

6. ДЕРЕВООБРОБНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЛІСОВА ІНЖЕНЕРІЯ



Наукові праці Лісівничої академії наук України
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.15421/412517>
Article received 2025.01.23
Article revised 2025.02.03
Article accepted 2025.06.09
Article published 2025.08.29

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Yuriy Huber
yuriy.huber@nltu.edu.ua

103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine

УДК 674.047

Дослідження якісних характеристик дубових заготовок висушених у різного типу сушильних камерах

Ю. М. Губер¹, З. П. Копинець², О. І. Олійчук³, Ж. Я. Гуменюк⁴, Ю. В. Рубінський⁵

Сушіння деревини займає важливе місце у виробництві продукції деревообробної галузі, оскільки якісні показники пиломатеріалів чи заготовок після камерного сушіння мають вирішальне значення для естетичних та експлуатаційних показників готових виробів.

Об'єктом дослідження були заготовки пиляні з деревини дуба звичайного (*Quercus robur* L.) розміром 50×50×1000 мм. Їхнє сушіння проводили у конвективній сушильній камері фірми *Katres typu KAD-1×6S* та вакуумно-конвективній сушильній камері фірми *Hildebrand-Brunner* місткістю приблизно 50 м³ висушуваних сортиментів.

Встановлено вплив способу сушіння на якісні показники заготовок пиляних з деревини дуба звичайного. Задана кінцева вологість партії ($W_{к.зад.}$) становила 8%. Зокрема, мінімальний і максимальний показники вологості з вибірки після сушіння у конвективній сушильній камері становили: $W_{к.мін} = 4,7\%$, $W_{к.мах} = 8,8\%$; після сушіння у вакуумно-конвективній сушильній камері – $W_{к.мін} = 5,0\%$, $W_{к.мах} = 10,6\%$. Фактична середня кінцева вологість ($W_{к.факт.}$) у штабелі після сушіння у конвективній сушильній камері становила 7,0%, після сушіння у вакуумно-конвективній сушильній камері – 7,6%. Середньоквадратичне відхилення кінцевої вологості заготовок після сушіння у конвективній сушильній камері становило 0,799%, після сушіння у вакуумно-конвективній сушильній камері – 0,958%.

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 Копинець Зоя Павлівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: zoya.kopynets@nltu.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8977-6953>

³ Олійчук Оксана Ігорівна – магістр, Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: lan@nltu.edu.ua

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 Рубінський Юрій Валерійович – аспірант, Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: yuriy.rubinskyi@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-3111-7989>

Отримані значення показників якості сушіння дубових заготовок у конвективній та конвективно-вакуумній сушильних камерах засвідчили, що за досліджуваних умов у конвективній сушильній камері процес сушіння відбувається рівномірніше.

Ключові слова: конвективна сушильна камера; вакуумно-конвективна сушильна камера; дуб звичайний; пиломатеріал; кінцева вологість; залишкові напруження; сушіння.

Вступ (Introduction).

Сушіння деревини займає важливе місце у виробництві продукції деревообробної галузі. Якісні показники пиломатеріалів чи заготовок після камерного сушіння мають вагомe значення для естетичних та експлуатаційних показників готових виробів. Вони у найширшому сенсі відносяться до параметрів, заданих нормативними документами або індивідуальним замовленням, які найкращим чином описують придатність деревини для подальшого застосування у процесах деревообробки та в меблевому виробництві (Андрашек, Гуменюк, 2003; Білей, Копинець, Лабай, 2010; Пінчевська, Чаусов, 2008).

У деревообробній промисловості України для виготовлення клеєних щитів широко використовують деревину дуба звичайного (Маєвський та ін., 2024; Маєвський, Копинець, Мороз, 2024). Оскільки дуб відносять до порід, які важко піддаються процесу висушування, у результаті якого досить складно досягти заданих якісних показників пилопродукції, дослідження процесів сушіння дубових пиломатеріалів чи заготовок залишається доволі актуальним (Білей, Копинець, Лабай, 2010; Câmprean, Lazarescu, 2016; Brunner-Hildebrand, 1987).

