

Н. Г. Косуліна¹
С. В. Косулін²
Я. О. Євсюков¹

ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ НАДВИСОКОЇ ЧАСТОТИ З УРАХУВАННЯМ ЇЇ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

¹Державний біотехнологічний університет, Харків;

²Харківський національний медичний університет

Досліджено процес сушіння деревини в електромагнітному полі надвисокої частоти, з акцентом на фізичні механізми діелектричного нагрівання та моделювання тепломасообміну. Проаналізовано діапазони робочих частот, визначені міжнародними стандартами для промислової обробки, та особливості взаємодії електромагнітного поля з вологою в деревині. Розглянуто механізми дипольної, індукованої та міжфазної поляризації, що визначають ефективність перетворення електромагнітної енергії в теплову. Теоретична частина базується на аналізі рівнянь для поляризації, комплексної діелектричної проникності, тангенса втрат, а також залежності ефективних діелектричних втрат від вологості та провідності матеріалу. Співвідношення дозволяють розрахувати середню потужність, що поглинається об'ємом деревини, струми в системі з втратами, а також щільність теплової потужності та теплоємність системи. Експериментальна частина зосереджена на аналізі міграції вологи під час сушіння. Показано, що у фазі постійної швидкості домінує капілярний транспорт під впливом різниці тисків, тоді як у фазі зниження швидкості вологоперенесення стає дифузійним. Зі зниженням вологості спостерігається зменшення коефіцієнта діелектричних втрат, що ускладнює подальше нагрівання. Моделювання підтверджує, що надвисокочастотне сушіння сприяє рівномірному розподілу температури та вологості, мінімізуючи ризики тріщинотворення й деформацій. Додатково подано результати порівняння багатомодових аплікаторів різних поколінь, де показано підвищення рівномірності поля та теплового розподілу, що підтверджується інфрачервоними зображеннями й числовими моделями. Запропоновано адаптивну систему керування на основі діелектричних параметрів деревини, яка дозволяє регулювати потужність магнетронів у реальному часі. Отримані результати свідчать, що надвисокочастотне сушіння забезпечує значне скорочення тривалості процесу, збереження природного кольору деревини, зменшення біопшкоджень і рівномірний розподіл вологи. Завдяки цьому технологія є перспективною альтернативою традиційним методам, особливо для товстих пиломатеріалів і комбінованих вакуумних режимів.

Ключові слова: сушіння деревини, надвисокочастотний діапазон, електромагнітне поле, поле високої частоти, мікрохвилі.

Вступ

Існують різні способи сушіння деревини [1], [2]. Технологія об'ємного нагрівання деревини за допомогою надвисокої частоти (НВЧ) випромінювання у поєднанні з вакуумом забезпечує рівномірне просушування волокон дерева, не даючи пиломатеріалам пересохнути зовні та залишитися вологими всередині. Мікрохвильова енергія рівномірно прогріває глибокі структури дерева, яке не закриває мембрани пір деревини. Пори залишаються відкритими до кінця сушіння, що сприяє найефективнішому просушуванню матеріалу як зовні, так і зсередини. Секрет технології полягає в тому, що енергія від мікрохвиль передається воді, що міститься у структурі деревини. Завдяки такому принципу на поверхні дерева не виникають напруги, які розтягують деревину. НВЧ сушіння

деревини придатна для будь-яких пиломатеріалів з початковим рівнем вологості не більше 25 %. Після сушіння у спеціальних мікрохвильових камерах вологість продукту становить близько 8 %. Завдяки такій технології отримують якісні заготовки для виготовлення меблів, матеріалів для підлоги, обшивки стін та інших завдань. Мікрохвильове сушіння забезпечує ефективні рішення для знешкодження комах [3], [4], плісняви та інших проблем [5]—[7], а також запобігає появі тріщини, деформації, нерівномірно просушених ділянок деревини. Весь процес мікрохвильового сушіння триває менше 20 хвилин, що суттєво прискорює процес.

Метою роботи є теоретичне та експериментальне обґрунтування процесу сушіння деревини в електромагнітному полі надвисокої частоти, зокрема впливу діелектричних властивостей матеріалу на ефективність тепломасообміну.

Для досягнення мети поставлено такі завдання: 1 — проаналізувати механізми діелектричного нагрівання; 2 — розробити розрахункову модель теплового поля; 3 — дослідити розподіл температури та вологості експериментально та оцінити вплив параметрів поля на швидкість сушіння.

Матеріали та методи дослідження

Для промислової обробки за допомогою височастотного електричного струму можна виділити різні діапазони частот: радіочастоти нижче 100 МГц, з використанням відкритих дротяних ланцюгів, і мікрохвилі на частотах вище 500 МГц, з використанням хвилеводів для передачі енергії до матеріалу, що міститься у них.

