

ВПЛИВ РЕЖИМУ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА НА ОСУШЕННЯ ПОРИСТИХ ТІЛ

Сформульовано задачу сушіння з врахуванням градієнта температури, що характерно для жорстких режимів. На основі побудованого розв'язку задачі тепломасопереносу досліджується вплив режиму сушильного агента на процес осушення. Режим сушильного агента представлено у вигляді розкладу в ряд Фур'є. Алгоритм реалізовано на прикладі процесу сушіння деревини. Ефективні коефіцієнти прийнято на основі дослідних даних Шубіна.

The problem of drying with taking into account a temperature gradient appropriate to dry regimes is formulated. On the basis of a constructed solution of heat mass transfer problem the influence of drying agent regime on drainage process is studied. The drying agent regime is introduced in the form of Fourier expansion. The algorithm is realized in terms of drying a wood. Effective coefficients of model are taken on the basis of Shubin's experiment data.

1. ВСТУП

Ефективним методом управління перенесенням вологи є зміна температурного градієнта всередині матеріалу. Змінюючи величину і напрям температури можна створити ефективні умови для переміщення вологи і цим впливати на фізико-хімічні і біологічні властивості матеріалу.

В початковий період сушіння вологість на поверхнях підтримується на сталому рівні, близькому до границі насичення. Швидкість сушіння при цьому стала. Коли запаси води в приповерхневих зонах вичерпані, вологість стає меншою границі насиченості і випаровування відбувається в глибині тіла [1]. По товщині утворюється три зони - осушена, двофазна і волога [2]. При цьому рідина переходить з капілярного стану в канатний, а тоді в плівково-менісковий стан [3]. Густина капілярної рідини відповідає критичному капілярному тиску. Рідина в капілярах володіє різними температурами фазових переходів і їх розкид визначає температурну зону фазового переходу-двофазну зону, де співіснують рідина і пара [2]. Якщо дисперсія розмірів пор за радіуса-

¹ Центр математичного моделювання ІППММ
ім. Я. Підстригача НАН України

² Львівський державний лісотехнічний університет

ми мала, має зміст поняття про поверхню розділу фаз між осушеною і капілярною зонами. В цьому випадку двофазна зона звужується до поверхні і в дальнішому розглядається дві зони- осушена і волога.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.

Перенесення газоподібної речовини в осушеній зоні відбувається молекулярним шляхом у вигляді дифузії і ефузії, молярним - фільтраційним рухом парогазової суміші всередині пор тіла під дією перепаду загального тиску. Рідка волога в пористому тілі може переміщатись шляхом дифузії через скелет (молекулярне перенесення), в вигляді фільтраційного руху (молярне або конвективне перенесення). Рух вологи в пористому тілі досить повільний, так що температура вологи дорівнює температурі стінок капілярів. Зміна вологовмісту в зв'язку з зміною температури в часі залежать від взаємозв'язку процесів зміни вологи і тепла всередині вологого матеріалу і процесів тепло і масообміну поверхні тіла з навколишнім середовищем. Для розрахунку оптимального режиму сушіння важливим є вивчення законів перенесення тепла і вологи з метою управління ним. Зміна градієнта вологи при швидкісному високотемпературному режимі гідротермічної обробки вимагає строгого контролю жорсткості, збереження ефективності та безпечності режиму сушіння.

Метою даної роботи є дослідження впливу режиму сушіння на основі побудованого наближеного розв'язку нелінійної задачі осушення шару товщини $2L$ ($-L \leq z \leq L$), осушення якого йде з поверхонь під дією конвективно-теплого нестационарного потоку сушильного агента для оцінки впливу на процес змінного в часі теплового режиму сушильної установки. В процесі конвективного сушіння тепло, яке підводиться газом, витрачається на випаровування рідини, нагрів матеріалу і подолання енергії зв'язку з матеріалом. Швидкість обміну теплом і масою, якщо внутрішньодифузійний опір малий, залежить тільки від опору примежового шару газу. Товщина і гідродинамічний стан цього шару залежать від відносної швидкості агента сушіння. Рівномірність та симетрія двостороннього осушення матеріалу створюється циркуляцією сушильного агента.