Якість сушіння визначають за певною кількістю пиломатеріалів (заготовок), відібраних з висушеної партії на основі конкретних показників. Кількість пиломатеріалів (заготовок), відібраних з висушеної партії, залежить від обсягу завантаження сушильної камери і становить від 20 до 200 зразків (ДСТУ 4921:2008). За цим державним стандартом, до показників якості сушіння деревини належать: відповідність середньої вологості висушених пиломатеріалів (заготовок) в партії заданій кінцевій вологості – $W_{\text{к}}$, %; величина відхилень середньої кінцевої вологості партії пиломатеріалів (заготовок) від заданої кінцевої вологості – $\Delta W_{\text{к}}$, %; відхилення кінцевої вологості окремих пиломатеріалів (заготовок) в партії від їхньої заданої кінцевої вологості – $\pm 2\sigma_{W_{\text{к}}}$, %; величина залишкових напружень у висушених пиломатеріалах (заготовках) – f_{σ} , %.

Згідно з положеннями «Керівних технічних матеріалів з технології камерного сушіння пиломатеріалів» (Білей та ін., 2010), до показників якості сушіння деревини, окрім зазначених вище, віднесено також перепад вологості за товщиною пиломатеріалів (заготовок) – $\Delta W_{\text{с}}$, % та допустимі дефекти сушіння.

Встановлення вологості пиломатеріалів (заготовок) і, відповідно, таких показників якості сушіння як середня вологість висушених пиломатеріа-

лів (заготовок) в штабелі, відхилення кінцевої вологості окремих пиломатеріалів (заготовок) в партії від заданої їхньої кінцевої вологості на сучасному етапі розвитку вимірювальних приладів, не є складним. Для цього використовують діелектричні (ємнісні) та кондуктометричні вологоміри, які з достатньою точністю дають змогу встановити вологість пилопродукції.

Конвективне та вакуумно-конвективне сушіння є промисловими способами сушіння деревини (Білей, Приставський, 2012; Espinoza, Bond, 2016; Korynets, Shchupakivsky, 2014; Teischinger et al., 2023). Порівняльний аналіз якості висушених різними способами пиломатеріалів чи заготовок у виробничих умовах є доволі актуальним, оскільки дасть змогу знайти шляхи удосконалення процесів сушіння деревини з погляду отримання високоякісних напівфабрикатів для подальшої обробки.

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

Об'єкти та 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 – якісні показники заготовок пиляних з деревини дуба звичайного після завершення сушіння.

Якість сушіння сортиментів визначатимемо за такими показниками: середня кінцева вологість заготовок в штабелі $W_{\text{к.факт.}}$, %; середньоквадратичне відхилення вологості S , %; відхилення вологості окремих заготовок від середнього значення в штабелі; значення перепаду вологості за товщиною заготовок ΔW , %; умовний показник залишкових напружень (відносна деформація зубців силової секції f_{σ} , %); кількість заготовок з вибірки з торцевими та пластевими тріщинами; кількість заготовок з жолобленням та його величина; кількість заготовок зі зміненими колірними характеристиками.

З метою визначення показників якості процесу сушіння дубових заготовок різними способами було проведено два дослідні висушування: у конвективній сушильній камері фірми Katres типу KAD-1×6S та вакуумно-конвективній сушильній

камері фірми Hildebrand-Brunner місткістю приблизно 50 м³ висушуваних сортиментів.

Дослідному сушінню підлягали заготовки пиляні з деревини дуба розміром 50×50×1000 мм. Початкова абсолютна вологість заготовок W_p , які підлягали сушінню, становила 65-75%. Її визначали за допомогою кондуктометричного вологоміра Logica LG-43.

