

При співставленні даних, наведених на рис. 2 і рис. 3, впливає, що міцність клейових з'єднань на основі суміші КФЖ і 30... 50 % деревної мелеси без каталізатора затвердіння вища, ніж для подібних клейових композицій, які містять сульфат амонію. Очевидно, у цьому випадку сумарна кількість сульфату амонію і кислих продуктів мелеси у полімерній композиції перевершує оптимальну, а концентрація смоли – нижча від оптимальної. Внаслідок цього виникає забагато центрів початку процесу затвердіння, а сам процес проходить швидко і призводить до утворення багатьох не зв'язаних густосічастих структур у клейовому з'єднанні. Клейові з'єднання з такою структурою мають високу крихкість і, відповідно, невелику міцність.

Висновки

Узагальнюючи результати проведених досліджень можемо стверджувати, що деревну мелесу можна використовувати як наповнювач у клейових композиціях на основі карбамідних смол замість деревного борошна чи інших наповнювачів. До суміші карбамідної смоли і каталізатора гарячого затвердіння варто вводити до 10 % деревної мелеси, оскільки більший її вміст призводить до значного зменшення міцності клейового з'єднання. Можна використовувати і клейові композиції на основі карбамідної смоли і деревної мелеси (30 % і більше) без каталізатора затвердіння, однак оптимальні технологічні режими використання таких композицій потрібно ще встановити.

УДК 647.047

Проф. В.М. Голубець, д-р техн. наук;

доц. І.М. Озарків, канд. техн. наук; доц. Й.Л. Ацбергер – УкрДЛТУ

ТЕПЛООБМІН У ПРОЦЕСІ СУШІННЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ З ДЕРЕВИНИ У КИПЛЯЧОМУ ШАРІ

Наводяться основні теоретичні рівняння теплообміну у процесі сушіння, які визначають особливості сушіння подрібненої деревини у киплячому шарі. Описані умови сушіння у киплячому, аерофонтанному і щільному шарах.

Prof. V.M. Holubets, I.M. Ozarkiv, J.L. Acberher – USUFWT

Heat exchange in the process of bulk material drying from wood in a boiling layer

Major theoretical equations of heat exchange in the process of drying, determined by the peculiarities of chopped wood in boiling layer, have been given. Drying conditions in a boiling, aerofountain, and dense layers have been described.

Сушіння подрібненої деревини у плитному виробництві значною мірою визначається як теплофізичними, технологічними властивостями самого матеріалу, так і цільовим призначенням та техніко-експлуатаційними вимогами об'єкту сушіння. Слід нагадати, що технологія виробництва плит вимагає висушування стружки від початкової вологості 120...80 % до кінцевої вологості 2...4 % (внутрішній шар) і 4...6 % (зовнішній шар плити). Розміри деревинних частинок плит регламентуються видом плити і шаром [1]. Наприклад, для трьохшарових деревостружкових плит розміри є такими: для зовніш-

нього шару (довжина×ширина×товщина, мм) $20 \times 3 \times 0,20 \dots 0,25$ мм, внутрішнього – $40 \times 12 \times 0,40 \dots 0,45$ мм, а для одношарових – $20 \times 6 \times 0,3 \dots 0,4$ мм.

Процес сушіння подрібненої деревини також є не тільки теплофізичним, але й масообмінним процесом, в якому одну з визначальних ролей відіграє форма і вид енергії зв'язку вологи з деревиною. У свою чергу цикл сушіння подрібненого матеріалу, як і масивного тіла, при постійному режимі сушіння, можна розділити на два основні періоди сушіння, які між собою відрізняються не тільки характером зміни вологості, але й швидкістю сушіння і розподіленням температури за поперечним перерізом частинок, які сохнуть.

Як відомо [2], перший період сушіння супроводжується нагріванням матеріалу, підвищенням парів води над його поверхнею і випаровуванням вологи (температура дрібних частинок підвищується до температури мокрого термометра і залишається постійною, а вологовіддача при постійному режимі також залишається сталою величиною). У другому періоді, після так званої першої критичної точки, має місце безперервне зменшення швидкості сушіння внаслідок заповільнюючого поступлення вологи із середини матеріалу (при цьому температура матеріалу поступово зростає і прямує до температури середовища).