Задача розв'язується, як задача з змінною в часі границею фазового переходу L_m , закон руху якої визначається на основі розв'язку задачі тепломасопереносу. Тепломасоперенос відбувається по товщині тіла.

Задача зводиться до розв'язку наступної системи рівнянь в осушеній зоні [4, 5]:

рівняння теплопровідності:

$$[\Pi(C_v \rho_v + C_a \rho_a) + (1 - \Pi)C_s \rho_s] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_c \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad L_m \leq z \leq L, \quad 0 \leq L_m \leq L; \quad (1)$$

рівняння масоперенесення пароповітряної суміші:

$$\rho_v \frac{K_g}{\mu_g} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_1 \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right) \right] = 0, \quad \rho_a \frac{K_g}{\mu_g} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \left[D_1 \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right) \right] = 0; \quad (2)$$

рівняння стану бінарної пароповітряної суміші:

$$P = \left(\frac{\rho_v}{M_v} + \frac{\rho_a}{M_a} \right) RT; \quad (3)$$

рівняння балансу енергії на рухомій межі фазових переходів $z = L_m$:

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_m+0} = r_k \frac{K_g}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=L_m+0}, \quad (4)$$

лінеаризоване рівняння стану на рухомій межі фазових переходів $z = L_m$:

$$T_m = T_{mk} + \beta_k P_n, \quad (5)$$

де $T_{mk} = \frac{9T_k V_k}{8V}$, $\beta_k = \frac{3T_k V}{8V_k}$. Зокрема, в роботах [3]

$T_m = 83 + 16 \cdot 10^{-5} P_n$, λ_c - теплопровідність осушеної зони. В інших випадках коефіцієнти T_{mk} , β_k визначаються з температурних режимів сушіння конкретного матеріалу, C_v, ρ_v ; C_a, ρ_a - теплоємність і густина пари та повітря, відповідно, F - джерельний член, Π - пористість матеріалу.

Граничні умови на границі $z = L$ виражають теплообмін між поверхнями пластини і сушильним агентом за законом Ньютона

$$\lambda_c \frac{\partial T}{\partial z} + \tilde{\alpha} [T - u(t)] = 0, \quad (6)$$

де $\tilde{\alpha}$ - коефіцієнт теплообміну, $u(t)$ - температура сушильного агента, змінна в часі і в частковому випадку може бути представлена у вигляді розкладу в ряд Фур'є

$$u(\tau) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^p (\alpha_n \cos v_n^2 \tau + \beta_n \sin v_n^2 \tau) \quad (7)$$

а на межі фазового переходу $z = L_m$

$$T = T_m, \quad (8)$$

де T_m - поки що невідома температура фазового переходу, залежна тільки від тиску насиченої пари P_n , $T_m = f(P_n)$,

$$D_1 = \left(D + 1,064 \sqrt{\frac{RT}{M_v}} \varepsilon \right), \text{ де } \varepsilon - \text{коефіцієнт молекулярного течіння}$$

пари.

В початковий момент температура тіла задовольняє умові

$$T(t=0) = f(z) \quad (9)$$

На поверхнях пористої пластини мають місце умови конвективного масообміну. В зв'язку з симетрією задачі приведемо їх для однієї з половин. Умови на поверхнях $z = L$ та $z = L_m$ газової зони запишемо так:

$$\rho_v \frac{K_g}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial z} + D_1 \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right) = -\tilde{\beta}(\rho_v - \rho_0), \quad \rho_a = \rho_{a0} \quad \text{для } z = L_0, \quad (10)$$

$$\rho_v = \rho_n \quad \text{на поверхні } z = L_m, \quad (11)$$

Тут $\tilde{\beta}$ - коефіцієнт масообміну, ρ_n - густина насиченої пари за даної температури фазового переходу, що підлягає визначенню, ρ_0 - густина пари в середовищі поза пористим тілом (в сушильному агенті).

