

шильний агент насичується у вищележачих шарах матеріалу, тому нижчележачі шари вологу свою деякий час зберігають, їх температура залишається на рівні температури мокрого термометра. У міру висихання верхніх шарів, зона сушіння поступово заглиблюється по ходу руху теплоносія і пересувається до нижчележачих шарів до тих пір, поки капілярна волога в наскрізних каналах не випарується повністю. Тому температура верхньої поверхні полотна в процесі фільтраційного сушіння завжди вища від температури його нижньої поверхні. Цей фактор потрібно враховувати для дотримання якісних показників матеріалу.

Висота вологого шару полотна в ході процесу постійно зменшується. Ця обставина, зокрема, сприяє інтенсивному протіканню сушіння в першому періоді, тому що дозволяє з часом процесу здійснювати підвід до нижчележачих шарів матеріалу менш насиченого вологою теплоносія і таким чином – інтенсифікувати масообмін.

Після випаровування з матеріалу капілярної вологи починається видалення вологи осмотично та адсорбційно зв'язаної, що відбувається в другому періоді процесу сушіння. Ця волога має більш міцний зв'язок з матеріалом, на її випаровування необхідно витрачати більше енергії, що призводить в періоді падаючої швидкості сушіння до підвищення температури матеріалу, яка після повного його зневоднення поступово досягає температури теплоносія, який підводиться до матеріалу для сушіння.

Температурні криві сушильного агента на виході з матеріалу характеризують ступінь ефективності його використання. Співставлення температурних кривих з кінетичними показує, що при зменшенні вологості матеріалу з 79 % до 20 %, тобто майже до закінчення процесу, температура відпрацьованого теплоносія не перевищує температури мокрого термометра, яка дорівнює 331 К (при температурі теплоносія 573 К), що свідчить про високу ступінь ефективності використання сушильного агента. Різка підвищення температури теплоносія на виході з матеріалу приходить на початок періоду падаючої швидкості сушіння, коли з полотна випаровується адсорбційно та осмотично зв'язана волога, яка вимагає, на відміну від вологи капілярної, для свого видалення нагріву матеріалу до відносно високих температур.

Необхідно зазначити, що пошарове випаровування вологи в процесі фільтраційного сушіння, призводить до утворення по товщині матеріалу градієнтів вологовмісту та температури. Температурний градієнт має напрям, який співпадає з напрямком фільтрації теплоносія, його наявність сприяє інтенсифікації процесу. Термодифузія вологи, яка виникає при цьому, так само прискорює сушіння матеріалу. Градієнт вологовмісту навпаки, спрямований в сторону, протилежну руху теплоносія крізь полотно і таким чином є фактором, який перешкоджає інтенсифікації сушіння.

Отримані результати є основою для створення математичної моделі кінетики фільтраційного сушіння фільтрувальних картонів та організації процесу в промислових умовах.

Література

1. Ханьк Я. Н. Фильтрационная сушка плоских пористых материалов: Дис. докт. техн. наук, – Львов, 1992. – 401 с.

УДК 674.047.

Проф. П.В. Білей, д-р техн. наук;
асист. І.А. Соколовський – УкрДЛТУ

ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

Наведено основні формули для розрахунку тривалості технологічних операцій: початкового нагрівання, сушіння деревини, тепловологообробки і кондиціонування.

Prof. P.V. Bilej, Dr. of Thechn. Sc., I.A. Sokolovsky – USUFWT

Determination of duration of technological operations of a lumber drying process operations

Brought over basic formulas for lumber drying duration computation.

Тривалість камерного сушіння пиломатеріалів складається із суми тривалостей таких технологічних операцій: складання матеріалу в штабель $\tau_{ф.ш.}$, початкова тепловологообробка $\tau_{пр}$ (початковий прогрів матеріалу), сушіння за даним режимом $\tau_{суш.}$, проміжні тепловологообробки $\tau_{п.о.}$, кондиціонування $\tau_{к.}$, остигання камери $\tau_{о.}$. Опишемо це формулою

$$\tau = \tau_{ф.ш.} + \tau_{пр} + \tau_{суш.} + \tau_{п.о.} + \tau_{к.} + \tau_{о.} \quad (1)$$

Укладання пиломатеріалів у штабелі виконується відповідно з КТМ (керівні технічні матеріали) проведення камерного сушіння деревини. Тривалість укладання пиломатеріалів у штабель залежить від ємності штабеля.

