

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТОРЦЕВОЇ ЗОНИ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ

*Т.В. Коваль, кандидат фізико-математичних наук*

*Розроблено модель процесу сушіння торцевої частини пиломатеріалів. Показано, що нерівномірний розподіл поля вологості за довжиною матеріалу призводить до утворення згинаючих деформацій волокон деревини, характерних тільки для торцевої зони сортименту, що є основною причиною торцевого розтріскування пиломатеріалів. Проведено експериментальні дослідження розподілу усадки, деформацій пружності та залишкових деформацій в торцевій зоні пиломатеріалів. Досліджено режими сушіння пиломатеріалів твердих листяних порід, які запобігають торцевому розтріскуванню.*

*Деревина, механізм переносу вологи, вологопровідність, по-вздожній рух вологи, деформації пружності, залишкові деформації, режими сушіння.*

Торцева зона пиломатеріалу, на відміну від центральної зони сортименту, характеризується двома факторами – зростанням інтенсивності сушіння за рахунок росту вологопровідності вздовж волокон та характером деформування деревини в процесі сушіння. На думку більшості дослідників, зростання інтенсивності сушіння торцевої зони є основною причиною виникнення торцевих тріщин. Між тим, відомо, що при збільшенні коефіцієнта вологопровідності градієнт поля вологості зменшується, що повинно привести до зниження внутрішніх напружень. Причину розривів торців слід шукати в особливостях деформування деревини в цій зоні.

**Мета дослідження** – вивчення причин та закономірностей торцевого розтріскування пиломатеріалів твердих листяних порід, яку вирішуємо такими етапами:

- вивчається вологопровідність деревини вздовж волокон;
- досліджуються особливості процесу сушіння і деформування деревини в торцевій ділянці пиломатеріалів;
- встановлюються залежності величини торцевого розтріскування від режимних та розмірних факторів.

**Матеріали та методика дослідження** базуються на рішенні диференціального рівняння вологопровідності. Для аналізу процесу сушіння торцевої ділянки пиломатеріалів розглянемо дошку, яка складається з трьох ділянок – двох торцевих та центральної. Задача розподілу поля вологості в матеріалі, що висушується, розглядається при вирішенні диференційного рівняння вологопровідності: [1]

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a' \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

за граничних і початкових умов:

$$u = u_{\text{поч}}, \text{ при } \tau = 0; \quad a' \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{x=x_{\text{нов}}} = \beta(u_{\text{нов}} - u_p) \quad (2)$$

Важливим є той факт, що чим товстіші та довші сортименти, тим більшою мірою процес лімітується вологопровідністю, тобто має місце гранична умова першого роду.

Для необмеженої за шириною пластини задача зводиться до рішення рівняння

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a'_{\text{попер}} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a'_{\text{нозд}} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (3)$$

де  $a'_{\text{попер}}$  і  $a'_{\text{нозд}}$  – коефіцієнт вологопровідності деревини упоперек та вздовж волокон.

Графоаналітичне рішення цього рівняння за граничних умов першого роду можна отримати, беручи до уваги відоме положення теорії теплопровідності, згідно з яким, результуючий критерій вологості дорівнює добутку відповідних критеріїв у двох взаємно перпендикулярних напрямках, тобто  $K = K_x \cdot K_z$  [2].

На основі цього рівняння отримані номограми для розрахунку поля вологості в поздовжньому напрямку.

Для знаходження критеріїв Фур'є в цьому розрахунку необхідно визначити коефіцієнти вологопровідності деревини в поздовжньому напрямку.

