

А.М. Шостачук, асист.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ДЕРЕВИНИ
НА ЇЇ ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ
ПРИ КОНВЕКТИВНО-НАДВИСОКОЧАСТОТНОМУ СУШІННІ**

(Представлено д.т.н., проф. І.Г. Грабаром)

Представлено аналіз впливу діелектричних характеристик вологої деревини на потужність виділення теплоти при конвективно-надвисокочастотному нагріві. Запропоновано рекомендації з регулювання інтенсивності нагріву з метою досягнення необхідного розподілення температурних полів в поперечному перерізі висушуваних матеріалів.

В [1, 2, 3] автором було досліджено кількісні закономірності впливу найважливіших факторів (поточна вологість, інтенсивність нагріву, розміри пиломатеріалів) на процеси видалення вологи та утворення тріщин. Проведені дослідження дали змогу зробити висновок, що для отримання висушених матеріалів високої якості необхідно віднайти механізми управління інтенсивністю процесів видалення вологи в процесі сушіння. Одним з таких механізмів є, на наш погляд, зміний режим роботи магнетронів.

Особливістю взаємодії хвиль НВЧ-діапазону та вологої деревини є аномальне високе поглинання НВЧ-енергії водою. Але, оскільки вологоутримання в процесі сушіння змінюється, очевидно, що потужність виділення теплоти в процесі сушіння також буде змінюватись. Висловимо припущення, що наявність чи відсутність тріщин обумовлена розподіленням температурних полів в поперечному перерізі висушуваних матеріалів. Розглянемо температуру нагріву деревини в процесі сушіння при незмінних режимах роботи магнетрона. Для оцінки впливу змінного електричного поля на деревину необхідно знати час зміщення або орієнтації її часток під дією електричного поля – час релаксації, який визначає час встановлення поляризації. Якщо час релаксації набагато більший за період зміни електричного поля, поляризація не відбудеться. Якщо цей час менший або дорівнює періоду зміни електричного поля, діелектрик поляризується. Час релаксації залежить від розмірів молекули та в'язкості речовини [4]:

$$\tau = 4\pi \frac{\eta r^3}{kT} = \frac{3r\nu}{kT},$$

де η – в'язкість; r – радіус молекули; ν – об'єм молекули; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура.

Для води [4] $\tau = 1,5 \cdot 10^{-11}$ с, а для деревинної речовини $\tau = 2 \cdot 10^{-6}$ с.

Представимо фази води та абсолютно сухої деревини, молекули яких мають відомий час релаксації, у вигляді сукупності двох математичних маятників (рис. 1, а). Для отриманої системи запишемо рівняння Лагранжа [5]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_p,$$

де T – кінетична енергія системи; φ – узагальнена координата.

Кінетична енергія двох сполучених маятників має вигляд:

$$T = \frac{m}{2} (V_1^2 + V_2^2), \tag{1}$$

де m – маса; V_1 і V_2 – лінійні швидкості обертального руху маятників, які дорівнюють:

$$V_1 = l_1 \omega; \tag{2}$$

$$V_2 = l_2 \omega, \tag{3}$$

тут ω – кутова швидкість обертального руху; l_1 та l_2 – довжини маятників.

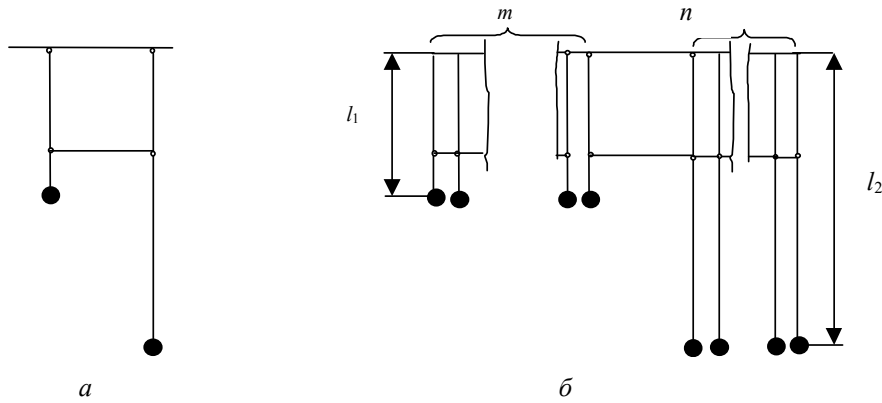


Рис. 1. Системи з 2-х (а) та $m + n$ (б) маятників

З урахуванням (2) і (3), формула (1) буде мати вигляд:

$$T = \frac{m}{2} \omega^2 (l_1^2 + l_2^2). \tag{4}$$

Узагальнену силу знайдемо з виразу елементарної роботи. При обертовальному русі маятників така робота буде дорівнювати:

$$\delta A = (-mgl_1 \sin \varphi - mgl_2 \sin \varphi) d\varphi = -mg\varphi(l_1 + l_2) d\varphi,$$