Рівняння руху межі розділу фаз $\bar{z}_m = L_m / L$:

$$\frac{d\bar{z}_m}{dt} = - \frac{j(\bar{z}_m)}{\Pi \rho_L L} \quad (12)$$

$$\text{при початковій умові} \quad \bar{z}_m = 1. \quad (13)$$

Система рівнянь (1), (13) представляє модель конвективно-теплового осушення тіла в сушильній установці.

Розв'язок даної задачі має вигляд

$$T(\bar{z}, \tau) = \vartheta_0(\bar{z}) + \sum_{n=1}^p \left[\vartheta_n(\bar{z}) \cos^2 \tau + \chi_n(\bar{z}) \sin^2 \tau \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n (\bar{z} - \bar{z}_m)}{\mu_n} B_n(\bar{z}_m) e^{-\mu_n^2 \tau} \quad (14)$$

де

$$B_n(\bar{z}_m) = \frac{2T_0 H}{\Delta_n} \left\{ \frac{\sin \mu_n (1 - \bar{z}_m)}{\mu_n} - \frac{H}{\mu_n^2} [\cos \mu_n (1 - \bar{z}_m) - 1] \right\} +$$

$$+ \sum_{k=1}^p \left\{ a_k(\bar{z}_m) \left[\tilde{Z}_{nk1}^* \left(\frac{v_k}{\sqrt{2}} \right) - \tilde{Z}_{nk1}^* \left(\frac{v_k \bar{z}_m}{\sqrt{2}} \right) \right] - b_k(\kappa_m) \left[\tilde{Z}_{nk2}^* \left(\frac{v_k}{\sqrt{2}} \right) - \tilde{Z}_{nk2}^* \left(\frac{v_k \kappa_m}{\sqrt{2}} \right) \right] \right\} +$$

$$+ c_k(\kappa_m) \left[\tilde{Z}_{nk3}^* \left(\frac{v_k}{\sqrt{2}} \right) - \tilde{Z}_{nk3}^* \left(\frac{v_k \kappa_m}{\sqrt{2}} \right) \right] - d_k(\kappa_m) \left[\tilde{Z}_{nk4}^* \left(\frac{v_k}{\sqrt{2}} \right) - \tilde{Z}_{nk4}^* \left(\frac{v_k \kappa_m}{\sqrt{2}} \right) \right] \right\}, \quad (15)$$

де

$$\varphi_n(\bar{z}) = a_n Y_1 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) - b_n Y_2 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) + c_n Y_3 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) - d_n Y_4 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \right); \quad (16)$$

$$\chi_n(\bar{z}) = -a_n Y_2 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) - b_n Y_1 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) - c_n Y_4 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) - d_n Y_3 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \right), \quad (17).$$

$$(n=1, 2, \dots, p;) ; v_n^2 = \frac{n\pi}{\tau_3} ; \tau = \frac{a\tau^*}{L^2}, \quad \bar{z} = \frac{z}{L} ; ; \bar{z}_m = \frac{L_m}{L} ; H = \frac{\tilde{\alpha}L}{\lambda}$$

Тут

$$Y_1 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_k \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) = ch \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \cos \frac{v_k \bar{z}}{\sqrt{2}}, \quad Y_2 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_k \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) = sh \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \sin \frac{v_k \bar{z}}{\sqrt{2}}, \quad (18)$$

$$Y_3 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_k \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) = sh \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \cos \frac{v_k \bar{z}}{\sqrt{2}}, \quad Y_4 \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_k \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) = ch \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \sin \frac{v_k \bar{z}}{\sqrt{2}}. \quad (19)$$

Коефіцієнти a_n, b_n, c_n, d_n визначаються з системи рівнянь $[A]y = f$,

$$\text{де } [A] = [\delta_{ij}]; \quad y = \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \\ c_n \\ d_n \end{pmatrix}; \quad f = \begin{pmatrix} H\alpha_n \\ H\beta_n \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$a_n(\bar{z}_m) = \frac{\Delta_1(\bar{z}_m)}{\Delta(\bar{z}_m)}; \quad b_n(\bar{z}_m) = \frac{\Delta_2(\bar{z}_m)}{\Delta(\bar{z}_m)}; \quad c_n(\bar{z}_m) = \frac{\Delta_3(\bar{z}_m)}{\Delta(\bar{z}_m)}; \quad d_n(\bar{z}_m) = \frac{\Delta_4(\bar{z}_m)}{\Delta(\bar{z}_m)} \quad (20)$$

