



Й. В. Андрашек, О. М. Петросюк

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ВОЛОГОСТІ В ПРОЦЕСІ КОНДИЦІОНУВАННЯ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА

Термічно модифікована деревина зберігаючи безперечні переваги звичайної деревини, як конструкційного матеріалу має ряд безумовних переваг таких як: відносно низька вартість термооброблення, біологічна стійкість і забезпечення стабільності форми і розмірів виробів у процесі експлуатації, показники екологічності на рівні звичайної деревини, механічне оброблення без використання спеціальних різальних інструментів. Наведені вище переваги термічно модифікованої деревини обумовлюють широкий спектр її використання у виробництві меблів, дерев'яному будинкобудуванні, садово-паркових виробів тощо. Після завершення процесу термічного модифікування деревини її абсолютна вологість знаходиться на рівні абсолютно сухого стану. Для досягнення необхідної кінцевої вологості термічно обробленої деревини потрібно виконати кондиціювання (зволоження). Не зважаючи на те, що рівноважна вологість термічно модифікованої деревини в 2-3 рази нижча від натуральної деревини, для отримання кінцевого якісного продукту необхідно досягти певного рівня кінцевої вологості термічно модифікованої деревини залежно від умов подальшої експлуатації і температури оброблення. Проведений аналіз різних наближених математичних моделей які використовуються для опису форм переміщення вологи в деревині в процесі сушіння. На основі проведеного аналізу запропонована математична модель процесу зволоження деревини під час кондиціювання на базі систем критеріальних рівнянь. Для практичної реалізації отриманий розв'язок критеріальних рівнянь математичної моделі, що описує динаміку розподілу полів вологості термічно модифікованої деревини ясеня в процесі кінцевого кондиціювання для досягнення необхідної кінцевої вологості залежно від умов експлуатації і температури термічного модифікування. Реалізація розробленої математичної моделі дасть змогу здійснити чисельне моделювання динаміки процесу та дослідити вплив основних технологічних факторів на вологоперенесення в деревині ясеня (або інших порід) в процесі кондиціювання термічно модифікованої деревини.

Ключові слова: рівноважна вологість; термічно модифікована деревина; безрозмірна координата точки; коефіцієнт вологопровідності деревини; зв'язана і вільна волога в деревині; кондиціювання; капілярна конденсація водяної пари; граничні умови вологообміну.

Вступ / Introduction

Ідея створення термодеревини полягає у використанні безперечних переваг звичайної деревини як будівельно-оздоблювального матеріалу. До безумовних переваг деревини відносяться: доступність за ціною, екологічність, легкість оброблення, широкий спектр використання і практично невичерпний запас (відновлюваність ресурсів).

Не зважаючи на те, що на науково-дослідному рівні технологія виготовлення термодеревини, як така, що давала б змогу отримати екологічно чистий продукт із задовільними фізико-механічними властивостями та зовнішнім виглядом, розробляється впродовж тривалого часу, при застосуванні її на практиці виникає ряд проблем, що обмежують можливість отримання кінце-

вого якісного продукту [4]. Однією з них є проблема досягнення необхідної кінцевої вологості термічно обробленої деревини. Це пов'язано з тим, що рівноважна вологість термічно модифікованої деревини в 2-3 рази нижча від натуральної деревини [4, 20] і, як наслідок, остаточна вологість ТМД у виробках, що експлуатуються в зовнішньому середовищі повинна становити 4-5 %.

Об'єкт дослідження – технологічний процес термічного модифікування деревини ясеня.

Предмет дослідження – поля розподілу вологості термічно модифікованої деревини ясеня в процесі кінцевого кондиціювання.

Мета роботи – розроблення математичної моделі розподілу полів вологості за товщиною термічно модифікованої пилопродукції деревини ясеня в процесі кон-

Інформація про авторів:

Андрашек Йосип Володимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності. Email: joseph.andrashek@nltu.edu.ua; <https://orcid.org/0009-0002-1011-0089>

Петросюк Олександр Миколайович, аспірант, кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності. Email: sashapetrosyk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2186-5655>

Цитування за ДСТУ: Андрашек Й. В., Петросюк О. М. Моделювання розподілу вологості в процесі кондиціювання термічно модифікованої деревини ясеня. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 1. С. 91–96.

