

УДК 541.18+532.6

Л 765-3

Л.С. Атрощенко, канд. техн. наук
Г.М. Юн, д-р техн. наук**ТЕОРЕТИЧНИЙ АСПЕКТ ШВИДКІСНОГО СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ**

Інститут економіки та менеджменту НАУ, e-mail: yun@ua.fm

Дано порівняльний аналіз різних методів сушіння деревини. Запропоновано новий метод швидкісного сушіння, оснований на застосуванні рідкого робочого тіла й оригінальної технології пакування пиломатеріалу. Викладено фізику процесу швидкісного сушіння. Розглянуто етапи реалізації методу швидкісного сушіння пиломатеріалів.

Вступ

Процес сушіння матеріалів або речовин займає значне місце в реалізації багатьох технологічних процесів у різних галузях господарської діяльності людини.

Сушіння деревини – найбільш тривалий і енергоємний процес, який займає 30–50 % часу технологічного циклу.

Вирішуючи питання вдосконалення технологій, передусім прагнуть до підвищення якості продукту, інтенсифікації процесу, тобто скорочення часу перетворення продукту, зниження питомих витрат на одиницю виробу або маси продукту.

Процес сушіння деревини здійснює людина здавна. Для цього використовували здебільшого природне явище – атмосферне сушіння.

До недоліків атмосферного сушіння належать:

- значна тривалість процесу;
- залежність від сезонності;
- виникнення великих деформацій.

Аналіз досліджень і публікацій

Вибір способу сушіння, обладнання й організація процесу залежать від багатьох факторів як технологічного, так і місцевого значення.

Тепер основний метод одержання деревини – конвективне сушіння, суть якого полягає в підтримці різниці вологості робочого тіла (газоподібного середовища) і рівноважної вологості рідини, що знаходиться в деревині.

Конвективним камерам сушіння незалежно від застосовуваного робочого тіла, наприклад, повітря, пари, властиві деякі недоліки.

По-перше, неможливість практичного забезпечення рівномірного температурного поля в сушильних камерах призводить до виникнення різних видів деформації (крутіння, накладання, щілиноутворення та ін.). Виниклі сили можуть досягати 150 кг/см^2 . Появу деформацій, зокрема, на вигин, спричиняють сили ваги внаслідок нераціонального пакування (укладання) пиломатеріалів на час сушіння.

По-друге, конвективний метод сушіння спричиняє значну енергоємність процесу,

зумовлену періодичним викидом в атмосферу робочого тіла, утилізація якого нераціональна через його низький температурний потенціал, а високий ступінь рециркуляції агента призводить до додаткових затрат електроенергії на його прокачування і помітно знижує коефіцієнт корисної дії циклу в цілому з урахуванням тривалості процесу. Питома витрата енергії теплової енергії навіть у кращих конвективних сушильних установках перевищує 4500 кДж на 1 кг випареної вологи.

По-третє, спостережувана тенденція збільшення вартості деревини висуває підвищені вимоги до якості сушіння (деформацій, утворення щілин тощо). Ці вимоги змушують знижувати температуру робочого середовища в конвективних камерах майже до $60 \text{ }^\circ\text{C}$, що призводить до небажаного збільшення часу сушіння.

Наприкінці XIX ст. з метою скорочення часу сушіння робилися спроби сушити деревину в рідких середовищах, зокрема, з використанням високомолекулярних з'єднань продуктів поділу нафти [1].

У праці [2] наведено результат дослідження із сушіння виробів з деревини (берези і хвойних порід) у рідкому теплоносії.

Однак у процесі освоєння подібної технології не вдалося запобігти утворенню щілин на поверхні деревини і розколу пиломатеріалів.

Натепер не існує загальної теорії сушіння і методів визначення параметрів процесу, що однозначно забезпечують кінцеву якість деревини [3].

Факторами, що ускладнюють розроблення загальних методів розрахунку температурних режимів сушіння деревини, є розходження в капілярностях різних порід деревини без урахування того, що вона міняється від комля до верхівки [4–6]. Співвідношення “дрібних” (діаметром до 10^{-7} м) і “великих” (діаметром більше 10^{-7} м) капілярів не передбачувано навіть для однієї і тієї ж породи деревини. Фізика поведінки вологи і процесу випаровування для “дрібних” і “великих” капілярів різна [4].

Першим параметром, який найбільш істотно впливає на розрахунок температурних режимів процесу сушіння деревини, є випаровування вологи в капілярах, що викликає значне підвищення тиску в них.