де φ – кут відхилення від вертикального положення.

В останньому виразі справа від знака рівняння стоїть добуток узагальненої сили на елементарне переміщення. Таким чином, узагальнена сила дорівнює:

$$Q_p = -mg\varphi(l_1 + l_2). \tag{5}$$

Враховуючи вираз (4), знаходимо:

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0.$$

Далі:

$$\frac{\partial T}{\partial \omega} = m\omega(l_1^2 + l_2^2);$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega} = m\ddot{\varphi}(l_1^2 + l_2^2). \tag{6}$$

Підставляючи вирази (5) і (6) в рівняння Лагранжа та скорочуючи на m , отримуємо:

$$\ddot{\varphi} + \frac{l_1 + l_2}{l_1^2 + l_2^2} g\varphi = 0.$$

Для отриманого диференціального рівняння 2-го порядку існує відоме рішення: приймемо

$$k^2 = \frac{l_1 + l_2}{l_1^2 + l_2^2} g.$$

Тоді період коливань системи з двох маятників:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{(l_1^2 + l_2^2)}{(l_1 + l_2)g}}. \tag{7}$$

Значення l_1 і l_2 знайдемо з виразу для періоду коливань математичного маятника, якщо замість періоду підставимо час релаксації води та абсолютно сухої деревини, відповідно 10^{-6} та 10^{-13} с. Отримуємо значення l_1 і l_2 для води та сухої деревини $2,5 \cdot 10^{-13}$ і $2,5 \cdot 10^{-23}$ м відповідно. Підставляючи отримані дані у (7), знаходимо період власних коливань для системи з двох маятників з довжинами l_1 і l_2 : $T_{1-2} = 1 \cdot 10^{-6}$ с. Як видно, період коливань з двох маятників довжинами l_1 і l_2 дорівнює періоду коливань маятника довжиною l_1 .

Аналогічні результати отримуємо, якщо кількість маятників в системі поставити у відповідність поточній вологості деревини в процесі сушіння (рис. 2, б). Наприклад, при 50%-ій вологості кількість маятників m (волога) буде дорівнювати кількості маятників $n = 2m$ (суха деревина). Моделюючи зміну вологості деревини в процесі сушіння, будемо змінювати m від 50 до 0. Враховуючи вираз (7) та наведені вище міркування, формула для обчислення періоду системи маятників, яка описує зміну вологості деревини в процесі сушіння, буде мати вигляд:

$$T^{**} = 2\pi \sqrt{\frac{(ml_1^2 + nl_2^2)}{(ml_1 + nl_2)g}}$$

Результат, який дає останній вираз, аналогічний результату, отриманому з (7).

Таким чином, при конвективно-надвисокочастотному нагріві саме за допомогою молекул води відбувається перетворення енергії змінного електромагнітного поля в теплову енергію. Оскільки вологість деревини в процесі конвективно-надвисокочастотного сушіння змінюється, ставиться завдання регулювання параметрів змінного електромагнітного поля під час сушіння з метою забезпечення, з одного боку, мінімальної тривалості сушіння, з іншого – відсутності тріщин. Розглянемо фактори, які обумовлюють підвищення температури деревини в процесі конвективно-надвисокочастотного сушіння. Як відомо [6], формула діелектричних втрат має вигляд:

$$P_{num} = 2\pi f E^2 \xi \xi_0 \operatorname{tg} \delta, \tag{8}$$

де f – частота змінного електричного поля; E – напруженість поля.