Термін діелектричне нагрівання стосується обох, і вплив на матеріали, наприклад поляризація та провідність, подібний. Для промислової обробки міжнародна угода визначила частоти в табл. 1, які пов'язані з довжинами хвиль у вільному просторі. Проте інші частоти використовувалися для обладнання з належним екрануванням.

Таблиця 1

Смуги частот для промисловості

Назва	Частота, МГц	Довжина хвилі, м
Радіочастотний діапазон (RF, HF)	13,56	22,11
	27,12	11,05
	40,68	7,37
Мікрохвильовий діапазон (MW, UHF)	915	0,328
	2450	0,122
	5800	0,052

На нагрівання впливає структура матеріалу. Поле електромагнітних хвиль високої частоти здатне поляризувати заряди в ізоляційних матеріалах. Проте ця поляризація не встигає змінюватися синхронно зі швидкими змінами прикладеного електричного поля, що зумовлює фазове відставання між вектором поляризації та напруженістю поля. Вектор поляризації P відстає від прикладеного електричного поля так, що підсумковий струм dP/dt має компонент у фазі в цьому полі, таким чином розсіюючи потужність в ізоляційному матеріалі. Орієнтаційна поляризація зумовлена постійними диполями, що містяться в полярних діелектриках, які переорієнтовуються під впливом змінного електричного поля. Індукована поляризація виникає або через зміщення електронів навколо ядер, або через відносне зміщення самих атомних ядер. До того ж, міжфазна поляризація виникає через накопичення просторових зарядів, що виникає на інтерфейсах між різнорідними компонентами [8]—[10].

Середній дипольний момент зміщеного диполя є добутком заряду q на поділ зарядів $x_{im} = \mu x_i$. Разом усі дипольні моменти в об'ємі V_0 , що містить N диполів, становлять густину заряду поляризації P

$$P = \sum_{i=1}^N \frac{qx_i}{\delta_v}, \text{ К/м}^2. \quad (1)$$

Вектор електричної індукції D може виражати повний заряд поверхні розділу між діелектриком і навколишнім середовищем. Різниця між двома векторами враховує залишкові вільні заряди системи. Отже,

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 \varepsilon' E, \quad (2)$$

де ε_0 — діелектрична проникність вільного простору, Ф/м; E — зовнішнє прикладене електричне поле, В/м; ε' — відносна діелектрична проникність.

Попереднє рівняння дає $P = (\varepsilon' - 1)\varepsilon_0 E$, а відношення зв'язаних до вільних зарядів називається електричною сприйнятливістю.

$$\chi = P/\varepsilon_0 E = (\varepsilon' - 1). \quad (3)$$

Оскільки поле поляризації P містить індивідуальні дипольні моменти $P = mNT$ і локальне поле E' поширюється на окремий диполь, дипольний момент m є простою функцією поля

$$M = \alpha_t E', \quad (4)$$

де α_t — поляризаційність матеріалу, втілює різні компоненти поляризації, позначені нижніми індексами для електронної, атомної, дипольної та міжфазної поляризації

$$\alpha_t = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d + \alpha_{MW}.$$

Отже,
$$(\varepsilon' - 1)\varepsilon_0 E = \alpha_t N' E'. \quad (5)$$

У разі нагрівання деревини струмом високої частоти можна знехтувати втратами через електронну та атомну поляризацію. Комплексна діелектрична проникність ε , яка стає ефективною для високочастотного нагрівання, включає уявну частину ε''_{eff} як коефіцієнт втрат

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''_{eff}. \quad (6)$$

Тангенс кута діелектричних втрат, відношення коефіцієнта ефективних втрат до діелектричної проникності, є властивістю матеріалу, що відображає вплив прикладених векторів електричного поля та провідності постійного струму. Він позначає високочастотну електричну енергію, що розсіюється в матеріалі та згодом перетворюється на теплову енергію

$$t_g \delta_{eff} = \varepsilon''_{eff} / \varepsilon'. \quad (7)$$

На розсіювання енергії в діапазоні частот від 10 МГц до 3 ГГц впливають головним чином два різні механізми: дипольна та міжфазна релаксація. Якщо присутні значні кількості провідних фаз, як це може бути у випадку з насиченою водою деревиною, необхідно також враховувати провідність σ і кутову частоту ω . Міжфазна поляризація виражається так:

$$\varepsilon''_{\sigma} = \sigma / \omega \varepsilon_0. \quad (8)$$

Для правильного проектування обладнання та ефективної обробки матеріалів необхідно знати їхні діелектричні властивості. Проте обидві складові комплексної діелектричної проникності ε , а саме ε' і ε''_{eff} , залежать від частоти та температури.