Другий період, у свою чергу, виходячи з умов випаровування, умовно можна розділити на два етапи: перший, коли здійснюється випаровування ще з поверхні матеріалу, та другий, коли зона випаровування вологи переміщається у середину матеріалу.

Величина критичної вологості, як і характер кривої сушіння, у періоді заповільнюючої швидкості сушіння (другому періоді) буде залежати від розміру частинок матеріалу, а також від інтенсивності та способу підведення тепла. У роботі ми будемо даліше користуватися терміном сипуча деревина, а не подрібнена деревина, оскільки сушіння тирси, стружки, технологічної тріски за своїм механізмом близьке до сушіння багатьох сипучих матеріалів, а поняття "подрібнена деревина" включає у себе не тільки тирсу, стружку, але й пакувальну стружку, сірникову соломку і т.д.

При математичному описуванні теплообміну із сипучими матеріалами використовують поняття як квазігомогенне, однорідне [3,4], так і гетерогенне, двокомпонентне середовище [5,6]. Слід відзначити, що концепція квазігомогенного середовища характерна простотою математичного опису, аналітичного розв'язку задачі і достатньо простого дослідження ефективних коефіцієнтів перенесення, але вона може бути використаною тільки у випадках, коли розглядається шар матеріалу, який значно перевищує розміри частинок, а також коли має місце рівність температур компонентів і дуже велика тривалість процесу сушіння. Проте, при наявності внутрішніх джерел теплоти, часто виникає значне температурне "ковзання" між газом (теплоносієм) і дрібними частинками (об'єктом сушіння). Тоді доцільно використовувати двокомпонентні моделі, оскільки останні більш глибоко і повніше враховують умови теплоперенесення. Адже, в бінарних гетерогенних системах "газ – тверде тіло" при пропусканні із певними швидкостями потоку менш щільної фази (газу) знизу – вгору через шар більш щільної фази (подрібненого матеріалу) ут-

ворюється висячий (псевдозріджений) шар, який, залежно від характеру псевдорозрідження частинок і відповідних конструкцій сушильних агрегатів, може бути киплячим шаром (КШ), фонтануючим, віброкиплячим, щільним шаром і т.д. Слід відзначити, що у всіх системах висячий шар характеризується тим, що вага важкої фази (сили земного тяжіння) врівноважується тертям газу чи дрібної частинки у поєднанні з архімедовою силою. При цьому частинки твердого матеріалу плавають у потоці газу, пульсують, здійснюють вихрові рухи, але не покидають меж шару при значному збільшенні лінійної швидкості агента сушіння (газу) через одночасне збільшення порізності, тобто легкої фази в шарі матеріалу.

Таким чином, шар подрібненого матеріалу буде представляти собою неоднорідну (гетерогенну) систему, яка під впливом теплофізичних характеристик буде приймати певні осереднені значення. У зв'язку з чим зупиняємося на деяких властивостях сипучої деревини, які суттєво впливають на інтенсивність теплообміну.

Відомо, що порівняно невеликі розміри частинок сипучої деревини і невелика насипна маса при низькій вологості самого матеріалу надають їм значну рухомість, а під дією газового потоку – ще й леткість, де швидкості кружляння частинок сипучої деревини будуть значно впливати на інтенсивність сушіння при конвективному підведенні теплоти. Слід нагадати, що насипна маса сипучої деревини залежить від сортименту і складає, наприклад: для технологічної щепи після переробки горбилів і рейок при вологості 3...5 % – 200...250 кг/м³, тирси – 120...140 кг/м³, стружки після переробки деревини на верстатах – 90 кг/м³, різаної стружки для середнього шару тришарових плит – 40...45 кг/м³, деревно-волокнистої маси – 20 кг/м³, деревної муки – 94...209 кг/м³ і стружки подрібненої після молоткової дробарки – 140...200 кг/м³ [2].

