

ріювання місця розташування газоподавальних отворів відносно зривної кромки стабілізатора.

Ключові слова: інтенсифікація процесів переносу, математичне моделювання, кільцева ніша, циліндричний стабілізатор полум'я.

Fialko N.M., Sherenkovsky Y.V., Maison M.V., Meranova N.O., Butovsky L.S., Abdulin M.Z., Polozeko N.P., Klishch A.V., Stryzheus S.M., Timoshchenko O.B. The Intensification of Transfer Processes within a Burner with a Cylindrical Flame Holder

The patterns of relationship investigation results of transfer processes within a burner with a cylindrical flame holder, using different intensification methods of the processes are presented. The case of application a rectangular circular cavity on a lateral face of the flame holder is analyzed. The data of the research concerning potentiality of fuel and oxidizer mixing intensification in way of variation gas supply holes locations relatively the flame holder stalling edge is discussed.

Key words: transfer processes intensification, mathematical simulation, circular cavity, cylindrical flame holder.

УДК 674.047

Проф. П.В. Білей, д-р техн. наук;

доц. І.А. Соколовський, канд. техн. наук – НЛТУ України, м. Львів

ОСНОВИ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ

Розглянуто фізичні явища, що описують кінетику процесу сушіння, яка характеризується зміною вологості (вологомісту) матеріалу за певний проміжок часу. Процес сушіння поділено на два періоди: сталої та сповільненої швидкостей сушіння. Виведено залежності між інтенсивністю теплообміну і швидкістю сушіння для обох періодів з використанням закону збереження енергії і маси речовини. У цих рівняннях використано теплообмінний і масообмінний критерії Нуссельта і Ребіндера. Наведена методика дає достатньо точні для практичного використання результати з визначення кінетики процесу будь-якого способу сушіння.

Ключові слова: теплообмін, масообмін, вологість, вологовміст, температура, теплопровідність, конвекція, сушіння, кінетика, критерії, швидкість сушіння, інтенсивність.

Вступ. Кінетика процесу сушіння характеризується зміною середнього вологовмісту – $\bar{U}_{(t)}$ (або середньою за об'ємом вологістю – $\bar{W}_{(t)}$, %, де $U_{(t)} = 0,01 \cdot W_{(t)}$) і середньої температури матеріалу – $\bar{t}_{(t)}$ за певний проміжок часу – τ . Зміна локального вологовмісту і локальної температури залежить від взаємопов'язаного механізму перенесення тепла і вологи в середині матеріалу та теплообміну і масообміну матеріалу з оточуючим його середовищем. Внутрішній тепломасообмін залежить від будови матеріалу і характеру зв'язку вологи в ньому. Зовнішній тепломасообмін визначається закономірностями взаємодії матеріалу з середовищем. Знаходження полів вологовмісту $U_{(x,y,z,t)}$ і температури можливе розв'язком системи диференціальних рівнянь тепло- і вологоперенесення за відповідних початкових і граничних умов залежно від способу і режиму сушіння [1-4].

Основна частина. Розглядаючи найбільш простий випадок сушіння дуже тонкого вологого матеріалу м'якими режимами з постійними параметрами середовища ($t_c = \text{const}$, $\phi = \text{const}$, $\omega = \text{const}$), то процес сушіння відбувається таким чином. У початковий період зменшення вологості матеріалу є незначним, а температура поверхневих і внутрішніх шарів зростає до температури змоченого термо-

метра – t_m . У технології сушіння деревини цей період називають початковою тепловологообробкою матеріалу перед сушінням. Після початкового періоду вологість матеріалу зменшується протягом деякого часу за лінійним законом, тобто зменшення вологості за одиницю часу (швидкість сушіння) буде величиною постійною ($dW/d\tau = \text{const}$), а температура поверхні матеріалу також залишиться постійною (тому $dt/d\tau = 0$) і психрометрична різниця ($\Delta t = t_c - t_m = \text{const}$) також є постійною. Цей період продовжується до досягнення матеріалом критичної вологості – $W_{кр}$, після чого температура поверхні матеріалу ($t_{нов}$), а за нею і температура центральних шарів (t_u), починає зростати.