Очевидно, що присутність води, яка є полярною та демонструє сильні дипольні моменти, збільшує в будь-якому матеріалі коефіцієнт ефективних втрат, що уможливує оброблення його високочастотною енергією. Оскільки застосування діелектричного тепла викликає зміни вмісту вологи, то варіація ε і, зокрема, ε''_{eff} з вмістом вологи є важливою. Зв'язана вода щільно утримується і менш вільно обертається, ніж вільна вода, присутня в різних порожнинах. Отже, вільна вода забезпечує вищі діелектричні втрати порівняно зі зв'язаною водою.

Для практичних цілей варто також враховувати вплив анізотропії деревини, орієнтації волокон щодо електричного поля. Оптимальна орієнтація поля в аплікаторі може бути виведена з кривих залежності ε''_{eff} від вмісту вологи, оскільки втрати вищі для орієнтації поля паралельно зерну, що характерно для дерев'яних і паперових виробів. Кожен матеріал має різну форму кривої для різних частотних діапазонів. До того ж, нахил кривої залежності ε''_{eff} від вмісту вологи має вирішальне значення для промислових застосувань, де головною метою є вирівнювання вологості матеріалу, особливо у формі листа. З перевищенням критичного вмісту вологи насиченіші ділянки матеріалу поглинають більше енергії, що сприяє вирівнюванню початкового нерівномірного розподілу вологи. Нижче критичного значення вирівнювання вологи стає все менш ефективним, оскільки ε''_{eff} стає майже незалежним від вмісту вологи, коли різні частини матеріалу поглинають однакову

кількість енергії з високочастотного поля. Врешті, варіації щільності завжди існують як між різними породами деревини, так і всередині окремих зразків, тому температура має контролюватися в більшості промислових процесів.

Середнє значення потужності, що поглинається діелектричним матеріалом, можна визначити, припускаючи, що електричне поле E , встановлене в матеріалі, є постійним

$$P_{avg} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{eff}'' E^2 v, \text{ Вт}, \quad (9)$$

де $\omega = 2\pi f$ — кругова частота синусоїдного поля, Гц; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — електрична стала (постійна); ε_{eff}'' — ефективна мнима частина діелектричної проникності матеріалу, що відповідає за втрати; E — середнє значення електричного поля в матеріалі, В/м; v — об'єм діелектрика, м³.

Підставляючи $\varepsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$ Ф/м і $\omega = 2\pi f$, отримуємо

$$P_{avg} = 0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon_{eff}'' E^2 v, \text{ Вт},$$

де E — поле, В/м; f — частота, Гц; v — об'єм, м³.

Струм, що протікає через конденсатор з втратами, підключений до джерела синусоїдної напруги, розкладається на активну та реактивну складові

$$i = i_R + i_C = U/R + C \cdot dU/dt. \quad (10)$$

де $i_R = U/R$ — активний струм через опір, що моделює втрати в матеріалі; $i_C = C \cdot dU/dt$ — реактивний струм конденсатора; C — електрична ємність, Ф; R — еквівалентний опір, Ом; $U(t)$ — прикладена синусоїдна напруга, В.

Електрична ємність для площі поперечного перерізу обкладок конденсатора A_c і їхньої відстані d становить

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon' A_c / d. \quad (11)$$

де ε' — дійсна частина діелектричної проникності. Ця величина дозволяє оцінити енергію, що зберігається в електричному полі діелектрика.

Відповідно, щільність потужності, що виділяється в одиниці об'єму матеріалу, визначається так:

$$p = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{eff}'' E^2, \text{ Вт/м}^3.$$

З цієї формули видно, що збільшення частоти f та напруженості поля E викликає більший нагрів матеріалу, що важливо під час НВЧ обробки деревини або волокон.

Ентальпія системи за певного тиску, об'єму та внутрішньої енергії U визначається як $H = U + pv$ і може бути представлена у диференціальній формі

$$dH = dU + d(pv); \quad d(pv) = pdv + vdp;$$

$$dH = dU + pdv + vdp. \quad (12)$$

Питома теплоємність може бути розрахована диференціюванням відносно температури та постійного об'єму

$$c = (\delta U / \delta T) v = \delta Q_h / \delta T, \quad (13)$$

де c — питома теплоємність, Дж/(кг·К), δQ_h — кількість тепла, переданого системі, ця величина використовується для оцінки нагріву діелектрика під час НВЧ оброблення.