Заготовки укладали у штабелі розміром 1200×1200×1000 мм на прокладках завтовшки 22 мм. Після цього штабелі автотранспортом завантажували безпосередньо у сушильну камеру KAD-1×6S та на рейковій візці вакуумно-конвективної сушильної камери Hildebrand-Brunner. В обидві камери було завантажено однакову кількість штабелів – по 72 шт. Сушіння заготовок відбувалося до заданої кінцевої вологості $W_k = 8\%$.

Заготовки у подальшому використовують для виготовлення клеєних щитів, тому їх висушували з використанням режиму, що забезпечує отримання пилопродукції другої категорії якості сушіння. Застосовували багатоступеневі режими сушіння, які передбачали операції початкового прогрівання, сушіння, кінцевої тепловологообробки (кондиціювання) та охолодження. У конвективній сушильній камері температура агента сушіння на першому ступені режиму становила $t_c = 33^\circ\text{C}$, рівноважна вологість – $W_p = 16\%$; на останньому ступені режиму сушіння температура агента сушіння становила $t_c = 60^\circ\text{C}$, а градієнт сушіння – $TG = 2,4$.

У вакуумно-конвективній сушильній камері температура агента сушіння на першому ступені режиму становила $t_c = 40^\circ\text{C}$, рівноважна вологість – $W_p = 14\%$; на останньому ступені режиму сушіння

температура агента сушіння становила $t_c = 63^\circ\text{C}$, а рівноважна вологість – $W_p = 5,4\%$.

Відхилення кінцевої абсолютної вологості від заданої є одним із визначальних чинників, який впливає на якість сушіння деревини. Вологість деревини визначали згідно з ДСТУ 4922:2008.

Вологість дубових заготовок після вивантаження з сушильної камери та витримування на складі з контрольованим мікрокліматом впродовж 48 год вимірювали з використанням ємнісного вологоміра MERLIN HM9 WS-25. Вимірювання проводили у трьох місцях заготовки (10 см від торців та посередині) у партії із 228 шт., які висушували у конвективній камері та у 200 шт. – після вакуумно-конвективного сушіння.

Важливим показником якості висушених заготовок є перепад вологості за товщиною, оскільки його високі значення можуть свідчити про наявність вологісних напружень та коротку тривалість кінцевої тепловологообробки.

З метою визначення перепаду кінцевої вологості за товщиною відібрано десять заготовок, висушених у вакуумно-конвективній та десять – у конвективній сушильних камерах. З кожної відібраної заготовки посередині їхньої довжини випилювали по дві секції вологості завтовшки 8 мм та одну секцію – для встановлення відносної деформації зубців силової секції. У подальшому одну із секцій вологості використовували для встановлення кінцевої вологості відібраних заготовок (рис. 1 а, б), а іншу розпилювали за товщиною на шість шарів завтовшки 8-9 мм (рис. 1 с). Кінцеву вологість відібраних заготовок і вологість кожного шару визначали ваговим методом згідно з ДСТУ 4922:2008.