Citation APA: Andrashek, J. V., & Petrosiuk, O. M. (2024). Simulation of moisture fields in the process of conditioning thermally modified ash wood. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(1), 91–96. <https://doi.org/10.36930/40340113>

диціювання (зволоження) залежно від температури і вологості середовища в термокамері.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

1. Виконати літературний аналіз використання математичних моделей для розрахунку полів вологості пиломатеріалів у процесі кондиціювання.
2. Розробити математичну модель розподілу полів вологості в процесі кондиціювання термічно модифікованої деревини ясена на базі критеріальних рівнянь.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Різні наближені математичні моделі, такі як модель дифузії Фіка, модель градієнта тиску пари, модель Ликова, Siau модель і модель Watiker використовуються для опису форм переміщення вологи в деревині в процесі сушіння [8, 13]. Серед цих моделей тільки модель дифузії Фіка застосовують за ізотермічних умов [7], модель градієнта тиску і модель Ликова використовує водяний потенціал як рушійну силу, Siau модель розглядає хімічний потенціал як рушійну силу [19]. Насправді, хімічний потенціал і вологісний потенціал деревини тільки два різних виразних шляхи, вони однакові за суттю стосовно переміщення вологи під час сушіння, так потенціал вологості може бути використаний як рушійна сила для парової і рідкої фаз, в т.ч. й зв'язану і вільну вологу в деревині [7]. Хоча усі моделі дають певні пояснення стосовно внутрішнього переміщення вологи в деревині під час процесу сушіння, поряд з цим вони мало придатні для математичного опису полів вологості термічно модифікованої під час кондиціювання (зволоження).

Матеріали та методи дослідження. Для дослідження використовувалися ясеневі обрізні пиломатеріали товщиною 30 мм, шириною більше 100 мм і довжиною понад 2000 мм з початковою вологістю 6-8 %. Визначення розподілу вологості за товщиною проводилося ваговим методом згідно зі стандартом DIN EN 13 183-1:2002 [10]. Оброблення експериментальних даних проведено методом статистичного і дисперсійного аналізу. Для знаходження розв'язків критеріальних рівнянь вологопровідності деревини використані ознаки збіжності числових рядів та методи математичного аналізу.

Результати досліджень та їх обговорення / Research results and their discussion

Стан дослідженості проблеми. Зволоження деревини в процесі кондиціювання представляє собою складний процес, що складається з конденсації пари на поверхні деревини, переміщення (дифузії) вологи всередину і супроводжується її набряком. Основними факторами, що впливають на зволоження в різних точках перетину деревинних сортиментів, є: форма і розміри, безрозмірна координата точки x/R , вологопровідність деревини в напрямку перенесення вологи і параметри навколишнього середовища. Взаємозв'язок між ними і тривалістю процесу сорбції (зволоження) τ можна описати системою критеріальних рівнянь:

$$1 - A = f\left(Fo', \frac{x}{R}\right); \quad (1)$$

$$1 - A = \frac{W_p - W}{W_p}; \quad Fo' = \frac{a' \tau}{R^2}, \quad (2), (3)$$

де: A – безрозмірна вологість в точці перетину сортимента; W_p – рівноважна вологість деревини, %; W – вологість в точці x/R в момент часу, τ ; Fo' – масообмінний критерій Фур'є.

В роботі П. В. Білей [7] показано, що сорбція водяної пари зовнішньою поверхнею деревини при $\varphi > 0,7$ (така умова завжди виконується в процесі кондиціювання) характеризується тим, що одночасно з полімолекулярною адсорбцією, яка компенсує кількість води, що дифундує всередину, відбувається капілярна конденсація водяної пари. Як з підвищенням відносної вологості повітря φ , так і за $\varphi = const$, в міру наближення до стану рівноваги вологості деревини з повітрям, доля капілярно-конденсованої вологи з плином часу зростає і стає переважаючою порівняно з долею вологи, що була поглинута шляхом полімолекулярної адсорбції. Варто зауважити, що дане твердження справедливе тільки для поверхні сортименту. Оскільки частина води, що була сорбована на поверхні шляхом полімолекулярної адсорбції в подальшому мігрує всередину, де вона виявляється сорбованою вже шляхом мономолекулярної адсорбції, а частина капілярно конденсованої води також переноситься всередину, де поглинається шляхом полімолекулярної адсорбції.