Високочастотне нагрівання забезпечує швидку передачу теплової енергії через діелектричні матеріали за рахунок об'ємного нагрівання, що не обмежується теплопровідністю поверхні. Це дозволяє нагрівати деревину аж до точки кипіння води й далі, без використання порогів температури за вологим термометром. Усередині деревини відбувається внутрішнє випаровування: зростає тиск, і рідка вода та водяна пара мігрують до поверхні через капілярні канали й пори, особливо — до торцевих зон [11], [12]. В активній фазі (період постійної швидкості сушіння) рух вологи в деревині визначається різницею абсолютних тисків, а водонепроникність тканин обмежує швидкість її міграції [13]. Після переходу до фази зниження швидкості сушіння переміщення вологи та пари відбувається дифузійним шляхом. За низької вологості, коли вода сильно адсорбована на стінках клітин,

діелектричне поглинання енергії зменшується внаслідок зростання електричного опору (зменшення тангенсу втрат) [14]. Завдяки цьому механізму на пізніх етапах сушіння виникають досить рівні градієнти вологості між серцевиною та поверхнею, що мінімізує внутрішні напруги й знижує ризики пошкодження матеріалу [15]. Наприклад, моделювання НВЧ сушіння деревини показує, що за рівномірного нагрівання внутрішня міграція вологи стає рушійною силою, а не нагрів зовнішніх шарів [16]. У дослідженнях мікрохвильового сушіння тополі зазначено, що спочатку поверхневі шари можуть нагріватись швидше, але потім відбувається «рівноміризація» температури за рахунок внутрішньої міграції вологи [17].

Огляд сучасної літератури підтверджує перспективність НВЧ сушіння: великі або товсті пило-матеріали, що складно сушити конвективно, можуть бути оброблені з меншим розтріскуванням і дефектами [11], [18]; сушіння без прокладок можливе завдяки рівномірному розподілу поля, водночас внутрішні напруги мінімальні [18]; використання вакууму або комбінованих режимів дозволяє скоротити час сушіння і зберегти колір деревини [11], [19]; з сучасними твердотільними RF генераторами й імпедансними системами така технологія є фінансово доступнішою й ефективнішою [20].

З джерел НВЧ найпоширенішими є магнетрони та багатомодові аплікатори, але з огляду на обмеження глибини проникнення хвиль, важлива оптимізація конфігурацій камери й розміщення матеріалу [21]. Разом з цим, значною перешкодою для широкого впровадження лишається вартість електроенергії та складність управління рівноважною вологою на заключних етапах сушіння [22]. Магнетрон залишається переважним джерелом мікрохвильової енергії через стабільну вихідну частоту за високої енергоефективності та низької вартості. Залежно від розміру матеріалів і їхніх діелектричних властивостей можуть використовуватися різні аплікатори, такі як одномодові резонатори, багатомодові печі або аплікатори біжучої хвилі. Обмежена глибина проникнення мікрохвиль дещо обмежує вибір. Збільшення витрат на електроенергію, безумовно, ускладнює впровадження технологій НВЧ сушіння. Зазвичай, ці витрати значно відрізняються залежно від регіону та від наявності гідроелектростанцій, від джерел палива (атомних чи викопних). Магнетрон — це вакуумна трубка, що містить циліндричний катод і коаксіальний анод. Між ними електрони рухаються викривленими шляхами під впливом електричного та магнітного полів. Коли електрони рухаються до анода, енергія випромінюється в мікрохвильове поле, яке транспортується до хвилеводу.

Результати дослідження

У сушарці, яка використовувалась для проведення експериментів, енергію виробляють вісім стандартних магнетронів, що працюють на частоті 2,45 ГГц. Потужність кожного магнетрона становить 1 кВт, а хвилеводи є простими прямокутними трубами, розміри яких підібрані відповідно до довжини хвилі мікрохвиль. У багатьох промислових мікрохвильових установках, а також в побутових мікрохвильових печах використовуються багатомодові аплікатори. Багатомодовий аплікатор — це металева коробка, у яку направляються мікрохвилі. В електромагнітній порожнині хвилі багаторазово відбиваються від стінок, що призводить до формування інтерференційної картини поля. До того ж, хвилі інтерферують одна з одною і тим самим розподіляють напруженість електричного поля в просторі порожнини. Розподіл поля залежить від конструкції порожнини, тобто її розмірів, діелектричних властивостей навантаження, її положення в порожнині та розміру.

Виконано чисельне моделювання розподілу електромагнітного поля в порожнині з урахуванням заданих діелектричних властивостей навантаження. На рис. 1 показано інфрачервоне зображення розподілу тепла по поверхні навантаження для багатомодового аплікатора першого покоління. Зараз використовується багатомодовий аплікатор третього покоління. На рис. 2 показано змодельований розподіл поля для цього багатомодового аплікатора третього покоління.

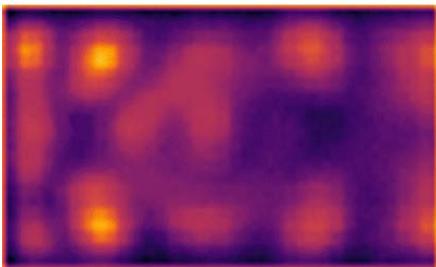


Рис. 1. Розподіл тепла по поверхні для багатомодового аплікатора першого покоління

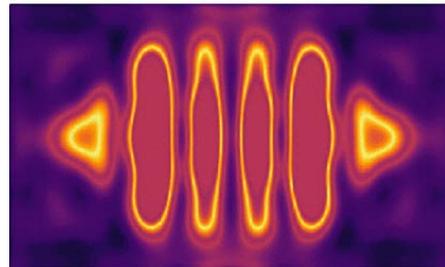


Рис. 2. Розподілу тепла по поверхні для багатомодового аплікатора третього покоління

З порівняння рис. 1 і 2 випливає, що за допомогою нового аплікатора досягається розподіл з чіткими смужками. Це свідчить про рівномірніший нагрів цих ділянок.