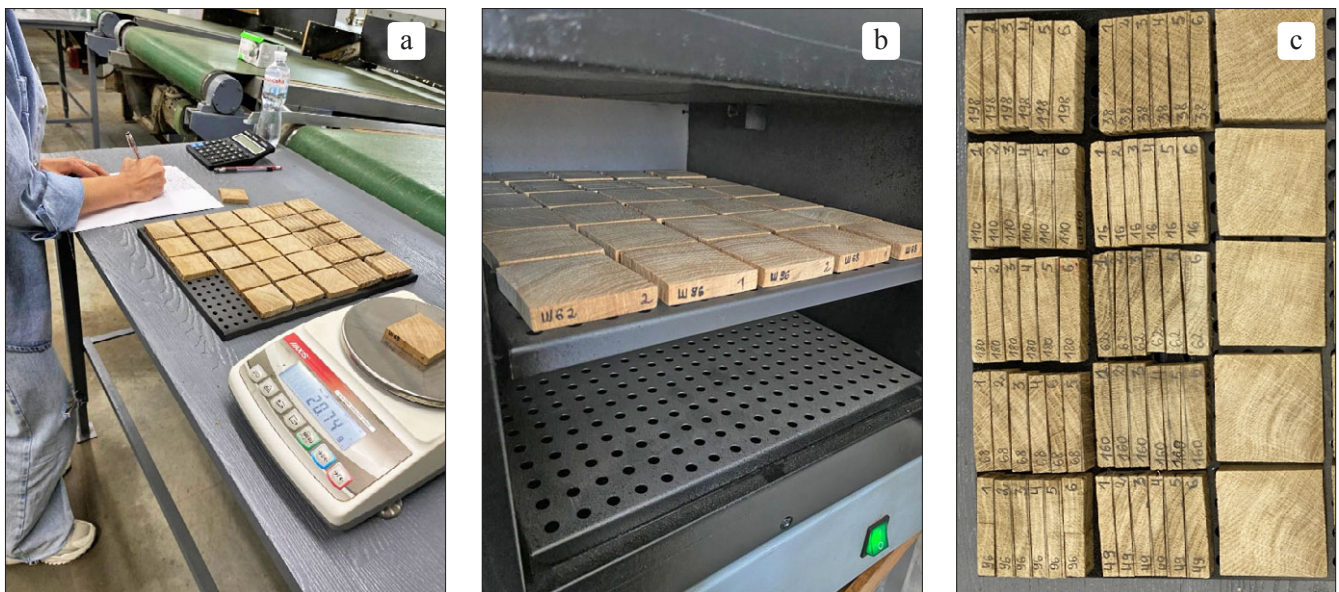


Рис. 1. Визначення пошарової вологості заготовок з деревини дуба звичайного ваговим методом: а – зважування секцій вологості; б – розміщення секцій вологості в сушильній шафі; с – секції для визначення пошарової вологості дубових заготовок

Fig. 1. Determination of layer-by-layer moisture content of European oak wood blanks using the weight method: а – weighing of moisture sections; б – Arranging moisture sections in a drying chamber; с – sections for determining the layer-by-layer moisture content of oak blanks

Секції зважували на цифровій вазі AXIS з точністю $\pm 0,001$ г та завантажували у сушильну шафу СНОЛ 58/350. Температуру у сушильній шафі підтримували на рівні $103 \pm 1^\circ\text{C}$. Через 16 год зразки виймали та зважували, після чого повторно поміщали у сушильну шафу на дві години. Після чергового зважування порівнювали масу зразків з попереднім значенням. Якщо маса секції не відрізнялася від попереднього значення більше ніж на 0,001 г, то її приймали як масу деревини в абсолютно сухому стані.

Для визначення показника внутрішніх напружень висушених заготовок за відносною деформацією зубців силових секцій використовували методику згідно з положеннями ДСТУ 4921:2008.

Для проведення дослідження, поряд зі секціями для визначення пошарової вологості, вирізали секції для встановлення відносної деформації зуб-

ців силової секції. Секції висушували у сушильній шафі протягом 16 год за температури $103 \pm 1^\circ\text{C}$. Після сушіння до абсолютно сухого стану випилювали силові секції (рис. 2, а), згідно схеми (рис. 2, б). Відразу після розкрою зубці секції можуть вигнутися назовні або всередину. Для кожної секції штангенциркулем вимірювали товщину T і віддаль T_1 між зовнішніми гранями зубців секції з точністю до 0,1 мм. За умови рівності величин T і T_1 напруження в заготовках майже відсутні.

Відносну деформацію зубців секції розраховували за формулою (Білей та ін., 2010; ДСТУ 4921:2008):

$$f_s = (T - T_1) / (2 \cdot l) \cdot 100, \% \quad (1)$$

За кінцевий результат приймали середнє арифметичне значення відхилення зубців усіх контрольних секцій.