За високих значень відносної вологості ($\varphi > 0,7$) капілярна конденсація починається з самого початку процесу сорбції, оскільки суцільна плівка адсорбованої води на поверхні заглиблень утворюється практично миттєво. Інтенсивність капілярної конденсації менша порівняно з адсорбцією на зовнішній поверхні деревини, але більша інтенсивності адсорбції на її внутрішніх поверхнях. У зв'язку з цим, радіуси менісків у мікрозаглибленнях, протягом майже всього процесу сорбції дещо менші порівняно з станом рівноваги вологості деревини з повітрям. Оскільки швидкість дифузії води в середину деревини з плином часу зменшується, вказана різниця радіусів менісків також зменшується, що приводить до зниження інтенсивності капілярної конденсації водяної пари. Очевидно, що капілярна конденсація на поверхні деревинного сортименту повністю регулюється дифузією вологи в середину деревини.

Умови вологообміну на поверхні деревини в процесі кондиціювання визначаються масообмінним критерієм Біо (Bi). Якщо критерій $Bi' \rightarrow \infty$, що можливо, коли коефіцієнт вологообміну $\alpha \rightarrow \infty$, то такий вологообмін відноситься до безмежно інтенсивного.

Граничні умови вологообміну при цьому, аналогічно з теплообміном, належить до граничних умов першого роду:

$$W_{\Pi} = W_p. \quad (4)$$

Дана умова не вимагає, щоб значення Bi' дійсно мало дуже велике значення, оскільки фізичний зміст граничних умов першого роду полягає тому, що процес зволоження загалом лімітується не зовнішнім, а внутрішнім вологообміном в деревинному сортименті. В зв'язку з цим, за $Bi' > 70$ [7] зовнішній вологообмін можна вважати безмежно інтенсивним.

Для визначення швидкості адсорбції водяної пари в середині деревинного сортименту П. В. Білей [7] запропонував наступне рішення. Після диференціювання (2), до змінних в якому відносяться $(1 - A)$ і W , отримаємо приріст вологості в процесі адсорбції в різних точках речовини (деревини):

$$dW = -W_p \cdot d(1 - A). \quad (5)$$

Знак "мінус" означає, що волога в процесі сорбції переміщується в бік меншого вологовмісту.

Після диференціювання (3), до змінних в якому відносяться Fo' і τ , отримаємо:

$$dFo' - \frac{a'}{R^2} d\tau. \quad (6)$$

Для отримання швидкості адсорбції в різних точках деревинних матеріалів розділимо рівняння (5) на (6):

$$\frac{dW}{d\tau} = -W_p \frac{a'}{R^2} \frac{d(1-A)}{dFo'}. \quad (7)$$

Хоча координати точок x/R в даному рівнянні в явному вигляді відсутні, але від них залежить числове значення $(1-A)$.

Рішення даного рівняння відносно безрозмірної вологості для деревинних сортиментів у формі необмеженої пластини має вигляд:

$$1-A = \frac{4}{\pi} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\frac{x}{R}\right] \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo'\right]. \quad (8)$$

З метою вивчення якісних закономірностей зміни швидкості адсорбції в часі в різних точках деревинного сортименту у формі необмеженої пластини П. В. Білеєм (3) побудована номограма шляхом графічного диференціювання $(1-A)$ по Fo' на графіку побудованому за рівнянням (8). Аналіз отриманої діаграми і рівняння швидкості сорбції (7) дав можливість виявити наступні закономірності:

- швидкість адсорбції води деревиною прямо пропорційна коефіцієнту дифузії води в деревині, її рівноважній вологості і обернено пропорційна квадрату визначального розміру матеріалу;
- найбільша швидкість на початку процесу адсорбції характерна для точок які знаходяться близько до поверхні матеріалу. З плином часу картина змінюється на протилежну, швидкість адсорбції всередині матеріалу зростає, тоді як біля поверхні вона прямує до нуля.

Наведені вище рівняння придатні для розрахунку процесів адсорбції води деревиною за умови, що початковий стан матеріалу – абсолютно сухий. Розподіл вологості за товщиною дощок термічно модифікованої деревини ясена показаний на рисунку. Для визначення розподілу вологості вирізали секцію товщиною 10 мм яку в подальшому розкроювали за товщиною на 7 пластинок. Товщина кожної пластинки складала 4-5 міліметрів. Для кожної пластинки визначалася вологість ваговим способом згідно з DIN EN 13 183-1:2002 [10].

