



<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.36930/412618>
Article received 2025.09.19
Article revised 2026.02.12
Article accepted 2026.03.19
Article published 2026.05.22

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Yuriy Huber
yuriy.huber@nltu.edu.ua
103 General Chuprynka St.,
Lviv, 79057, Ukraine

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



УДК 674.047

Особливості всихання заготовок з дубової деревини, висушених у сушильних камерах різного типу

Ю.М. Губер¹, О.І. Олійчук², С.В. Копинець³, Ж.Я. Гуменюк⁴, А.О. Ференц⁵

Деревина належить до матеріалів, які змінюють свої лінійні розміри залежно від температурно-вологісного стану навколишнього середовища. На ці особливості потрібно звертати увагу не лише в технологічних процесах її механічного оброблення, де необхідно враховувати припуски на всихання, але й під час експлуатації за умов змінних параметрів довкілля.

Експериментальні дослідження проводили на заготовках, вицільаних із деревини дуба звичайного (*Quercus robur* L.) номінальними розмірами 50 × 50 × 1000 мм. Величину всихання визначали після їхнього сушіння у конвективній сушильній камері KAD-1×6S фірми Katres та вакуумно-конвективній сушильній камері місткістю приблизно 50 м³ висушуваних сортиментів фірми Hildebrand-Brunner. Заготовки висушували до заданої кінцевої вологості 8%.

За умови зниження вологості деревини нижче 30% відбувається зменшення її лінійних розмірів. На величину цієї зміни впливає низка факторів: деревний вид та вологість деревини, її густина, напрям щодо головних осей дерева, розміри сортименту, режим сушіння, частка вмісту пізньої деревини, анатомічна й субмікроскопічна будова деревини, місце вицільовання зразка деревини за висотою та діаметром колоди тощо.

¹ Губер Юрій Мирославович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: yuriy.huber@nltu.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2678-511X>

² Олійчук Оксана Ігорівна – магістр. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: lan@nltu.edu.ua

³ Копинець Сергій Володимирович – аспірант кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: kopynets.serhii@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6194-8309>

⁴ Гуменюк Жанна Ярославівна – старший викладач кафедри технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: zhanna.humenyuk@nltu.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9453-5812>

⁵ Ференц Андрій Олегович – аспірант кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: ferents.andrii@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8844-5399>

Встановлено, що величина зміни лінійного розміру заготовок після вакуумно-конвективного сушіння становить 3,03 мм, після конвективного – 3,41 мм. Коефіцієнт всихання заготовок, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері становить 0,247, а у конвективній – 0,273.

Отримані результати засвідчують, що процес вакуумно-конвективного сушіння перебігає інтенсивніше і це має вплив на величину всихання, яка є меншою, ніж за конвективного сушіння.

Ключові слова: сушіння деревини; дуб звичайний; вакуумно-конвективна сушильна камера; конвективна сушильна камера; вологість деревини; температура; рівноважна вологість деревини.

Вступ (Introduction).

Клеєні щити широко використовують як конструкційний матеріал для виробництва різноманітних виробів з деревини (Udovyt'ska et al., 2024). Зокрема, для виготовлення клеєних щитів в Україні широко використовують деревину дуба звичайного (Губер та ін., 2025; Маєвський та ін., 2024; Маєвський, Копинець, Мороз, 2024).

Деревину відносять до матеріалів, які під впливом зміни її вологості змінюють свої лінійні розміри (Білей, Комбаров, Білей, 2012; Озарків, Копинець, Ацбергер, 2006), що має значний вплив не лише на технологічні процеси механічного оброблення деревини, коли потрібно враховувати припуски на її всихання, але й на процес її експлуатації за змінних параметрів навколишнього середовища.

Під час висушування деревини за умови зниження її вологості нижче 30% відбувається зменшення її лінійних розмірів. На це впливає низка факторів, серед яких деревний вид і вологість деревини, її густина, анізотропія, розміри матеріалу, режим сушіння, частка вмісту пізньої деревини у річних кільцях, анатомічна й субмікроскопічна будова деревини тощо. Також на величину всихання впливають і місце та умови росту дерева, місце випилювання зразка деревини за висотою та діаметром колоди, вік, дерева, наявність ознак (вад) деревини, що порушують усталену її будову (Стріха, 1950).

У практичних розрахунках використовують коефіцієнт всихання (Білей та ін., 2010), який характеризує величину всихання за зміни вологості стінок клітин на 1%:

$$K = \frac{\beta_{\max}}{W_{\text{г.н}}}, \quad (1)$$

де $\beta_{\max}$ – повне всихання зразка деревини, %; $W_{\text{г.н}}$ – границя насичення стінок клітин деревини, %.

Всихання вздовж волокон настільки несуттєве (Perré & Keeu, 2006), що його в розрахунках ігнорують.

Повне всихання зразка деревини визначають:

$$\beta_{\max} = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{a_{\max}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

де $a_{\max}$ – розмір зразка за вологості, однакової або більшої від границі насичення стінок клітин; $a_{\min}$ – розмір зразка в абсолютно сухому стані.

Дослідженням всихання деревини займалися як вітчизняні (Білей, Комбаров, Білей, 2012; Максимів та ін., 2014; Пінчевська, 2013; Губер, Гуменюк, Хіноцький, 2012), так і закордонні (Castro, Mituca, & Anjos, 2006; Badel & Perre, 2007; Rahimi et al., 2022) дослідники. Зокрема, Білей та ін. (2012) встановили, що окрім густини деревини і напрямку волокон, на величину всихання зразків з деревини дуба має вплив і кількість річних кілець на 1 см. Результати проведених досліджень на мікрорізах деревини Пінчевською (2013) засвідчили, що початкова вологість і температура сушильного агента у межах 20-60°C не впливають на величину всихання деревини дуба звичайного. Також встановлено, що максимальне всихання у тангенціальному напрямі становить $\beta_{\max}^T = 7,9\%$, а у радіальному – $\beta_{\max}^P = 2,9\%$.

