

5. Назар М.Б. Шифрування інформації методом простої заміни / М.Б. Назар, Ю.І. Грицюк // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.05. – С. 3239-331.

6. Покровский Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи / Н.Б. Покровский. – М. : Связьиздат, 1962. – 392 с.

7. Проскурин В.Г. Программно-аппаратные средства обеспечения информационной безопасности. Защита в операционных системах : учебн. пособ. [для ВУЗов] / В.Г. Проскурин, С.В. Крутов, И.В. Мацкевич. – М. : Изд-во "Радио и связь", 2000. – 168 с.

8. Соколов А.В. Защита информации в распределенных корпоративных сетях и системах / А.В. Соколов, В.Ф. Шаньгин. – М. : Изд-во "ДМК Пресс", 2002. – 656 с.

9. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си. – М. : Изд-во "Триумф", 2002. – 816 с.

Сулятыцкий П.Р., Грицюк Ю.И. Классические методы шифровки информации простой заменой

Приведены некоторые классические методы шифрования/дешифрования информации простой заменой (подстановкой), которые являются основой современной криптографии. Установлено, что криптография в прошлом использовалась лишь в военных целях. Однако в настоящий момент, вместе с формированием информационного общества, криптография становится одним из основных инструментов, которые обеспечивают конфиденциальность, доверие, авторизацию, электронные платежи, корпоративную безопасность и множество других важных дел. Невзирая на доступность и понятность изложения информации в другой учебной литературе, большинство из приведенных там примеров касаются английского и русского алфавитов.

Ключевые слова: методы защиты информации, криптография, шифрование/дешифрование информации, шифровальная таблица Трисемуса, биграммный шифр Плейфера, криптографическая система Хилла, система омофонов.

Sulyatyckij P.R., Grytsyuk Yu.I. Classic methods of encryption of information by simple replacement

The classic methods of encryption/decryption of information a method of simple replacement (substitutions), which are basis of modern cryptography. It is set that cryptography in was the past used only in soldiery aims. However presently, together with forming of informative society, cryptography becomes one of basic instruments, which provide confidentiality, trust, authorizing, electronic payments, corporate safety and great number of other important businesses. Without regard to their availability and clearness of exposition in other educational literature, majority from the examples resulted there touch the English and Russian alphabets.

Keywords: methods of priv, cryptography, encryption/decryption of information, enciphering table of Trithemius, code Playfair (bigram cipher), the cryptographic system Hill, system of homophones.

УДК 539.374 Доц. Б.І. Гайвась¹, канд. фіз.-мат. наук; асист. І.Б. Борецька²

ОСУШЕННЯ ПОРИСТИХ ТІЛ У СУШИЛЬНИХ КАМЕРАХ ЗА М'ЯКИХ РЕЖИМІВ

Розв'язок задачі тепломасопереносу в пористій пластині в нестационарному режимі сушильного агента апробовано на осушенні деревини за м'якого трьохетапного режиму керування температурою. Показано незначний вплив тривалості етапів м'якого режиму сушильного агента на температуру фазового переходу в деревині.

¹ ЦММ ІППІММ ім. Я.С. Підстригача, м. Львів;

² НЛТУ України, м. Львів

Під час сушіння деревини запаси води в приповерхневих зонах стають вичерпаними. При цьому вологість стає меншою від границі насиченості та випаровування відбувається у глибині тіла [6, 7]. Якщо дисперсія розмірів пор за радіусами мала, то має зміст поняття про поверхню розділу фаз між осушеною і капілярною зонами [5, 6]. За побудови розв'язку розглядають дві зони: осушену і вологу.

З часом товщина осушеної зони збільшується і швидкість сушіння сповільнюється. Зміна вологовмісту внаслідок зміни 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. Рівномірність та симетрія двостороннього осушення матеріалів створюється циркуляцією сушильного агента.

Постановка задачі. Розглядають неізотермічне симетричне конвективне осушення пористої пластини товщини $2L$. У приповерхневих зонах відбувається перехід вологи з рідкого стану в газоподібний та виникнення конвективно-дифузійного потоку пари назовні. Ширина осушеної зони змінна в часі. Задача теплопровідності розв'язують як задачу зі змінною границею фазового переходу, закон руху якої, температуру і тиск фазового переходу T_m , P_n визначено внаслідок розв'язку спряженої задачі тепломасоперенесення. Тепломасоперенесення в осушеній зоні описується рівняннями теплопровідності, масоперенесення, рівнянням руху границі фазового переходу, крайовими умовами конвективного тепломасопереносу на зовнішній границі осушеної зони, умовами зв'язку між температурою фазового переносу і тиском насичення на рухомій границі, початковими умовами та законом зміни температури сушильного агента.