$\Delta_i(\bar{z}_m)$, ($i = 1, 2, 3, 4$) визначники четвертого порядку. В дальні-

шому позначимо $Y_m \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \right) = Y_m \left(\frac{v_n \bar{z}}{\sqrt{2}} \right)$. $\Delta(\bar{z}_m) = |\delta_{ij}|$,

де

$$\delta_{11} = \frac{v_n}{\sqrt{2}} \left[Y_3 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right) - Y_4 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right) \right] + HY_4 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right); \quad \delta_{12} = - \left\{ \frac{v_n}{\sqrt{2}} \left[Y_3 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right) + Y_4 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right) \right] + HY_2 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right) \right\};$$

$$\delta_{33} = \frac{v_n}{\sqrt{2}} \left[Y_1 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right) - Y_2 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right) \right] + HY_3 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right); \quad \delta_{34} = - \left\{ \frac{v_n}{\sqrt{2}} \left[Y_1 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right) + Y_2 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right) \right] + HY_4 \left(\frac{v_n}{\sqrt{2}} \right) \right\};$$

$$\begin{aligned} \delta_{21} &= \delta_{12}; \delta_{22} = -\delta_{11}, \delta_{23} = \delta_{14}; \delta_{24} = -\delta_{13}; \delta_{31} = Y_1 \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \bar{z}_m \right); \\ \delta_{32} &= -Y_2 \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \bar{z}_m \right); \delta_{33} = Y_3 \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \bar{z}_m \right); \delta_{34} = -Y_4 \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \bar{z}_m \right); \delta_{41} = -Y_2 \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \bar{z}_m \right); \\ \delta_{42} &= -Y_1 \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \bar{z}_m \right); \delta_{43} = -Y_4 \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \bar{z}_m \right); \delta_{44} = -Y_3 \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \bar{z}_m \right); \end{aligned} \quad (21)$$

$$Y_i(\kappa_m) = Y_i \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \kappa_m \right), \quad Y_i(1) = Y_i \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \right). \quad (22)$$

Температуру фазового переходу визначено у вигляді:

$$\begin{aligned} T_m &\approx T_{mk} \left[\frac{B}{A+1} (\eta_1 - \eta_0) + \alpha_{12} \right] / \left[\frac{B}{A+1} (\eta_1 - \eta_0) + \alpha_{12} (1 + c_{11}) \right] + \\ &+ T_{mk} \left[\frac{B}{A+1} (\eta_1 - \eta_0) c_{11} \Phi \right] / \left[\frac{B}{A+1} (\eta_1 - \eta_0) + \alpha_{12} (1 + c_{11}) \right] \left[\frac{B}{A+1} (\eta_1 - \eta_0) + \alpha_{12} \right] \end{aligned}$$

3. РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ВОЛОГОПРОВІДНОСТІ

Задача вологопровідності (12-13) звелась до наступної задачі Коші

$$\frac{d\tilde{\chi}}{dt} = \frac{HT_0}{4B} \frac{(2B\tilde{\chi} - S)^3}{[-B\tilde{\chi}^2 + S\tilde{\chi} - BU]} \left\{ \frac{(\chi - a_3)}{(\chi - a_2)} \left[1 - \frac{((\chi - a_1))^{\frac{A+1}{B}} c_{11} \Phi}{(\chi - a_2)^2} \right] \right\}, \quad (23)$$

$$\text{де } a_2 = a_1 + \frac{A+1}{B} \alpha_{12}, \quad a_3 = a_1 + \frac{A+1}{B} (\alpha_{12} + 1), \quad a_1 = A + \eta_0,$$