Місткість камери розраховують за формулою:

$$E = lbhn\beta_0 \frac{100 - y_0}{100}, \text{ м}^3, \quad (2)$$

де: l , b , h – відповідно довжина, ширина та висота штабеля; n – кількість штабелів у камері; β_0 – коефіцієнт об'ємного заповнення штабеля.

$$\beta_0 = \beta_d \beta_{ш} \beta_v,$$

де β_d , $\beta_{ш}$, β_v – відповідно коефіцієнти заповнення штабеля по довжині, ширині, висоті штабеля. При застосуванні стандартних прокладок (25×40 мм).

$$\beta_v = \frac{S_1}{S_1 + 25},$$

де: S_1 – товщина матеріалу, мм; Y_0 – об'ємне всихання матеріалу (залежить від розмірів матеріалу, породи та кінцевої вологості), визначається за формулою $Y_0 = K_0(30 - W_K)$; W_K – кінцева вологість деревини).

Продуктивність операції по складанню пилопродукції в штабелі залежить від рівня механізації складальних робіт, розмірів пиломатеріалів або заготовок і становить для деревообробних і меблевих підприємств $\Pi_{\text{скл}} = 0,8 \dots 4,1$ людино-годин на 1 м^3 висушуваного матеріалу. Орієнтовно тривалість операції по складанню пилопродукції в штабелі можна визначити за формулою

$$\tau_{\text{скл}} = \Pi_{\text{скл}} \frac{E}{n}, \text{ год}, \quad (3)$$

де n – кількість чоловік, зайнятих на складанні штабелів, чол.

Початкова тепловологообробка

Початкова тепловологообробка потрібна для швидкого прогрівання матеріалу перед сушінням. Вона відбувається під дією сушильного агента високого ступеня насичення (близько 100 %) і підвищеної температури. Процес нагрівання відбувається без зміни агрегатного стану води в деревині. Вважається, що процес тепловологообробки визначається тільки двома явищами: теплообміном з оточуючим середовищем та теплопровідністю деревини. Згідно з КТМ з технології камерного сушіння початковий прогрів деревини рекомендується проводити в насиченому середовищі $\phi=100\%$ при початковій вологості деревини $W_{\text{п}} > W_{\text{тн}}$, а при $W_{\text{п}} < W_{\text{тн}}$ відносна вологість повітря може бути меншою ($\phi = 90 \dots 98\%$). Для створення додатнього градієнта температури в процесі сушіння на першому ступені режиму температура середовища має бути на $5 \dots 8^\circ\text{C}$ вище від першого ступеня, але не більше 100°C .

Інтенсивний прогрів забезпечується впуском пари в камеру через зовнішні труби при включених калориферах, працюючих вентиляторах та закритих припливно-витяжних каналах.

В результаті дослідження початкового прогріву в процесі сушіння деревини твердих листяних порід, знайдена залежність тривалості чистого нагрівання (без транспортного запізнення) від температури (t_c) середовища, породи деревини (виражену через її густину – ρ), товщину матеріалу – S , та початкової вологості деревини – $W_{\text{п}}$.

Тривалість початкового прогрівання, із врахуванням теплової інерції матеріалу і камери (з обладнанням) визначають за формулою

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_0 + A \cdot \rho \cdot t_c^m \cdot S^n \cdot \lg W_{\text{п}} \cdot 10^{-3}, \text{ год}, \quad (4)$$

де: A – коефіцієнт пропорційності, який враховує одиниці виміру величин; ρ – густина деревини, $\text{кг}/\text{м}^3$; t_c , $^\circ\text{C}$; S , мм; $W_{\text{п}}$, %, m , n – коефіцієнти.

Сушіння деревини за обраними режимами

Від правильного вибору та дотримання режиму (підтримання параметрів середовища на заданому рівні залежно від стану матеріалу – його вологості та внутрішніх напружень) залежать кількісні і якісні показники процесу сушіння. Таким чином, режим сушіння – вирішальний фактор інтенсифікації процесу і підвищення якості висушуваного матеріалу.