Розв'язок задачі теплопровідності. У рівнянні теплопровідності для осушеної зони

$$\left[\Pi c_v \rho_v + c_s (1 - \Pi) \rho_s \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_c \frac{\partial^2 T(z, \tau)}{\partial z^2} \quad (1)$$

необхідно перейти до безрозмірних змінних, використавши заміну

$$\tau = \frac{at}{L^2}, \quad \tau^* = \frac{a\tau^*}{L^2}, \quad \bar{z} = \frac{z}{L}, \quad a = \frac{\lambda_c}{\Pi c_v \rho_v + c_s (1 - \Pi) \rho_s},$$

де: λ_c – теплопровідність сухої зони, Π – пористість, c_s , ρ_s – теплоємність і густина скелету пористого тіла, c_v , ρ_v – теплоємність і густина пари.

Рівняння теплопровідності набуде вигляду

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}(\bar{z}, \tau) = \frac{\partial^2 T(\bar{z}, \tau)}{\partial \bar{z}^2}, \quad (2)$$

а граничні умови на границі $\bar{z} = 1$

$$\frac{\partial T}{\partial \bar{z}} + H[T - u(\tau)] = 0, \quad H = \frac{\tilde{\alpha} L}{\lambda}, \quad (3)$$

де $\tilde{\alpha}$ – коефіцієнт теплообміну, а на межі фазового переходу $\bar{z} = \bar{z}_m$ ($\bar{z}_m = \frac{L_m}{L}$),

L_m – координата межі фазового переходу,

$$T = T_m \quad (4)$$

Задачу розв'язують за початкової умови:

$$T(\bar{z}, 0) = f(\bar{z}). \quad (5)$$

Представлення розв'язку задачі теплопровідності у тригонометричному вигляді. Функцію управління температурою сушильного агента $u(\tau)$ представлено у вигляді тригонометричного ряду

$$u(\tau) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^p (\alpha_n \cos \nu_n^2 \tau + \beta_n \sin \nu_n^2 \tau). \quad (6)$$

Розв'язок задачі теплопровідності шукається у вигляді

$$T(\bar{z}, \tau) = T_1(\bar{z}, \tau) + T^*(\bar{z}, \tau), \quad (7)$$

де $T_1(\bar{z}, \tau)$ представляє розв'язок рівняння теплопровідності, який задовольняє граничним умовам задачі, але не задовольняє початковій. $T^*(\bar{z}, \tau)$ є розв'язком задачі теплопровідності, який задовольняє однорідним граничним умовам і такі початкові умови, за яких задовольняється умова (5).

$$T^*(\bar{z}, 0) = f(\bar{z}) - \bar{T}_0(\bar{z}),$$

де $\bar{T}_0(\bar{z})$ – значення температури $T_1(\bar{z}, \tau)$, яке отримується з розв'язку задачі за $\tau = 0$.

Розв'язок задачі $T_1(\bar{z}, \tau)$ шукається у вигляді

$$T_1(\bar{z}, \tau) = \varphi_0(\bar{z}) + \sum_{n=1}^p [\varphi_n(\bar{z}) \cos \nu_n^2 \tau + \chi_n(\bar{z}) \sin \nu_n^2 \tau], \quad (8)$$

де $\varphi_n(\bar{z})$ і $\chi_n(\bar{z})$ має вигляд [1]:

$$\varphi_n(\bar{z}) = a_n Y_1\left(\frac{\nu_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{\nu_n \bar{z}}{\sqrt{2}}\right) - b_n Y_2\left(\frac{\nu_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{\nu_n \bar{z}}{\sqrt{2}}\right) + c_n Y_3\left(\frac{\nu_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{\nu_n \bar{z}}{\sqrt{2}}\right) - d_n Y_4\left(\frac{\nu_n \bar{z}}{\sqrt{2}}, \frac{\nu_n \bar{z}}{\sqrt{2}}\right), \quad (9)$$

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

$$(n = 1, 2, \dots, p;) \quad (10)$$

а $T^*(\bar{z}, \tau)$ визначено так:

$$T^*(\bar{z}, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin \mu_n(\bar{z} - \bar{z}_m)}{\mu_n} \exp(-\mu_n^2 \tau)$$

$$A_n = \frac{1}{\Delta_n(\mu_n, \bar{z}_m)} \int_{\bar{z}_m}^1 f_1(\bar{z}) \left[\cos \mu_n(1 - \bar{z}) + \frac{H}{\mu_n} \sin \mu_n(1 - \bar{z}) \right] d\bar{z}$$

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

$$f_1(\bar{z}) = f(\bar{z}) - \bar{T}_0, \text{ де } \bar{T}_0 = T_1(\bar{z}, 0) = \sum_{n=0}^p \varphi_n(\bar{z}).$$

$$T_0^*(\bar{z}, \bar{z}_m) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n (\bar{z} - \bar{z}_m)}{\mu_n} A_n^*(\bar{z}_m) e^{-\mu_n^2 \tau}, \quad (11)$$

$$A_n^* = \frac{2T_0 H}{\Delta_n} \left\{ \frac{\sin \mu_n (1 - \bar{z}_m)}{\mu_n} - \frac{H}{\mu_n^2} [\cos \mu_n (1 - \bar{z}_m) - 1] \right\} \quad (12)$$

