

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛООБМІННОГО КРИТЕРІЮ НУССЕЛЬТА В ПЕРІОДІ ПОСТІЙНОЇ ШВИДКОСТІ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ОДИНОЧНИХ ВЗІРЦІВ ДЕРЕВИНИ

Висвітлені основні проблеми визначення теплообмінного критерію Нуссельта в періоді постійної швидкості конвективного сушіння одиночних взірців деревини.

Senior teacher Y.V. Knych – NUFWT of Ukraine

Determination of heat-exchange criterion nuselta is in period of permanent speed of konvektivnogo drying of single standards of wood

In work the basic problems of determination of heat-exchange criterion of NuseVta are lighted up in the period of permanent speed of the konvektion drying of single standards of wood.

Розвиток технологій [1-6] вимагає інтенсифікації процесів сушіння. Коефіцієнт теплообміну виражають безрозмірним критерієм Нуссельта Nu , що характеризує інтенсивність теплообміну в пограничному шарі. На границі "ріди-на-стінка" виникає конвективний потік, викликаний теплопровідністю $q_{\kappa\partial} = \lambda_c \frac{\Delta t}{l}$ і конвективна тепловіддача $q_{\kappa\partial} = \alpha \Delta t$. Поділивши вирази, отримаємо:

$$Nu = \frac{q_{\kappa\partial}}{q_{\kappa\partial}} = \frac{\alpha \Delta t l}{\lambda_c \Delta t} = \frac{\alpha l}{\lambda_c}, \quad (1)$$

де: α - коефіцієнт теплообміну, Вт/м² град; λ_c - коефіцієнт теплопровідності середовища, Вт/м×град; l - визначаючий розмір, м.

Для отримання кількісних закономірностей критерій Нуссельта як для чистого теплообміну, так і теплообміну, ускладненого масообміном, використовують метод критеріальних узагальнень експериментальних даних.

Зауважимо, що на основі теоретичних досліджень встановлено, що критеріальні рівняння теплообміну можуть містити в собі не тільки класичні критерії подібності, які описують даний процес, але і параметричні фактори (симплексні критерії), що витікають із фізичної суті процесу сушіння. Так, для періоду постійної швидкості радіаційно-конвективного сушіння різних матеріалів проф. П.Д. Лебедевим для теплообмінного критерію Нуссельта отримано рівняння:

$$Nu = A Re^n \left(\frac{T_c}{T_m} \right)^m \left(\frac{T_p}{T_c} \right)^k, \quad (2)$$

де: Re – критерій Рейнольдса; $\left(\frac{T_c}{T_m} \right)$ – модифікований критерій Гухмана; $\left(\frac{T_p}{T_c} \right)$ – симплексний критерій, що враховує вплив радіаційного теплообміну на конвективний.

Рівняння (2) підтвердилось іншими дослідниками для радіаційно-конвективного сушіння різних матеріалів, в тому числі деревини. Цим доведено доцільність використання симплексних критеріїв для визначення критерію Нуссельта.

Зауважимо, що визначення критерію Nu вимагає знання коефіцієнта теплопровідності вологого повітря (середовища), та Re – коефіцієнта кінематичної в'язкості середовища, які в технічній літературі приведені таблицями для сухого повітря на лінії насичення, тобто відсутні для будь-якого ступеня насичення (ϕ) повітря.

Використовуючи рівняння стану суміші ідеальних газів і табличні значення коефіцієнтів λ_c і ν в результаті математичної обробки отримано такі емпіричні узагальнені рівняння для різного ступеня насичення повітря ϕ :

$$\lambda_c = [4,67 - (4,16 + 2,45\phi)] \cdot 10^{-2} + (7,14 + 4,46\phi) \cdot 10^5 T_c,$$

де: ϕ – ступінь насичення повітря, $\phi = 0 \dots 1$.

Температура газу на вході в канал і температура поверхні матеріалу (період постійної швидкості сушіння) є сталими. Рівняння енергії для даного завдання має вигляд:

$$\omega_x \frac{dt}{dx} = a \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}. \quad (3)$$

Оскільки рух газу рівномірний, то розподіл швидкості в плоскому каналі визначається рівнянням параболи:

$$\omega_y = \frac{3}{2} \omega \left(1 - \frac{y^2}{r_0^2} \right), \quad (4)$$

де: ω — середня швидкість потоку, м/с; y – відстань від осі каналу до точки, що розглядається за його характерним розміром ($r_0 = h/2$), м.

