

3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ЛІСОВИРОБНИЧОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 674*047,3

*Проф. І.М. Озарків, д-р техн. наук;
аспір. В.С. Козар – НЛТУ України, м. Львів*

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ГЕЛІОСУШАРЦІ

Наведено теоретичні дослідження процесу конвективно-радіаційного сушіння. Отримано рівняння, що базуються на використанні теорії променевого тепломасообміну і дають змогу розраховувати температуру в будь-якій зоні сортимента із врахуванням оптичних властивостей деревини. Це дає змогу прогнозувати інтенсивність сушіння.

Ключові слова: конвективно-радіаційне сушіння, геліосушарка, геліотермічні колектори, температурне поле.

Вступ. Відомо [1], що в сонячній сушильній установці має місце комбіноване конвективно-радіаційне сушіння деревини, тобто, коли штабель пиломатеріалів обдуває підігріте повітря та опромінює потік сонячного випромінювання, яке безпосередньо пройшло через прозоре скло передньої та бокових стінок камери, а також частково вторинним випромінюванням від геліотермічних колекторів. Віддачу тепла внаслідок теплопровідності стараються припинити шляхом зменшення безпосереднього контакту об'єкта сушіння із нагрітими конструктивними елементами сушарки. Це дає змогу не тільки спростити математичні операції, але й розширити можливості аналітичних розв'язків. Зокрема, в разі нехтування втратами тепла внаслідок теплопровідності спрощується обчислення температурного поля у зовнішньому шарі деревини, а також істотно полегшується облік залежності теплофізичних параметрів сушіння від температури агента сушіння. Крім того, нехтування теплопровідністю в умовах конвективно-радіаційного сушіння під час визначення нестационарних температурних полів дає нам змогу безпосередньо перейти до розрахунку надлишкових температур, оминаючи при цьому задачі теплопровідності за рахунок оптичних характеристик інфрачервоного випромінювання.

Об'єкт та методика. Об'єктом дослідження є механізм процесів конвективно-радіаційного сушіння деревини на базі сонячного випромінювання. Для оцінювання впливу густини випромінювання на тривалість сушіння деревини різних порід у діапазоні температур 20...100 °С у діапазоні довжин хвиль монохроматичного випромінювання 1...10 мкм, ми у [2] здійснили відповідні обчислення із використанням ЕОМ, що дозволило розробити і надалі використовувати отриману математичну модель для розрахунку конвективно-радіаційних сушарок.

Обговорення та результати. В інженерній практиці теплові витрати, пов'язані з конвективним теплообміном, набагато переважають витрати, які зумовлені сонячним випромінюванням. Тим більше, що це має місце в геліоустановках із примусовою циркуляцією нагрітого повітря.

Особливим випадком є визначення температури та побудова кінетичних кривих нагрівання деревних сортиментів із врахуванням конвективної та променевої складових теплообміну. Зазначимо, що отримати рівняння, які дали б змогу розрахувати температурні поля, з допомогою простих аналітичних методів дуже складно. Щоб виконати розрахунок процесів нагрівання та сушіння деревини в геліоустановках із використанням спеціальних геліотермічних колекторів, потрібно попередньо знати зміну значень спектрального коефіцієнта поглинання $\bar{A}_\lambda$, показника поглинання променів деревиною m_λ , коефіцієнта випромінювальної здатності складових променевого теплообміну $\bar{\epsilon}_\lambda$, коефіцієнта теплообміну α_k тощо.

В умовах геліосушіння під час розрахунку температурних полів треба ввести коефіцієнт, який враховував би відношення величини опроміненої поверхні штабеля пиломатеріалів $F_{опр}$ до величини всієї поверхні F , яка бере участь в конвективно-променевому теплообміні, тобто

$$k_f = F_{опр} / F. \quad (1)$$

Тоді залежність між максимальною температурою t_{max} в геліосушарці та температурою повітря t_c , як агента сушіння, можна записати

$$t_{max} = t_c + \frac{\bar{A}_\lambda \cdot E_{п.м} \cdot k_f}{\alpha_k}, \quad (2)$$

де: $E_{п.м.}$ – густина променевого потоку на опроміненій поверхні матеріалів. (енергетична опроміненість); α_k – коефіцієнт комбінованого теплообміну.

Зауважимо, що в процесі сушіння вентилятори в сонячній сушильній камері працювали тільки вдень для періодичного перемішування нагрітого повітря (вентилятори вмикали щогодини на 10 хв) для регулювання рівномірності температурних полів всередині сушарки.