Вклад у $T^*(\bar{z}, \bar{z}_m)$ від суми $\sum_{n=1}^p \varphi_n(\bar{z})$ представлено у вигляді

$$T_{\varphi}^* = - \int_{\bar{z}_m}^1 \sum_{k=1}^p \varphi_n(\xi) \times T_3(\bar{z}, \bar{z}_m, \xi, \tau) d\xi$$

$$T_3(\kappa, \kappa_m, \xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} 2H \frac{\left[\frac{\sin \mu_n (\kappa - \kappa_m)}{\mu_n} \right] \left[\cos \mu_n (1 - \xi) + H \frac{\sin \mu_n (1 - \xi)}{\mu_n} \right] e^{-\mu_n^2 \tau}}{\cos \mu_n (1 - \kappa_m) \left[(\mu_n^2 + H^2)(1 - \kappa_m) + H \right]},$$

де μ_n – корені трансцендентного рівняння $\operatorname{tg} \mu_n = -\frac{\mu_n}{H(1 - \kappa_m)}$.

Таким чином, температуру за довільного конвективного нагрівання і залежно від часу, можна записати у вигляді:

$$T(\bar{z}, \tau) = \varphi_0(\bar{z}) + \sum_{n=1}^p \left[\varphi_n(\bar{z}) \cos \nu_n^2 \tau + \chi_n(\bar{z}) \sin \nu_n^2 \tau \right] +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n (\bar{z} - \bar{z}_m)}{\mu_n} B_n(\bar{z}_m) e^{-\mu_n^2 \tau} \quad (13)$$

де $B_n(\bar{z}_m)$ визначається так:

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

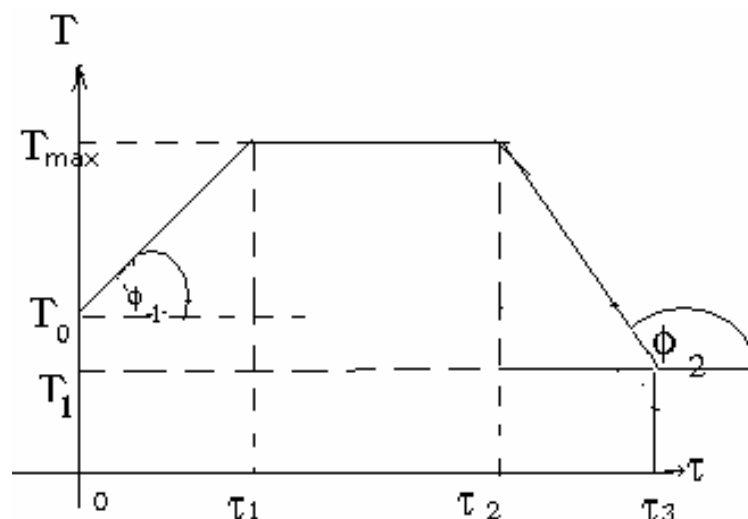
$$\sum_{k=1}^p \left\{ a_k(\bar{z}_m) \left[\tilde{Z}_{nk1}^* \left(\frac{\nu_k}{\sqrt{2}} \right) - \tilde{Z}_{nk1}^* \left(\frac{\nu_k \bar{z}_m}{\sqrt{2}} \right) \right] - \right.$$

$$- b_k(\kappa_m) \left[\tilde{Z}_{nk2}^* \left(\frac{\nu_k}{\sqrt{2}} \right) - \tilde{Z}_{nk2}^* \left(\frac{\nu_k \kappa_m}{\sqrt{2}} \right) \right] + c_k(\kappa_m) \left[\tilde{Z}_{nk3}^* \left(\frac{\nu_k}{\sqrt{2}} \right) - \tilde{Z}_{nk3}^* \left(\frac{\nu_k \kappa_m}{\sqrt{2}} \right) \right] -$$

$$\left. d_k(\kappa_m) \left[\tilde{Z}_{nk4}^* \left(\frac{\nu_k}{\sqrt{2}} \right) - \tilde{Z}_{nk4}^* \left(\frac{\nu_k \kappa_m}{\sqrt{2}} \right) \right] \right\}. \quad (14)$$

А $a_n(\bar{z}_m)$, $b_n(\bar{z}_m)$, $c_n(\bar{z}_m)$, $d_n(\bar{z}_m)$ визначаються з граничної умови на поверхні осушеної зони та рухомої границі фазового переходу.

Нехай керування сушінням – триетапне, а саме: функція керування температурою сушильного агента є лінійною функцією на стадії розігріву, сталою величиною на стадії витримки і лінійною функцією – на стадії охолодження до температури T_1 .



