УДК 66. 047. 7, 66.047.3

НАУКОВО - ПРАКТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ ПРОМИСЛОВИХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕРМОВАКУУМНИХ УСТАНОВОК СУШІННЯ КАПІЛЯРНО - ПОРИСТОГО МАТЕРІАЛУ

Кутовий В.О., старший науковий співробітник, Ніколаєнко А.О. молодший науковий співробітник

(*Національний науковий центр «Харківський фізико – технічний інститут».)*

Розроблено імпульсний низькотемпературний режим термовакуумного сушіння деревини та наведена конструкція термовакуумної сушильної установки

деревини з еластичною оболонкою.Низькотемпературний технологічний процес сушіння покращує якість висушуваної деревини, яка під час сушіння не тріскається і не жолобиться.

Ключові слова: *термовакуумна установка, деревина, енергозбереження, якість.*

Постановка задачі

Сушіння деревини є одним із найбільш дорогих, тривалих і енергоємних технологічних процесів. В умовах інтенсивного розвитку деревообробної промисловості проблеми сушіння деревини зростають. Деревообробні підприємства потребують якісної сухої деревини. Тільки в Україні щорічно виробляється десятки мільйонів тонн м3 пиломатеріалів. При сушінні 1м3 деревини необхідно випарувати сотні літрів води. Для випаровування вологи із 1м3 деревини енергозатрати складають 230...460 кВт.ч електроенергії. Якщо новостворена технологія зменшить витрати енергії на сушіння деревини тільки на 1%, то економія складе значну суму. На даний час для сушіння деревини використовують конвективний метод, де в якості сушильного агента застосовують пар, гаряче повітря або суміш повітря з топковим газами, температура нагрівання деревини близько 1000С. Сушіння твердих порід деревини доходить до 50-60 діб, якість висушеної продукції низька, особливо пиломатеріалів із деревини листяних порід, в яких дефекти (тріщини і викривлення) досягають 40%, що призводить до необхідності підвищення ефективності сушіння деревини та розробки нових сушильних установок.

Метою цієї роботи є: розробка енергозберігаючого методу термовакуумного сушіння деревини та створення високоефективних, екологічно чистих сушильних установок. Ідея термовакуумного сушіння деревини полягає в тому, щоб при низькотемпературному нагріванні матеріалу інтенсифікувати внутрішній вологоперенос і зовнішній вологообмін. Це можна досягти шляхом застосування термобаричного методу. У вакуумі випаровування вологи в десятки разів інтенсивніше в порівнянні з атмосферним тиском, оскільки з пониженням тиску коефіцієнт дифузії водяної пари підвищується. Наприклад, при зниженні тиску у вакуумній камері до 5,3.103 Па коефіцієнт дифузії водяної пари збільшується в 19 разів. [1]. Таким чином, досить підтримувати температуру поверхні матеріалу, що висушується на рівні температури кипіння води при відповідному тиску, щоб створити високоінтенсивний процес внутрішнього вологопереносу і зовнішнього вологообміну.

Аналіз досягнень в області сушіння деревини

Для деревини використовують багато видів сушіння - конвективний, кондуктивний, радіаційний, вакуумний, діелектричний. Ці види сушіння мають безліч різновидів і часто застосовуються в комбінації між собою. Тривалість сушіння зазначеними способами становить від декількох годин до декількох діб. Сушіння деревини відбувається в громіздких металічних об’ємах. [1]. В даний час для сушіння деревини використовують більше всього конвективний метод, де в

якості сушильного агента застосовують пар, гаряче повітря або суміш повітря з топковим газами, температура нагрівання деревини може досягати 1000С і вище, що призводить до збільшення внутрішніх напружень у матеріалі, а це в свою чергу викликає викривлення і утворення тріщин в деревині і знижує її товарний вигляд. Сушка твердих порід деревини доходить до 50-60 діб, якість висушеної продукції низька, особливо пиломатеріалів з деревини листяних порід, в яких дефекти (тріщини і викривлення) досягають 40%, що призводить до необхідності підвищення ефективності сушіння деревини та розробки нових сушильних установок. [2, 3]. У зв'язку з цим розробляються вакуумні способи сушіння пиломатеріалів. Найбільш перспективним з точки зору інтенсифікації процесу сушіння у вакуумі є молярний вологоперенос під дією градієнта тиску. При нагріванні деревини у вакуумі волога випаровується на його поверхні при температурі, що відповідає кипінню води при тиску навколишнього середовища. Наприклад, при робочому тиску в камері