У роботі Максиміва та ін. (2014) розглянуто питання всихання деревини явора у тангенціальному та радіальному напрямках. Губер та ін. (2012) встановили, що із підвищенням температури і збільшенням тривалості процесу пропарювання повне об'ємне всихання деревини білої акації збільшується. Зокрема, пропарювання деревини за температури 80-100°C майже не впливає на величину всихання, однак за температури 120°C вплив стає істотним.

Проведені Castro et al. (2006) дослідження величини всихання зразків шпону товщиною 0,6 мм з деревини дуба і бука показали більше всихання у тангенціальному напрямі порівняно з радіальним.

У статті Badel & Perre (2007) розглянуто питання можливості прогнозування поведінки будь-якого зразка з деревини дуба під час всихання, незалежно від його походження, щільності тощо. Rahimi et al. (2022), досліджуючи всихання зразків деревини червоного дуба та жовтої тополі і встановили, що об'ємне всихання заболоні вище, ніж ядра.

У наукових роботах найчастіше розглядають питання величини всихання зразків деревини певного деревного виду від напряму відносно

річних кілець (тангенціальний, радіальний). Так, за результатами досліджень Peggé & Keeu (2006) коефіцієнт всихання деревини дуба у радіальному напрямі становить $K_r = 0,20$, а в тангенціальному – $K_t = 0,37$. У «Керівних технічних матеріалах з технології камерного сушіння пиломатеріалів» (Білей та ін., 2010) коефіцієнт всихання деревини дуба звичайного у радіальному напрямі становить 0,14, у тангенціальному – 0,30. Згідно з Glijer (2011), коефіцієнт всихання деревини дуба у радіальному напрямі становить 0,17, у тангенціальному – 0,26.

Відомо, що на початку процесу сушіння (Білей, 2005; Білей та ін., 2013; Шостак та ін., 2005) внутрішні шари деревини мають значно більшу вологість ніж поверхневі, які через це висихають у розтягнутому стані. Відбувається явище невідного всихання – всідання (Білей, 2005). Під час сушіння деревини перепад вологості за товщиною матеріалу є меншим у тонших зразках. Відповідно, тоді і меншою є різниця між всиханням і всіданням. Стріха (1950) встановив, що всихання букових пиломатеріалів зменшується на 36,7% за збільшення їхньої товщини від 10 до 400 мм. Чим жорсткіший режим сушіння, тим більші внутрішні напруження та менше кінцеве всихання (всідання). Однак таку закономірність спостережено за температури агента сушіння не вище 100°C.

Коваль та ін. (2008) досліджували величину припусків на всихання для пиломатеріалів листяних порід (дуба, ясеня, клена, берези, вільхи, тополі, осики) до кінцевої вологості $W_k = 5-7\%$, $W_k = 14-16\%$, $W_k = 29-31\%$ за різних розмірів поперечного перерізу сортиментів. Результати досліджень показали, що величина всихання пиломатеріалів залежить від режимів сушіння, розмірів пиломатеріалів, породи та початкової вологості деревини. Розмір поперечного перерізу має велике значення для величини всихання, оскільки у зразках великих розмірів виникають внутрішні напруження, деформації, які змінюють характер всихання деревини і впливають на його величину.

Отже можна узагальнити, що найбільше всихання деревини відбувається впоперек волокон, а найменше – поздовж. У площині впоперек волокон деревина також всихає нерівномірно, всихання відбувається більше в тангенціальному, ніж в радіальному напрямі. Величину припусків на всихання пиломатеріалів з деревини різних порід встановлено чинним стандартом ДСТУ 4920:2008.

У виробничих умовах для сушіння пиломатеріалів найчастіше використовують конвективні сушильні камери, а також вакуумно-конвективні (Espinoza & Bond, 2016; Kopynets &

Shchupakivskyi, 2014; Teischinger et al., 2023; Губер та ін., 2025). У цьому аспекті виникає питання, чи має вплив спосіб сушіння деревини на величину її всихання, оскільки саме величина всихання має важливе значення для встановлення припусків на всихання під час розпилювання лісоматеріалів на пиломатеріал. За використання різного типу сушильних камер корекція стандартних припусків на всихання дасть змогу раціонально підходити до витрат деревинної сировини, оскільки застосування завищених припусків на всихання призведе як до перевитрат деревини, так і до збільшення затрат на подальше механічне оброблення. Тому точне встановлення припусків на всихання за умови обмеженого ресурсу та високої ціни на дубові пиломатеріали відіграє важливу роль для ресурсозбереження та економії коштів і на сьогодні є дуже актуальним питанням.

Мета дослідження полягає у встановленні впливу способу сушіння на величину всихання пиляних заготовок з деревини дуба звичайного. Для досягнення поставленої мети здійснено дослідні сушіння пиляних заготовок з деревини дуба звичайного у виробничих умовах у конвективній та вакуумно-конвективній сушильних камерах та експериментально встановлено величину їхнього всихання після сушіння у цих типах сушильних камер.

Об'єкти і методика дослідження (Objects and methods).

Об'єкт дослідження – процес сушіння заготовок пиляних з деревини дуба звичайного (*Quercus robur*) у сушильних камерах різного типу. *Предмет дослідження* – величина всихання заготовок пиляних з деревини дуба звичайного після завершення сушіння.