Очевидно, що основними з цих факторів є діелектричні характеристики деревини, які є функціями її вологості, а значить, змінюються в процесі конвективно-надвисокочастотного сушіння. Аналізуючи ξ і $\operatorname{tg} \delta$, необхідно враховувати, що вологу деревину доцільно розглядати як двофазну речовину. Однею фазою є вода, іншою – деревинна речовина. Вода – дисперсна фаза, що заповнює систему капілярів в дисперсному середовищі. В залежності від пропорцій, в яких змішані ці фази, значення ξ і $\operatorname{tg} \delta$ можуть бути різними. Деревину з вологістю нижче 30 % розглядають – як змішаний діелектрик, що одна фаза розчинена в іншій, а деревину з вологістю вище 30 %, коли в капілярах присутня вільна волога – як діелектрик, що складається з двох шарів. При переході через точку насичення волокна, тобто при зміні зв'язку між деревиною і вологою можуть спостерігатися екстремуми ξ і $\operatorname{tg} \delta$. Наведені в літературі [4, 7] дані дають змогу простежити не тільки зміну параметрів ξ і $\operatorname{tg} \delta$ в залежності від температури, вологості та частоти коливань, а також і визначити спільний вплив параметрів ξ і $\operatorname{tg} \delta$ на інтенсивність виділення теплоти. Значення параметрів $\operatorname{tg} \delta$ і ξ деревини дуба в змінному електричному полі з частотою 2,4 ГГц, в залежності від вологості [8], зображено на рис. 2. Розглянемо вплив напруженості E на сталість температурного режиму сушіння. Величина E в процесі конвективно-надвисокочастотного сушіння обумовлена вологістю деревини, тобто ємністю конденсатора, між пластинами якого і знаходиться деревина, причому залежність у даному випадку зворотня [9]:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{\xi_2}{\xi_1}, \tag{9}$$

де E_1, C_1, E_2, C_2 – напруженість поля і ємність конденсатора на початку (2) і в кінці (1) сушіння відповідно; ξ_1, ξ_2 – відносна діелектрична проникність відповідно вологої (2) та сухої (1) деревини.

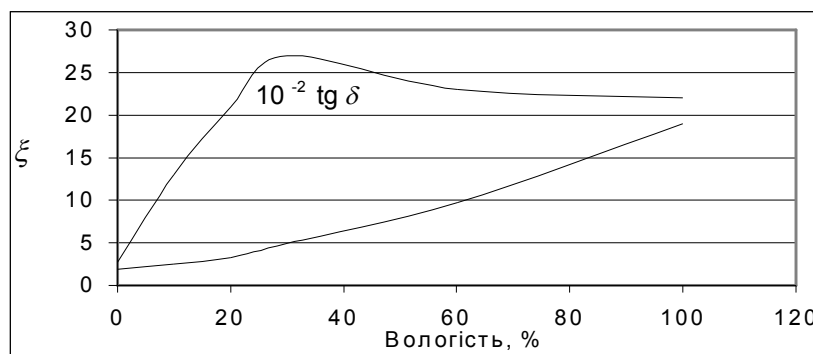


Рис. 2. Залежність діелектричних характеристик деревини дуба від вологості [8]

Таким чином, в процесі конвективно-надвисокочастотного сушіння діелектрична проникність деревини, а значить, і ємність конденсатора C зменшується. Тобто величина E_1/E_2 в процесі сушіння збільшується. А це означає збільшення в процесі сушіння напруженості змінного електричного поля E .

Оскільки при конвективно-надвисокочастотному нагріві деревини на потужність виділення тепла впливає не тільки діелектрична проникність, а і тангенс кута діелектричних втрат, а напруженість E присутня в формулі (8) у другому ступені, то викликає інтерес розгляд залежності інтенсивності виділення теплоти від поточної вологості, причому остання буде обумовлювати значення $\operatorname{tg} \delta$ і ξ . Як

досліджуваний показник оберемо коефіцієнт k_n , який відношенням потужності, що виділяється в деревині при поточній вологості, до потужності виділення тепла у деревині з вологістю 60 %.

Співвідношення значень потужності, яка виділяється в сухій і вологій деревині, з урахуванням (8) і (9):

$$k_n = \frac{\Pi_{y1}}{\Pi_{y2}} = \frac{E_1^2 \xi_2 \operatorname{tg} \delta}{E_2^2 \xi_1 \operatorname{tg} \delta} = \frac{\xi_2^3 \operatorname{tg} \delta}{\xi_1^3 \operatorname{tg} \delta} \quad (10)$$

З урахуванням (10), значення k_n за результатами розрахунків наведені на рис. 3.