Розклад цієї функції періоду $2\tau_3$ у тригонометричний ряд по косинусам має вигляд

$$T(\tau) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \cos \frac{n\pi}{\tau_3} \tau,$$

$$\alpha_0 = \frac{2}{\tau_3} \left[T_{\max} \left(-\frac{\tau_1}{2} + \frac{\tau_2}{2} + \frac{\tau_3}{2} \right) + T_0 \frac{\tau_1}{2} + T_1 \left(-\frac{\tau_2}{2} + \frac{\tau_3}{2} \right) \right],$$

$$\alpha_n = \frac{2}{\tau_3} \left[\frac{(T_{\max} - T_0)}{\tau_1 \nu_n^4} (\cos \nu_n^2 \tau_1 - 1) + \frac{T_{\max}}{\nu_n^2} (\sin \nu_n^2 \tau_2 - \sin \nu_n^2 \tau_1) \right] +$$

$$+ \frac{2}{\tau_3} \left\{ -\frac{T_{\max} \tau_3 - T_1 \tau_2}{\tau_3 - \tau_2} \frac{\tau_2}{n\pi} \sin \nu_n^2 \tau_2 - \frac{T_{\max} - T_1}{\tau_3 - \tau_2} \left(\frac{1}{\nu_n} \right)^4 \left[(-1)^n - \cos \nu_n^2 \tau_2 - \frac{n\pi \tau_2}{\tau_3} \sin \nu_n^2 \tau_2 \right] \right\}. \quad (15)$$

$$\nu_n^2 = \frac{n\pi}{\tau_3}$$

Задача вологопровідності в процесі конвективного осушення.

Розв'язок задачі вологопровідності знаходиться з рівнянь масоперенесення пароповітряної суміші в порах осушеної зони з врахуванням конвективного, дифузійного та ефузійного потоків у вигляді рівнянь Стефана-Максвелла [6, 7].

Рівняння масоперенесення в осушеній зоні тіла під час врахування дифузійного, ефузійного, конвективного та теплового потоків мають вигляд

$$\rho_v \frac{K}{\mu_g} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_1 \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right) \right] = 0, \quad \rho_a \frac{K}{\mu_g} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + D_1 \frac{\partial^2 \rho_a}{\partial z^2} = 0 \quad (16),$$

де: $D_1 = \left(D + 1,064 \sqrt{\frac{RT}{M_v}} \varepsilon \right)$, ε – коефіцієнт молекулярного течіння пари. На поверхнях пористої пластини мають місце умови конвективного масообміну. В зв'язку з симетрією задачі приведено їх для однієї з половинок. Умови на поверхнях $z = L$ та $z = L_m$ газової зони запишуться так:

$$\rho_v \frac{K}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial z} + D_1 \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right) = -\tilde{\beta} (\rho_v - \rho_0), \quad \rho_a = \rho_{a0} \text{ на поверхні } z = L_0, \quad (17)$$

$$\rho_v = \rho_n \text{ на поверхні } z = L_m, \quad (18)$$

де: $\tilde{\beta}$ – коефіцієнт масообміну, ρ_n – густина насиченої пари за відповідної температури, ρ_0 – густина пари в середовищі поза пористим тілом [5, 6].

Якщо ввести змінні: $\xi, \eta, \bar{z} : \rho_a = \rho_{a0}\xi, \rho_v = \rho_n\eta, z = L_0\bar{z}$,

$$\tilde{a} = \frac{D_1 M_a \mu_g}{K \rho_{a0} R T_s}, \quad \tilde{b} = \frac{\rho_n}{\rho_{a0}} \frac{M_a}{M_v}, \quad D_1 = (D + 1,064 \varepsilon \sqrt{\frac{R T_s}{M_v}}), \quad \beta' = \frac{L_0 \beta}{D_1}, \quad (19)$$

де T_s – середня температура, то можна лінеаризувати вихідну систему рівнянь. Тут ρ_{a0} – густина повітря на зовнішніх стінках пластини. Інтегрується рівняння системи (16). Тоді густина пари $\eta(\bar{z}, \bar{z}_m)$ визначиться так:

$$\eta = \left[-A + \sqrt{(A+1)^2 - 2B(\eta_1 - \eta_0)(\bar{z} - \bar{z}_m)} \right]. \text{ На поверхні } \bar{z} = 1 \text{ є рівність}$$

$$\frac{b}{(1+a)} \frac{(\eta_1^2 - 1)}{2} + \eta_1 - 1 + \beta'(\eta_1 - \eta_0)(1 - \bar{z}_m) = 0,$$

розв'язок якої визначає величину безрозмірної густини пари на зовнішній поверхні пластини $\bar{z} = 1$. Зміна ширини осушеної зони позначається $\bar{z}_m^* = 1 - \bar{z}_m$. Фізично прийнятна вітка розв'язку має вигляд

$$\eta_1 = -\left(A + B\bar{z}_m^* \right) + \sqrt{U + S\bar{z}_m^* + B^2\bar{z}_m^{*2}}, \quad (20)$$

$$\text{де: } A = \frac{(1 + \tilde{a})}{\tilde{b}}, \quad B = -\beta' A, \quad U = (A+1)^2, \quad S = 2B(A + \eta_0).$$

Густина пари, величина потоку j та тиск $P(\bar{z}, \bar{z}_m)$ визначається за формулами:

$$j = H \left\{ -\left(a_1 + B\bar{z}_m^* \right) + \sqrt{U + S\bar{z}_m^* + B^2\bar{z}_m^{*2}} \right\}, \quad (21)$$

$$\text{де: } a_1 = A + \eta_0, H = \beta \rho_n,$$

$$P(\bar{z}, \bar{z}_m) = \frac{\rho_n \eta}{M_v} R T(\bar{z}) = \left[-A + \sqrt{(A+1)^2 - 2B(\eta_1 - \eta_0)(\bar{z} - \bar{z}_m)} \right] \frac{\rho_n}{M_v} R T(\bar{z}, \bar{z}_m), \quad (22)$$

де η_1, η_0 – відносна насиченість пари на поверхні пластини та в сушильному агенті.