В умовах, коли немає примусової циркуляції, тобто конвективна складова теплового потоку в процесі конвективно-радіаційного сушіння в геліоустановці буде мінімальною (в умовах природної конвекції) або дорівнюватиме нулю, то з урахуванням поширення теплоти в матеріалі (об'єкті сушіння) внаслідок теплопровідності можна записати для поверхні F і за час τ

$$q_{теплопров} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (3)$$

а відношення радіаційної складової $q_{випр}$ до $q_{теплопр.}$ буде дорівнювати

$$\bar{B}_{випр} = \frac{q_{випр}}{q_{теплопр}} = \frac{\sigma_0 \cdot T^4}{\lambda \cdot \frac{dT}{dx}} = \frac{\sigma_0 \cdot T^4 \cdot dx}{\lambda \cdot dT} = \frac{\sigma_0 \cdot T^3}{\lambda} \cdot R, \quad (4)$$

де: R – визначальний або характерний розмір тіла ($R = \frac{\delta}{2}$, δ – товщина матеріалу, що сушиться); λ – коефіцієнт теплопровідності деревини.

Інакше кажучи, отриманий нами критерій $\bar{B}_{випр}$ буде враховувати радіаційний складник потоку тепла.

Із виразу (2) видно, що для підвищення частки використання енергії випромінювання доцільно підвищити температуру повітря в камері (особливо в тих зонах сушарки, де температура поверхні матеріалу має велику величину). Тобто внаслідок конвективної тепловіддачі температура матеріалу T_m ($T_m \equiv T_{n.m}$) знизиться. Це свідчить про те, що температура деревини може бути підвищена двома шляхами: за рахунок збільшення інтенсивності опромінення (додатковим встановленням геліотермічних колекторів) або за рахунок підвищення температури агента сушіння (повітря) у сушильній камері.

Для оцінювання конвективної складової теплового потоку в геліосушарці, коли $\frac{B_i}{\bar{B}_{випр}} < 1$ (критерій Біо; $\bar{B}_{випр}$ – радіаційний критерій,

$\bar{S}_{випр} = \frac{\sigma_0 \cdot R}{\lambda} \cdot T^3$, R – характерний розмір, λ – критерій теплопровідності матеріалу), доцільно ввести об'єднаний критерій конвективно-радіаційного сушіння, тобто

$$B_{\Sigma} = \bar{B}_{випр} + \frac{B_i}{\bar{B}_{випр}} \cdot \varepsilon_f \quad (5)$$

де ε_f – коефіцієнт, який враховує вид сортименту, тобто необмежені пластину чи циліндр (для пластини – $\varepsilon_f = 0,275$).

В умовах конвективно-радіаційного теплообміну температура необмеженої пластини в точці з координатою x за час τ визначається за формулою [2]

$$t_{\infty} = t_{\max} - (t_{\max} - t_0) \cdot \exp\left(-\frac{k_f \cdot \alpha_{\Sigma} \cdot \tau}{C_m \cdot \rho_m \cdot x}\right), \quad (6)$$

де t_0 – початкова температура пластинчатого сортименту; α_{Σ} – сумарний коефіцієнт теплообміну.

Останню формулу виразимо через безрозмірну температуру

$$\bar{\Theta} = \frac{t_{\infty} - t_0}{t_{\max} - t_0}. \quad (7)$$

Тоді рівняння (6) можна представити виразом

$$\bar{\Theta} = 1 - \exp(-k_f \cdot Fo \cdot B_i), \quad (8)$$

де Fo критерій Фур'є, $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$.

Формула (8) є частковим випадком відомого класичного розв'язання рівняння, що відображає нагрівання необмеженої пластини за крайової умови третього роду, тобто

$$\bar{\Theta} = 1 - \sum_{i=1}^n B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo}. \quad (9)$$

Обмежившись першим членом ряду і прийнявши для малих значень B_i ($B_i < 0,10$) $B_n \approx 1$ і замінивши при малих значеннях μ_1 величину

$$ctg \mu_n = \frac{1}{B_i} \cdot \mu_n, \quad (10)$$

на $tg \mu_1 \approx \mu_1$ тобто прийняти, що $\mu_1^2 \approx B_i$, то отримаємо, що показник ступеня буде дорівнювати

$$K = k_f \cdot F_0 \cdot B_i = k_f \cdot \frac{\lambda \cdot \tau^2}{C_m \cdot \rho_m \cdot R^2} \cdot \frac{\alpha_\Sigma}{\lambda} \cdot x = \frac{\alpha_\Sigma}{C \cdot \rho \cdot R} \cdot \tau. \quad (11)$$

Таким чином, рівняння для визначення температури пластини t в точці з координатою x у момент часу τ буде таким:

$$(t_\infty - t_0) = (t_{\max} - t_0) \cdot (1 - e^{-K \cdot \tau}). \quad (12)$$

Аналізуючи останню формулу, ми бачимо, що із підвищенням величини K значення τ зменшується. Інакше кажучи, збільшення α_Σ та зменшення теплоаккумуляційної здатності матеріалу ($\rho \cdot C$), а також підвищення температури t_c буде викликати зменшення часу сушіння. Остання формула вказує на її графічне відображення, що виражало б приріст температури (наприклад, по осі ординат відкладати різницю $(t - t_0)$, а по осі абсцис чинник часу $(K \cdot \tau)$ за різних значень різниці $(t_{\max} - t_0)$). Аналіз формул (2), (3) і (12) показує, що із підвищенням показника K величина τ зменшується, тобто збільшення коефіцієнта a_k та зменшення акумуляційної здатності деревини ($\rho \cdot C$), як і підвищення температури сушильного агента зменшує тривалість процесу сушіння.