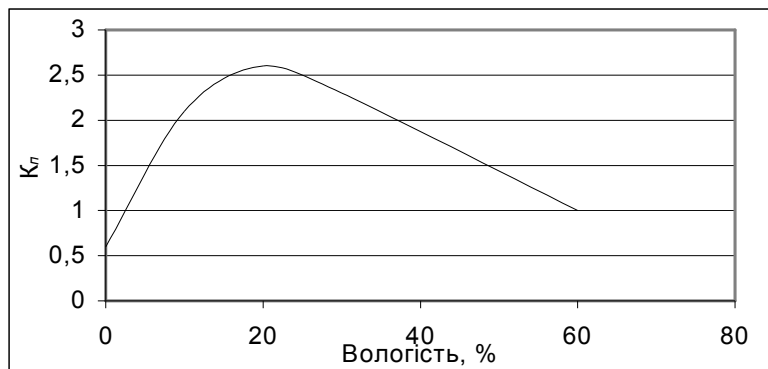


Рис. 3. Зміна коефіцієнта k_n в процесі сушіння деревини дуба

Таким чином, максимальне збільшення виділення тепла відбувається при досягненні деревиною вологості 27–30 % – межі гігроскопічності, тобто в той період, коли починається усушка і з'являється можливість розтріскування матеріалу.

Для експериментальної перевірки наведених вище міркувань було проведено сушіння зразків з деревини дуба. Розміри дослідних зразків 80x80x80 мм, початкова вологість 65–70 %, кінцева – 0–5 %, температура повітряного потоку 70 °С, швидкість – до 2 м/с, інтенсивність НВЧ-нагріву – 130 Вт/м³. На рис. 4 представлено дослідний зразок з площинами зрізу (а) та картину внутрішніх тріщин в поперечному перерізі. Як видно, незмінний температурний режим не є оптимальним.

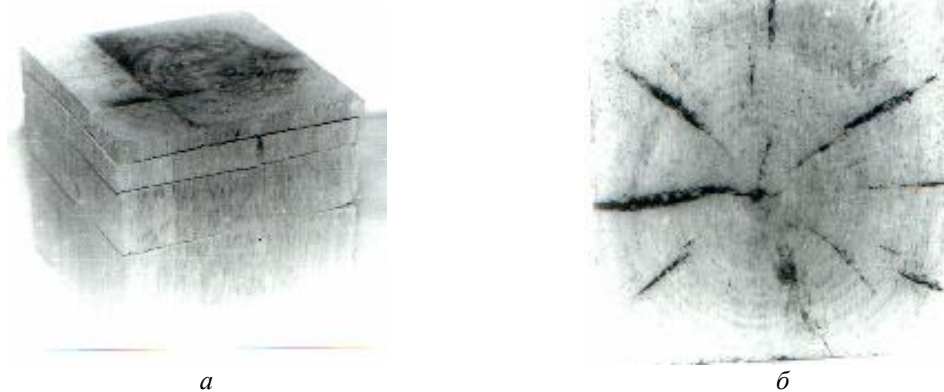


Рис. 4. Дослідний зразок (а) та внутрішні тріщини в його поперечному перерізі (б)

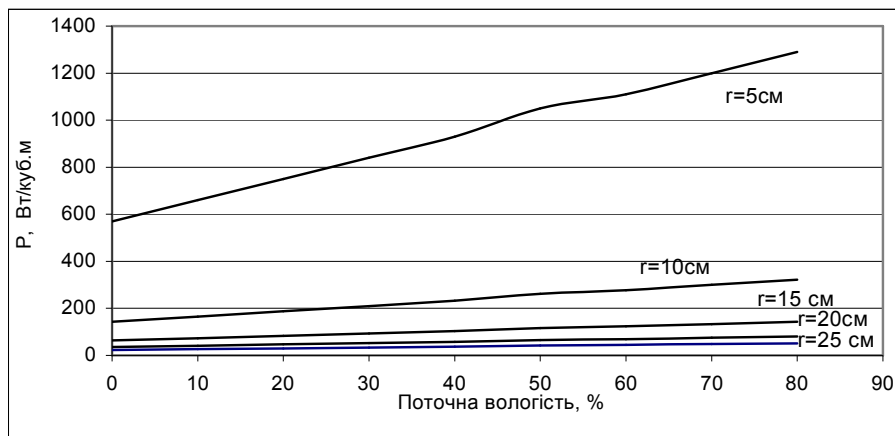


Рис. 5. Графік регулювання інтенсивності нагріву в залежності від вологості висушуваної деревини