Визначення температури фазового переходу з врахуванням градієнта температури за товщиною пластини. Температура фазового переходу T_m та тиск насичення P_n знаходимо з умов

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{z}} \Big|_{\bar{z}=\bar{z}_m} = r_k \frac{K_g}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial \bar{z}} \Big|_{\bar{z}=\bar{z}_m} \text{ та } T_m = T_{mk} + \alpha_{mk} P_n \quad (23)$$

і лінеаризованої залежності між температурою та тиском фазового переходу $T_m = T_{mk} + \alpha_{mk} P_n$, де T_{mk}, α_{mk} знаходимо шляхом лінеаризації формули Філоненка [2]. Знехтувавши градієнтом температури, отримано такий вираз для температури фазового переходу:

$$T_m \approx T_{mk} \left[\frac{B}{A+1} (\eta_1 - \eta_0) + \alpha_{12} \right] / \left[\frac{B}{A+1} (\eta_1 - \eta_0) + \alpha_{12} (1 + c_{11}) \right] \quad (24)$$

Визначення залежності між часом і шириною осушеної зони за м'яких режимів. З рівнянь балансу маси рідини в процесі сушіння отримаємо рівняння для визначення зміни координати фазового переходу в часі та рівняння руху межі розділу фаз рідина – газ

$$\frac{dz_m^*}{d\tau} = \frac{j(z_m^*)}{\Pi \rho_L L} = \frac{\tilde{\beta} \rho_{n0} T_0}{\Pi \rho_L L (T_0 + T_m(\tau))} \left[- (a_1 + B z_m^*) + \sqrt{U + S z_m^* + B^2 z_m^{*2}} \right] \quad (25)$$

за початкової умови: $z_m^* = 0$, якщо $\tau = 0$. (26)

Використовуючи вираз для температури фазового переходу і враховуючи заміну $\sqrt{U + S z_m^* + B^2 z_m^{*2}} = \tilde{\chi} + z_m^* B$, отримуємо розв'язок задачі (25) та (26)

$$\begin{aligned} & \frac{4B}{H} \left\{ \frac{A_0}{2B} \ln \left| \frac{2\tilde{\chi}B - S}{2\sqrt{UB} - S} \right| - \frac{C_0}{2B} \left[\frac{1}{(2\tilde{\chi}B - S)^2} - \frac{1}{(2\sqrt{UB} - S)^2} \right] \right\} + \\ & + \frac{4B}{H} A_1 \ln \left| \frac{\tilde{\chi} - a_3}{\sqrt{U} - a_3} \right| + \frac{2}{H} \left\{ B_1 \ln \left| \frac{2\tilde{\chi}B - S}{2\sqrt{UB} - S} \right| - C_1 \left[\frac{1}{2\tilde{\chi}B - S} - \frac{1}{2\sqrt{UB} - S} \right] \right\} - \\ & - 2 \frac{D_1}{H} \left[\frac{1}{(2\tilde{\chi}B - S)^2} - \frac{1}{(2\sqrt{UB} - S)^2} \right] = \tau, \end{aligned}$$

де $A_0 = -\frac{1}{4B}$, $C_0 = B(a_1^2 - U)$, $B_0 = 0$, $A_1 = -\frac{1}{4B} \left[1 + \frac{(-a_3^2 + 2a_1a_3 - U)(a_3 - a_2)}{(a_3 - a_1)^3} \right]$,

$$D_1 = \frac{(-a_3^2 + 2a_1a_3 - U)(a_3 - a_2)}{8B^2(a_3 - a_1)^3}, \quad B_1 = \frac{(a_2 - a_3)}{2} \left[1 + \frac{(-a_3^2 + 2a_1a_3 - U)}{(a_3 - a_1)^2} \right]$$

$$C_1 = \frac{(a_1 - a_2)}{(a_1 - a_3)} B(a_1^2 - U); \quad \tilde{\chi} = \sqrt{U + S z_m^* + B^2 z_m^{*2}} - z_m^* B. \quad (27)$$

Вираз (27) визначає залежність між часом сушіння і координатою межі осушеної зони z_m .