$$\begin{aligned} \tilde{\chi} &= \sqrt{U + Sz_m^* + B^2 z_m^{*2}} - z_m^* B, \quad \Phi - \text{градієнт температури всюди крім} \\ &\text{площини фазового переходу } \bar{z}_m; \\ A &= \frac{(1+a)}{b}, \quad B = -\beta' A, \quad U = (A+1)^2, \quad S = 2B(A + \eta_0); \quad \beta' = \frac{L_0 \beta}{D_1}; \end{aligned}$$

$$\tilde{a} = \frac{D_1 M_a \mu_g}{K \rho_{a0} RT_s}, \quad \tilde{b} = \frac{\rho_n}{\rho_{a0}} \frac{M_a}{M_v}; \quad D_1 = (D + 1,064\bar{r}) \sqrt{\frac{RT_s}{M_v}}.$$

Розв'язок рівняння (23) повинен задовольняти початковій умові

$$\chi|_{t=0} = \sqrt{U}. \quad (24)$$

В зв'язку з складністю функцій Φ , зокрема $\varphi'_{n\kappa}(\kappa_m)$, $\chi'_{n\kappa}(\kappa_m)$,

$B_0(\kappa_m), B_n(\kappa_m)$ розв'язок рівняння знайдено наближено методом ітерацій. Інтегруючи рівняння (23) в границях від нуля до t і враховуючи (24), отримуємо

$$\chi = \int_0^t F(\chi, t) dt + \chi_0. \quad (25)$$

В даному рівнянні шукана функція χ знаходиться під знаком інтеграла. Таким чином, ми прийшли до інтегрального рівняння для функції χ , яка задовольняє рівнянню (23) і початковій умові (24). Будемо вважати $\chi_0 = \chi|_{t=0} = \sqrt{U}$ нульовим наближенням розв'язку.

Підставляючи в підінтегральну функцію в правій частині рівності (25) замість χ значення χ_0 отримаємо

$$\tilde{\chi}_1(t) = \frac{HT_0}{4BT_{mk}} \frac{(2B\sqrt{U} - S)^3}{[-2BU + S\tilde{\chi}]} \left\{ \frac{(\sqrt{U} - a_3)}{(\sqrt{U} - a_2)} \left[t - \frac{(\sqrt{U} - a_1)^{A+1} c_{11} \Phi_1(1, t)}{(\sqrt{U} - a_2)^2} \right] \right\} + \sqrt{U}$$

, де

$$\Phi(1, t) = \alpha_0 \frac{H}{1+H} t + \frac{L^2}{a} \sum_{n=1}^p \frac{1}{v_n^2} \left[\phi'_{nk}(1) \sin v_n^2 \frac{at}{L^2} + \chi'_{nk}(1) \left(\cos v_n^2 \frac{at}{L^2} - 1 \right) \right]; \quad (26)$$

. Продовжуючи цей процес, отримуємо формули для s -ого наближення

$$\begin{aligned} \chi_s(t) &= \frac{HT_0}{4BT_{mk}} \frac{(2B\tilde{\chi}_{s-1}(t) - S)^3}{[-B\tilde{\chi}_{s-1}(t)^2 + S\tilde{\chi}_{s-1}(t) - BU]} \left\{ 1 - \frac{\frac{A+1}{B} c_{11} \alpha_{12}}{(\chi_{s-1}(t) - a_2)} \left[\frac{[\chi_{s-1}(t) - a_1]^{A+1} c_{11} \Phi_s(\chi_{s-1}(t), t)}{[\chi_{s-1}(t) - a_2]^2} \right] \right\} + \sqrt{U} \\ \Phi_s(\tilde{\chi}_{s-1}(t), t) &= \alpha_0 \frac{H}{1+H} t + \frac{L^2}{a} \sum_{n=1}^p \frac{1}{v_n^2} \left[\phi'_{nk} \left(1 - \frac{\tilde{\chi}_{s-1}^2(t) - U}{S - 2B\tilde{\chi}_{s-1}(t)} \right) \cos^2 v_n^2 \frac{at}{L^2} + \chi'_{nk} \left(1 - \frac{\tilde{\chi}_{s-1}^2(t) - U}{S - 2B\tilde{\chi}_{s-1}(t)} \right) \sin^2 v_n^2 \frac{at}{L^2} \right] + \\ &+ B_0 \left(1 - \frac{\tilde{\chi}_{s-1}^2(t) - U}{S - 2B\tilde{\chi}_{s-1}(t)} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \left(1 - \frac{\tilde{\chi}_{s-1}^2(t) - U}{S - 2B\tilde{\chi}_{s-1}(t)} \right) e^{-\mu_n^2 \frac{at}{L^2}} \quad (27) \end{aligned}$$