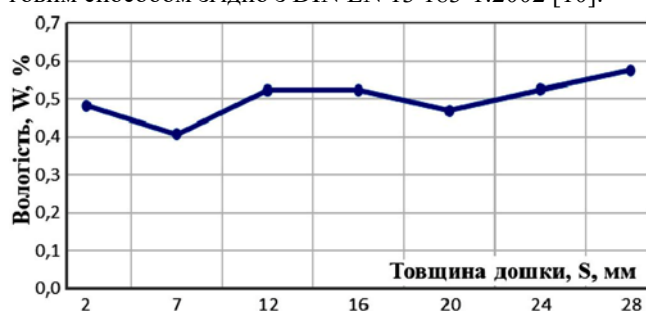


Рисунок. Розподіл кінцевої вологості термічно модифікованої деревини ясена за товщиною ($S = 30$ мм) без зволоження (кондиціювання) / Thickness distribution of final moisture of thermally modified ash wood ($S = 30$ mm) without humidification (conditioning)

На рисунку показана вологість кожної пластинки за товщиною дошки. Як видно з рисунка, перепад вологості за товщиною знаходиться в межах 0,3-0,6 %, що дає змогу з достатньою для практичних цілей точністю встановити, що остаточна вологість термічно модифікованої деревини відповідає абсолютно сухому стану.

Швидкість сорбції пари (вологи) деревиною переважно визначається коефіцієнтом вологопровідності де-

ревини. В рівняннях (6) і (7) припускається, що протягом всього процесу сорбції $a' = const$. Для забезпечення постійного значення коефіцієнта вологопровідності необхідно, щоб процес сорбції проходив за ізотермічних умов. В процесі кондиціювання (кінцевого зволоження) температура в термокамері підтримується на заданому рівні. Перепад температури за перетином сортименту (за товщиною) не перевищує 2-2,5 °C і з достатньою для практичних розрахунків точністю коефіцієнт вологопровідності можна приймати однаковим за всім перетином матеріалу. Умови протікання процесу кондиціювання приймають ізотермічними.

Розв'язання критеріальних рівнянь. Для визначення динаміки розподілу полів вологи по товщині деревинного сортименту в умовах зволоження підставимо у формулу (8) формулу (2). Внаслідок цього отримаємо:

$$\frac{W_p - W(x, Fo')}{W_p} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x), \quad (9)$$

$$\text{де: } F(n) = \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo'\right]; f(n, x) = \cos\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\frac{x}{R}\right] F(n).$$

Звідси:

$$W = W(x, Fo') = W_p \left(1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x)\right), \quad (10)$$

Для визначення суми $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x)$ покажемо, що

ряд $a_n = \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\frac{x}{R}\right] \cdot F(n)$ є збіжним при

будь-яких значеннях критерію Фур'є (Fo'). Для цього скористаємося очевидною подвійною нерівністю:

$$W(0, Fo') < W(x, Fo') \leq W(R, Fo'), \quad (11)$$

де $W(0, Fo')$, $W(R, Fo')$ – значення відносних вологостей на поверхні та у центральному шарі деревинного сортименту для різних значень критерію Фур'є.

Помножимо (11) на -1 , до отриманої нерівності додамо W_p та поділимо одержаний результат на W_p , тоді матимемо:

$$\frac{W_p - W(R, Fo')}{W_p} \leq \frac{W_p - W(x, Fo')}{W_p} < \frac{W_p - W(0, Fo')}{W_p}, \quad (12)$$

Оскільки, згідно з формулою (9), маємо:

$$\begin{aligned} &\text{• для } x = 0 \\ &\frac{W_p - W(0, Fo')}{W_p} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, 0) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} F(n); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} &\text{• для } x = R \\ &\frac{W_p - W(R, Fo')}{W_p} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, R) = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

то подвійну нерівність (11) можна подати у вигляді системи двох нерівностей:

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x); \\ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x) < \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} F(n). \end{cases} \quad (15)$$

Отже, згідно з аналізом системи нерівностей (15), нескінченна сума ряду $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x)$ є додатною. Її значення не перевищує значення нескінченної суми збіжного знакопечергового ряду $a_n = \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} F(n)$.