Цей алгоритм апробовано на моделі сушіння деревини (сосни). За вихідні дані взято такі параметри: порода деревини: сосна, довжина пластини $l = 1$ м; півтовщина дошки, $L_0 = 0,022$ м; вологовміст (початковий) $U_0 = 0,4$ (кг/кг); температура початкова, $t_0 = 20$ (°C) = 293 °K; температура середовища, $t_s = 40$ (°C) = 313 °K; 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); густина базисна, $\rho_b = 415$ (кг/м³); пористість $\Pi = 0,6$; середній розмір частинок скелету $d = 0,01$ м, $D = 0,001224126$ (м²/год); густина насиченої пари $\rho_n = 0,013188$ (кг/м³); $\rho_{a0} = 1,29$ (кг/м³); $\rho_L = 1000$ (кг/м³); коефіцієнт вологообміну $\beta = 0,000976$ (м/год); коефіцієнт теплообміну, $\alpha = 22,32599$ (Вт/м²·град); коефіцієнт теплопровідності, $\lambda = 0,299993$ (Вт/м·град).

Внаслідок числового аналізу отримано:

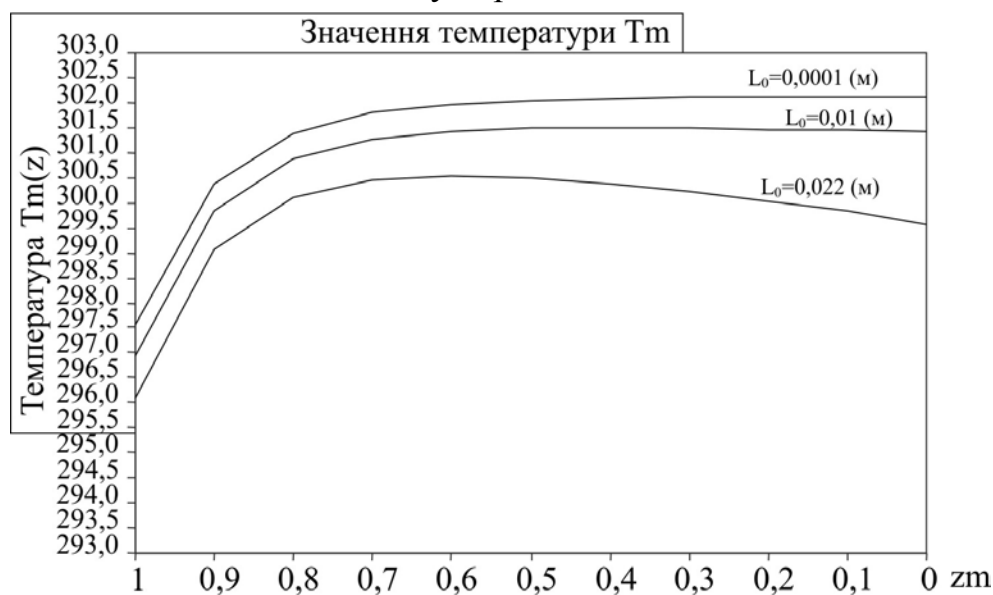


Рис. 1. Залежність температури фазового переходу

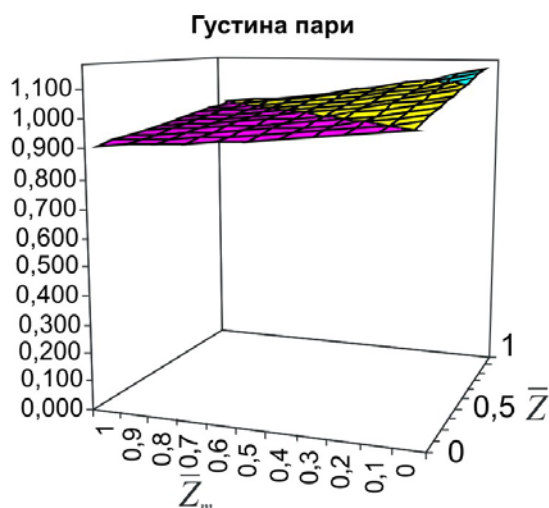


Рис. 2. Густина пари $\eta(\bar{z}, \bar{z}_m) T_m$ від товщини пластини

Табл. Залежність тиску $P(\bar{z}, \bar{z}_m)$ в довільній точці перерізу за зміни координати границі фазового переходу (в МПа)

$(\bar{z}_m, \bar{z})$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	0,1650	0,1666	0,1681	0,1696	0,1711	0,1727	0,1742	0,1757	0,1772	0,1788	0,1803
0,9	0,1676	0,1692	0,1708	0,1724	0,1740	0,1757	0,1773	0,1789	0,1805	0,1821	0,1837
0,8	0,1692	0,1709	0,1726	0,1743	0,1760	0,1776	0,1793	0,1810	0,1827	0,1844	0,1861
0,7	0,1705	0,1723	0,1741	0,1758	0,1776	0,1794	0,1811	0,1829	0,1847	0,1865	0,1882
0,6	0,1718	0,1737	0,1755	0,1774	0,1792	0,1811	0,1830	0,1848	0,1867	0,1885	0,1904
0,5	0,1731	0,1751	0,1771	0,1790	0,1810	0,1829	0,1849	0,1869	0,1888	0,1908	0,1927
0,4	0,1746	0,1767	0,1787	0,1808	0,1829	0,1849	0,1870	0,1891	0,1912	0,1932	0,1953
0,3	0,1762	0,1784	0,1806	0,1828	0,1850	0,1872	0,1894	0,1916	0,1938	0,1959	0,1981
0,2	0,1780	0,1803	0,1827	0,1850	0,1873	0,1897	0,1920	0,1943	0,1967	0,1990	0,2013
0,1	0,1801	0,1825	0,1850	0,1875	0,1900	0,1925	0,1950	0,1975	0,1999	0,2024	0,2049
0	0,1824	0,1850	0,1877	0,1904	0,1930	0,1957	0,1984	0,2010	0,2037	0,2064	0,2090