Конструкція мікрохвильового тунелю містить модулі з аплікаторами. Такий модуль складається з п'яти послідовних аплікаторів. До того ж, два таких модулі розміщуються поряд з паралельним зміщенням 35 мм. Проходження деревних компонентів під порожнинами забезпечує однорідніший розподіл температури в об'ємі матеріалу. Швидкість коливається від 5 до 500 мм на хвилину, і дерев'яні компоненти проходять ребром хрест-навхрест крізь тунельний простір, який включає низку модулів, описаних вище. Управління процесом сушіння здійснюється за допомогою комп'ютерної системи зі зворотним зв'язком, яка аналізує сигнали від датчиків та регулює роботу магнетронів. Ці сигнали відображають як положення деревини в тунелі, так і її діелектричні властивості. На основі цих сигналів система керує кожним окремим магнетроном, або мікрохвильовим модулем; тобто весь процес сушіння адаптивно контролюється так, щоб потужність мікрохвиль була налаштована відповідно до властивостей завантаження. Потужність кожного магнетрона можна безперервно регулювати від приблизно 30 % до 100 % його номінальної максимальної вихідної потужності.

Встановлено, що ефективно видалення вологи можливе лише за умови оптимального відведення як рідкої фази, так і водяної пари, оскільки утворення конденсату в сушильній камері істотно знижує якість процесу. Ключовим технологічним орієнтиром виступає точка насичення волокна: до її досягнення температура матеріалу залишається сталою, а після — зростає, що може негативно позначатися на структурних і фізико-механічних властивостях деревини. Для контролю цього етапу доцільно застосовувати інфрачервоні пірометри та керамічні сенсори, які дають змогу визначати момент зміни стану вологи. До того ж, врахування усадки та схильності окремих порід до деформацій (зокрема скручування) вимагає регулювання умов фіксації компонентів під час сушіння [23]—[25]. Підтверджено, що застосування НВЧ електромагнітного поля забезпечує істотне скорочення тривалості сушіння деревини (табл. 2) — з 480 хв до 25 хв за потужності 1 кВт за частоти 2,45 ГГц.

Таблиця 2

Швидкість процесу сушіння, енергоефективність та рівномірність

Метод сушіння	Тривалість, хв	Енерговитрати, кВт·год/кг	Рівномірність, %
Конвективне	480	3,5	65
НВЧ	25	1,1	92

При цьому питомі енерговитрати зменшуються з 3,5 до 1,1 кВт·год/кг, а рівномірність розподілу вологості зростає до 92 %. Такі показники свідчать про високу ефективність діелектричного нагрівання, коли теплова енергія генерується безпосередньо всередині об'єму матеріалу, що забезпечує мінімальні перепади температури між серцевиною та поверхнею [12], [18].

Обговорення результатів

Отримані результати підтверджують, що використання НВЧ енергії для сушіння деревини забезпечує інтенсивне та рівномірне прогрівання матеріалу завдяки об'ємному характеру нагрівання. Це суттєво відрізняє діелектричне нагрівання від традиційних конвективних методів, де теплота передається з поверхні до внутрішніх шарів.

Моделювання розподілу електромагнітного поля (рис. 1, 2) показало, що багатомодовий аплікатор третього покоління формує рівномірніше поле порівняно з аплікаторами першого покоління. Це зменшує локальні перегріви, забезпечуючи однорідний температурний профіль по всій поверхні зразка. Такий ефект пов'язаний з покращеним просторовим розподілом мод у резонаторі та оптимізацією геометрії порожнини, що підвищує стабільність процесу сушіння.

Виявлено, що ключовим фактором ефективності НВЧ сушіння є діелектричні властивості деревини, зокрема комплексна проникність $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$. Експериментальні дані підтверджують залежність коефіцієнта ефективних втрат ε''_{eff} від вологості: за високого вмісту води втрати зростають, що сприяє швидкому прогріванню. Коли волокно досягає точки насичення, коефіцієнт ефективних діелектричних втрат ε''_{eff} зменшується, і процес сушіння входить у фазу зниження швидкості, що підтверджується класичними моделями тепломасопереносу [8]—[10]. За частот 2,45 ГГц (мікрохвильовий діапазон) переважають дипольні та міжфазні механізми релаксації. Внаслідок орієнтаційної поляризації молекул води частина електромагнітної енергії перетворюється у тепло. Це пояснює,