#### *Теоретичні та експериментальні дослідження*

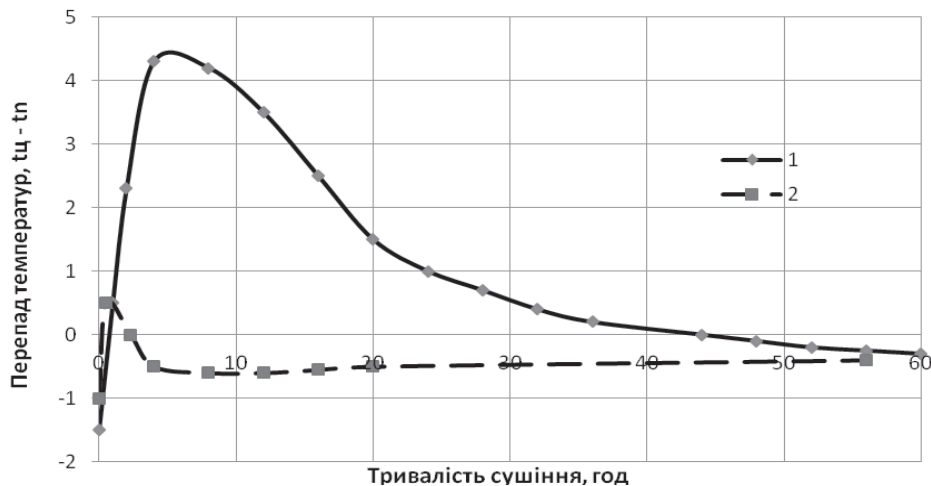
Дослідження вологопровідності деревини вздовж волокон проводили для деревини сосни, дуба і бука за температури +20, +50 і +70 °С за методом стаціонарного току вологи. Експериментальні дослідження показали, що основним фактором, який впливає на вологопровідність деревини вздовж волокон, як і в поперечному напрямку є: вологість, температура, порода деревини та її положення в стовбурі [4].

**Результати досліджень.** У результаті узагальнення та математичної обробки експериментального матеріалу отримані рівняння для визначення коефіцієнтів вологопровідності вздовж волокон для деревини ядра та стиглої деревини (4) і деревини заболоні та заболонних порід (5).

$$a'_{\text{нозд}} = 0,62 \cdot 10^{-42} T^{18} \rho^{-2,35} \exp(-0,122W) \quad (4)$$

$$a'_{\text{нозд}} = 0,255 \cdot 10^{-41} T^{18} \rho^{-2,55} \exp(-0,122W) \quad (5)$$

Раніш було показано, що за конвекційного камерного сушіння деревини температурний перепад між поверхнею та центром матеріалу незначний, тому в розрахунках його можна не враховувати. Однак, зі збільшенням інтенсивності випаровування вологи з торців пиломатеріалів температурний перепад повинен збільшуватись, що може вплинути на точність розрахунків.



**Рис. 1. Поле температур у поздовжньому (1) і поперечному (2) напрямках сортименту**

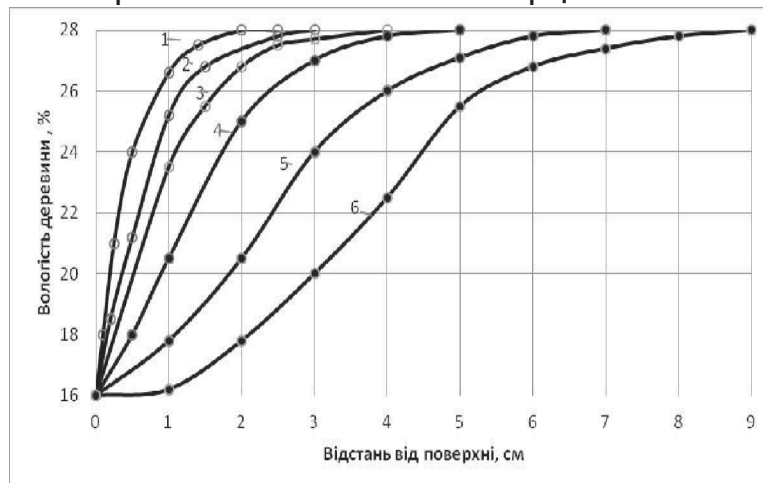
Порівняльне визначення поля температур в поздовжньому і поперечному напрямках сортименту, що висушувались у середовищі з однаковими режимними параметрами, показали однакові закономірності зміни поля температур у поверхневих зонах пласті й торця. Відмінність була в абсолютних величинах – у поздовжньому напрямку сортименту вона була значно більшою, ніж в поперечному. Тривалість періоду зі значним перепадом температур по довжині матеріалу становить близько 10% від загальної тривалості сушіння.