10-20 кПа температура кипіння води не перевищує 318- 323К - при цьому відбувається режим сушіння, який не ушкоджує органіку деревини. Це забезпечує практично повну відсутність мікротріщин в деревині і поліпшує якість кінцевого продукту. Отже, застосування вакуумної технології дозволяє вести високоінтенсивний процес сушіння при відносно невисокій температурі, що в результаті призводить до зниження енергетичних витрат на видалення вологи із деревини. Ефективність сушіння пиломатеріалів в більшості визначатися формою нагрівального елемента і способу передачі теплової енергії від нагрівального елемента до висушуваного матеріалу.

Метою роботи є: розробка енергозберігаючого методу термовакуумного сушіння деревини та створення високоефективних, екологічно чистих сушильних установок, корпус яких виготовлений із міцного еластичного матеріалу. Ідея термовакуумного сушіння деревини полягає в тому, щоб при низькотемпературному нагріванні матеріалу інтенсифікувати внутрішній вологоперенос і зовнішній вологообмін. Це можна досягти шляхом застосування термобаричного методу. У вакуумі випаровування вологи в десятки разів інтенсивніше в порівнянні із атмосферним тиском, оскільки з пониженням тиску коефіцієнт дифузії водяної пари підвищується. Наприклад, при зниженні тиску у вакуумній камері до 5,3.103 Па коефіцієнт дифузії водяної пари збільшується у 19

разів. [4]. Таким чином, досить підтримувати температуру поверхні матеріалу, що висушується на рівні температури кипіння води при відповідному тиску, щоб створити високоінтенсивний процес внутрішнього вологопереносу і зовнішнього влагообміну .

Результати дослідження

Термовакуумна технологія сушіння деревини полягає в поєднанні процесу вакуумування і теплового нагрівання. Принцип роботи сушильної технологіїї заснований на низькотемпературному випаровуванні вологи із матеріалу при зниженому тиску.

Тривалість процесу сушіння і якість матеріалу, що висушується, в основному

залежать від швидкості просування вологи із товщі деревини до поверхні, і видалення вологи із поверхні деревини в навколишнє середовище. Швидкість просування вологи в капілярно - пористому середовищі пов'язана зі зміною температури і, отже, зі зміною тиску в товщі висушуваного матеріалу і на його поверхні. [5]. Перенесення пару із капіляра на його поверхню залежить від радіуса, довжини капіляра і тиску на його кінцях.

$$J_k = \frac{8}{3}\sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \cdot r \cdot \left(\frac{P_1 - P_2}{L}\right), \qquad (1)$$

де J_k – потік пару при нагріванні, протікає в одиницю часу через одиницю площі поперечного перерізу капіляра кг· /К$^{1/2}$ м^{2}·с, P_1, P_2 – перепад тиску на кінцях капіляра, Па; M – молекулярна маса пару, кг/моль;

R – універсальна газова постійна, Дж/моль·К; T – температура нагрівання, К; r – радіус капіляра, м; L - довжина капіляра, м.

Під час нагрівання тиск в капілярах зростає пропорційно кореню квадратному із абсолютних температур [2].

$$\frac{P_1}{\sqrt{T_1}} = \frac{P_2}{\sqrt{T_2}}; \text{ звідки } P_2 = \frac{P_1\sqrt{T_2}}{\sqrt{T_1}}, \qquad (2)$$

де T_1, T_2 – початкова і кінцева температура нагрівання капіляра, К. Підставив значення P_2 із виразу (2) у вираз (1), одержимо.