Висновки і узагальнення. Одним із основних результатів впливу на деревину концентрованих потоків енергії, до яких належить й інфрачервоне випромінювання, є зміна температури в окремих зонах об'єму й поверхні матеріалу. Часткова прозорість деревини під час випромінювання приводить до поглинання енергії випромінювання в межах поверхневого шару деревини кінцевої товщини. Поглинаючий шар – це розподілене джерело тепла, тобто зона концентрованого потоку енергії. На поверхні тіла або в його середині, починаючи з певного часу, буде діяти джерело тепла, яке певним чином буде розподіленим в окремих зонах матеріалу і в часі. Поглинання випромінювання еквівалентне появі джерела тепла всередині і на поверхні деревини.

Точніші результати розрахунків температурних полів можуть бути отримані в разі врахування характеру змін теплофізичних властивостей матеріалу, що приводить до необхідності розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь теплопровідності. Розв'язання задач ускладнюється ще й тим, що джерело тепла, внаслідок залежності поглинаючої здатності від температури, також додатково вносить нелінійність у диференціальні рівняння. Із числа нелінійних задач теплової оброблення (нагрівання, сушіння) концентрованими потоками енергії найбільш практичну цінність отримали задачі нагрівання ізотропного тіла, коли λ і c залежить від температури. Тому, дослідники часто звертаються до різних наближених способів розв'язання цих задач на основі аналітичних уявлень, числових методів, принципів моделювання, статистичних методів і т. ін. Хоча, під час розроблення того чи іншого розрахункового методу аналізу теплових процесів внаслідок опромінення необхідно врахувати низку особливостей: зокрема, під час комбінованого сушіння має міс-

це високоінтенсивне нагрівання в широкому діапазоні зміни температур (від нормальної до температури кипіння води), а також поглинання променів і перевипромінювання самого матеріалу. Тому, під час комбінованого сушіння розрахункове визначення температурних полів потрібно здійснювати на основі кінетики процесу сушіння із врахуванням динаміки тепло- і масообміну в матеріалі.

У процесі нагрівання тонкого матеріалу (лущеного або струганого шпону, паркетної фрези, тарних дощочок) інфрачервоним випромінюванням за малих значень критерію Біо ($B < 0,10$) має місце променевий і конвективний теплообмін.

Тому, враховуючи останнє, балансове рівняння тепло-і масообміну в процесі конвективно-радіаційного сушіння можна записати

$$q_{вунр} + \alpha_k (t_c - t_{П.М}) = C \cdot \rho_0 \cdot R \frac{dt}{d\tau}, \quad (13)$$

де C , ρ_0 – відповідно питома теплоємність і густина абсолютно сухої деревини.

З огляду на те, що в стаціонарному стані критерій Фур'є прямує до ∞ ($\frac{dt}{d\tau} = 0$), то температура деревини t_∞ буде дорівнювати

$$t_\infty = t_c + \frac{q_{вунр}}{\alpha_k} \cdot k_f. \quad (14)$$

Література

1. Озарків І.М. Використання сонячної енергії у промисловості : навч. посібн. / за ред. д-ра техн. наук І.М. Озарківа / І.М. Озарків, З.П. Копинець. – Львів : НВФ "Українські технології", 2008. – 276 с.

2. Озарків І.М. Науково-технічні основи конвективно-радіаційного сушіння деревини : дис. ... д-ра техн. наук. – Львів : Вид-во НЛТУ України, 2006. – 404 с.

Озаркив И.М., Козар В.С. Особенности расчета температурных полей в гелиосушилке

Приведены теоретические исследования процесса конвекционно-радиационной сушки. Получены уравнения, которые базируются на использовании теории лучистого теплообмена, и позволяют рассчитать температуру в той или иной зоне сортамента с учетом оптических свойств древесины. Это позволит спрогнозировать интенсивность сушки.

Ключевые слова: конвективно-радиационная сушка, гелиосушилка, древесина, гелиотермические коллекторы, температурное поле.

Ozarkiv I.M., Kosar W.S. Features calculation temperature fields in heliodrying chamber

The findings of the theoretical research of process of convective-radiation drying are cited. The received equations are based on the theory of radiant heat exchange and help to calculate the temperature in a certain area of assortment considering the optical properties of timber. This will predict the intensity of the drying process.

Keywords: convective-radiation drying, heliodrying chamber, timber, heliothermic collectors, temperature field.