Проведені додаткові експериментальні дослідження перевірки відповідності розрахункових та фактичних значень поля вологості показали, що розрахункові дані з достатньою точністю відповідають експериментальним, що дає можливість порівнювати поля вологості в торцевих зонах виходячи з розрахункових даних. Розрахунки полів вологості в поздовжньому напрямку, проведені в пиломатеріалах різної товщини, показали, що чим товщі пиломатеріали, тим більше поле вологості наближається до поля вологості напівобмеженого тіла, де градієнти поля вологості в поздовжньому напрямку максимальні. Це свідчить про те, що зі збільшенням товщини пиломатеріалів безпека торцевого розтріскування збільшується.

Зіставлення полів вологості в поздовжньому та поперечному напрямках сортименту, розрахованих за відповідних коефіцієнтів вологопровідності, показує, що градієнт поля вологості в поздовжньому напрямку менше ніж в поперечному (рис. 2).

Це дає можливість передбачити вірогідність порушення цілісності деревини. За інших рівних умов, порушення цілісності повинно спостерігатися в зоні пласті дошки, що не підтверджується на практиці. Тому, враховуючи, що різні умови вологообміну торцевої та пластової поверхні незначно впливають на розподіл поля вологості, особливості вологообміну торцевої ділянки не виявляють причин переважного розтріскування деревини в зоні торця.

Розрахунки безпеки режимів сушіння для торцевих поверхонь, що були проведені за відомими методиками [5] не отримали експериментального підтвердження. Враховуючи, що надійність таких розрахунків залежить, в основному, від надійності визначення модулів пружності та залишкових деформацій, було висунуто гіпотезу про різний характер деформацій деревини в поверхневих зонах пласті й торця.



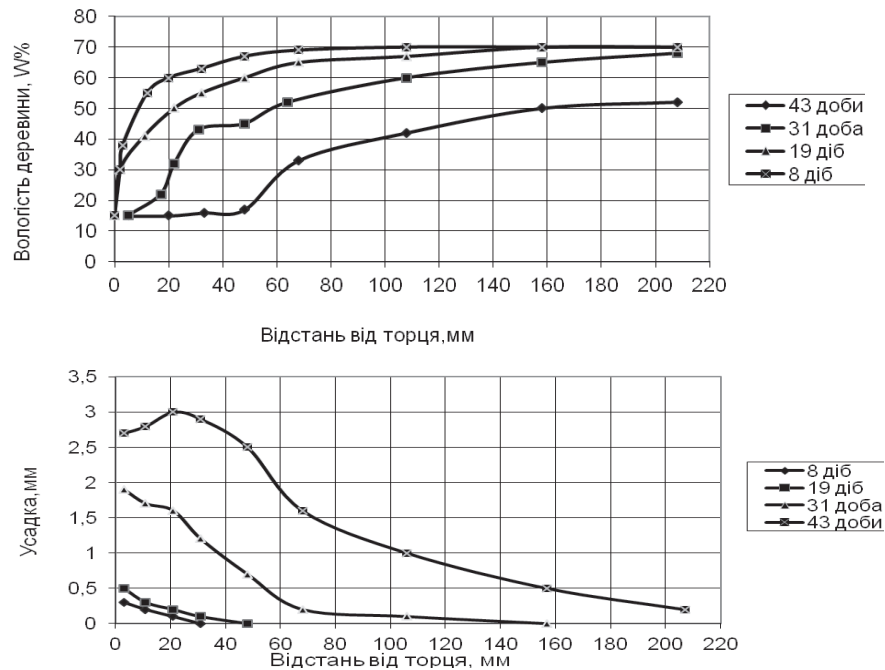
**Рис. 2. Розподіл поля вологості в деревині дуба на початковій стадії сушіння ( $t_c = 57^{\circ}\text{C}$ ;  $t_m = 54^{\circ}\text{C}$ ): 1,2,3 – поперечний напрямок; 4,5,6 – поздовжній напрямок; 1,4 – 10 г; 2,5 – 24 г; 4,6 – 48 г**

На відміну від центральної зони дошки, де деревина деформується в площині перпендикулярній довжині волокон, у торцевій ділянці характер деформацій змінюється. Крім поперечних деформацій, при висиханні поверхневих зон торця виникає специфічний поздовжній вигин волокон. Такі деформації згину характерні тільки для торцевої ділянки сортименту. Значна різниця величини модуля пружності за поперечної та згинаючої деформацій призводить до різкого збільшення напружень у поверхневих шарах торця порівняно з напруженнями в поверхневих шарах пласті. Виходячи з цих посилок можна вважати, що виявлений характер деформацій є основною причиною розриву деревини в зоні торця.