$$J_k = \frac{8}{3}\sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \cdot r \cdot \left(\frac{P_1 - \frac{P_1\sqrt{T_2}}{\sqrt{T_1}}}{L}\right) = \frac{8}{3}\sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \cdot r \cdot \left(\frac{\frac{P_1\sqrt{T_1}}{\sqrt{T_1}} - \frac{P_1\sqrt{T_2}}{\sqrt{T_1}}}{L}\right) =$$

$$= \frac{8}{3}\sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \cdot r \cdot \frac{P_1\left(\sqrt{T_1} - \sqrt{T_2}\right)}{\sqrt{T_1} \cdot L} = 1{,}064 \cdot \sqrt{\frac{M}{R}} \cdot r \cdot \frac{P_1\left(\sqrt{T_1} - \sqrt{T_2}\right)}{\sqrt{T_1}L} \qquad (3)$$

Із виразу 3 слідує, що при T_1=T_2, потік пару із матеріалу, що висушується, дорівнює 0, звідки J_k =0. У початковий момент сушіння відбувається видалення вологи із поверхні деревини за рахунок повітряного потоку, який створює вакуумний насос всередині замкнутого об'єму під час його відкачки і внутрішньої енергії самого матеріалу, в результаті чого витрати тепла на випаровування вологи із поверхні призводить до зниження температури його тіла. У разі відсутності зовнішнього підігріву процес випаровування вологи сповільнюється, температура тіла знижується , $T_2 \rightarrow 0$ Якщо $T_2 << 0$ - йде процес сублімаційного сушіння. Із збільшенням температури $T_2 > T_1$ відбувається нагрівання всієї системи за рахунок зовнішнього джерела тепла. Волога деревина отримує приплив тепла і нагрівається до заданої температури, потік пару збільшується. У процесі початкового прогрівання пиломатеріалів тиск вологи в масиві деревини підвищується і досягає такого значення, при якому воно буде перевищувати тиск пари в навколишньому середовищі. Якщо у внутрішніх шарах пиломатеріал має

надмірну порівняно із зовнішнім середовищем тиск, то під його впливом волога у вигляді спрямованого потоку рухається в бік більш низького тиску, відбувається вологоперенос. [6]. Вирішальне значення тут мають коефіцієнт вологопровідності пиломатеріалу і градієнт вмісту вологи, що виникає при перепаді вологості на поверхні і всередині матеріалу. Для сушіння деревини необхідно, щоб волога від внутрішніх шарів переміщалася до поверхні (вологоперенос) і видалялася із поверхні (вологообмін). При цьому важливо, щоб процеси вологообміну і вологопереносу були за інтенсивністю однаковими. Якщо кількість вологи, що видаляється із поверхні деревини, буде більше тієї вологи, яка надходить із внутрішніх шарів, то всихання поверхневих шарів прискориться. В результаті створиться напруга між внутрішніми і зовнішніми шарами, що призводить до деформацій в деревині і навіть до тріщин і руйнувань.

Термовакуумна сушильна установка із еластичного матеріалу.

Існує велика різноманітність пристроїв та обладнання для сушіння деревини. В даний час вакуумні сушильні установки виготовляють із металу.

Такі установки є громіздкими і дорогими. Для захисту від викривлення пиломатеріалів у процесі сушіння використовують методи і засоби, що фіксують дошки в штабелі за допомогою різних затискних пристроїв. Виготовлення металевих камер більшого об’єму значно збільшує їх вартість.

Для спрощення конструкції установки і її здешевлення стінки вакуумної сушильної установки пропонується виготовляти із еластичного, міцного матеріалу на рис.1.

Рис. 1. Загальний вигляд термовакуумної установки з еластичною оболонкою

Дошки 3 розміщують усередині пакету 1, виготовленого із еластичного матеріалу на рис. 2.