де $\bar{z}_{ms}(t) = 1 - \frac{\tilde{\chi}_s^2(t) - U}{S - 2B\tilde{\chi}_s(t)}$ -аргументи функцій

$$\phi'_{n\bar{z}}(\bar{z}_{ms}), \chi'_{n\bar{z}}(\bar{z}_{ms}), B_0(\bar{z}_{ms}), B_n(\bar{z}_{ms})$$

Даний алгоритм апробовано на моделі осушення деревини (сосни). За вихідні дані взято такі параметри: довжина пластини $l = 1$ м, півтовщина дошки, $L = 0,022$ м; вологовміст (початковий) $U_0 = 0,4$ (кг/кг); швидкість агента сушіння $v = 2$ (м/с) = 7200 м/год; відносна вологість $\varphi = 50\% = 0,5$; густина $\rho = 581$ (кг/м³); густина абсолютно сухого тіла $\rho_0 = 457$ (кг/м³); коефіцієнт теплопровідності, λ (Вт/м·град) визначається за формулою [6]:

$$\text{при } 0,05 < U < 1: \lambda = 0,00222UT_0 + 10^{0,291\lg 100U - 1,022}$$

$$\text{при } 1,0 < U < 1,3: \lambda = (0,0013U + 0,0009)T_0 + 10^{0,291\lg 100U - 1,022}$$

Коефіцієнт теплообміну, $\tilde{\alpha}$ (Вт/м²·град) визначається за формулою:

$$\tilde{\alpha} = 8,35(0,00625T_c + 2,1) \left(\frac{v}{0,0083T_c + 1,37} \right)^{0,8} \cdot l^{-0,2}$$

Коефіцієнт вологообміну, $\tilde{\beta}$ (м/с) визначається за формулою:

$$\tilde{\beta} = \begin{cases} \text{при } 5 \text{ } ^\circ\text{C} < t \leq 70 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \left[0,527(T_c + 10)^{2,06} \cdot 10^{-4} + 0,04 \right] \cdot \left[(5v + 3,5) - (0,0017v + 0,0116)(\varphi - 45)^2 \right] \cdot 10^{-7} \\ \text{при } 70 \text{ } ^\circ\text{C} < t \leq 100 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \frac{\left[(2v + 35) - (0,0017v + 0,0116)(\varphi - 45)^2 \right] \cdot 10^{-7}}{(4,32 - 0,0303T_c) - 0,0089(5v + 35) - (0,0017v + 0,0116)(\varphi - 45)^2} \end{cases}$$

В результаті числового аналізу отримано:

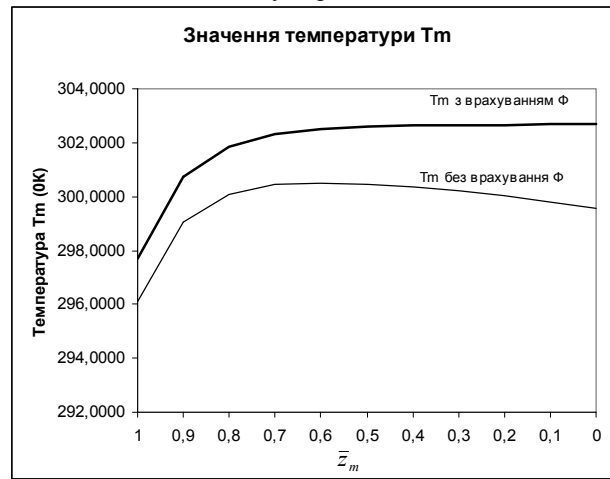


Рис.1. Залежність температури фазового переходу при зміні температури сушильного агента від $T_0=293$ (К), $T_c=313$ (К)