Поділ процесу сушіння на два періоди сталої та сповільненої швидкості сушіння спостерігається для всіх вологих матеріалів м'якими режимами за умови, що початкова вологість (W_0 , %) є вищою за критичну ($W_{кр}$). Інтенсивність випаровування вологи з поверхні матеріалу (i_c) може бути тотожною з інтенсивністю випаровування з поверхні води (i_b) за умови, коли $t_{нов} = t_m$, а на практиці $i_c = (1,03 \dots 1,2) \cdot i_b$ за рахунок впливу теплового випромінювання поверхні матеріалу [1, 2].

У процесі конвективного сушіння інтенсивність теплообміну (q_n , Вт/м²) із заданим температурним градієнтом $\Delta t = (t_c - t_{нов})$ визначаються співвідношенням

$$q_n = \alpha \cdot (t_c - t_{нов}) = Nu_q \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot (t_c - t_{нов}), \quad (1)$$

де: α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·К); λ – коефіцієнт теплопровідності вологого повітря, м; L – довжина поверхні матеріалу вздовж потоку повітря, м; Nu_q – теплообмінний критерій Нуссельта. Потік вологи під час конвективного сушіння визначається співвідношенням

$$j_n = Nu_m \cdot \frac{D_n}{L} \cdot (P_n - P_c), \quad \frac{\kappa z}{m^2 \cdot c}, \quad (2)$$

де: Nu_m – масообмінний критерій Нуссельта; D_n – коефіцієнт дифузії пари в повітря віднесений до різниці тисків, м²/с; P_n – тиск пари на поверхні матеріалу, який дорівнює тиску насичення із температурою поверхні матеріалу – $t_{нов}$, Н/м²; P_c – тиск повітря, Н/м².

Оскільки в періоді сталої швидкості сушіння температура матеріалу не змінюється ($dt/d\tau = 0$), то все тепло, яке передається матеріалу, йде на випаровування вологи. Тому, на основі закону збереження енергії можна записати таке рівняння балансу тепла

$$q_n = j_n \cdot r_0, \quad \text{Вт} / \text{м}^2, \quad (3)$$

де r_0 – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

Якщо позначити швидкість сушіння в період сталої значення через N , де $N = dW/d\tau$, відношення об'єму до поверхні матеріалу через R_v , а густину матеріалу в абсолютно сухому стані через ρ_0 , то можна записати

$$q_n = 0,01 \cdot r_0 \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot N, \quad \text{Вт} / \text{м}^2. \quad (4)$$

Таким чином, за величиною швидкості сушіння – N можна знайти інтенсивність теплообміну i , навпаки, знаючи інтенсивність теплообміну знайти

швидкість сушіння. Введемо тепло- і масообмінний критерій Кірпічова у співвідношеннях:

$$Ki_q = \frac{q_n \cdot R_v}{\lambda \cdot T_c}, \quad (5)$$

$$Ki_m = \frac{j_n \cdot R_v}{a_m \cdot \rho_o \cdot U_o}. \quad (6)$$

У позначеннях прийнято: a_m – коефіцієнт вологопровідності матеріалу за температурою змоченого термометра, $\text{м}^2/\text{с}$; $\bar{U}_o$ – середній початковий вологовміст матеріалу, $\text{кг}/\text{кг}$. Для випадку періоду сталої швидкості сушіння масообмінний критерій Кірпічова можна записати так:

$$Ki_m = \frac{R^2 \cdot N}{a_m \cdot W_o}. \quad (7)$$

де $\bar{W}_o$ – середня початкова вологість матеріалу, %.