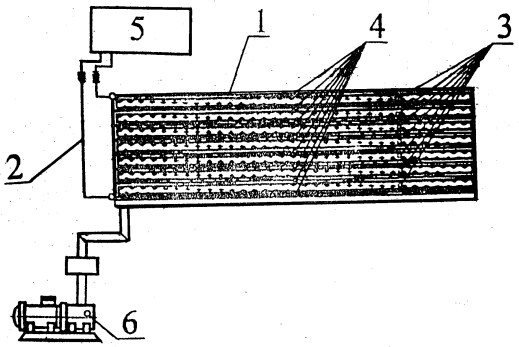

Рис. 2. Схема термовакуумної установки із еластичною оболонкою

Кожен шар деревини прокладається нагрівальним елементом 4, які через фідер 2 з'єднуються із джерелом електричного струму 5. Розміри і кількість нагрівальних елементів розраховуються індивідуально, в залежності від розмірів сушильної камери. Безпосередній контакт із нагрівачем покращує передачу тепла від нагрівального елемента до пиломатеріалу, це призводить в свою чергу до економії електроенергії, скорочує час нагрівання дощок до заданої температури, збільшує коефіцієнт передачі тепла від нагрівальних елементів до деревини, сприяє рівномірному нагріванню деревини по всьому об'єму. При вакуумуванні камери, за допомогою вакуумного насосу 6, під дією атмосферного тиску оболонка щільно стискає висушуваний матеріал. Сушильна установка із еластичною оболонкою трансформується в прес, який робить дошки рівними, що дозволить уникнути деформації пиломатеріалу під час сушіння і створює умови для ефективного теплообміну із нагрівальними елементами [7, 8]. При вакуумуванні камери за допомогою вакуумного насоса і досягненні тиску у вакуумній камері 1 кПа температура кипіння води становитиме 280К. Низькотемпературний технологічний процес сушіння покращує якість висушуваної деревини, яка під час сушіння не тріскається і не жолобиться. Камера з еластичною оболонкою коштує значно дешевше за рахунок меншої металоємності і простоти у виготовленні. Низькотемпературний технологічний процес сушіння деревини дозволяє використовувати в якості матеріалу для вакуумної камери, наприклад , поліетилен. Якщо порівняти дві термовакуумні сушильні установки із металевою оболонкою і поліетиленовою, то очевидно, що є суттєва перевага термовакуумної сушильної установки з еластичною оболонкою в порівнянні із термовакуумною сушильною установкою, яка виготовлена із металу. Крім того вакуумні камери з еластичною оболонкою займають мало місця. Це швидко споруджувальні модульні конструкції, що дозволяють індивідуально підібрати розміри сушильної камери відповідно з габаритами висушуваного матеріалу, зменшує собівартість висушуваного обладнання, знижує енерговитрати, скорочує час сушіння. Залежно від виду матеріалу, що висушується, режим видалення вологи із вакуумного об’єму і прогрівання пиломатеріалу буває різним. Наприклад, час сушіння соснових дощок товщиною 50 мм, із початковою вологістю 70% становить 72 години до вологості 6%. Максимальна температура нагрівання становить 323К, тиск в сушильній камері $26{,}6.10^2$ Па. Сушіння дуба вологістю 70% при тих же параметрах сушіння, що і

сосни, здійснюється за 520 годин. Кількість електричної енергії, яка використовується на видалення 1л вологи із деревини дуба, становить 0,8 кВт·г. Коли вологість деревини досягає встановленого значення, її нагрівання припиняється. Пиломатеріал охолоджується у вакуумній камері при низькому тиску, що дозволяє зафіксувати рівну форму висушеної деревини. Технологічний режим сушіння забезпечує отримання високоякісних матеріалів із заданою вологістю. Тріщини і викривлення відсутні на рис.3.

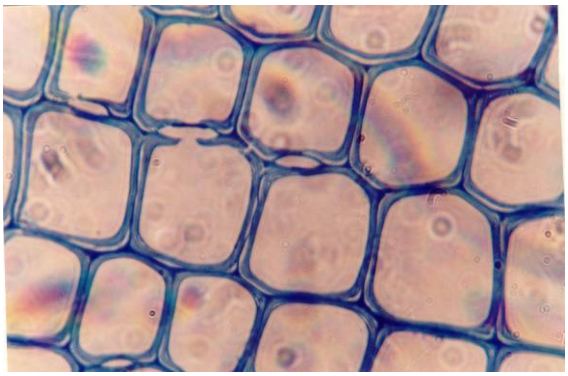

Рис. 3. Структура деревини дуба після сушіння, (поперечний розріз).