На рис. 5 пропонується графік регулювання інтенсивності нагріву в ході конвективно-надвисокочастотного сушіння при дотриманні незмінної температури в центрі зразка. В результаті запропонованого способу регулювання вдалося уникнути підвищення температури в центрі поперечного перерізу при сушінні дубових пиломатеріалів з розмірами поперечного перерізу $50 \times 80 \text{ мм}^2$ і початковою 65–70 % та кінцевою вологістю 6–8 %. Складність проведення даного експерименту полягала в тому, що залежність діелектричних характеристик та теплопровідності від вологості є безперервною функцією, а переключання режимів в конвективно-надвисокочастотних печах, на яких проводились дослідження, здійснювалося ступінчасто. Крім того, інтенсивність нагріву при двох сусідніх положеннях регулятора режиму є суттєвою. Тому для забезпечення більш плавного переходу з одного режиму на інший спочатку збільшували завантаження печі за рахунок встановлення ємності з водою, яку виймали з печі при переході на більш "слабкий" режим.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шостачук А.М. Дискретна кінетика утворення поверхневих тріщин при НВЧ-сушінні деревини дуба // Вісник ЖІТІ. – 1999. – № 11. – С. 13–16.
2. Шостачук А.М. Моделювання та оптимізація технологій НВЧ-сушіння деревини дуба. Частина 1. Експериментальне дослідження впливу деяких факторів на видалення вологи при НВЧ-сушінні деревини дуба // Вісник ЖІТІ. – 1999. – № 9. – С. 294–296.
3. Шостачук А.М. Моделювання та оптимізація технологій НВЧ-сушіння деревини дуба. Частина 2. Моделі процесів видалення вологи. Сучасні технології в аерокосмічному комплексі // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 40-річчю польоту людини в космос, 4–6 вересня 2001 року. Житомирський інженерно-технологічний інститут. – С. 17–21.
4. Торговников Г.И. Диэлектрические свойства древесины. – М.: Лесная промышленность, 1986. – 276 с.
5. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1998. – 416 с.
6. Востров В.Н. Электротехнология в деревообработке. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 192 с.
7. Соболев Ю.С. Древесина как конструкционный материал. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 248 с.
8. Боровиков А.М., Уголёв Б.Н. Справочник по древесине. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 296 с.
9. Дьяконов К.Ф., Горяев А.А. Сушка древесины токами высокой частоты. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 256 с.

ШОСТАЧУК Андрій Миколайович – асистент кафедри автомобілів та механіки технічних систем Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- мікрохвильові технології сушіння деревини;
- процеси тепло- та масообміну в колоїдних капілярно-пористих тілах;
- механіка руйнування деревини.

Подано 12.02.02

Шостачук А.М. Дослідження впливу вологості деревини на її температурний режим при конвективно-надвисокочастотному сушінні

Шостачук А.Н. Дослідження впливу вологості деревини на її температурний режим при конвективно-надвисокочастотному сушінні.

Shostachuk A.N. Investigating of the influence of the wood wetness on its temperature under the conditions of convective-super-highfrequent drying.

УДК 621.3.036.282

Исследование влияния влажности древесины на ее температурный режим при конвективно-сверхвысокочастотному сушении / Шостачук А.Н.

Представлен анализ влияния диэлектрических характеристик влажной древесины на мощность выделения теплоты при конвективно-сверхвысокочастотном нагреве. Предложены рекомендации по регулированию интенсивности нагрева с целью обеспечения необходимого распределения температурных полей в поперечном сечении висушиваемых материалов.

УДК 621.3.036.282

Investigating of the influence of the wood wetness on its temperature under the conditions of convective-super-highfrequent drying / Shostachuk A.N.

The analysis of the influence of dielectrical characteristics of wet wood on the power of extraction of the warmth under the condition of convective-super-highfrequent heating is shown. The recommendations on the regulation of heating intensity with the purpose of reaching the necessary temperature in the cross-section of the drying materials are offered.