Безпосередньо від режиму сушіння залежать тільки показники міцності матеріалу та збереження його фізико-механічних властивостей. Перші виз-

начаються відношенням границі міцності деревини до максимальних напружень (критерій безпечності режиму), а другі – рівнем і тривалістю дії високих температур на деревину в процесі сушіння. Решта показників якості сушіння залежать від структурної будови деревини, правильного і своєчасного проведення тепловологообробки, правильного формування штабелів і проведення початкового прогріву. Найбільш ефективними є такі режими, які забезпечують високу якість сушіння, зберігаючи показники міцності і інші фізичні властивості, режими, в яких параметри середовища координуються станом матеріалу. В цьому випадку повніше враховуються особливості будови і властивості деревини, її густина, початкова вологість, характер розподілу вологості за товщиною матеріалу.

Тривалість сушіння пиломатеріалів визначають, як суму тривалостей сушіння по кожному ступені. Для цього використовуємо графоаналітичний метод:

$$\tau = C_{\tau} \frac{KS_1^2}{a_m^1 \cdot 10^6} C A_{\text{рц}} A \lg \frac{W_{\text{п}}}{W_k}, \quad (5)$$

де: K – коефіцієнт, який враховує співвідношення одиниць вимірювання; C_{τ} – коефіцієнт, який залежить від товщини матеріалу; a_m^1 – коефіцієнт вологопровідності при температурі змоченого термометра – $t_{\text{м}}$; C – коефіцієнт сповільнення сушіння в штабелі; $A_{\text{рц}}$ – коефіцієнт реверсивності циркуляції; A_{ϕ} – коефіцієнт, який залежить від ступеня насичення повітря на першому ступені режиму.

Для більш точного визначення тривалості сушіння формулу (5) розкладають на три частини (по кількості ступенів стандартних режимів сушіння). Для першого ступеня

$$\tau_1 = C_{\tau_1} \frac{65S_1^2}{a_1^1 \cdot 10^6} C_1 A_{\text{рц}} \lg \left(0,81 \frac{W_{\text{п}} - W_{\text{р1}}}{W_{\text{к1}} - W_{\text{р1}}} \right). \quad (6)$$

Для наступних ступенів відповідно

$$\tau_i = C_{\tau_i} \frac{65S_i^2}{a_2^i \cdot 10^6} C_i A_{\text{рц}} \lg \left(\frac{W_{\text{кi}} - W_{\text{рi}}}{W_{\text{кi}} - W_{\text{рi}}} \right). \quad (7)$$

Проміжкові тепловологообробки деревини

Проведення тепловологообробок дає змогу, крім збільшення пластичності деревини і зменшення внутрішніх напружень, значною мірою вирівняти температурне поле в камері. Таким чином, проведення проміжних тепловологообробок дозволяє періодично знімати нагромаджені напруження, зберігати цілісність матеріалу в процесі сушіння. Періодичність проведення тепловологообробок залежить від особливостей будови деревини, розміру матеріалу та застосовуваних режимів.

Для визначення тривалості проміжних тепловологообробок можна застосувати емпіричні формули (за наявності експериментальних даних) для окремих порід.

Орієнтовно тривалість проміжної тепловологообробки ($\tau_{п.о.}$, годин) для товщин $S_1 > 20$ мм можна визначити за формулою:

$$\tau_{п.о.} = a + b\sqrt{(S_1 - 20)^3}, \text{ год} \quad (8)$$

де a , b – коефіцієнти формули, які залежать від породи деревини, швидкості циркуляції повітря.

Температуру агента сушіння при тепловологообробці рекомендується приймати на $3...8$ °C більше від відповідного (поточного) ступеня режиму сушіння, а при переході на вищий ступінь режиму – за її температурою. Відносну вологість повітря приймають $\phi = 100$ % за умови $W \geq 25$ %, та $\phi = 92...97$ % за умови $W < 25$ %. Режими проміжної тепловологообробки пропонується проводити в процесі сушіння твердих листяних порід товщиною $25...70$ мм та хвойних порід товщиною $50...70$ мм.

Кінцева тепловологообробка

Кінцеву тепловологообробку проводять для вирівнювання вологості за товщиною матеріалу. В процесі конвективного сушіння є завжди перепад вологості (потенціал вологопереносу) по товщині матеріалу. В кінці процесу вологість поверхневих шарів ($W_{пов}$) є близькою до рівноважного стану (тобто, $W_{пов} \approx W_p$), а вологість центральних шарів може бути (в $2...3$ рази і більше) вищою ніж поверхневих. Експлуатувати таку деревину як матеріал небезпечно – нерівномірність розподілу вологості по перетину може позначатись на якості готових виробів.