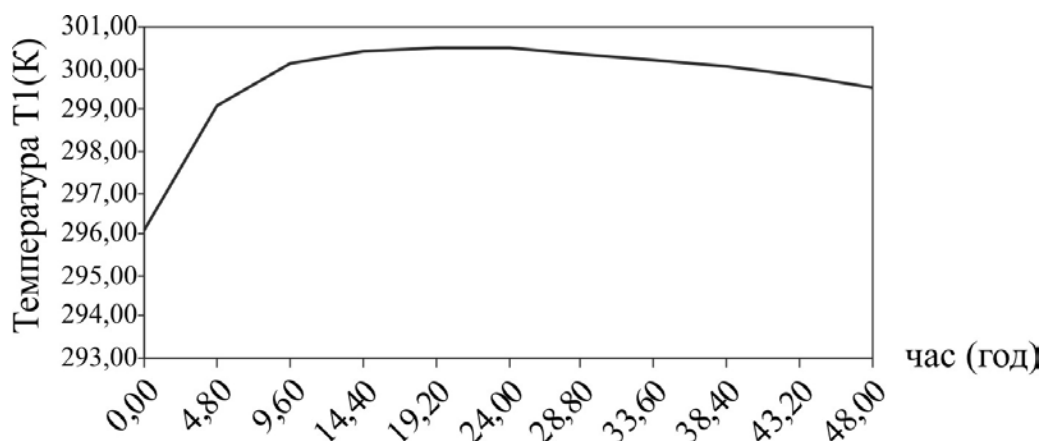


Рис. 3. Залежність зміни складової температури $T_1(\bar{z}, \tau)$ в часі

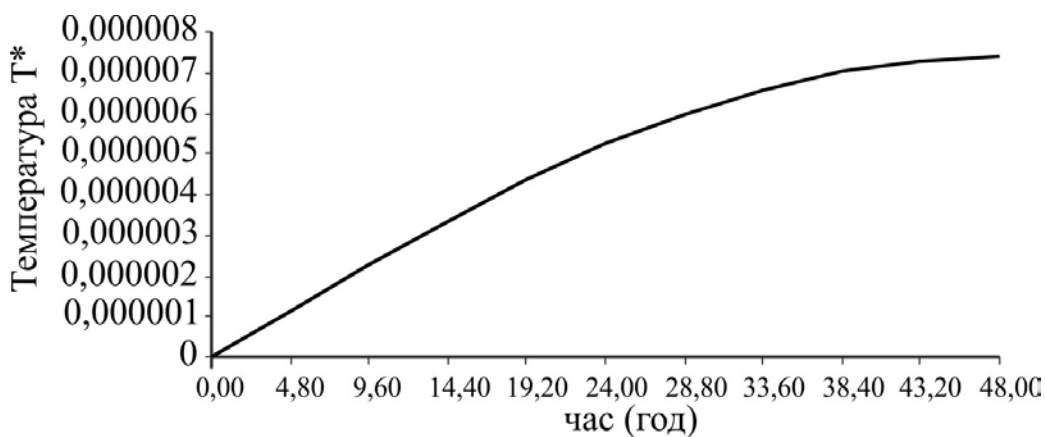


Рис. 4. Залежність зміни складової температури $T^*(\bar{z}, \tau)$ в часі

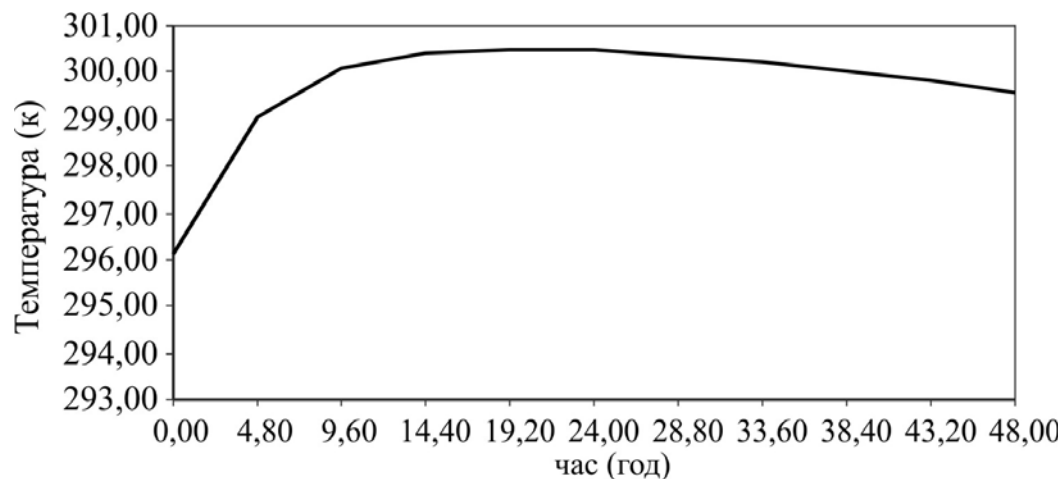


Рис. 5. Залежність зміни величини $T(\bar{z}, \tau) = T_1(\bar{z}, \tau) + T^*(\bar{z}, \tau)$ в часі

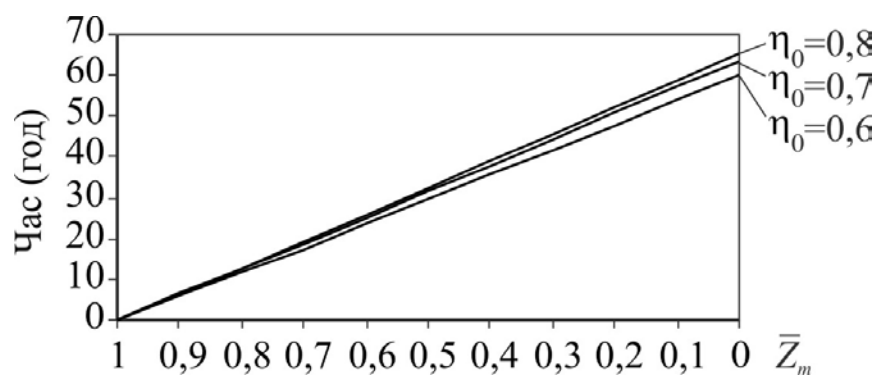


Рис. 6. Зміна координати фазового переходу в часі

Висновки. Як впливає з емпіричних формул Шубіна, теплопровідність тіла зростає з вологовмістом і початковою температурою. Це призводить до того, що випаровування при цьому більш інтенсивне і поглиблення границі фазового переходу відбувається за нижчої температури, ніж коли вологовміст менший. Таким чином, саме внутрішній теплоперенос у цьому випадку є визначальним. Температура фазового переходу з ростом товщини пластини менша. Чим менша насиченість сушильного агента, тим за меншої температури настає поглиблення границі фазового переходу. З отриманих числових результатів випливає, що вплив складової температури $T^*(\bar{z}, \tau)$ на розв'язок за м'яких режимів (за зміни температури сушильного агента від 20 °С до 40 °С) є нехтовно малим і зміна режиму нагріву й охолодження мало впливає на тепломасоперенос в пластині. Інтенсивність фазових переходів залежить також від різниці тисків у порах і в сушильному агенті.

Література

1. **Вигак В.М.** Оптимальное управление нестационарными температурными режимами. / В.М. Вигак. – К. : Вид-во "Наук. думка", 1979. – 359 с.
2. **Вукалович М.П.** Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М. : Изд-во "Машиностроение", 1967. – 365 с.
3. **Гринчик Н.Н.** К проблеме моделирования взаимодействия нестационарных электрических, тепловых и диффузионных полей в слоистых средах / Н.Н. Гринчик, В.А. Цурко // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75, № 3. – С. 135-141.