У періоді сповільненої швидкості сушіння інтенсивність процесу (j_n) та інтенсивність теплообміну (q_n) протягом всього часу зменшується за складною закономірністю, яка визначається формою зв'язку вологи з матеріалом і механізмом переміщення тепла і вологи всередині матеріалу.

У цьому випадку визначення швидкості сушіння залежить від розв'язку диференціальних рівнянь тепло- і масоперенесення за відповідних граничних умов. Але це є неможливим через те, що змінюються коефіцієнти тепло- і масообміну, а температура і вологообмін на поверхні матеріалу визначаються спільною дією тепла і вологи в його всередині.

Однак, користуючись законами збереження енергії і маси речовини, можна встановити взаємозв'язок середніх інтегральних значень вологовмісту $\bar{U}$ і температури – $\bar{t}$ з інтенсивністю теплообміну (q_n) і масообміну (j_n), а відповідно із швидкістю сушіння у вигляді балансу тепла. Згідно із законом збереження енергії все тепло, яке підводиться до матеріалу, складається з тепла на нагрівання матеріалу і на випаровування вологи. Кількість тепла, яка йде на нагрівання матеріалу в одиницю часу, визначається за формулою

$$q = (c_o m_o + c_g m_g) \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad \text{кВт}, \quad (8)$$

де: c_o , c_g – відповідно, питома теплоємність абсолютно сухої деревини і води, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; m_o , m_g – відповідно, маса абсолютно сухої деревини і води, кг ; $\bar{t}$ – середня температура матеріалу, К .

Кількість тепла, яка витрачається на випаровування вологи, дорівнює

$$r \cdot \frac{dm_g}{d\tau} = r_o m \frac{d\bar{U}}{d\tau}, \quad (9)$$

де $r = r_o + r_{zm}$, тобто сума питомої теплоти випаровування і теплоти змочування, $\text{кДж}/\text{кг}$. Порівнявши вирази (8) і (9) та врахувавши, що середній питомий потік тепла підведеного до одиниці поверхні за одиницю часу дорівнює ($\bar{q}_n \cdot F$) та розділивши на об'єм (V), отримаємо

$$\bar{q}_n = (c_o + c_g \bar{U}) \cdot \rho_o \cdot R_v \cdot \frac{d\bar{t}}{d\tau} + \rho_o \cdot R_v \cdot r \frac{d\bar{U}}{d\tau}, \quad (10)$$

де: $c_o + c_g \bar{U} = c$ – теплоємність вологого матеріалу, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; R_v – відношення об'єму сухого матеріалу (V) до поверхні вологого матеріалу, м .

Тоді

$$q_n = \rho_o \cdot R_v \cdot r \frac{d\bar{U}}{d\tau} \left(1 + \frac{c}{r_o} \cdot \frac{d\bar{t}}{d\bar{U}} \right). \quad (11)$$

У виразі (11) відношення $(d\bar{t}/d\bar{U})$ характеризує підвищення середньої температури в процесі сушіння при зміні вологовмісту на одиницю, його позначають через (δ) , як температурний коефіцієнт сушіння (або коефіцієнт термовологопровідності)

$$\delta = \frac{d\bar{t}}{d\bar{U}} = \frac{d\bar{t}}{dW} \cdot 100.$$

Температурний коефіцієнт сушіння (δ) визначається із температурних кривих, що описують процес сушіння. Величина $(d\bar{t}/(r \cdot d\bar{U}))$ є безрозмірною, вона характеризує відношення кількості тепла $(c \cdot d\bar{t})$, яке витрачено на нагрівання матеріалу до кількості тепла $(r_o \cdot d\bar{U})$, яке витрачається на випаровування вологи за безмежно малий проміжок часу – $d\tau$. Таким чином, величина $c\delta/r_o$ є основним критерієм кінетики процесу сушіння, який називають критерієм Ребіндера – Rb , тобто відношення добутку питомої теплоємності вологого матеріалу (c) на температурний коефіцієнт сушіння (δ) до питомої теплоти випаровування вологи (r_o). Тоді рівняння (11) можна записати так:

$$q_{n(\tau)} = \rho_o \cdot R_v \cdot r \frac{d\bar{U}}{d\tau} (1 + Rb). \quad (12)$$

Отримане рівняння (12) є основним рівнянням кінетики сушіння, воно встановлює взаємозв'язок між теплообміном ($q_{n(\tau)}$) і масообміном $(d\bar{U}/d\tau)$ за допомогою критерію Ребіндера (Rb). Це рівняння є справедливим для будь-якого матеріалу та за будь-якого способу сушіння.