Верхня припустима границя тиску визначається збереженням самої структури капілярів, що забезпечує міцніші характеристики деревини.

Прикладом недотримання цієї вимоги можуть служити останні російські швидкісні сушильні камери сім'ї СК, де перевищення граничного тиску в капілярах призводить до їх руйнування і, як наслідок, до розпушення деревини.

Другим параметром невизначеності є хімічний склад деревини, який у процесі сушіння має бути збережений, тому що від нього залежить ступінь деформації деревини в процесі сушіння.

Третім параметром є енергетична оцінка теплового припливу в часі в процесі сушіння, складність якої зумовлена різноманіттям зв'язків води в тілі деревини.

Частково вода знаходиться у фізичному зв'язку з матеріалом деревини, структура якої переважно капілярно-пориста. При цьому не існує методики визначення функції дисперсійного розподілу капілярів за розмірами, від яких залежить потенційна енергія зв'язку води.

Потенційна енергія зв'язку залежить також від структури внутрішньої поверхні самих капілярів.

Вода міститься в деревині як складова частина молекул у кількості, що залежить від виду молекул.

Таким чином, теплота фазового переходу (випари) не може бути визначена розрахунковим способом, а проведення досліджень для кожного конкретного випадку економічно недоцільно.

Останнім із найскладніше обумовлених параметрів у формалізованому описі процесу сушіння є параметр рівноважного тиску пари води, що міститься в деревині.

Швидкість сушіння залежить від різниці тиску, рівноважного щодо вологи в деревині, і парціального тиску в робочій речовині (тілі).

Детальний аналіз видів зв'язку і відповідні розрахункові співвідношення наведено в літературі [5; 7; 8].

Постановка завдання

При проведенні серії експериментів із сушіння деревини в рідкому середовищі, зокрема в парафіні, авторам удалося звести до мінімуму, а в деяких випадках цілком уникнути деформації для довгомірних матеріалів з одночасним виключенням утворення щілин (оптичний контроль із чотириразовим збільшенням), а також зберегти міцність деревини, її біологічний і хімічний захист (крім речовин, що містять розчинники).

Так, дуб, висушений до 3,5 % вологості, був витриманий протягом року при 100 % вологості навколишнього середовища (бетонний підвал). У результаті експерименту виявилось, що він набув усього лише 11% вологості.

Збереження якості сушіння деревини залежить від температури рідини, за якої відбувається занурення деревини, і температурного режиму в процесі сушіння, що, у свою чергу, залежить від породи і первісної вологості деревини.

Процес сушіння здійснюється в режимі бульбашкового випаровування вологи з деревини. Характер останнього (дисперсність розмірів бульбашок і інтенсивність) дозволяє за допомогою візуального спостереження й аналізу варіювати теплоприплив до сушильної камери і, як наслідок, температуру робочої речовини сушіння. Такий контроль забезпечував високу якість висушеної деревини.

Час сушіння м'яких порід, зокрема соснової дошки товщиною 20 мм із початковою вологістю 85 % і кінцевою – 3,5 %, становить не більше 40 хв, час сушіння дошки товщиною 76 мм – 1 год 20 хв.

Крім того, були проведені експерименти на промисловій сушильній установці заготівель довжиною 1,5 м таких порід деревини, як дуб, оксамитне (коркове) дерево, липа, сосна.

Виконаємо деякі розрахунки, задаючи величиною теплоприпливу g , що витрачається безпосередньо на випаровування вологи в деревині. Рівняння теплового балансу на кожен момент часу сушки буде мати вигляд:

$$q = q_{\text{пр}} + q_{\text{вип.в}}$$

де $q_{\text{пр}}$ – потужність, що поглинається сушильною камерою від початку сушіння до її завершення, кДж/с; $q_{\text{вип.в}}$ – потужність, затрачувана на випаровування вологи з деревини, кДж/с.

Кількість тепла, яке надходить у сушильну камеру, можна записати у вигляді

$$g = C_d (t_{\text{р.т}} - t_0^n) + \tau_{\text{рід}} \Delta m_{\text{рід}}$$

де C_d – секундна теплоємність висушеної деревини (кількість тепла, що поглинається висушеною деревиною за 1 с у разі нагрівання на 1°C), кДж/(с·°C); $t_{\text{р.т}}$ – температура робочого тіла, °C; t – первісна температура деревини, °C; $\tau_{\text{рід}}$ – теплота фазового переходу рідини в тілі деревини, кДж/кг; $\Delta m_{\text{рід}}$ – маса рідини, що зазнала фазового переходу в одиницю часу, кг/с.