4. **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. (7).
5. **Гайвась Б.І.** Вплив дисперсії розмірів пор на напружено-деформований стан пористого шару при несиметричному осушенні / Б. Гайвась // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології : наук. зб. – Львів : Вид-во ЦММ ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України. – 2007. – Вип. 5. – С. 19-29.
6. **Гайвась Б.І.** Математичне моделювання процесів сушіння капілярно-пористих плоских об'єктів з урахуванням руху границі фазового переходу / Б.І. Гайвась // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур : матер. VIII Міжнар. наук. конф., 14-17 серпня 2010 р. – Львів : Вид-во ЦММ ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України, 2010. – С. 214-216.
7. **Гринчик Н.Н.** Інтенсивність фазових переходів / Н.Н. Гринчик, В.А. Цурко // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75, № 3. – С. 135-141.

Гайвась Б.І., Борецкая И.Б. Осушение пористых тел в сушильных камерах при мягких режимах

Решение задачи тепломассопереноса в пористой пластине в нестационарном режиме сушильного агента апробировано на осушении древесины при мягком трехэтапном режиме управления температурой. Показано незначительное влияние длительности этапов мягкого режима сушильного агента на температуру фазового перехода в древесине.

Gayvas B.I., Boretska I.B. The drainage of porous bodies in drying chambers at soft modes

The solution to the problem of heat and mass transfer in a porous plate in an ambulatory mode of the drying agent has been approbated on the drainage of wood at a soft three-stage mode of the temperature control. An inconsiderable effect of drying agent soft mode stages duration on the phase transition temperature in wood has been demonstrated.