Для встановлення величини всихання заготовок пиляних з деревини дуба звичайного після їхнього висушування різними способами відібрано партію свіжопиляних заготовок номінальним розміром $50 \times 50 \times 1000$ мм (за вологості $W_k = 8\%$) кількістю 238 шт., які висушували у конвективній та 210 шт. – у вакуумно-конвективній камерах. Розпилювальний розмір з урахуванням нормативного припуску на всихання 3,4 мм (ДСТУ 4920:2008) становив 54×54 мм.

Вологість заготовок визначали згідно з положеннями ДСТУ 4922:2008. Перед укладанням в штабелі вимірювали початкову вологість кожної заготовки з використанням кондуктометричного вологоміра Logica LG-43 на зразках вибірки. Їхня початкова абсолютна вологість W_n знаходилася в діапазоні 65-75%. Разом із визначенням вологості деревини проводили вимірювання товщини та ширини заготовок у трьох місцях – 10 см від кожного торця та посередині

довжини. Місця вимірювання розмірів на кожній із заготовок помічали маркером. Точність вимірювання розмірів штангенциркулем становила 0,01 мм (рис. 1). Лінійний розмір визначали як середнє значення трьох вимірювань на одній заготовці.



Рис. 1. Вимірювання лінійних розмірів дубових заготовок

Fig. 1. Measuring linear dimensions of oak wood blanks

Дослідні сушіння проведено у конвективній сушильній камері періодичної дії фірми Katres типу KAD-1×6S та у вакуумно-конвективній сушильній камері фірми Hildebrand-Brunner. Обидві сушильні камери місткістю приблизно 50 м³ висушуваних сортиментів.

Із пиляних заготовок з деревини дуба сформували штабелі розміром 1200 × 1200 × 1000 мм. Під час формування штабелів використовували прокладки завтовшки 22 мм. У кожен із сушильних камер завантажили по 72 шт. штабелів. Сушіння заготовок проводили до заданої кінцевої вологості $W_k = 8\%$.

Для висушування заготовок застосовували багатоступеневі режими сушіння, до складу яких входять фази: початкове прогрівання, сушіння, кінцеве тепловологооброблення (кондиціонування) та охолодження. На першому ступені режиму у конвективній сушильній камері температура агента сушіння становила $t_c = 33^\circ\text{C}$, рівноважна

вологість – $W_p = 16\%$. На останньому ступені режиму сушіння температура агента сушіння t_c становила 60°C , а градієнт сушіння $TG = 2,4$. На першому ступені режиму у вакуумно-конвективній сушильній камері температура агента сушіння t_c становила 40°C , рівноважна вологість $W_p = 14\%$. На останньому ступені режиму сушіння $t_c = 63^\circ\text{C}$ і $W_p = 5,4\%$.

Після вивантаження з сушильної камери заготовки витримували на складі з контрольованим мікрокліматом впродовж 48 год і тоді вимірювали їхню вологість, використовуючи ємнісний вологомір MERLIN HM9 WS-25. Також здійснювали повторне вимірювання лінійних розмірів заготовок за товщиною та шириною у попередньо маркованих місцях.

Результати (Results).

У результаті вимірювання розмірів поперечного перерізу заготовок з деревини дуба звичайного після їхнього висушування в конвективній та вакуумно-конвективній сушильних камерах отримано значення зміни лінійних розмірів. Оскільки не брали до уваги виду розпилювання заготовок (тангенціальний, радіальний), то для встановлення величини всихання приймали більшу зміну лінійного розміру за товщиною або шириною. Статистичне опрацювання отриманих значень (рис. 2, рис. 3) показало, що за висушування заготовок у конвективній сушильній камері відбулася більша зміна лінійних розмірів заготовок, ніж у вакуумно-конвективній. Зміна лінійного розміру заготовок, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері, знаходилася в межах від 0,91 мм до 4,46 мм, а середнє значення становило 3,03 мм. Зміна лінійного розміру заготовок, висушених у конвективній сушильній камері, знаходилася в межах 2,11-5,24 мм, а середнє значення становило 3,41 мм. Отже, різниця становить 0,38 мм або 11,14%.

За максимальною зміною лінійного розміру та кінцевою вологістю заготовок визначали коефіцієнт всихання:

$$K_w = \frac{\beta_w}{(W_{г.н} - W_k)}, \quad (3)$$

де β_w – всихання заготовки до кінцевої вологості, %; W_k – кінцева вологість деревини, %.

За результатами опрацювання експериментальних даних полігон розподілу отриманих значень коефіцієнта всихання (рис. 4) засвідчив, що після сушіння у конвективній сушильній камері коефіцієнт всихання заготовок з дубової деревини дещо вищий, ніж у заготовок, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері.

