и численный метод расчета динамики тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел в прямоточной ленточной сушилке.*

**Ключевые слова:** *конвективно-конденсационный способ сушки, термолабильные материалы, математическое моделирование, непрерывная сушка, ленточная сушилка.*

## **CONVECTIVE-CONDENSATION METHOD OF DRYING HEAT-SENSITIVE MATERIALS**

*N. Sorokovaya, Y. Snezhkin, R. Shapar.*

**Annotation.** *This paper a method for dehydrating heat-sensitive materials in the co-current belt dryer , which includes changes in temperature and moisture content of the drying agent and allowing to reduce the drying time and to ensure energy and resource conservation is presenting. The mathematical model and a numerical method for calculating the dynamics of heat and mass transfer, phase transformations and shrinkage during drying of colloidal capillary-porous bodies in a co-current belt dryer are presented.*

**Key words:** *convection-condensation method of drying, thermolabile materials, mathematical modeling, continuous dryers, belt dryers.*