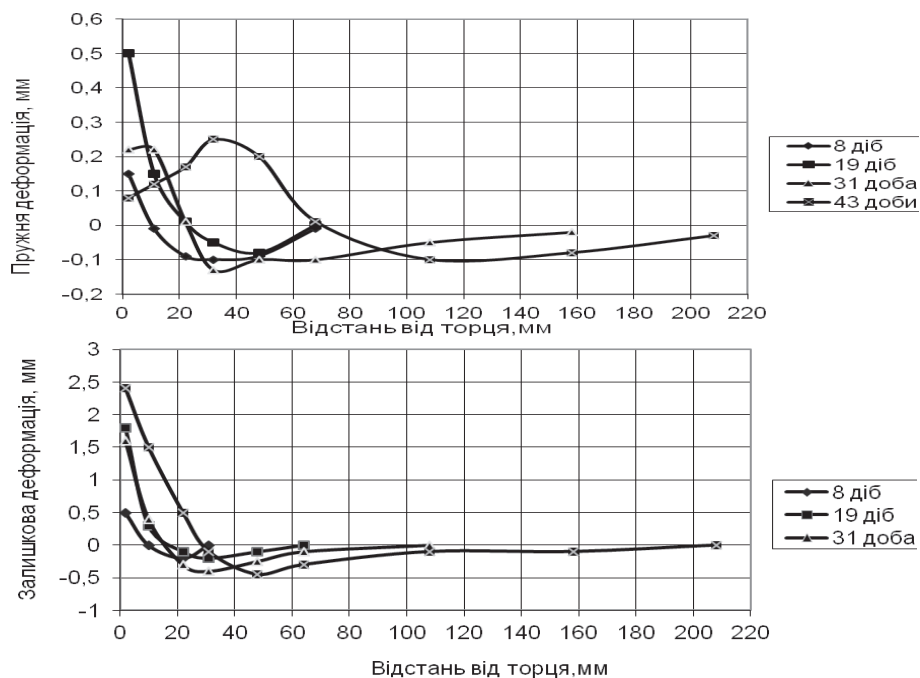
Наявність нерівномірного за перетином і довжиною матеріалу поля вологості, а отже, й неоднорідно деформованого поля, призводить до складного напруженого стану матеріалу в зоні торця. Існуючі методики кількісного оцінювання напружень для даної ділянки матеріалу не можуть бути застосовані, тому доцільно виявити якісну сторону явища. З цією метою проведено експериментальне дослідження деформацій деревини в торцевих ділянках пиломатеріалів у процесі сушіння. Пружні та залишкові деформації, а також поле вологості та усадки визначалося шляхом послідовного видалення напружених шарів матеріалу (рис. 3, 4).

Як показує аналіз розвитку напружень в поверхневих зонах сортименту, максимальні напруження в зоні торця виникають раніше, ніж у зоні пласті. Тому на початковій стадії процесу сушіння режим доцільно орієнтувати виходячи з цілісності деревини в зоні торця. Для визначення режимних параметрів початкової стадії процесу сушіння було проведено ек-

спериментальні дослідження з виявлення закономірностей розвитку торцевих тріщин, при плануванні яких застосовували математичні методи планування експериментів. Сушіння зразків здійснювали в експериментальній сушарці.



**Рис. 3. Розподіл вологості та усадки деревини в поздовжньому напрямку сортименту**



**Рис. 4. Розподіл пружних і залишкових деформацій деревини в поздовжньому напрямку сортименту**

У результаті проведених досліджень було розкрито як вплив кожного з факторів, так і взаємодії їх на величину торцевих тріщин.