Процес сушіння має особливості.

Теплові і масообмінні процеси симетричні відносно поверхонь, відстань між якими мінімальна, тобто відповідає товщині пиломатеріалу,

та щодо інших поверхонь істотно не впливають на процес сушіння [1].

Таким чином, натепер немає розробки, в якій наведено хоча б якісний опис процесу сушіння в рідинах. Природно, чисто експериментальний метод проведення процесу не дозволяє сушити деревину в промислових масштабах.

Узагальнимо основні фактори й умови, що забезпечують реалізацію інтенсивного сушіння деревини:

- для реалізації самого процесу сушіння температура робочої речовини повинна перевищувати температуру фазового переходу води в капілярах;

- для збереження прогнозованих характеристик деревини необхідно, щоб теплоприплив був нижче граничного, при якому відбувається руйнування капілярів;

- збереження хімічного складу деревини обумовлюється інертністю робочого тіла до хімічного складу деревини і температурою сушки;

- відсутність деформацій забезпечується зменшенням чи виключенням перепаду температур за всіма трьома вимірами пиломатеріалу і мінімізацією впливу сил притягання Землі;

- утворення тріщин запобігається в тому випадку, коли градієнт температури на поверхні пиломатеріалу дорівнює нулю або розривна напруження не перевищує границі міцності матеріалу в поверхневому шарі.

Процес інтенсивного сушіння пиломатеріалів

Розглянемо поетапно процес інтенсивного сушіння пиломатеріалів.

1. Момент повного занурення пиломатеріалу товщиною h до сушильної камери характеризується тим, що поверхня матеріалу буде знаходитися при температурі робочого середовища $t_{p.c}$, а маса деревини буде мати первісну температуру t_0^d . Розподіл температури в тілі пиломатеріалу в момент занурення зображено на рисунку (а).

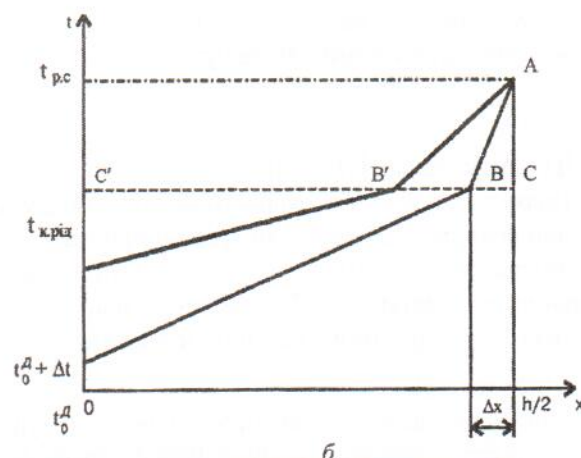
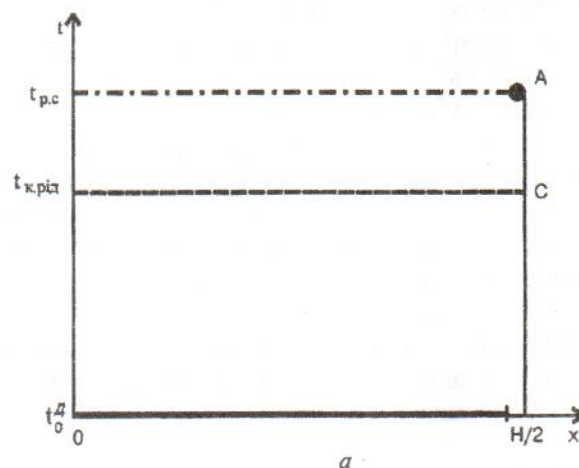
2. Другим етапом процесу буде прогрівання поверхні деревини до температури, що дорівнює температурі кипіння рідини в тілі деревини під дією різниці $t_{k.pid} - t_0^d$, де $t_{k.pid}$ – температура кипіння рідини в деревині. У цей проміжок часу Δt (часу прогрівання поверхні пиломатеріалу до $t_{k.pid}$) випаровування вологи з деревини не буде (див. рисунок, а, точка С).

3. На рисунку (б) показано, що деревина висушена до нульової вологості і прогрілася до температури робітничого середовища. Розподіл температури в тілі деревини в момент часу $\tau_1 \geq \Delta t$

показано на рисунку (б). На поверхні деревини буде підтримуватися температура робочого середовища (точка А). Оскільки волога частково випарувалася в шарі Δx , то на глибині $h/2 - \Delta x$ температура деревини дорівнює температурі кипіння рідини в деревині (точка В). Одночасно буде прогріватися тіло деревини від температури кипіння рідини в деревині $t_{k.pid}$ у площині координати $h/2 - \Delta x$ до температури $t_0^d + \Delta t$ у площині координати $x = 0$. У процесі сушіння температурний фронт $t_{k.pid}$ буде просуватися в гліб тіла деревини (точка В').