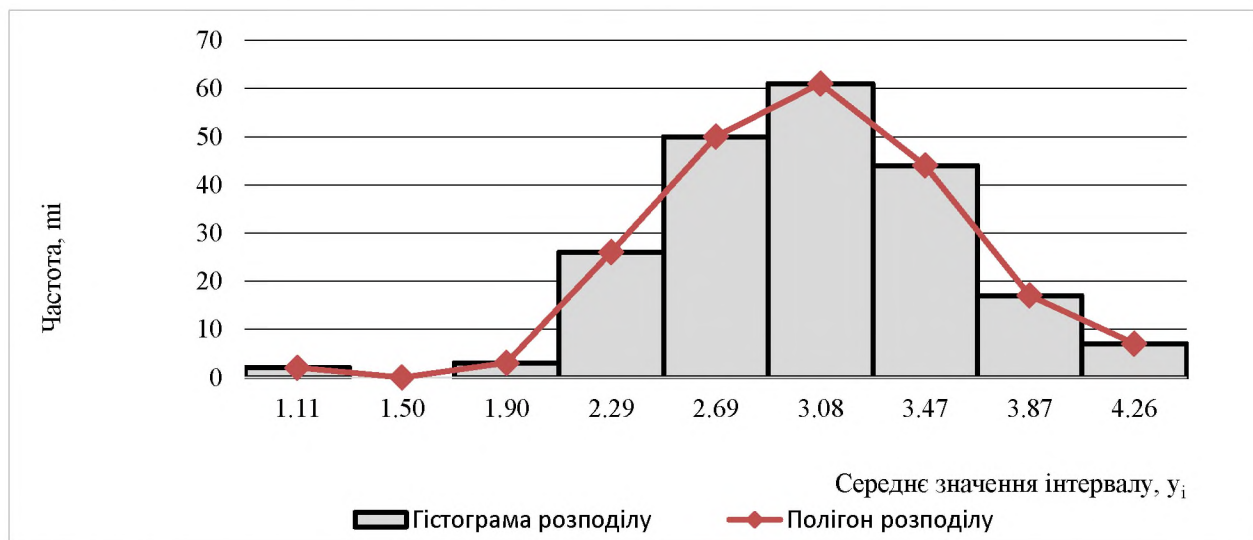


Рис. 2. Полігон розподілу зміни лінійних розмірів заготовок з деревини дуба, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері

Fig. 2. Distribution polygon of changes in linear dimensions of oak wood blanks dried in a vacuum-convection drying kiln

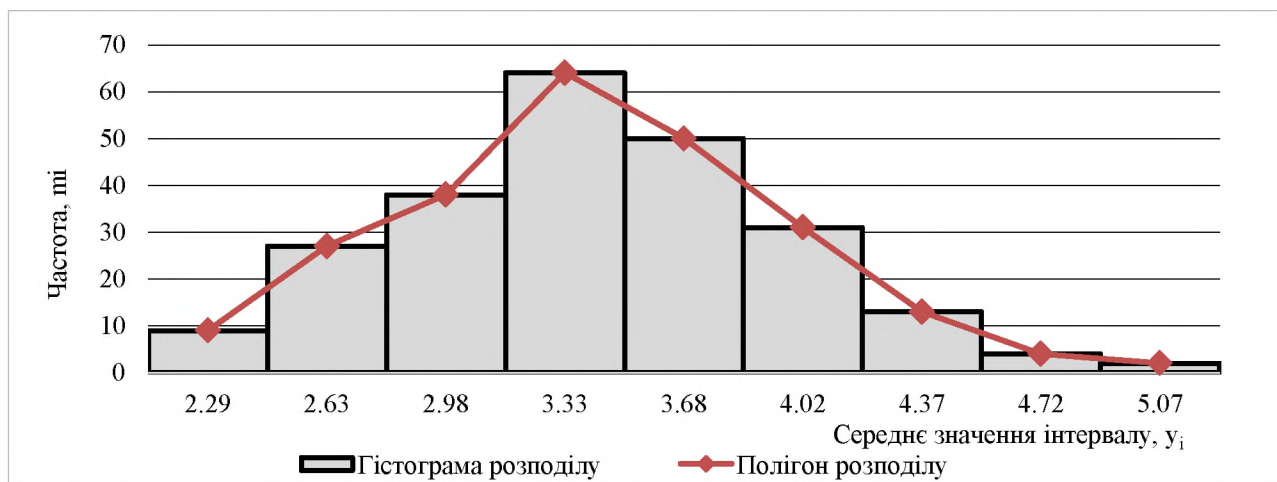


Рис. 3. Полігон розподілу зміни лінійних розмірів заготовок з деревини дуба, висушених у конвективній сушильній камері

Fig. 3. Distribution polygon of changes in linear dimensions of oak wood blanks dried in a convection drying kiln

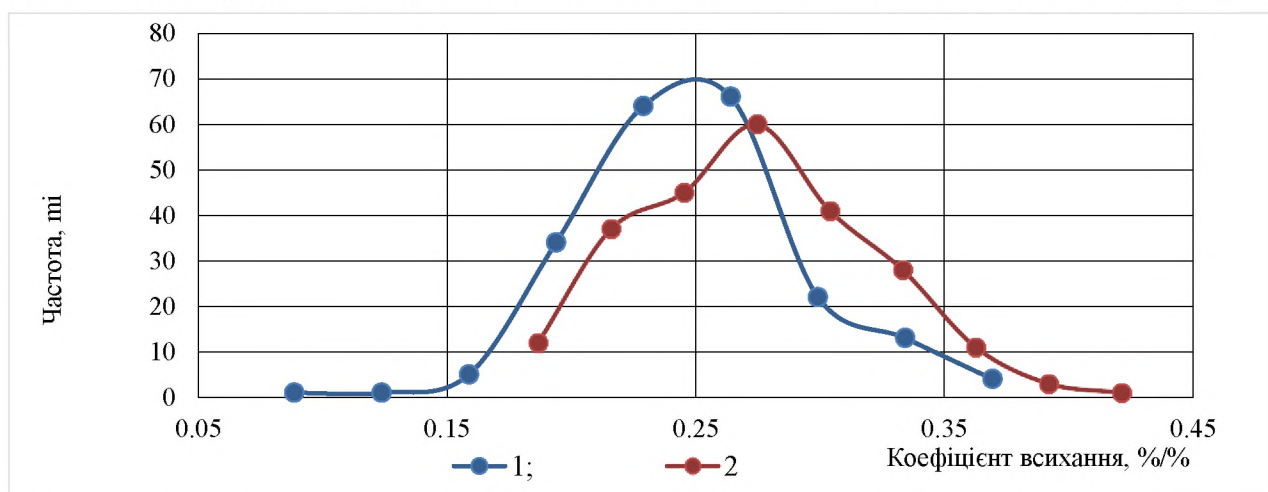


Рис. 4. Полігон розподілу коефіцієнта всихання заготовок з деревини дуба: 1 – у вакуумно-конвективній сушильній камері; 2 – у конвективній сушильній камері