Із результатів дослідження установлено, що після сушіння клітини деревини дуба мають правильну форму, мембрани клітин стають тонші, клітини деревини дуба до сушіння мають неправильну форму із широкими міжкліточними мембранами на рис. 4.

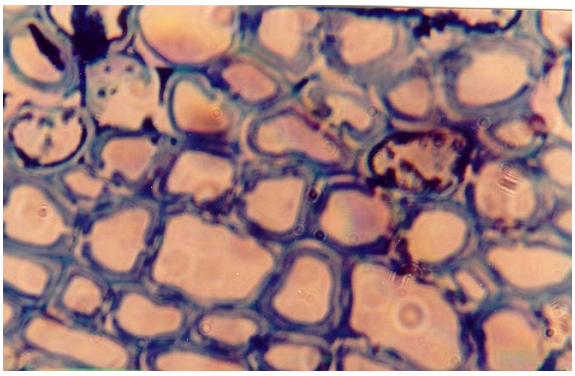

Рис.4. Структура деревини дуба до сушіння, (поперечний розріз)

Імпульсний режим сушіння деревини

В основу технології термовакуумного сушіння деревини закладено принцип «імпульсного» режиму сушіння. Процес сушіння складається із послідовних стадій нагрівання деревини і її вакуумування. На першій стадії сушіння матеріал при атмосферному тиску швидко нагрівається до заданої температури. Водяна пара, що покинула деревину, утворює навколо деревини насичену водяну пару. У результаті цього іде пропарювання деревини по товщині матеріалу, що призводить до розширення капілярів. Це дозволяє уникнути значних напруг і великих залишкових деформацій у тілі деревини щільних порід. Коли температура всередині деревини досягає рівня, необхідного для сушіння,

включається вакуумний насос, видаляється повітря і пар із сушильної камери. У цей час під дією градієнта тиску і температури із внутрішніх шарів деревини волога надходить назовні. На поверхні деревини волога перетворюється в пар і надходить у вакуумний насос.

Як відомо [9], лінійна швидкість потоку рідини в пористому тілі прямо пропорційна різниці тисків Δp на поверхні матеріалу і в всередині його, квадрату об'єму пор $V^2_{пор}$. Обернено пропорційна квадрату повної поверхні закритих пор на одиницю об'єму тіла $S_ч$, динамічної в'язкості рідини η, лінійного розміру тіла l.

$$\nu = \frac{\Delta p \cdot V^2_{їð}}{5 \cdot S^2_{÷} \cdot \eta \cdot l}, \quad (4)$$

Ефективний час видалення вологи із деревини триває до настання моменту, коли поверхневий шар деревини висихає, пори закриваються, що ускладнює подальше видалення вологи із висушуваного матеріалу. У цей час сушку деревини необхідно припинити. Вакуумна камера відкривається і вентилюється. Із вакуумної камери видаляється сконденсована волога, а температура деревини знижується. У деревині починається процес вологопереносу. Волога надходить із внутрішніх шарів деревини на поверхню. Поверхневий шар зволожується, пори відкриваються, і деревина може піддаватися знову термовакуумному сушінні. Число стадій «прогрівання - вакуум- атмосферний тиск - прогрівання - вакуум-атмосферний тиск і т. д.» залежить від необхідної кінцевої вологості і складу деревини. Імпульсний режим термовакуумного сушіння деревини економить додатково близько 20% електроенергії.

Термовакуумна технологія сушіння дозволяє отримати високу якість деревини без тріщин і викривлення, прискорює процес сушіння в порівнянні із іншими методами сушіння, забезпечує екологічну чистоту, скорочує витрати електроенергії, зменшує вагу установки і собівартість, поліпшує умови праці обслуговуючого персоналу. Термовакуумна сушильна установка з еластичною оболонкою може використовуватися для сушіння деревини різних порід, товщини і довжини.

Висновки

Створені науково - практичні основи промислових енергоефективних термовакуумних установок сушіння капілярно - пористих середовищ. Запропонований і розроблений низькотемпературний, дискретний термовакуумний процес сушіння деревини дозволяє значно скоротити час сушіння деревини в порівнянні із існуючими методами і значно знизити споживання електроенергії.