Висновок. Для розв'язку задач кінетики процесу сушіння $W=f(\tau)$ і $t=\psi(\tau)$ та визначення інтенсивності тепло- і масообміну наведена вище методика дає достатньо точні для практичного використання результати. Однак для визначення полів вологовмісту і температури матеріалу в процесі сушіння потрібно мати розв'язок системи диференціальних рівнянь тепло- і масоперенесення за відповідних граничних умов.

Література

- Білей П.В. Теоретичні основи теплової оброблення і сушіння деревини : монографія. – Колюмня : Вид-во "Вік", 2005. – 364 с.
- Білей П.В. Тепломасообмінні процеси деревооброблення : підручник / П.В. Білей, І.В. Петришак, І.А. Соколовський, Л.Я. Сорока. – Львів : Вид-во ЗУКЦ, 2013. – 376 с.
- Львов А.В. Теория сушки / А.В. Львов. – М. : Изд-во Госэнергоиздат, 1950. – 416 с.
- Львов А.В. Тепломасообмен : справочник / А.В. Львов. – М. : Изд-во "Энергия", 1978. – 480 с.

Билей П.В., Соколовский И.А. Основы кинетики процесса сушения

Рассмотрены физические явления, которые описывают кинетику процесса сушения, которая характеризуется изменением влажности (волеговмисту) материала за определенным промежутком времени. Процесс сушения разделен на два периода: постоянной и замедленной скоростей сушения. Выведены зависимости между интенсивностью теплообмена и скоростью сушения для обоих периодов с использованием закона сохранения энергии и массы вещества. В этих уравнениях использован теплообменный и массообменный критерии Нуссельта и Ребиндера. Приведенная методика дает достаточно точные для практического использования результаты из определения кинетики процесса любого способа сушения.

Ключевые слова: теплообмен, массообмен, влажность, волеговмист, температура, теплопроводимость, конвекция, сушение, кинетика, критерии, скорость сушения, интенсивность.

Bylei P.V., Sokolovsky I.A. Fundamentals of Drying Kinetics

The physical phenomena that describe the kinetics of the drying process, which is characterized by a change in humidity (moisture content) of material over certain period of time were considered. The drying process was divided into two periods: the continuous and slow speed drying. Relationships between the intensity of heat transfer and drying rate for both periods, using the law of conservation of energy and mass of the substance have been displayed. In these equations a heat transfer and mass transfer Nusselt and Rebinder criteria were used. The method gives sufficiently accurate results for practical use to determine kinetics of any kind of drying.

Key words: heat transfer, mass transfer, humidity, moisture, temperature, conductivity, convection, drying kinetics, criteria, rate of drying, intensity.

УДК 674.04 Доц. Б.Я. Кишинецький, д-р техн. наук – НЛТУ України, м. Львів

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ДЕРЕВИНИ

Запропоновано практичні рекомендації щодо прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини за допомогою математичних моделей. Розроблено відповідне комп'ютерне забезпечення, яке дає змогу прогнозувати міцність та довговічність термопластичних клейових з'єднань деревини у виробничих умовах з мінімальними затратами та без особливих навиків користувачів. Під час прогнозування необхідно вибрати породу деревини, її щільність, ступінь навантаження клейової композиції, коефіцієнти для певної породи деревини та середньозважену добову, місячну або річну температуру та вологість навколишнього середовища. Результати прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини отримано у числових значеннях та графічній інтерпретації.