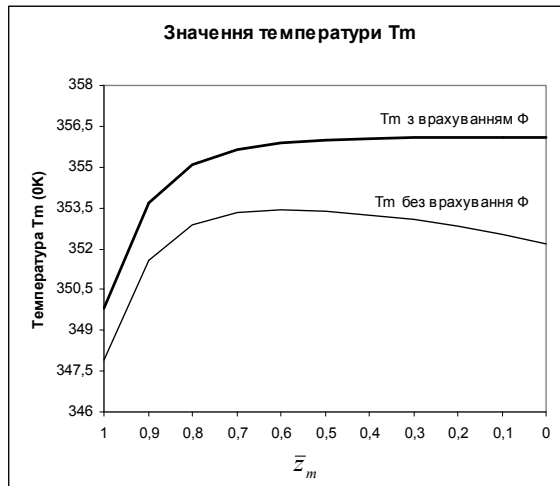


Рис.2. Залежність температури фазового переходу при зміні температури сушильного агента від $T_0=313(K)$, $T_c=373(K)$

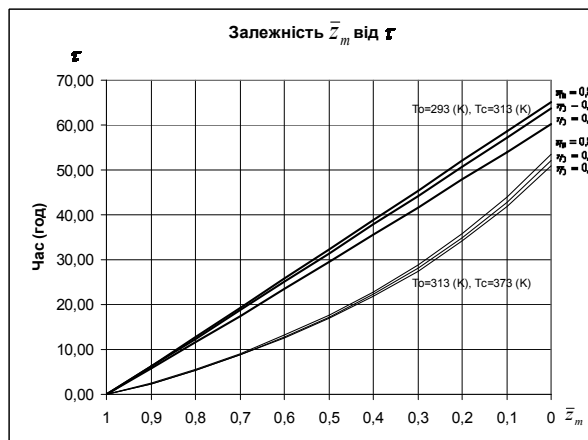


Рис.3. Зміна координати фазового переходу в часі при різних температурних режимах

4. ВИСНОВКИ

На основі наближеного аналітичного розв'язку нелінійної задачі тепловологопереносу пористої пластини отримано залежності температури фазового переходу з врахуванням градієнта температури при

різних температурних режимах сушильного агента; визначено зміну координати фазового переходу в часі в процесі сушіння при різних вологісних режимах сушильного агента. Теплопровідність тіла зростає зі збільшенням вологовмісту і початковою температурою. В зв'язку з цим випаровування є більш інтенсивне при вищих температурних режимах.

1. Лыков А.В. Теплообмен в процессах сушки / А.В. Лыков. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956, 464с. 2. Гайвась, Б. І. Урахування впливу дисперсії розмірів пор на процес осушення пористого шару [Текст] / Б. І. Гайвась // Прикладні проблеми механіки і математики : наук. зб. – 2007. – Вип. 5. – С. 103–112. 3. Гринчик Н.Н. Тепло и массоперенос в капиллярно-пористых средах при интенсивном парообразовании с учетом движения фронта испарения. / Н.Н. Гринчик. // Теория и техника сушки влажных материалов. Минск: 1979, с.30–49. 4. Гайвась Богдана. Математичне моделювання процесів сушіння капілярно-пористих плоских об'єктів з урахуванням руху границі фазового переходу / Б.І. Гайвась // VIII Міжнародна наукова конференція: Математичні проблеми механіки неоднорідних структур, 14–17 серпня 2010 р. : зб. доповідей. – Львів – С. 214–216. 5. Гайвась, Богдана. Математичне моделювання процесу конвективно-теплого осушення пористих тіл в сушильних установках / Б. Гайвась // Обчислювальна математика і математичні проблеми механіки / під заг. ред. В. Л. Макарова [та ін.] : зб. пр. – Львів : ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2009. – С. 262–264. 6. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С. Шубин. – М. : Изд-во «Лесная промышленность», 1990.- 336 с.