Підставимо вираз (4) в рівняння (3) та після деяких простих перетворень отримаємо рівняння (5) в безрозмірному вигляді:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = (1 - Y^2) \frac{\partial \theta}{\partial X}, \quad (5)$$

де: $\theta = \frac{t_c - t}{t_c - t_0}$ – безрозмірна температура; $Y = \frac{y}{r_0}$ – безрозмірна координата в по-

перечному перерізі каналу; $X = \frac{8}{3} \cdot \frac{1}{Re} \cdot \frac{x}{n}$ – комплексний критерій, який враховує

витрати напору за рахунок гідравлічного опору; $Pe = \frac{\omega h}{a} = Re P_r$ – критерій Пекле.

Запишемо граничні умови:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{при } X = 0 \text{ і } -1 < Y < 1 & \theta = 1 \\ \text{при } X \geq 0 \text{ і } Y = 0 & \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \\ \text{при } X = 0 \text{ і } Y = \pm 1 & \theta = 0 \end{array} \right\} \quad (6)$$

Розв'яжемо цю задачу методом розділення змінних. Для цього представимо рівняння у вигляді:

$$\theta(X, Y) = \varphi(X) \psi(Y) \quad (7)$$

Підставимо цей вираз в рівняння (5) і, розділивши змінні, отримаємо два диференціальні рівняння:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial X} + \varepsilon^2 \varphi = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} + \varepsilon^2 (1 - Y^2) \psi = 0 \quad (9)$$

де ε^2 – невідома постійна. Розв'язок першого рівняння: $\varphi = A e^{-\varepsilon^2 X}$ (10)
де A – друга невідома постійна.

Розв'язок другого рівняння можна представити у вигляді ряду:

$$\varphi(Y) = \sum_{n=0}^{\infty} b_{2n} Y^{2n} \quad (11)$$

Підставимо цей вираз у рівняння (9) отримаємо відношення для коефіцієнтів (b_{2n}): $b_0 = 1$, $b_2 = \frac{b_0}{2} \varepsilon^2$, $b_{2n} = \frac{\varepsilon^2}{2n(2n-1)} (b_{2n-4} - b_{2n-2})$; $n = 0, 1, 2$.

Отже, загальний розв'язок має вигляд:

$$\theta = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \psi_n(Y) \exp\left(-\frac{8}{3} \varepsilon_n^2 \cdot \frac{1}{Pe} \cdot \frac{X}{n}\right) \quad (12)$$

Коефіцієнти ряду A_n визначаються із граничних умов, в даному випадку можна записати: $\theta(0, Y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \psi_n(Y) = 1$ (13)

Використовуючи умови ортогональності власних функцій, які мають вигляд:

$$\int_{-1}^{+1} \psi_n \psi_m (1 - Y^2) dY = 0, \quad (14)$$

отримаємо вираз для коефіцієнта ряду: $A_n = \frac{\int_{-1}^{+1} \theta(0, Y) \psi_n (1 - Y^2) dY}{\int_{-1}^{+1} \psi_n^2 (Y) (1 - Y^2) dY}$. (15)

Зробивши деякі заміни і перетворення, рівняння для визначення θ буде мати вигляд:

$$\theta = 3 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n}{\varepsilon_n^2} \exp\left(-\frac{8}{3} \varepsilon_n^2 \cdot \frac{1}{Pe}\right), \quad (16)$$

де B_n — нова постійна: $B_n = -\frac{1}{2} A_n \left(\frac{d\psi}{dY}\right)_{Y=1}$. (17)

Для критерію Нуссельта в плоскому каналі можемо записати:

$$Nu = \frac{\alpha X}{\lambda} = -\frac{2}{\theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)_{Y=1}. \quad (18)$$