Математичне опрацювання результатів досліджень дозволило отримати рівняння регресії, що відображують залежність глибини торцевих тріщин від температури, психрометричної різниці режиму сушіння та товщини пиломатеріалів. На основі цих рівнянь отримано залежності, що відображують параметри процесу, за яких досягаються однакові довжини тріщин для пиломатеріалів заданої товщини. Ці рівняння мають вигляд:

Для дубових заготовок:

$$Z_{mp} = -45,53 + 11,42\Delta t + 0,102S + 0,258t_m + 0,082\Delta t \cdot S - 0,05\Delta t \cdot t_m - 0,012S \cdot t_m - 0,00306S \cdot t \cdot t_m$$

Для букових заготовок:

$$Z_{mp} = -64,83 + 15,13\Delta t + 0,83S + 0,73t_m + 0,078\Delta t \cdot S - 0,16\Delta t \cdot t_m - 0,0053S \cdot t_m - 0,00106S \cdot t \cdot t_m$$

Динаміка розвитку тріщин залежно від вологості деревини показує, що стабілізація розмірів тріщин настає за середньої вологості деревини, що дорівнює 35–45%. Таким чином, беручи за основу діючі на підприємстві режими сушіння та враховуючи характер розвитку напружень в пиломатеріалах, що висушуються, рекомендований режим має додатковий ступінь, побудований з урахуванням напружень в торцевій ділянці пиломатеріалів і регламентує проведення процесу до середньої вологості деревини 40%.

Розроблені режими раціонально застосовувати для масового сушіння пиломатеріалів твердих листяних порід в тому випадку, коли подовження терміну процесу та пов'язане з ним підвищення собівартості сушіння менше від вартості втрат деревини з причини торцевого розтріскування. Розрахунки показують, що використання рекомендованих режимів сушіння є доцільним, якщо величина браку сушіння більша за 1%. Для пиломатеріалів завтовшки більш ніж 40 мм доцільно застосування вологозахисних замазок, оскільки збільшення терміну процесу, за умови застосування даних режимів сушіння, призводить до значного збільшення її собівартості.

### Висновки

1. Торцева зона пиломатеріалів характеризується переміщенням вологи в двох напрямках – вздовж та впоперек волокон, що призводить до утворення нерівномірного поля вологості в поздовжньому та поперечному напрямках сортименту. Нерівномірність поля вологості в поперечному напрямку зменшується при наближенні до торця, а в поздовжньому напрямку збільшується вздовж осі сортименту.

2. Обґрунтована можливість застосування методу розрахунку полів вологості в торцевих зонах пиломатеріалів за їх вологості в межах границі гігроскопічності деревини на базі рішень диференційного рівняння вологопровідності.

3. Нерівномірне поле вологості в поздовжньому напрямку приводить до утворення деформацій згину волокон деревини, характерних для торцевої зони пиломатеріалів, що є основною причиною утворення та розвитку торцевих тріщин.

### Список літератури

1. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.
2. Кречетов И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – М. : Бриз, 1997. – 496 с.
3. Чудинов Б.С. Теория тепловой обработки древесины / Б.С. Чудинов. – М. : Наука, 1968. – 255 с.
4. Коваль В.С. Вологопровідність деревини вздовж волокон / В.С. Коваль, Т.В. Коваль // Науковий вісник НУБіП України. Техніка та енергетика АПК. –К., 2013. – № 185. – С. 153–156.
5. Серговский П. С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П.С. Серговский. – М. : Лесн. пром-сть, 1975. – 400 с.

*Разработана модель процесса сушки торцовой части пиломатериалов. Показано, что неравномерное распределение поля влажности по длине материала приводит к образованию изгибающих деформаций волокон древесины, характерных для торцовой зоны сортимента, которые являются основной причиной торцевого растрескивания пиломатериалов. Проведены экспериментальные исследования распределения усадки, упругих и остаточных деформаций в торцовой зоне пиломатериалов. Исследованы режимы сушки пиломатериалов твердых листовенных пород, предупреждающих торцевое растрескивание.*

***Древесина, механизм переноса влаги, влагопроводность, продольный ток влаги, упругие и остаточные деформации, режимы сушки.***

*A model of the drying process end part of lumber were developpe. It is shown that the uneven distribution of moisture along the length of the field material leads to the formation of the bending deformation of wood fibers, characteristic of the end face area assortment, which are the main cause of mechanical cracking of lumber. Experimental studies of the distribution of shrinkage, elastic and residual strain in the end face area of lumber were conducted. Modes of lumber drying solid hardwood warning mechanical cracking, wood moisture transport mechanism, hydraulic conductivity, moisture longitudinal current, and residual elastic deformation modes of drying were investigated.*

***Wood moisture transport mechanism, hydraulic conductivity, moisture longitudinal current, residual elastic deformation, modes of drying.***