Порізність ε , яка виражає відносну величину проміжків між частинками сипучого матеріалу в різних його станах і визначається як доля об'єму порожнин між частинками у загальному об'ємі шару ($\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_m} = \frac{V_{пор}}{V_{ш}}$, де $\rho_{нас}$

– насипна густина, ρ_m – густина частинок, $V_{пор}$ – сумарний об'єм проміжків між частинками, $V_{ш}$ – весь об'єм шару насипних частинок), залежить від вологості деревини і висоти шару. Для шару тріски, отриманого із круглих колод, у стані спокою і при вологості 5 % – $\varepsilon = 0,55$; для шару подрібненої вторинно стружки і тій же вологості – $\varepsilon = 0,70$; для шару тирси – $\varepsilon = 0,80$; для шару стружки зовнішнього шару плит – $\varepsilon = 0,96$; для шару стружки середнього шару плит – $\varepsilon = 0,91$ [2].

Гідродинаміка шару частинок у процесі сушіння, значною мірою, залежить від гранульометричного складу, тобто розподілення частинок матеріалу за розмірами (діаметрами). Як відомо, розподілення частинок за розмірами (діаметрами) визначається методом ситовим, мікроскопічного аналізу, пневмоповітряної сепарації і т.п. Тобто, по різному вводять різні поняття ек-

вівалентного діаметра (лінійного розміру частинки, еквівалентного діаметру відповідного шару).

Зокрема, середній арифметичний діаметр виражається

$$d_e = \frac{\sum_{i=1}^n d_i n_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i / d_i^2}{\sum_{i=1}^n g_i / d_i^3}, \quad (1)$$

де: n – загальна кількість частинок; n_i – кількість частинок i -ої фракції; d_i – середній діаметр i -ої фракції; g_i – масова доля частинок.

Середній квадратичний діаметр визначається

$$d_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 n_i}{n} \right]^{1/2} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n g_i / d_i}{\sum_{i=1}^n g_i / d_i^3} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

а середній діаметр за масою

$$d_e = \sum_{i=1}^n g_i d_i = \left(\frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^4}{n} \right)^{1/4}. \quad (3)$$

На практиці найчастіше еквівалентний діаметр частинки визначають методом ситового аналізу за співвідношенням

$$d_e = \frac{\sum_{i=1}^n g_i d_i}{\sum_{i=1}^n g_i}, \quad (4)$$

де: d_i – середній діаметр отворів сит; g_i – масова доля фракції.

Натомість

$$d_i = \sqrt{\frac{d_1^2 d_2^2}{d_1 + d_2}}, \quad (5)$$

де: d_1, d_2 – відповідно діаметри, визначені за розмірами отворів прохідного і непрохідного сит.

Для характеристики частинок неправильної форми був введений термін геометричний коефіцієнт форми φ або обернена величина – коефіцієнт сферичності $f(f = \varphi^{-1})$. Тобто коефіцієнт форми може бути представлений виразом

$$\varphi = d_e / d_{ш} \text{ або } d_e = \varphi d_{ш}, \quad (6)$$

де $d_{ш}$ – діаметр шару, об'єм якого є еквівалентним об'єму частинки.

Очевидно, що для шароподібних частинок коефіцієнт $\varphi = 1$; для округлених – 0,75; для кутоподібних – 0,66; для продовгуватих – 0,58 і пластинкоподібних – 0,43 [2].

Іноді, для врахування відмінності форми частинки від сферичної, замість d використовують співвідношення d/φ .

У процесі конвективного сушіння впливову роль відіграє тепло- і масообмін між сушильним агентом (газом) і об'єктом сушіння, а також перенесення тепла і маси (вологи) у середині матеріалу. При цьому процес сушіння значно інтенсифіковується за рахунок зменшення дифузійних і термічних опорів біля межі розділу фаз, що досягається безперервним поновленням поверхні матеріалу, яка контактує із газовим середовищем. При сушінні подріблених (сипучих) матеріалів у підвішеному або псевдопідвішеному стані поновлення контактної поверхні значно інтенсифіковується.