Fig. 4. Distribution polygon of the shrinkage factor of oak wood blanks: 1 – in a vacuum-convection drying kiln; 2 – in a convection drying kiln

Коефіцієнт всихання заготовок, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері, знаходився в межах 0,071-0,387 (середнє значення 0,247), а коефіцієнт всихання заготовок, висушених у конвективній сушильній камері, знаходився в межах 0,172-0,436 зі середнім значенням 0,273.

Дискусія (Discussion).

Сушіння деревини – складний процес, закономірності якого визначаються одночасним протіканням низки фізичних явищ, які належать до класу перенесення. За цього процесу відбувається перенесення як тепла, так і маси. Щодо перенесення тепла, то цей процес стосується поглинання тепла поверхнею матеріалу та переміщення тепла по матеріалу. Щодо перенесення маси, то процес передбачає випаровування вологи з поверхні матеріалу та переміщення вологи по матеріалу. Під час дослідження процесів сушіння у сушильних камерах різного типу потрібно враховувати не лише температурно-вологість показники середовища, але й спосіб сушіння. Відмінність конвективного способу сушіння від конвективно-вакуумного полягає у сушінні деревини нагрітим повітрям за атмосферного тиску, а сушіння конвективно-вакуумним способом здійснюється за тиску нижче атмосферного (Білей та ін., 2006).

Відомо, що у вакуумі температура кипіння води нижча ніж за атмосферного тиску (Espinoza & Bond, 2016; Білей та ін., 2006), тому в процесі конвективно-вакуумного сушіння процес відбувається інтенсивніше, ніж конвективне сушіння за однакових температур середовища.

За досліджуваних умов (рис. 5), у вакуумно-конвективній сушильній камері температуру

агента сушіння підтримували трохи вищою, ніж в конвективній сушильній камері, а рівноважну вологість деревини підтримували трохи нижчою. Загалом режим сушіння був жорсткішим. Варто зазначити, що в умовах зниженого тиску температура кипіння води зменшується, що також впливає на інтенсивність висушування заготовок. У низці робіт (Пінчевська, 2013; Стріха, 1950; Білей, 2005; Білей та ін., 2010) зазначено, що за вищої інтенсивності процесу сушіння величина всихання деревини знижується. Це відбувається за рахунок фіксації шарів деревини, які вже висохли і унеможливають вільне всихання інших шарів деревини, вологість яких ще не перейшла нижче границі насичення клітинних стінок. Тому у вакуумно-конвективній сушильній камері спостережено деяке зменшення величини всихання порівняно зі всиханням зразків у конвективній сушильній камері.

Величини припуску на всихання для пилопродукції з деревини дуба звичайного номінальним розміром поперечного перерізу (товщиною, шириною) 50 × 50 мм до кінцевої вологості $W_k = 8\%$ становить 3,40 мм (ДСТУ 4920:2008). Зміна лінійного розміру заготовок після вакуумно-конвективного сушіння становить 3,03 мм, після конвективного – 3,41 мм. Для конвективного сушіння показник незначно виходить за межі припуску. Але з огляду на допустимі відхилення розмірів заготовок внаслідок неточності лісопиляльного обладнання для товщини 50 мм (+4 мм, -2 мм за ДСТУ EN 1313-2:2018) можна вважати, що у подальшому буде можливість забезпечити належну якість поверхонь після стругання.

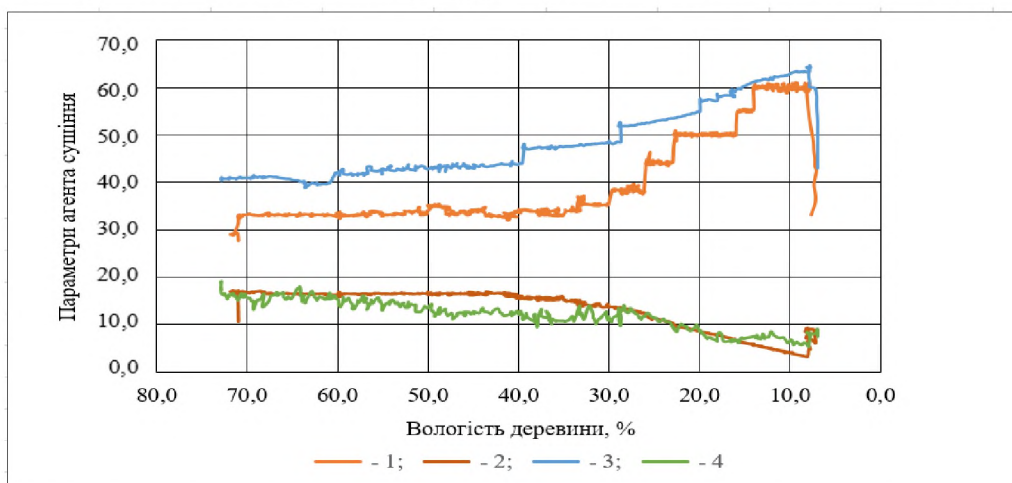


Рис. 5. Порівняння режимів сушіння: 1 – температура агента сушіння у конвективній сушильній камері; 2 – рівноважна вологість деревини у конвективній сушильній камері; 3 – температура агента сушіння у вакуумно-конвективній сушильній камері; 4 – рівноважна вологість деревини у вакуумно-конвективній сушильній камері

Fig. 5. Comparison of drying schedules: 1 – drying agent temperature in a convection drying kiln; 2 – equilibrium moisture content of wood in a convection drying kiln; 3 – drying agent temperature in a vacuum-convection drying kiln; 4 – equilibrium moisture content of wood in a vacuum-convection drying kiln

Висновки (Conclusions).