З метою забезпечення необхідної точності обчислень значень залежності $W(x, Fo')$ знайдемо скільки членів збіжного ряду a_n потрібно залишити, щоб обчислити його суму, наприклад, з точністю 0,01. Для вирішення цієї задачі скористаємося умовою: якщо при знаходженні суми збіжного знакочередового ряду обмежитись тільки першими n членами, а всі інші відкинути, то абсолютна похибка результату обчислень не перевищить першого з відкинутих членів, тобто якщо відкинути всі члени ряду, починаючи з k -го члена, то абсолютна похибка нескінченної суми ряду буде меншою за абсолютне значення $k + 1$ члена цього ряду. Для практичної реалізації цієї умови почергово обчислимо за абсолютною величиною буде меншим за 0,001:

$$\begin{aligned} |a_1| &= \left| \frac{(-1)^{1+1}}{2 \cdot 1 - 1} F(1) \right| = \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} Fo' \right] < 0,01 \text{ при } Fo' > 1,87; \\ |a_2| &= \left| \frac{(-1)^{2+1}}{2 \cdot 2 - 1} F(2) \right| = \frac{1}{3} \exp \left[-\frac{9\pi^2}{4} Fo' \right] < 0,01 \text{ при } Fo' > 0,16; \\ |a_3| &= \left| \frac{(-1)^{3+1}}{2 \cdot 3 - 1} F(3) \right| = \frac{1}{5} \exp \left[-\frac{25\pi^2}{4} Fo' \right] < 0,01 \text{ при } Fo' > 0,048; \\ |a_4| &= \left| \frac{(-1)^{4+1}}{2 \cdot 4 - 1} F(4) \right| = \frac{1}{7} \exp \left[-\frac{49\pi^2}{4} Fo' \right] < 0,01 \text{ при } Fo' > 0,022; \\ |a_5| &= \left| \frac{(-1)^{5+1}}{2 \cdot 5 - 1} F(5) \right| = \frac{1}{9} \exp \left[-\frac{81\pi^2}{4} Fo' \right] < 0,01 \text{ при } Fo' > 0,012. \end{aligned}$$

Отже, якщо припустити, що початком зволоження деревини є час на момент якого значення критерію Фур'є Fo' є більшим за 0,012, то у цьому випадку можна вважати, що значення ряду $\frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} F(n)$ приблизно дорівнює сумі перших п'яти його членів, тобто

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} F(n) &\approx \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} Fo' \right] - \frac{1}{3} \exp \left[-\frac{9\pi^2}{4} Fo' \right] + \\ &+ \frac{1}{5} \exp \left[-\frac{25\pi^2}{4} Fo' \right] - \frac{1}{7} \exp \left[-\frac{49\pi^2}{4} Fo' \right] + \\ &+ \frac{1}{9} \exp \left[-\frac{81\pi^2}{4} Fo' \right] = \sum_{n=1}^5 |a_n|. \end{aligned} \quad (16)$$

Понад це, різниця абсолютних значень сум лівої та правої частин приблизної рівності (16) не перевищує 0,01, тобто

$$\left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} F(n) \right| \approx \sum_{n=1}^5 |a_n| < 0,01. \quad (17)$$

Отже, з врахуванням співвідношення (16), систему нерівностей (15) можна подати у вигляді:

$$0 \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x) < \sum_{n=1}^5 |a_n|. \quad (18)$$

Тоді, оскільки, згідно з формулою (9)

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{W_p - W(x, Fo')}{W_p}, \quad (19)$$

то, з огляду на формулу (18), маємо

$$0 \leq \frac{\pi}{4} \cdot \frac{W_p - W(x, Fo')}{W_p} < \sum_{n=1}^5 |a_n|. \quad (20)$$

Помножимо отриману подвійну нерівність на $4/\pi$, тоді матимемо:

$$0 \leq \frac{W_p - W(x, Fo')}{W_p} < \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^5 |a_n|. \quad (21)$$

Звідси, оскільки, згідно з формулою (9) $\frac{W_p - W(x, Fo')}{W_p} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x)$, то має місце подвійна нерівність:

$$0 \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x) < \sum_{n=1}^5 |a_n|,$$

яка виконується для будь-яких значень змінної x .