Процес сушіння сипучих матеріалів з деревини тісно пов'язаний із питанням гідродинаміки і тепломасообігу у киплячому шарі. Адже, якщо в шар твердого подрібненого матеріалу пропускати із певною швидкістю підігріте повітря або топкові гази, то шар матеріалу спочатку розпушується, а потім переходить у стан, який подібний до стану киплячої рідини, тобто в так званий псевдорозріджений стан.

У такому псевдорозрідженому стані шар розпушується та інтенсивно перемішується, завдяки чому всі частинки матеріалу омиваються сушильним агентом. Внаслідок інтенсивного перемішування і безпосереднього контакту окремих частинок проходить вирівнювання температури в об'ємі шару.

Використовуючи залежності між швидкістю повітря v і діаметром частинок d при різній величині порізності шару ε , як показали дослідження [7], можна досягнути відповідного стану сушіння шару (наприклад, коли $\varepsilon < 0,40$ – має місце сушіння в щільному шарі; $\varepsilon = 0,55 \dots 0,75$ і коли $d = 6 \dots 40$ мм – то є сушіння у киплячому шарі; $\varepsilon = 0,55 \dots 0,75$ і $d = 25 \dots 30$ мм – фонтануючий шар з висхідним рухом частинок матеріалу по осі сушильного агрегату та низхідним вздовж стінок); $\varepsilon = 0,75 \dots 0,95$ – агрофонтануюче сушіння, коли є фонтануючий шар із частковим виносом підсушених і повним винесенням сухого матеріалу; $\varepsilon = 1,0$ – сушіння у пневмотрубах, коли є підвішений шар, а самі частинки матеріалу перемішуються зі швидкістю $v_m = v_{\text{газ}} - v_{\text{кружіння}}$, тобто $v_{\text{газ}} < v_{\text{круж.}}$.

У стані псевдорозрідження вага шару (з врахуванням сили Архімеда) зрівноважується перепадом тиску в шарі, тобто

$$\Delta p = g (\rho_m - \rho_g)(1 - \varepsilon) H = g (\rho_m - \rho_g)(1 - \varepsilon_{\text{кр}}) H_{\text{кр}}, \quad (7)$$

де: $\varepsilon_{\text{кр}}$, $H_{\text{кр}}$ – порізність і висота шару подрібненого матеріалу в момент початку псевдорозрідження відповідно; ρ_g – густина розрідженого газу (агента сушіння).

Розв'язуючи рівняння (7) разом з рівнянням $\Delta p = \Delta p(v)$ для стаціонарного шару можна визначити швидкість на початку псевдорозрідження. Слід відзначити, що для визначення $v_{\text{кр}}$ використовують велику кількість рівнянь.

Зокрема, для розрахунку швидкості кружління деревинних частинок використовують формули Тодеса [3], Раквіца і Святкова [2].

Формула Тодеса має вигляд:

$$Re_{кр} = \frac{A_r}{150 \frac{1 - \varepsilon_{кр}}{\varepsilon_{кр}^3} + \left(\frac{1,75}{\varepsilon_{кр}^3} A_r \right)^{1/2}}, \quad (8)$$

де: $\varepsilon_{кр}$ – критична порізність (приймається на 10 % більшою за ε насипного шару); A_r – критерій Архімеда ($A_r = \frac{gd^3}{\nu^2} - \frac{\rho_m - \rho_e}{\rho_e}$).

Тимчасом, формула Раквіца описується рівнянням

$$\nu = 0,135 \sqrt{\rho_m \cdot D \cdot 10^3} \text{ м/с}, \quad (9)$$

де: ρ_m – густина частинки, г/см³; D – товщина частинки (стружки), мм.