1. Чим інтенсивніше висихає деревина, тим виникають більші внутрішні напруження через нерівномірність всихання за перерізом матеріалу, оскільки поверхневі шари швидше досягають значення кінцевої вологості і, зафіксувавшись у розтягнутому стані, ускладнюють вільне всихання внутрішніх шарів.

2. Середнє значення зміни лінійного розміру заготовок з деревини дуба звичайного за різних способів сушіння відрізняється між собою на 0,38 мм, що можна вважати несуттєвим з огляду на те, що заготовки в подальшому проходять операцію стругання, а в номінальну

товщину заготовок закладено припуск на оброблення.

3. Середнє значення коефіцієнта всихання заготовок, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері, становить 0,247, а у конвективній сушильній камері – 0,273 за різниці в 0,026 або 9,52%.

4. Менше значення всихання під час сушіння у вакуумно-конвективній сушильній камері можна пояснити явищем всідання, оскільки внаслідок інтенсивного проходження процесу перепади вологості за товщиною у заготовках є більшими, що призводить до висихання поверхневих шарів у розтягнутому стані і перешкоджанню вільному всиханню внутрішніх шарів.

Список літератури (References)

- Badel, E., & Perre, P. (2007). The shrinkage of oak predicted from its anatomical pattern: validation of a cognitive model. *Trees*, 21, 111-120. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0105-z>
- Biley, P. (2005). *Theoretical foundations of heat treatment and drying of wood*. Kolomyia: Publishing house «Vik» [Білей, П. (2005). *Теоретичні основи теплової обробки і сушіння деревини*. Коломия: Видавництво «Вік». 364 с.] (in Ukrainian)
- Biley, P. V., Kombarov, A. M., & Biley, P. P. (2012). The study of physical properties of the wood of oak. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 22(5), 113–116. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2012/22_5/113_Bil.pdf [Білей, П. В., Комбаров, А. М., Білей, П. П. (2012). *Дослідження фізичних властивостей деревини дуба*. Науковий вісник НЛТУ України, 22(5), 113–116] (in Ukrainian)
- Biley, P. V.; Ozarkiv, I. M.; Huber, Yu. M.; Pavlyust, V. M., & Kopynets, Z. P. (2006). *Vacuum drying of wood*. Lviv: Editorial and Publishing Department of UNFU. [Білей, П. В., Озарків, І. М., Губер, Ю. М., Павлюст, В. М., Копинець, З. П. (2006). *Вакуумне сушіння деревини*. Львів: РВВ НЛТУ України. 72 с.] (in Ukrainian)
- Biley, P. V.; Petryshak, I. V.; Sokolovskiy, I. A., & Soroka, L. Ya. (2013). *Heat-and-mass transfer processes in woodworking*. Lviv: Western Ukrainian Consulting Center, LLC. [Білей, П. В., Петришак, І. В., Соколовський, І. А., Сорока, Л. Я. (2013). *Тепломасообмінні процеси деревообробки*. Львів: ЗУКЦ. 376 с.] (in Ukrainian)
- Biley, P. V., Sokolovskiy, I. A., Pavlyust, V. M., & Kopynets, Ye. P. (2010). *Technical guidelines on the technology of chamber drying of lumber*. Uzhhorod: Karpaty. [Білей, П. В., Соколовський, І. А., Павлюст, В. М., Кунинець, Є. П. (2010). *Керівні технічні матеріали з технології камерного сушіння пиломатеріалів*. Ужгород: Карпати, 140 с.] (in Ukrainian)
- Castro, A., Mituca, C., & Anjos, O. (2006). Shrinkage of beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus robur*) veneer sheets during the drying process. *Ecowood – 2006*, 2. International conference on environmentally – compatible forest products. Proceedings of Ecowood – 2006. Edited by Fernando Caldeira Jorge. p: 491–498. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Ofelia-Anjos/publication/259822784_Shrinkage_of_beech_Fagus_sylvatica_and_oak_Quercus_robur_veneer_sheets_during_the_drying_process/links/0deec52e043ced2f20000000/Shrinkage-of-beech-Fagus-sylvatica-and-oak-Quercus-robur-veneer-sheets-during-the-drying-process.pdf
- DSTU EN 1313-2:2018. (EN 1313-2:1998/AC:1999, IDT) Round and sawn timber. Permitted deviations and preferred sizes. Part 2: Hardwood sawn timber. Effective from January 01, 2019. Official edition. Kyiv: State Enterprise «Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality». https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79821
- DSTU 4920:2008. Sawn wood. Assessment of radial and tangential shrinkage. Effective from July 01, 2009. Official edition. Kyiv: State Consumer Standard of Ukraine. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=70608 [ДСТУ 4920:2008. Пилопродукція. Визначання радіального і тангенціального усихання. Чинний від 2009-