Після закінчення сушіння, що означає відсутність вологи в деревині, остання набуде температуру $t_{k.pid}$ по всьому обсязі (пряма СС').

Подальше нагрівання деревини до температури робочої рідини $t_{p.c}$ не має сенсу через те, що промислове виробництво споживає деревину, вологість якої лежить у межах 5–25%. Таким чином, процес сушіння має



Розподілення температури в тілі пиломатеріалу:

а – у момент занурення до сушильної камери; б – у процесі сушіння;

— — момент занурювання пиломатеріалу до сушильної камери; - - - - момент прогріву деревини до температури кипіння вологи; — · — · — момент прогріву деревини до температури робочого середовища

перериватися у визначений момент, що забезпечує задану вологість деревини. Аналізуючи зміну вологості в деревині, можна відзначити, що вологість у тілі деревини в процесі сушіння однозначно пов'язана з локальною температурою

$$\eta = f(t),$$

де η – відносна масова вологість; t – температура.

Середня вологість матеріалу в момент часу t визначається формулою [9]

$$\bar{\eta} = \frac{\int_{t_{\text{кр.рід}}}^t f(t) dt}{t - t_{\text{кр.рід}}},$$

де $f(t)$ – розподіл температури в деревині по її товщині.

Висновки

У процесі сушіння в деревині формується певний розподіл вологи, яка буде підвищуватися від поверхні до центра тіла деревини. Звідси випливає, що для вирівнювання температури по об'єму потрібний якийсь час.

У зв'язку з цим виникає необхідність на підставі експериментальних даних одержати рівняння регресії, що визначають залежність вологісних характеристик від температурних режимів сушіння для різних порід і початкових значень вологості.

Потрібно також контролювати вологість у процесі сушіння, оскільки ні контактний, ні місткісний методи вимірювання вологості некоректні.

Найбільш коректним можна вважати ваговий метод визначення (вимірювання) вологості деревини. Однак ці проблеми лише супутні.

Статистична обробка результатів вимірювання дозволяє одержати перехідні функції для створення автоматичних систем керування процесами сушіння деревини різних порід.

У подальшому автори наведуть результати експериментів, виконаних за допомогою сушильної камери, сконструйованої на основі зазначених теоретичних положень.

Серію експериментів передбачається проводити для твердої і м'якої порід деревини при різній довжині і товщині дошки в широкому діапазоні початкової і кінцевої вологості зразків.

Список літератури

1. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. – М., Л.: Энергия, 1966. – 285 с.
2. Власенко С.А., Данилов О.Л., Серов Р.А., Белоглазов В.П. Интенсивное энергосбережение при сушке обработанной древесины // Интенсивное энергосбережение в пром. технологии: Тез. докл. 3-й Всесоюз. науч. конф. по пробл. энергосберегающих технологий. – М., 1991. – С. 19.
3. Лурье М.Ю. Современные проблемы сушильной техники. – М., Л.: Леспромиздат, 1941. – 245 с.
4. Кришнер О.М. Научные основы техники сушки. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 250 с.
5. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. – М.: ГИТТЛ, 1954. – 296 с.
6. Федоров И.М. Теория и расчет процессов сушки во взвешенном состоянии. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 190 с.
7. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.Н. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1987. – 399 с.
8. Сум Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
9. Мышкис А.Д. Математика для втузов, специальные курсы. – М.: Наука, 1971. – 250 с.

Стаття надійшла до редакції 07.07.03.

Л.С. Атрошенко, Г.Н. Юн

Теоретический аспект скоростной сушки пиломатериалов

Дан сравнительный анализ различных методов сушки древесины. Предложен новый метод скоростной сушки, основанный на применении жидкого рабочего тела и оригинальной технологии пакетирования пиломатериала. Изложена физика процесса скоростной сушки. Рассмотрены этапы реализации метода скоростной сушки пиломатериалов.

L.S. Atroshenko, G.N. Yun

A theoretical aspect of saw-timber high-speed drying

It is given comparative analysis different methods of wood drying and proposed a new method of highspeed drying, which is based on using operational liquid and original technology of lumber packaging. Physics of high-speed drying process is stated and main stages of method practical realization are considered.