Звідси, оскільки $-1 < \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \frac{x}{R} \right] < 1$, то

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x) \approx \sum_{n=1}^5 \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x).$$

Отже, динаміка розподілу полів вологи в процесі кондиціювання термічно модифікованої деревини ясна описується залежністю:

$$W = W(x, Fo') = W_p \left(1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^5 \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} f(n, x) \right). \quad (22)$$

Згідно з отриманим рішенням, розподіл вологості за товщиною термічно модифікованих ясеневих дощок має косинусоподібний характер і якісно узгоджується з результатами експериментальних досліджень, отриманих в роботах [3, 4, 5, 20]. Дослідження на кількісні показники будуть проведені в наступних дослідженнях. До основних факторів, що визначають характер розподілу вологості за товщиною та інтенсивність зволоження, в процесі кондиціювання, відносяться – рівноважна вологість деревини та коефіцієнт вологості (потенціалопровідності).

Обговорення результатів дослідження. За результатами виконаних теоретичних і експериментальних досліджень показано, що для отримання математичної моделі розподілу вологості за товщиною термічно модифікованих ясеневих дощок можна використати систему критеріальних рівнянь (1), (2) і (3). Дані рівняння встановлюють взаємозв'язок між формою і розмірами, безрозмірною координатою точки x/R , вологості деревини в напрямку перенесення вологи і параметри навколишнього середовища. Взаємозв'язок між ними і тривалістю процесу сорбції (зволоження) τ можна описати системою критеріальних рівнянь. Дані рівняння придатні для розрахунку розподілу вологості за товщиною за умови, що початковий стан деревини – абсолютно сухий. Як видно з рис. 1 і результатів досліджень, наведених в роботах [3, 4, 5, 20], після завершення процесу термічного модифікування вологість пиломатеріалів знаходиться на рівні 0,3-0,8 %, що для інженерних розрахунків можна прийняти за абсолютно сухий стан.

Водночас, у роботі [1, 2] автори розглядають вплив умов процесу кондиціювання на гігроскопічність і механічні властивості бука європейського, термічно модифікованого в системі реактора високого тиску. Зокрема, бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.) вони термічно модифікували в закритій реакторній системі за різних умов перебігу процесу. Для оцінювання гігроскопічності та механічних властивостей на термічно модифікованій деревині TMW (англ. *Thermally Modified Wood*) проводили цикли сорбції, вимірювання динамічної сорбції парів DVS (англ. *Dynamic Vapor Sorption*) і випробування на трітчковий згин. Як функція втрати маси ML (англ. *Mass Loss*), початковий рівноважний вміст вологи EMC (англ. *Equilibrium Moisture Content*), виміряний при 20 °C/65 % відносної вологості RH (англ. *Relative Humi-*

dity) безпосередньо після процесу, сильно впливав на RH під час його перебігу. Цей ефект пояснюється перебудовами аморфних полімерів у ультраструктурі клітинної стінки в процесі термічної модифікації ТМ (англ. *Thermal Modification*). Однак ЕМС ТМВ поступово збільшувався після циклів сорбції, що склалися з кондиціонування над рідкою водою та замочування водою. Це збільшення було найбільш виразним для ТМВ, модифікованого при низькій відносній вологості, що є показанням для оборотних ультраструктурних перебудов. Результати випробування на вигин свідчать про те, що структурні зміни також перешкождали пластичній течії аморфних полімерів клітинної стінки, цим самим зменшуючи непружну в'язкість і непружний прогин, тоді як на інші властивості вигину впливав виключно втрата маси МЛ. Умови процесу в закритих реакторних системах мають глибокий вплив на кінцеві властивості деревини, і, отже, часткову оборотність цих змін властивостей необхідно враховувати під час їх застосування.

Аналогічні дослідження було проведено й іншими науковцями. Наприклад, у роботі [6] було проаналізовано вплив вологи на властивості вигину термічно модифікованих бука та ялини. А у роботі [8] охарактеризовано одностадійне термогідрооброблення ТНТ (англ. *Thermo-Hydro Treatment*) листяних порід, де проведено аналіз стабільності форми після п'яти циклів замочування-сушіння. У роботі [22] розглянуто вплив температури та тривалість оброблення на вибрані біологічні, механічні, фізичні та оптичні властивості термічно модифікованої деревини, водночас як у роботі [16] встановлено вплив початкового вмісту вологи на ефективність проти розбухання термічно модифікованої заболоні сосни звичайної, обробленої в реакторі високого тиску під насиченою парою. Окрім цього, у роботі [14] автори виявили наявність у термічно модифікованій деревині водорозчинних сполук – вуглеводів і фурфуролів, а у роботі [12] проаналізовано міцність гігротермічно модифікованої деревини.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розроблена математична модель процесу сорбції (зволоження) термічно модифікованої деревини ясеня в процесі кондиціонування з використанням системи критеріальних рівнянь вологопровідності деревини.