Створено дослідно - промисловий зразок термовакуумної сушильної установки деревини, у якої стінки виготовлені із еластичного матеріалу. Така конструкція термовакуумної сушильної установки дозволяє уникнути деформації пиломатеріалу під час сушіння, покращує умови теплообміну деревини з нагрівальними елементами, сприяє рівномірному нагріванню деревини по всьому об'єму, зменшує вартість сушильного обладнання.

Проведені дослідження дозволили сформулювати новий підхід до технології сушіння деревини, що вносить значний внесок у розвиток науково- технічної сфери сушіння капілярно - пористих матеріалів.

Література

1. Расев А.И., Косарин А.А. Гидродинамическая обработка и консервирование древесины. М. «Форум». 2010. 416 с.
2. Патент 2044238 Россия, МПК F26B5/04. Вакуумная сушильная камера: / Кошелев С.М., Михайлев М.В., Черемисинов В.В., Шуляков А.С.; заявитель и патентообладатель «Ангарский электролизный химический комбинат». –
№ 5021510/06; заявлено:10.01.1992; опубликовано:20.09.1995. Бюл. №
3. Патент 2186305 Россия, МПК F26B5/04, F26B7/00. Вакуумная сушильная камера:/ Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Лашков В.А. и др.; заявитель и патентообладатель «Научно-технический центр по разработке технологий и оборудования». -№ 2000117723/06; заявлено: 04.07.2000; опубликовано: 27.07.2002. Бюл. №
4. Горяев А.А. Вакуумно-диэлектрическая сушка древесины. (Обзор). М. 1977. С.4-6.
5. Лыков А.В. Михайлов Ю.А.. Теория тепло и массопереноса. - Москва: «Госэнергоиздат», 1963. - С. 47-52.
6. Г.С. Шубин. Сушка и тепловая обработка древесины. М. Лесная промышленность. 1990. С. 29 – 42.
7. Пат. 268 Україна, МПК F 26D9/06. Вакуумная камера сушильной установки: /Кутовой В.А., Маханьков В.И., Егоров А.М., Хижняк Н.А.; заявитель и патентообладатель ННЦ «Харьковский физико-технический институт». - № 97073453; заявл. 01.07.97; опубл. 25.12.98. Бюл.№6 – 4с.
8. Патент 269 Україна, МПК F26B 9/06. Вакуумная установка для сушки древесины: / Кутовой В.А., Маханьков В.И., Егоров А.М., Хижняк Н.А.; заявитель и патентообладатель ННЦ «Харьковский физико-технический институт».- № 97073455; заявл. 01.07.97; опубл. 25.12.98. Бюл.№6. - 4с.
9. Лыков А.В. Тепломассообмен: [Справочник]. - М. «Энергия», 1972. - 309с.

Аннотация

НАУЧНО – ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕРМОВАКУУМНЫХ УСТАНОВОК СУШКИ КАПИЛЯРНО - ПОРИСТЫХ СРЕД

В.А. Кутовой, А.А. Николаенко

Разработан импульсный низкотемпературный режим термовакуумной сушки древесины и представлена конструкция термовакуумной сушильной установки древесины с эластичной оболочкой. Низкотемпературный

технологический процесс сушки улучшает качество высушиваемой древесины, которая во время сушки не трескается и не коробится.

Ключевые слова: *термовакуумная установка, древесина, энергосбережение, качество*

Abstract

SCIENTIFIC AND PRACTICAL FUNDAMENTALS OF ENERGY EFFICIENT INDUSTRIAL THERMAL AND VACUUM DRYING EQUIPMENT OF CAPILLARY AND POROUS MATERIALS

Kutovoy V. ,Nikolaenko A.

Developed pulsed low-temperature regime of thermal vacuum drying of timber and presented design thermal vacuum wood drying installation with an elastic shell.Low-temperature drying process improves the quality of dried wood that during drying does not crack or warp.

Keywords: *thermal vacuum drying installation, wood, energy efficient, quality.*