- 07-01. Вид. офіційне. Київ: Держспоживстандарт України] (in Ukrainian) *DSTU 4922:2008*. Timber and sawn wood. Determination methods damp. Effective from July 01, 2009. Official edition. Kyiv: State Consumer Standard of Ukraine. Retrieved from https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=52795 [ДСТУ 4922:2008. Лісоматеріали та пилопродукція. Методи визначення вологості. Чинний від 2009-07-01. Вид. офіційне. Київ: Держспоживстандарт України] (in Ukrainian)
- Espinoza, O., & Bond, B. (2016). Vacuum Drying of Wood – State of the Art. *Current Forestry Reports*, 2, 223–235. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0045-9>
- Glijer, L. (2011). *Drying wood and more*. Warszawa: Wies Jutra. https://books.google.com.ua/books/about/Suszenie_drewna_i_nie_tyko.html?id=XbRaMwEACAAJ&redir_esc=y [Glijer, L. (2011). *Suszenie drewna i nie tylko*. Warszawa: Wies Jutra. 140 s.] (in Polish)
- Huber, Yu. M., Humenyuk, Zh. Ya., & Hinotskiy, A. K. (2012). Experimental investigation of shrinkage changes of the steamed acacia wood. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 22(2), 83–114. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2012/22_2/index.htm [Губер, Ю. М., Гуменюк, Ж. Я., Хіноцький, А. К. (2012). Експериментальні дослідження зміни всихання пропареної деревини акації. *Науковий вісник НЛТУ України*, 22(2), 83–114] (in Ukrainian)
- Huber, Y., Kopynets, Z., Oliichuk, O., Humeniuk, Z., & Rubinsky, Y. (2025). Investigation of the qualitative characteristics of oak-wood blanks dried in different types of drying chamber. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 28, 229–240. <https://doi.org/10.15421/412517> [Губер, Ю. М., Копинець, З. П., Олійчук, О. І., Гуменюк, Ж. Я., Рубінський, Ю. В. (2025). Дослідження якісних характеристик дубових заготовок, висушених у різних типах сушильних камер. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 28, 229–240] (in Ukrainian)
- Kopynets, Z. P., & Shchupakivsky, R. B. (2014). Investigation of beech lumber drying process by the low temperature multi-stage regimes. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 40, 59–62. <https://forest-woodworking.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/122/309>
- Koval, V. S., Marchenko, N. V., & Inozemzev, G. B. (2008). Question of the estimation of quantity shrinkage of saw-timbers of the different kind of sawing up. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 18(3), 136–142. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2008/18_3/136_Koval_18_3.pdf [Коваль, В. С., Марченко, Н. В., Іноземцев, Г. Б. (2008). Щодо оцінки припусків на усихання пиломатеріалів різного виду розпилювання. *Науковий вісник НЛТУ України*, 18(3), 136–142] (in Ukrainian)
- Maksymiv, V. M., Biley, P. V., Kombarov, A. M., & Biley P. P. (2014). The Determination of Machining Allowances for Drying Maple Wood Lumber. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 24(2), 143–146. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_2/143_Maks.pdf [Максимів, В. М., Білей, П. В., Комбаров, А. М., Білей, П. П. (2014). Визначення припусків на всихання пиломатеріалів з деревини явора. *Науковий вісник НЛТУ України*, 24(2), 143–146] (in Ukrainian)
- Маєвський, В. О., Копинець, С. В., Мороз, Р. О. (2024). Дослідження витрати дубових сирих необрізних пиломатеріалів на вихід чорнових заготовок для клеєних щитів. *Лісотехнічна освіта і наука: виклики сьогодення та перспективи розвитку: матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф., м. Львів, 23-25 жовтня 2024 року*, Львів: НЛТУ України. <https://doi.org/10.36930/conf150.3.6>
- [Mayevskyy, V. O., Kopynets, S. V., & Moroz, R. O. (2024). Research on the consumption of raw unedged oak lumber for the production of rough blanks for glued panels. In *Forestry education and science: current challenges and development prospects. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Lviv, October 23–25, 2024, Lviv: Ukrainian National Forestry University.] (in Ukrainian)
- Mayevskyy, V. O., Moroz, R. O., Kopynets, S. V., Ferents, O. B., Shchupakivsky, R. B., & Myskiv, Ye. M. (2024) Determining of dry oak lumber consumption due the production of solid edge glued panels. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 27, 181–188. <https://doi.org/10.15421/412425> [Маєвський, В. О., Мороз, Р. О., Копинець, С. В., Ференц, О. Б., Щупаківський, Р. Б., Миськів, Є. М. (2024). Визначення витрати дубових сухих обрізних пиломатеріалів на виготовлення клеєних щитів. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 27, 181–188] (in Ukrainian)