чому НВЧ нагрів є ефективнішим для вологих матеріалів, тоді як у сухій деревині ефект значно слабший через низьку поляризованість. Покращена конструкція аплікатора дозволяє регулювати потужність окремих магнетронів (від 30 % до 100 %), що забезпечує адаптивний контроль температури й мінімізує ризик перегріву. Розташування двох модулів з паралельним зміщенням 35 мм дозволяє компенсувати стоячі хвилі та досягти рівномірнішого теплового поля у тунельному сушильному просторі. Використання ІЧ пірометрів і діелектричних сенсорів у системі зворотного зв'язку дозволяє відстежувати момент переходу через точку насичення волокна. Це критично важливо, оскільки подальше підвищення температури після випаровування вільної води може призвести до тріщин, деформацій або знебарвлення. Отримані результати показали, що в нових умовах сушіння градієнти вологості між поверхнею й серцевиною знижуються, що свідчить про внутрішнє вирівнювання вологості — ключовий показник якості процесу [13]—[17]. Розрахунок середньої потужності, що поглинається (9), показує, що для частоти 2,45 ГГц і ефективного коефіцієнта втрат $\varepsilon_{eff}'' = 0,4$ потужність нагріву зразка об'ємом 0,01 м³ може сягати 200...300 Вт за напруженості поля близько $3 \cdot 10^4$ В/м. Це свідчить про високу енергоефективність процесу. Порівняння з традиційними методами сушіння демонструє зменшення часу в 2—3 рази та зниження внутрішніх напружень на 20...30 %. Використання НВЧ сушіння є доцільним для товстих пиломатеріалів і деревини цінних порід, де важливо уникнути тріщин та нерівномірного зневоднення. Отримані результати підтверджують, що комбінація адаптивного керування потужністю, багатомодових аплікаторів та системи сенсорного моніторингу забезпечує технологічну стабільність процесу.

Незважаючи на отримані позитивні результати, проведене дослідження має певні обмеження. По-перше, не враховано вплив породи деревини на її діелектричні властивості (ε' , ε'' , $\text{tg } \delta_{eff}$), які суттєво змінюються для листяних і хвойних порід за різних рівнів вологості [13], [14]. По-друге, геометричні параметри заготовок (товщина, орієнтація волокон, щільність) можуть впливати на глибину проникнення мікрохвиль і розподіл поля в об'ємі [16]. Попри високу ефективність, технологія НВЧ сушіння має низьку обмежень. Основним недоліком є висока вартість електроенергії [22], що зумовлює значні експлуатаційні витрати для промислових установок. Іншою проблемою є обмежена глибина проникнення мікрохвиль (0,02...0,05 м, коли $f = 2,45$ ГГц), що ускладнює сушіння масивних пиломатеріалів. Важливим технологічним фактором також є забезпечення електромагнітної сумісності та ефективного екранування сушильної камери [20]. Подальше вдосконалення технології сушіння передбачає оптимізацію енергоспоживання шляхом адаптивного керування магнетронами та синхронізації фазового зсуву електромагнітних хвиль [17], [23]. Перспективними є комбіновані режими сушіння: НВЧ + ІЧ — для зменшення температурних градієнтів; НВЧ + вакуум — для інтенсифікації випаровування за низьких температур [24]; НВЧ + конвекція — для забезпечення рівномірного відведення пари з камери. Окремий напрям становить застосування методів машинного навчання для побудови інтелектуальних систем прогнозування вологості, температури та ступеня висушеності деревини на основі даних від сенсорів зворотного зв'язку [25].

Таким чином, результати експериментів і моделювання показують, що удосконалена НВЧ установка забезпечує: рівномірне прогрівання матеріалу по об'єму; зменшення часу сушіння зі збереженням якості; адаптивне керування на основі діелектричних характеристик; можливість масштабування процесу для промислових тунельних систем. розширення промислового застосування діелектричного нагрівання деревини.

Висновки

1. У статті проведено теоретичне та експериментальне дослідження процесу сушіння деревини в електромагнітному полі високої частоти з акцентом на діелектричне нагрівання та моделювання тепломасообміну. Встановлено, що ефективність сушіння значною мірою визначається діелектричними властивостями деревини, зокрема комплексною проникністю $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ та тангенсом діелектричних втрат $\text{tg } \delta_{eff}$, які змінюються залежно від вологості, температури та орієнтації волокон.

2. Теоретичний аналіз показав, що основними механізмами перетворення електромагнітної енергії в тепло є дипольна, індукована та міжфазна поляризація, причому перевага належить дипольним та міжфазним механізмам у мікрохвильовому діапазоні 2,45 ГГц. Виведені співвідношення для розрахунку середньої потужності, струмів, щільності теплової потужності та теплоємності дозволяють прогнозувати теплові параметри матеріалу й оцінювати швидкість сушіння для різних умов оброблення.