Підставивши в цей вираз рівняння (17) і (12), отримаємо:

$$Nu = \frac{4 \sum_{n=0}^{\infty} A_n \psi_n(Y) \exp\left(-\frac{8}{3} \varepsilon_n^2 \cdot \frac{1}{Pe} \cdot \frac{X}{n}\right)}{3 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n}{\varepsilon_n^2} \exp\left(-\frac{8}{3} \cdot \frac{1}{Pe} \cdot \frac{X}{n}\right)}. \quad (19)$$

З цього рівняння видно, що коли $\frac{1}{Pe} \cdot \frac{X}{n}$ прямує до безмежності, то граничне (найменше) число Nu_{∞} дорівнює: $Nu_{\infty} = \frac{4}{3} \varepsilon_n^2 = 3,8$. (20)

Отже, найбільш повною критеріальною формою рівняння для визначення критерію Нуссельта в період постійної швидкості сушіння пиломатеріалів в штабелі можна вважати рівняння наступного вигляду:

$$Nu = Nu_{\infty} + Nu_n \left(1 - \frac{1}{Re} \cdot \frac{b}{h} \right)^n, \quad (21)$$

де: h – висота каналу (товщина прокладки), м; n – ширина штабелю в камерах з поперечною циркуляцією агента сушіння, м; Re – критерій Рейнольдса, який враховує розподіл швидкості газів між стінками каналу.

Аналіз отриманого критеріального рівняння (21) показує, що значення критерію Нуссельта Nu_{∞} є постійним і характеризує теплообмін на значній віддалі від початку входження газу в штабель. Встановлено, що коефіцієнт теплообміну при русі газу в каналах змінюється за довжиною свого шляху на проміжку лише від $X = 0$ до $X = l_{nm}$ (при $X > l_{nm}$, на протязі решти частини труби зростає стає значення). Проте, термічна початкова ділянка $l_{пт}$, як показують розрахунки, більше ніж в 10 разів перевищує ширину штабеля (B), а тому значенням Nu_{∞} можна нехтувати. Крім того, як це видно з рівняння (20), Nu_{∞} є величиною дуже малою порівняно із загальним критерієм Nu (в основному він більше 200). Тому Nu_{∞} при обробці експериментальних даних можна знехтувати. Отже, рівняння (21) можна переписати у вигляді:

$$Nu = Nu_n \left(1 - \frac{1}{Re} \cdot \frac{b}{h} \right)^n. \quad (22)$$

Література

1. **Gayda S.V.** (2001): Рациональное конструирование виробів з деревини / Rational constructing of wood Productss. Lviv: ВМС. – 93 p. (in Ukr.).
2. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Productss. Lviv: ВМС. – 160 p. (in Ukr.).
3. **Гайда С.В.** Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробці: Основи створення ГАВ. – Львів: ВМС. – 1998, – 149 с.
4. **Гайда С.В.** Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробці: Основи робототехніки. – Львів: ВМС. – 1998, – 145 с.
5. **Гайда С.В.** Особливості та перспективи роботизації меблевої промисловості України / Науковий вісник УкрДЛТУ / наук.-техн. зб. – Львів: УкрДЛТУ. – 2002, вип. 12.5 – С. 38-40.
6. **Гайда С.В., Кшивецький Б.Я., Войтович І.Г. Прокопович Б.В.** Тлумачний словник з деревооброблення. – Львів: НЛТУ України. – 2002. – 280 р.

УДК 647.047

Ст. викл. Ю.В. Книш, канд. техн. наук - НЛТУ України

АНАЛІТИЧНІ РОЗВ'ЯЗКИ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛО- І МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ГРАНИЧНИХ УМОВАХ ТРЕТЬОГО РОДУ

У роботі представлені розв'язки нестационарного тепло- і масопереносу при граничних умовах третього роду.

Senior teacher Y.V. Knych – NUFWT of Ukraine

Analytical upshots of unstationary transfer of mass and heat are at maximum terms of the third family

In work the upshots of unstationary transfer of mass and heat are presented at the maximum terms of the third family.

Розглянемо деякі розв'язки системи диференціальних рівнянь тепло і масопереносу при початкових і граничних умовах, що описують процес сушіння деревини різних сортиментів [1, 2, 6] та важливо для сучасних технологій [3-5].