- Ozarkiv, I. M., Kopynets, Z. P., & Acberher, Yo. L. (2006). Methods of Kirpichov's Criterion Research as Basic of Cracks Forming in Convective Wood Drying. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 16(2), 81–85. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2006/16_2/index.htm [Озарків, І. М., Копинець, З. П., Ацбергер, Й. Л. (2006). Методика дослідження критерію Кірпи́чова як основного критерію тріщиноутворення у процесі конвективного сушіння деревини. *Науковий вісник НЛТУ України*, 16(2), 81–85] (in Ukrainian)
- Perré, P., & Keey, R. B. (2006). Drying of Wood: Principles and Practices. In book: *Handbook of Industrial Drying*. (3rd ed., pp. 821–877). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b17208-44>
- Pinchevska, O. O. (2013). Determination of oak wood shrinkage. *Scientific Bulletin of the National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine. Series "Forestry and Ornamental Gardening"*, 187, 205–209. https://forestscience.com.ua/web/uploads/journals_pdf/Ukrainian%20journal%20of%20forest%20and%20wood%20science_No%20187_Part_2.pdf [Пінчевська, О. О. (2013). Визначення всихання деревини дуба. *Науковий вісник НУБіП України. Серія «Лісівництво та декоративне садівництво»*, 187, 205–209] (in Ukrainian)
- Rahimi, S., Singh, K., DeVallance, D., Chu, D., & Bahmani, M. (2022). Drying behavior of hardwood components (sapwood, heartwood, and bark) of red oak and yellow-poplar. *Forests*, 13(5), 722. <https://doi.org/10.3390/f13050722>
- Shostak, V. V., Acberher, Yo. L., & Kopynets, Z. P. (2005). Influence of drying regimes on cracks formation in wood. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 15(4), 109–114. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2005/15_4/109_Szostak_15_4.pdf [Шостак, В. В., Ацбергер, Й. Л., Копинець, З. П. (2005). Вплив режиму сушіння на тріщиноутворення деревини. *Науковий вісник НЛТУ України*, 15(4), 109–114] (in Ukrainian)
- Strikha, I. A. (1950). *Allowances for shrinkage of beech lumber*. Kyiv: Publishing House of the Academy of Architecture of the Ukrainian SSR [Стрі́ха, І. А. (1950). *Припуски на всихання букових пиломатеріалів*. Київ: Видавництво Академії архітектури УРСР. 55 с.] (in Ukrainian)
- Teischinger, A., Avramidis, S., Hansmann, Ch., & Mayrhofer, A. (2023). *Sawn Timber Steaming and Drying*. In book: *Springer Handbook of Wood Science and Technology* (pp.1167–1210). https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_23
- Udovytska, M., Mayevskyy, V., Udovytskyi, O., Kopynets, Z., & Manzyuk, A. (2024). Development of mathematical model for predicting the cupping of lumber. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 17(66), No2, 111–126. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2024.17.66.2.7>

Features of the Shrinkage Magnitude of Oak Wood Blanks Dried in Kilns of Various Types

Yu. Huber¹, O. Oliichuk², S. Kopynets³, Zh. Humeniuk⁴, A. Ferents⁵

Wood is among the materials whose linear dimensions vary depending on the temperature and humidity conditions of the surrounding environment. These characteristics should be taken into account not only during wood machining processes, where allowances for shrinkage must be considered, but also during service under conditions of varying environmental parameters.

The experimental studies were carried out on specimens (blanks) with nominal dimensions of 50×50×1,000 mm, sawn from pedunculate oak wood (*Quercus robur* L.). The magnitude of shrinkage was determined after drying the specimens in a batch-type convective kiln (KAD-1×6S, Katres) and in a Hildebrand-Brunner vacuum-convective drying kiln. Both kilns had a capacity of approximately 50 m³ of timber to be dried. Stacks measuring 1,200×1,200×1,000 mm were formed from the sawn oak specimens. Stickers with a thickness of 22 mm were used during stack formation. A total of 72 stacks were loaded into each kiln. The specimens were dried to a target final moisture content of 8%.

Multi-stage drying schedules were employed for drying the specimens, comprising the following phases: initial heating, drying, final heat and moisture treatment (conditioning), and cooling. At the first stage of the drying schedule in the convective kiln, the drying agent temperature (t_c) was 33°C and the equilibrium moisture content (W_r) was 16%. At the final stage of the drying schedule, the drying agent temperature was maintained at 60°C, and the drying gradient (TG)

was 2.4. In the vacuum-convective kiln, the drying agent temperature at the first stage of the schedule was 40°C and the equilibrium moisture content was 14%. At the final stage of the drying schedule, the drying agent temperature (t_c) was 63°C and the equilibrium moisture content (W_r) was 5.4%.

After unloading from the drying kiln, the specimens were conditioned in a storage facility with a controlled microclimate for 48 hours, after which their moisture content was measured using a MERLIN HM9 WS-25 capacitive moisture meter. The linear dimensions of the specimens, specifically their thickness and width, were then remeasured at the previously marked locations. The sample size comprised 238 specimens dried in the convective kiln and 210 specimens dried in the vacuum-convective kiln.

When the moisture content of wood decreases below 30%, a reduction in its linear dimensions occurs. The magnitude of this change is influenced by several factors, including wood species, moisture content, density, wood grain (orientation of wood fibres relative to longitudinal axes of the tree), dimensions of the timber assortment, drying schedule, proportion of latewood, anatomical and submicroscopic structure of the wood and the location of the wood specimen extraction with respect to the height and diameter of the log, etc.

The change in the linear dimensions of the specimens was found to be 3.03 mm after vacuum-convective drying and 3.41 mm after convective drying. The corresponding wood shrinkage factors were 0.247 and 0.273 for the vacuum-convective and convective drying methods, respectively.

The experimental results indicated that vacuum-convective drying is characterized by a higher drying intensity, which influences the shrinkage behavior of the wood, leading to lower shrinkage values than those observed in case of convective drying.

Key words: wood drying; pedunculate oak (*Quercus robur* L.); vacuum-convective drying kiln; convective drying kiln; wood species; wood moisture content; temperature; equilibrium moisture content.

¹ Yuriy Huber – PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Environmental and Wood Protection Technologies and Life Safety. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: yuriy.huber@nltu.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2678-511X>

² Oksana Oliichuk – master of sciences, Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: lan@nltu.edu.ua

³ Serhiy Kopynets – PhD Student at the Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: kopynets.serhii@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6194-8309>

⁴ Zhanna Humeniuk – senior lecturer at the Department of Environmental and Wood Protection Technologies and Life Safety. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: zhanna.humeniuk@nltu.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9453-5812>

⁵ Andriy Ferents – PhD Student at the Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: ferents.andrii@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8844-5399>