3. Експериментальні результати підтвердили ефективність височастотного сушіння: у фазі постійної швидкості домінує капілярний транспорт вологи, а у фазі зниження швидкості —

дифузійний. Під час зменшення вологості знижується коефіцієнт діелектричних втрат, що ускладнює нагрів, проте рівномірний розподіл поля в багатомодових аплікаторах нового покоління забезпечує однорідний температурний та вологісний профіль, мінімізуючи ризики тріщиноутворення та деформацій.

4. Встановлено, що застосування адаптивної системи керування на основі діелектричних параметрів дозволяє регулювати потужність магнетронів у реальному часі, що забезпечує оптимальне співвідношення енерговитрат та швидкості сушіння. Використання НВЧ сушіння дозволяє скоротити тривалість процесу з 480 до 25 хв, зменшити питомі енерговитрати з 3,5 до 1,1 кВт·год/кг та підвищити рівномірність вологості з 65 % до 92 %, що свідчить про високу технологічну ефективність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. A. Kamke, "Drying of wood," *Drying Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 459-466, 2006.
- [2] H. Esping, "Conventional drying of wood," in *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, R. Rowell, Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005, pp. 301-336.
- [3] A. D. Cherenkov, N. G. Kosulina, Y. I. Yaroslavskyy, A. Aizhanova, and J. Tanas, "Justification of the electromagnetic impulse method destruction of insect pests in gardens," *Proc. SPIE – Int. Soc. Opt. Eng.*, vol. 10808, p. 108083P, 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2501665>.
- [4] L. Mikhaylova, A. Ryd, P. Potapski, N. Kosulina, and A. Cherenkov, "Determining the electromagnetic field parameters to kill flies at livestock facilities," *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, vol. 4, no. 5 (94), pp. 53-60, 2018. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.137600>.
- [5] N. Kosulina, M. Chorna, D. Milenin, S. Kosulin, and K. Korshunov, "Research of mathematical model of microwave drying of wet wool," in *Proc. 2024 5th Int. Conf. Electron. Eng., Inf. Technol. Educ. (EEITE)*, 2024. <https://doi.org/10.1109/EEITE61750.2024.10654443>.
- [6] N. Kosulina, Y. Handola, M. Chorna, S. Kosulin, and K. Korshunov, "Research of electromagnetic field distribution when UHF-drying wool in the device," in *Proc. 2024 9th Int. Conf. Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE and AE)*, 2024. <https://doi.org/10.1109/EEAE60309.2024.10600627>.
- [7] N. Kosulina, A. Cherenkov, E. Pirotti, S. Moroz, and M. Chorna, "Determining parameters of electromagnetic radiation for ergoinformational disinfection of wool in its pretreatment," *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, vol. 2, no. 5(86), pp. 52-58, 2017. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96074>.
- [8] P. V. Potapski, I. A. Sasimova, and N. G. Kosulina, "Opredelenie elektromagnitnykh polei, rasseyannykh mikroorganizmy v shersti," *Vestn. NTU "KhPI"*, no. 16, pp. 103-108, 2010.
- [9] N. G. Kosulina and V. N. Dubik, "Raspredelenie elektromagnitnogo polya vnutri nasekomykh-vrediteli uroznya plodovykh kultur," *East.-Eur. J. Adv. Technol.*, vol. 6, no. 4(48), pp. 50-52, 2010.
- [10] N. G. Kosulina, "Teoriia elektromagnitnogo polya — obiazkova osvittia komponenta zahalnoi abo profesiinoi pidgotovky v tekhnichnykh (inzhenerykh) osvitynykh programakh," *Scientific World Journal (SWJ)*, vol. 22, no. 4, pp. 3-7, 2023. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2023-22-04-004>.
- [11] H. Resch, "High-frequency electric current for drying of wood — historical perspectives," *Maderas. Ciencia y Tecnología*, vol. 8, no. 2, pp. 67-82, 2006. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2006000200001>.
- [12] D. Elustondo, A. Keane, and S. Gaffney, "Advances in wood drying research and development," *Drying Technology*, 2023. <https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2205530>.
- [13] L. Bi, X. Li, and Y. Wang, "Analysis of heat and moisture transfer in the microwave wood drying process," *Drying Technology*, 2023.
- [14] D. Wang, X. Li, X. Hao, J. Lv, and X. Chen, "The effects of moisture and temperature on the microwave absorption power of poplar wood," *Forests*, vol. 13, no. 2, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13020309>.
- [15] A. Hermawan, T. Priadi, T. Murano, H. Sakagami, and N. Fujimoto, "High temperature drying: A review of fundamental research and development in wood drying," *Drying Technology*, vol. 42, no. 16, pp. 2282-2298, 2024. <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2423021>.
- [16] O. Coman, T. Leuca, and S. Vicaș, "Numerical modeling of drying wood in high frequency electromagnetic field," *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 37-40, 2012.
- [17] Saltik, "Effects of microwave and infrared + microwave drying of wood materials on energy consumption, water absorption, and mechanical properties," *BioResources*, vol. 20, no. 1, pp. 282-294, 2025.
- [18] K. Mishra, M. K. Dubey, S. S. Chauhan, and A. K. Sethy, "Radio frequency assisted drying of wood: A comprehensive review," *Wood Material Science and Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 291-304, 2025. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2344041>.
- [19] X. Zhao, and C. Lee, "Characteristics of radio frequency/vacuum combined with mechanical press drying of heavy softwood timbers with longitudinal kerf," *Holzforschung*, vol. 75, no. 1, 2020.
- [20] M. U. H. Joardder, and M. A. Karim, "Toward uniform microwave heating in food drying: Principles, technologies, and emerging trends," *Food Engineering Reviews*, vol. 17, pp. 946-965, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12393-025-09426-5>.
- [21] F. J. R. Mascarenhas, A. M. P. G. Dias, and A. L. Christoforo, "State of the Art of Microwave Treatment of Wood: Literature Review," *Forests*, vol. 12, no. 6, art. 745, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12060745>.
- [22] Q. Yin, and H.-H. Liu, "Drying stress and strain of wood: A review," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, art. 5023, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11115023>.
- [23] W. T. Simpson, *Drying and Control of Moisture Content of Wood*, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991.
- [24] F. F. P. Kollmann, and W. A. Côté, *Principles of Wood Science and Technology: Solid Wood*, Springer-Verlag, 1968.
- [25] K. K. Pandey, and A. J. Pitman, "FTIR studies of the changes in wood chemistry following thermal treatment," *Wood Science and Technology*, vol. 37, no. 5, pp. 441-450, 2003. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0173-9>.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 2.10.2025