Тривалість кінцевої тепловологообробки залежить від породи деревини, товщини, середньої кінцевої вологості матеріалу – $\bar{W}_k$, вологості поверхневих і центральних шарів, параметрів середовища. Орієнтовно тривалість кінцевої тепловологообробки можна визначити за формулою:

$$\tau_{ko} = B \bar{W}_k \sqrt{\frac{W_{ц}}{W_{пов}}}, \text{ год}, \quad (9)$$

де: B – коефіцієнт, який залежить від породи і товщини матеріалу; $W_{ц}$, $W_{пов}$ – відповідно вологість центральних і поверхневих шарів деревини.

Кондиціонування

Для вирівнювання вологості окремих дощок (заготовок) у штабелі після сушіння проводять кондиціонуючу обробку при температурі останнього ступеня режиму і відносній вологості повітря, яка забезпечує досягнення рівноважної вологості деревини. Тривалість кондиціонування можна визначити за формулою:

$$\tau_k = C_k \bar{W}_k S_1^2 \cdot 10^{-3}, \text{ год}, \quad (10)$$

де: C_k – коефіцієнт, який враховує породу деревини (наприклад, для бука і клена $C_k = 0,36$); $\bar{W}_k$ – середня кінцева вологість матеріалу, % абс.; S_1 – товщина матеріалу, мм.

Кінцеву тепловологообробку та кондиціонування доцільно об'єднати

$$\tau_k = A_k \bar{W}_k S_1^2 \sqrt{\frac{W_{ц}}{W_{пов}}} \cdot 10^{-3}, \text{ год}. \quad (11)$$

Тривалість цих тепловологообробок була знайдена орієнтовно. Для більш точного визначення тривалості тепловологообробок необхідно враховувати теплові та інерційні характеристики сушильних камер, параметри середовища, розміри і властивості матеріалу, швидкість циркуляції агента сушіння та інші фактори.

Тривалість остигання камери визначається за формулою

$$\tau_o = a(t_m - t_{ko}) \rho S_1^m, \quad (12)$$

де: t_m – температура матеріалу в кінці процесу сушіння, °C; t_{ko} – кінцева температура остигання в камері, °C; a , m – постійні коефіцієнти.

УДК 621.396.6+697.685.8 Асист. В.Б. Фаст – НУ "Львівська політехніка"

МОДЕЛЬ ПОВІТРОВОДУ ПОСТІЙНОГО ПЕРЕТИНУ ДЛЯ ШАФ СУШІННЯ З ПОДАЧЕЮ ПОВІТРЯ У ПРОТИЛЕЖНІ ТОРЦІ

Запропонована математична модель аналізу витрат повітря, за умови його неперервного роздачі вздовж грані повітроводу при подачі повітря у протилежні торці.

Assist. V.B. Fast – NU "Lviv'ska Politehnika"

Model of air duct with constant cross-section for dryers with air provision into opposite end faces

A mathematical model for air expenditures in the air duct is proposed. A case for continuous air distribution along the air duct side under air provision into opposite end faces is discussed.

У процесі проектування технологічного обладнання для сушіння різних матеріалів, в тому числі й дерева, виникає проблема аналізу витрат повітря вздовж рівномірно перфорованої грані повітророзподільних пристроїв. Дана задача знайшла своє рішення для повітроводів, у яких один торець заглушений, а у відкритий торець подається повітря. Проте часто трапляються випадки, коли ефективніше здійснювати подачу теплоносія у протилежні торці короба. Тоді він працюватиме у режимі підвищеного статичного тиску, а значить вектор швидкості повітря, що витікає з отворів, буде перпендикулярним до його грані, що забезпечить рівномірність процесу сушіння по всій довжині повітроводу. Нині, за наявності математичного апарату аналізу неперервних та дискретних витрат повітря у коробах постійного перерізу з одним заглушеним торцем [1], відсутні моделі, які б давали змогу розраховувати витрати повітря вздовж грані при зустрічній подачі повітря. Аналіз вказаних повітроводів здійснюється на основі фізичного моделювання через складність математичного опису руху зустрічних потоків повітря у коробі.