Практична значущість результатів дослідження – використання математичної моделі для розрахунку полів вологості в процесі зволоження дасть змогу розробити раціональні режими кондиціонування термічно модифікованої деревини ясеня для досягнення необхідної кінцевої вологості залежно від умов експлуатації і температури модифікації.

Висновки / Conclusions

На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки щодо розроблення математичної моделі розподілу полів вологості за товщиною термічно модифікованої пилопродукції деревини ясеня в процесі кондиціонування (зволоження) залежно від температури і вологості середовища в термокамері:

1. Отримана математична модель (22) для розрахунку розподілу полів вологості за товщиною термічно модифі-

кованої деревини ясеня в процесі кондиціонування (зволоження) залежно від температури, відносної вологості і тривалості оброблення.

2. З'ясовано, що для досягнення кращої узгодженості між передбаченнями моделі та експериментальним спостереженням необхідно отримати рівняння для визначення рівноважної вологості деревини і коефіцієнта вологопровідності.
3. Встановлено, що залежності значення коефіцієнта вологопровідності (потенціалопровідності) від режимних параметрів (температура і відносна вологість агента оброблення в термокамері) можна отримати графо-аналітичним методом з кривих зволоження з врахуванням розподілу вологості за товщиною сортименту.

References

1. Altgen, M., & Militz, H. (2015). Effect of temperature and steam pressure during the thermal modification process. In 8th European conference on wood modification, Helsinki, Finland, 226–233.
2. Altgen, M., & Militz, H. (2016). Influence of process conditions on hygroscopicity and mechanical properties of European beech thermally modified in a high-pressure reactor system. *Holz-forschung*, 70, 971–979. <https://doi.org/10.1515/hf-2015-0235>
3. Altgen, M., Ala-Viikari, J., Tetri, T., Hukka, A., & Militz, H. (2014). Impact of elevated steam pressure during the thermal modification of Scots pine and Norway spruce. In: *Proceedings of the COST Action FP0904 Workshop*, Skelleftea.
4. Andrashek, J. V., Maksymiv, V. M., & Petrosuik, O. M. (2019). Experimental studies of final moisture content of thermally modified ash wood. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(2), 120–123. <https://doi.org/10.15421/40290224>
5. Andrashek, J., & Petrosiuk, O. (2017). The methods of impregnation and thermal modification of the wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry. Collection of Scientific and Technical Works*, 43, 53–58.
6. Arnold, M. (2010). Effect of moisture on the bending properties of thermally modified beech and spruce. *Journal of Materials Science*, 45, 669–680. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3984-8>
7. Biley, P. V. (2005). Theoretical basics of heat treatment and drying of wood. Kolomyia: Age, 360 p.
8. Biziks, V., Andersons, B., Sansonetti, E., Andersone, I., Militz, H., & Grinins, J. (2015). One-stage thermo-hydro treatment (THT) of hardwoods: an analysis of form stability after five soaking-drying cycles. *Holz-forschung*, 69, 563–571. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0083>
9. Biziks, V., Andersons, B., Sansonetti, E., Andersone, I., Militz, H., & Grinins, J. (2015). One-stage thermo-hydro treatment (THT) of hardwoods: an analysis of form stability after five soaking-drying cycles. *Holz-forschung*, 69, 563–571. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0083>
10. DIN EN 13183-1. (2002). DE: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. Beuth Verlag, Berlin. URL: <https://webstore.ansi.org/standards/din/din-en131832002de>
11. Endo, K., Obataya, E., Zeniya, N., & Matsuo, M. (2016). Effects of heating humidity on the physical properties of hydrothermally treated spruce wood. *Wood Science and Technology*, 50, 1161–1179. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0822-4>
12. Hughes, M., Hill, C., & Pfriem, A. (2015). The toughness of hygrothermally modified wood – a review. *Holz-forschung*, 69, 851–862. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0184>
13. Jingyao, Zhao, & Yigchun, Cai. (2017). A comprehensive mathematical model of heat and moisture transfer for wood convective drying. *Holz-forschung*, 68(3), 313–321. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0077>
14. Karlsson, O., Tomiainen, P., Dagbro, O., Granlund, K., & Moren, T. (2012). Presence of water-soluble compounds in thermally modified wood: carbohydrates and furfurals. *BioResources*, 7, 3679–3689. <https://doi.org/10.15376/biores.7.3.3679-3689>
15. Ormondroyd, G., Spear, M., & Curling, S. (2015). Modified wood: review of efficacy and service life testing. In: *Proceedings of*