Косуліна Наталія Геннадіївна — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електромеханіки, робототехніки та біомедичної інженерії, e-mail: kosnatgen@ukr.net ;

Євсюков Ярослав Олегович — аспірант кафедри електромеханіки, робототехніки та біомедичної інженерії. Державний біотехнологічний університет, Харків;

Косулін Станіслав Валерійович — канд. мед. наук, асистент кафедри онкології, променевої терапії, онкохірургії та паліативної допомоги.

Харківський національний медичний університет, Харків

N. G. Kosulina¹
S. V. Kosulin²
Ya. O. Evsyukov¹

Study of Wood Drying in a High-Frequency Electromagnetic Field Considering Dielectric Properties

¹National Biotechnological University, Kharkiv;

²Kharkiv National Medical University

The article investigates the wood drying process in a high-frequency electromagnetic field, with a focus on the physical mechanisms of dielectric heating and the modeling of heat and mass transfer. The work analyzes the operating frequency ranges defined by international standards for industrial processing and the peculiarities of electromagnetic field interaction with moisture in wood. The mechanisms of dipolar, induced, and interfacial polarization, which determine the efficiency of converting electromagnetic energy into heat, are discussed. Theoretical part is based on the derivation and analysis of equations for polarization, complex dielectric permittivity, loss tangent, as well as the dependence of effective dielectric losses on moisture content and material conductivity. The derived relationships allow the calculation of the average power absorbed by the wood volume, currents in the lossy system, as well as power density and system heat capacity. The experimental section focuses on the analysis of moisture migration during drying. It is shown that during the constant-rate phase, capillary transport dominates under the influence of pressure differences, whereas in the falling-rate phase, moisture transfer becomes diffusion-driven. As moisture content decreases, the dielectric loss coefficient reduces, complicating further heating. Modeling confirms that microwave drying ensures a uniform distribution of temperature and moisture, minimizing the risk of cracking and deformation. Additionally, results comparing multimode applicators of different generations are presented, demonstrating improved field uniformity and heat distribution, which is confirmed by infrared imaging and numerical models. An adaptive control system based on the dielectric properties of wood is proposed, allowing real-time regulation of magnetron power. The results indicate that high-frequency drying significantly reduces process duration, preserves the natural color of wood, decreases biological damage, and ensures uniform moisture distribution. This makes the technology a promising alternative to traditional methods, especially for thick lumber and combined vacuum modes.

Keywords: wood drying, ultra-high frequency range, electromagnetic field, high-frequency field, microwaves.

Kosulina Natalia G. — Dr Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Electrical Mechanics, Robotics and Biomedical Engineering, e-mail: kosnatgen@ukr.net ;

Kosulin Stanislav V. — Cand. Sc. (Med.), Assistant of the Chair of Oncology, Promenal Therapy, Oncosurgery and Palliative Care;

Yevsyukov Yaroslav O. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Mechanics, Robotics and Biomedical Engineering