Формула С.М. Святкова [2]:

$$\nu = 0,14 \sqrt{\frac{\rho_m}{(0,22 + \frac{\alpha}{h}) \rho_{нов}}} \text{ м/с}, \quad (10)$$

де: $\rho_{нов}$ – густина повітря, кг/м³; h – товщина частинки, мм; α – коефіцієнт, який залежить від форми частинок (для частинок круглої або квадратної форми $\alpha = 1,1$, а для прямокутної або близько до неї – $\alpha = 0,90$)

Поряд з тим, використовуючи поняття еквівалентного діаметра при розрахунку швидкості початку розрідження (кружляння), слід мати на увазі те, що на розрідження великих частинок мають вплив раніше розріджені дрібні фракції, які передають їм частину кількості свого руху. Це значить, що швидкість розрідження залежить від всього розподілення частинок за діаметрами, тобто у загальному випадку залежність для розрахунку $\nu_{кр}$ полідисперсних систем має вигляд

$$Re_{кр} = 0,0736 Ar^{0,625} \varepsilon_{кр} (d_{max}/d_e)^{0,375}, \quad (11)$$

коли $20 < Re < 1,5 \cdot 10^3$ (d_{max} – максимальний діаметр частинки).

У роботі [9], на основі теорії подібності, отримана формула для розрахунку $\nu_{кр}$ полідисперсного матеріалу, що складається із фракцій різної густини, тобто

$$\nu_{кр} = c g^{(n+1)/3} \nu^{(1-2n)/3} d_e^n \left(\frac{\rho_m - \rho_e}{\rho_e} \right)^{0,60} \cdot \Pi_c^{0,33}, \quad (12)$$

де: $\Pi_c = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{g_i \rho_{max} d_{max}^3}{g_{max} \rho_i d_i^3}}{\sum_{i=1}^k \frac{g_i \rho_{max} d_{max}}{g_{max} \rho_i d_i}}$ – показник полідисперсності; c , n – коефіцієнти, які дорівнюють:

$$\begin{aligned} c &= 0,025; n = 1,3 - [d_e (g/\nu^2)^{1/3} \leq 3; \\ c &= 0,045; n = 0,765 - \text{коли } d_e (g/\nu^2)^{1/3} > 3; \end{aligned}$$

g_{max} – масова доля фракції максимального діаметра.

Тепло- і масообмін у киплячому шарі, як видно, із вище наведених формул, обумовлений рядом факторів, що визначаються: геометричними розмірами самого подрібненого матеріалу, інтенсивністю зовнішнього теплообміну, вологопровідністю об'єкта сушіння, швидкістю перенесення вологи до поверхні частинок, які висушуються. Інакше кажучи, на характер процесу сушіння у киплячому шарі впливають не тільки властивості матеріалу, його аеродинамічний режим, але й тепловий режим сушіння.

Для матеріалів із значним коефіцієнтом дифузії вологи сушіння буде протікати у першому періоді, коли $t_{n,m}=t_m$ ($t_{n,m}$ – температура поверхні матеріалу), а сам процес сушіння буде визначатися теплообміном між агентом сушіння (повітрям) і поверхнею частинок матеріалу. Тобто, визначення коефіцієнта теплообміну α буде здійснюватися з критеріального рівняння

$$Na = f(Re; Fe; Ar; h/d), \quad (13)$$

де Fe – критерій Федорова, який описується так:

$$Fe = \sqrt[3]{\frac{4}{3} Ar} = d \sqrt[3]{\frac{4}{3} \cdot \frac{g(\rho_m - \rho_z)}{v^2 \rho_z}}. \quad (14)$$

Слід відзначити, що термічний опір зовнішнього теплообміну відіграє важливу роль тільки при порівняно малих h і великих d . Інакше, при значних товщинах шару h і малих d шар матеріалу буде поглинати все тепло, що підводиться з повітря. При цьому лімітуючим фактором буде максимально допустима температура матеріалу.