- the Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, Vol. 4, Issue 4, 187–203. <https://doi.org/10.1680/coma.14.00072>
16. Rautkari, L., & Hill, C. A. S. (2014). Effect of initial moisture content on the anti-swelling efficiency of thermally modified Scots pine sapwood treated in a high-pressure reactor under saturated steam. *Holzforschung*, 68, 323–326. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0078>
 17. Sandberg, D., Kutnar, A., Karlsson, O., & Jones, D. (2021). *Wood Modification Technologies: Principles, Sustainability, and the Need for Innovation*. CRC Press, Boca Raton, 178 p. URL: <https://www.routledge.com/Wood-Modification-Technologies-Principles-Sustainability-and-the-Need/Sandberg-Kutnar-Karlsson-Jones/p/book/9780367767822>
 18. Scheiding, W. (2018). TMT in the year 2018 – an update. In: *Proceedings of the 10th European TMT Workshop*, Dresden. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/287359631.pdf>
 19. Siau, J. F. (1984). *Transport Process in Wood*. Springer Series in Wood Science (SSWO), Vol. 2. Springer-Verlag. New York, NY. 146–149. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-69213-0>
 20. ThermoWood handbook. (2022): International ThermoWood Association. Snellmaninkatu, Helsinki, Finland, 56 p. URL: <https://www.thermowood.fi/>
 21. Tjeerdsma, B. F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., & Militz, H. (1998). Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 56, 149–153. <https://doi.org/10.1007/s001070050287>
 22. Welzbacher, C., Brischke, C., & Rapp, A. (2007). Influence of treatment temperature and duration on selected biological, mechanical, physical and optical properties of thermally modified timber. *Wood Material Science & Engineering*, 2, 66–76. <https://doi.org/10.1080/17480270701770606>
 23. Wentzel, M., Altgen, M., & Militz, H. (2018). Analyzing reversible changes in hygroscopicity of thermally modified eucalypt wood from open and closed reactor systems. *Wood Science and Technology*, 52, 889–907. <https://doi.org/10.1007/s00226-018-1012-3>

J. V. Andrashek, O. M. Petrosiyyk

National Forestry University of Ukraine, Lviv, Ukraine

SIMULATION OF MOISTURE FIELDS IN THE PROCESS OF CONDITIONING THERMALLY MODIFIED ASH WOOD

While retaining the undoubted advantages of conventional wood as a structural material, thermally modified wood has a number of undeniable advantages, such as relatively low cost of heat treatment, biological resistance and ensuring the stability of the shape and dimensions of products during operation, environmental performance at the level of conventional wood, and machining without the use of special cutting tools. The above advantages of thermally modified wood provide for a wide range of applications in furniture production, wooden house building, garden and park products, etc. After the process of thermal modification of wood is completed, its absolute humidity is at the level of an absolutely dry state. In order to achieve the required final moisture content of heat-treated wood, conditioning (hydration) is required. Despite the fact that the equilibrium moisture content of thermally modified wood is 2–3 times lower than that of natural wood, a certain level of final moisture content of thermally modified wood must be achieved to obtain a high-quality product, depending on the conditions of further use and processing temperature. The paper presents the analysis of various approximate mathematical models used to describe the forms of moisture movement in wood in the process of drying. On the basis of this analysis, a mathematical model of the process of moistening wood during conditioning based on systems of criterion equations is proposed. For practical implementation, the solution of the criterion equations of the mathematical model describing the dynamics of the distribution of moisture fields of thermally modified ash wood in the process of final conditioning is obtained in order to achieve the required final moisture content depending on the operating conditions and temperature of thermal modification. The implementation of the developed mathematical model will allow for numerical modelling of the process dynamics and studying the influence of the main technological factors on moisture transfer in ash wood (or other species) during the conditioning of thermally modified wood.

Keywords: equilibrium moisture content; thermally modified wood; dimensionless coordinate of the point; moisture conductivity coefficient of wood; bound and free moisture in wood; conditioning; capillary condensation of water steam; boundary conditions of moisture exchange.