Термопластичні клейові з'єднання деревини потребують особливого підходу до прогнозування міцності та довговічності, оскільки вплив вологості й температури навколишнього середовища на них призводить до зміни напружено-деформаційного стану як деревини, так і клею та характеризуються втомою самого з'єднання. Тобто фізико-механічні процеси, що будуть проходити у термопластичних клейових з'єднаннях деревини, відрізнятимуться від процесів старіння та деструкції, які характеризують термореактивні клейові з'єднання деревини.

Дослідити напружено-деформаційний стан у термопластичних клейових з'єднань деревини можна на основі всебічного вивчення фізико-хімічних та фізико-механічних процесів, які будуть проходити у клейовій плівці та деревині. Ці

процеси вивчалися на основі результатів експериментальних досліджень довговічності та механізмів формування і руйнування клейових з'єднань деревини. Для прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини використовувались методи математичного та імітаційного моделювання. Основні результати досліджень наведено в наукових публікаціях [1-5].

Результати досліджень механізмів формування та руйнування термопластичних клейових з'єднань деревини та утворення адгезійних і когезійних зв'язків під час циклічної дії вологості та температури навколишнього середовища дали змогу синтезувати фізико-хімічні та фізико-механічні процеси у термопластичних клейових з'єднаннях деревини. Поєднання математичного та імітаційного моделювання напружено-деформаційного стану залежно від температури та вологості дало змогу отримати математичну модель прогнозування міцності та довговічності для термопластичних клейових з'єднань деревини. Використання числових методів дало змогу розробити загальнодоступний і простий механізм побудови математичних моделей прогнозування міцності та довговічності термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба та сосни (1, 2).

Математична модель для прогнозування міцності:

$$\sigma = -A^{(i)} \Delta T^{(i)} + B^{(i)} \Delta W^{(i)} \exp(-\alpha^{(i)} \tau^{(i)}); \quad (1)$$

математична модель для прогнозування довговічності:

$$\tau^{(i)} = \frac{1}{C^{(i)}} \cdot \ln \left(\frac{B^{(i)} \cdot \Delta W^{(i)}}{\sigma_{\text{гран.}} + A^{(i)} \cdot \Delta T^{(i)}} \right), \quad (2)$$

де: $\Delta T^{(i)}$ – середньозважена температура навколишнього середовища, °C; $\Delta W^{(i)}$ – середньозважена вологість навколишнього середовища, %; $\sigma_{\text{гран.}}$ – гранична міцність з'єднання; параметри $A^{(i)}$, $B^{(i)}$, $C^{(i)}$ – залежні від зміни температури і вологості навколишнього середовища.

Математичні моделі (1, 2) дають змогу прогнозувати міцність і довговічність для структурованих і неструктурованих термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба та сосни за короткий проміжок часу та без руйнування клейових з'єднань деревини [6, 7].

За допомогою отриманих математичних моделей можна прогнозувати міцність та довговічність термопластичних клейових з'єднань не лише для деревини дуба та сосни, але інших порід деревини. Для цього необхідно враховувати фізико-механічні характеристики порід деревини, що склеюються. Дані характеристики в математичних моделях враховано за допомогою коефіцієнта на породу деревини $k_{n.d.}$. Розрахунок цього коефіцієнта здійснено за результатами пришивдшених експериментальних досліджень [8].

Для підтвердження кореляційного зв'язку між результатами пришивдшених і тривалих експериментальних досліджень розраховано масштабний коефіцієнт k_m . [9].

Математичні моделі для прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини з врахуванням коефіцієнта на породу деревини $k_{n.d.}$ та масштабного коефіцієнта k_m матимуть вигляд:

$$\sigma = k_{n.d.} \cdot k_m \cdot (-A \cdot \Delta T^{(i)} + T \cdot \Delta W^{(i)} \exp(-C \cdot \tau^{(i)})), \quad (3)$$