У другому періоді сушіння подрібненого матеріалу характерне значним опором внутрішній дифузії вологи, коли температура матеріалу значно перевищує t_m і процес, в основному, лімітується температурою повітря t_c і мало залежить від швидкості і відносної вологості повітря. Тому, у даному випадку необхідне сумісне розв'язання рівнянь зовнішнього теплообміну і внутрішнього тепломасоперенесення, що приводить до труднощів розв'язку відповідних диференціальних рівнянь. Тому при розв'язанні диференціальних рівнянь тепломасоперенесення у киплячому шарі використовують різні наближені методи, а також формули, які отримані шляхом математичної обробки експериментальних даних при різних умовах сушіння. Проте, дані розрахункові формули представляють, як правило, у критеріальній формі

$$\frac{\bar{U}}{\bar{U}_n - \bar{U}} = f(Fo, Ar, Ko_m, G/L, \frac{t_{n,c} - \Theta_n}{\Theta_n}), \quad (15)$$

де: $\bar{U}$ – середній вологовміст матеріалу у певний момент часу; $\bar{U}_n$ – початковий вологовміст матеріалу; Ko_m – масообмінний критерій Косовича; G/L – відношення маси матеріалу до витрат агента сушіння; Θ_n – початкова температура матеріалу, °C; $t_{n,c}$ – початкова температура середовища, °C.

Слід вважати, що в більшості випадків, при безперервному процесі сушіння допускають у цілому, що сушіння кожної частинки протікає тільки у першому періоді сушіння.

Критерій Косовича

$$Ko_m = \frac{\overline{U}_n r}{C_m (t_{n.c} - \Theta_n)}, \quad (16)$$

де: C_m – питома теплоємність матеріалу; r – питома теплота пароутворення.

Теплообмін між газом (агентом сушіння) і частинками (міжфазний теплообмін) носить чисто конвективний характер, як і сам масообмін. При цьому міжфазний тепломасообмін у киплячому шарі розглядається порівняно з одиничною частинкою.

Автори [3] теплообмін між теплоносієм і частинками у киплячих і щільних шарах розраховують за рівнянням ($Re/\varepsilon > 200$)

$$Na = 0,40 (Re/\varepsilon)^{2/3} Pr^{1/3}, \quad (17)$$

де: Na ($-Na = \alpha \frac{d}{\lambda_c}$) – теплообмінний критерій Нусельта; Re ($Re = \frac{v}{\nu_c} d$) –

критерій Рейнольдса; λ_c , ν_c – відповідно теплопровідність і коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Таким чином, із останнього рівняння можна визначити коефіцієнт теплообміну між агентом сушіння і частинками сипучої деревини.

Література

1. Обливин А.Н., Воскресенский А.К., Семенов Ю.П. Тепло- и массоперенос в производстве древесно-стружечных плит. – М.: Лесн. пром-сть, 1978. – 192 с.
2. Архангельский В.А. Аппараты для сушки сыпучей древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1970. – 126 с.
3. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968. – 510 с.
4. Баум В.А., Бекмуратов О. Расчет температуры и теплообмена в каналах с кусковым материалом. / Изв. АН Туркменской ССР: Серия физ. – техн., хим. и геолог. наук, 1976. – № 3. – С. 101-105.
5. Дущенко В.П. Кинетика и динамика внутреннего тепло- и массопереноса в твердых дисперсных системах. – Дис. д-ра. техн. наук. – Киев, 1974. – 320 с.
6. Львов Ф.П. Тепло- и массообмен при сушке в кипящем, взвешенном, плотном и виброкипящих слоях. // В кн.: Тепло- и массообмен: Материалы дискуссии III Всесоюзн. сов. по тепло- и массопереносу. – Минск: ИТМО, 1969. – т. 11. – С. 105-124.
7. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. – М.: Химия, 1968. – 358 с.
8. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка в кипящем слое. – М.: Химия, 1964. – 288 с.
9. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем шаре. / Под ред. А.П. Баскакова. – М.: Металлургия, 1978. – 247 с.

УДК 674.047

П.В. Білей, д-р. техн. наук; аспір. А.В. Полоз – УкрДЛТУ

КІНЕТИКА АТМОСФЕРНОГО СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ

Досліджено кінетику атмосферного сушіння соснових пиломатеріалів, знайдено основний параметр процесу – коефіцієнт сушіння.