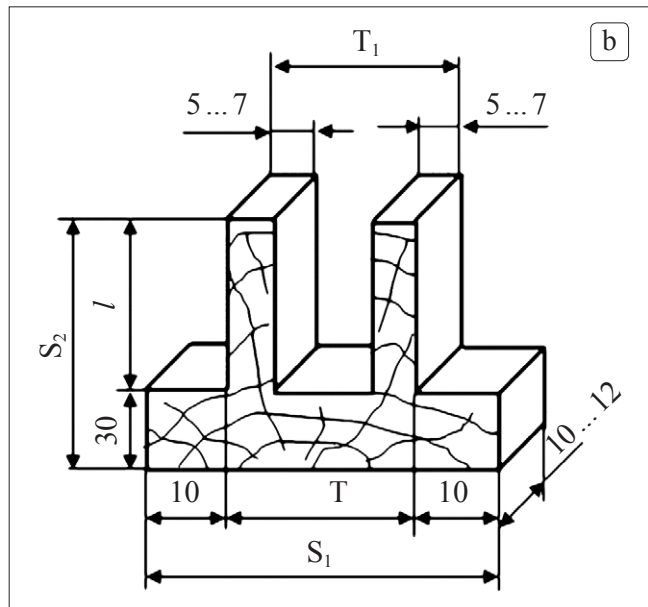


Рис. 2. Секція для дослідження умовного показника залишкових напружень: а – випиляна секція; б – схема розкрою секцій напружень для пиломатеріалів (заготовок) за товщини більше 40 мм:

S_1 – товщина пиломатеріалів (заготовок), мм; S_2 – ширина пиломатеріалів (заготовок), мм;

T – товщина секції, мм; T_1 – віддаль між зовнішніми гранями зубців, мм; l – довжина зубця, мм

Fig. 2. Section for studying the conditional residual stress index: а – sawn section; б – diagram of cutting sections of stress for sawn timber (blanks) with a thickness of more than 40 mm:

S_1 – thickness of sawn timber (blanks), mm; S_2 – width of sawn timber (blanks), mm; T – section thickness, mm;

T_1 – distance between the outer edges of prongs, mm; l – prong length, mm

Наявність тріщин і зміни кольору визначали візуально. Поздовжнє жолоблення (y %) визначали співвідношенням максимальної стріли прогину до довжини заготовки. З партії заготовок, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері з вибірки 200 шт. виявлено лише п'ять зразків з жолобленням, а з конвективної сушильної камери – чотири зразки. Вимірювання стріли прогину здійснювали з використанням плоскої поверхні та штангенциркуля (рис. 3).

Результати дослідження (Results).

За результатами вимірювань ємнісним вологоміром MERLIN HM9 WS-25 вологості у 228 шт. заготовок з деревини дуба, висушених у конвективній сушильній камері, вологість (W_k) коливалася від 4,7 до 8,8%. Середня кінцева вологість становила 7,0%.

За результатами статистичної обробки експериментальних даних кінцевої вологості заготовок побудовано гістограму та полігон розподілу (рис. 4).



Рис. 3. Вимірювання стріли прогину заготовки
Fig. 3. Measuring the deflection of the blank

У результаті вимірювань вологості 200 шт. заготовок з деревини дуба, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері, встановлено, що вологість W_k змінювалася від 5,0 до 10,6%. Середня кінцева вологість становила 7,6%. За результатами статистичної обробки експериментальних даних кінцевої вологості заготовок W_k побудовано гістограму та полігон розподілу (рис. 5).

Задана кінцева вологість заготовок W_k у штабелі становить 8%. Фактична середня кінцева вологість дубових заготовок у штабелі після процесу сушіння у конвективній сушильній камері становила 7,0, у вакуумно-конвективній – 7,6%. Цей показник відповідає заданому за II категорією якості ($\Delta W = \pm 1,5\%$).

Середньоквадратичне відхилення S кінцевої вологості заготовок після сушіння у конвективній сушильній камері рівне 0,799 і є меншим, ніж значення цього показника після сушіння заготовок у вакуумно-конвективній камері ($S = 0,958$). Отже, після сушіння у конвективній сушильній камері спостережено менші відхилення від середньої вологості.

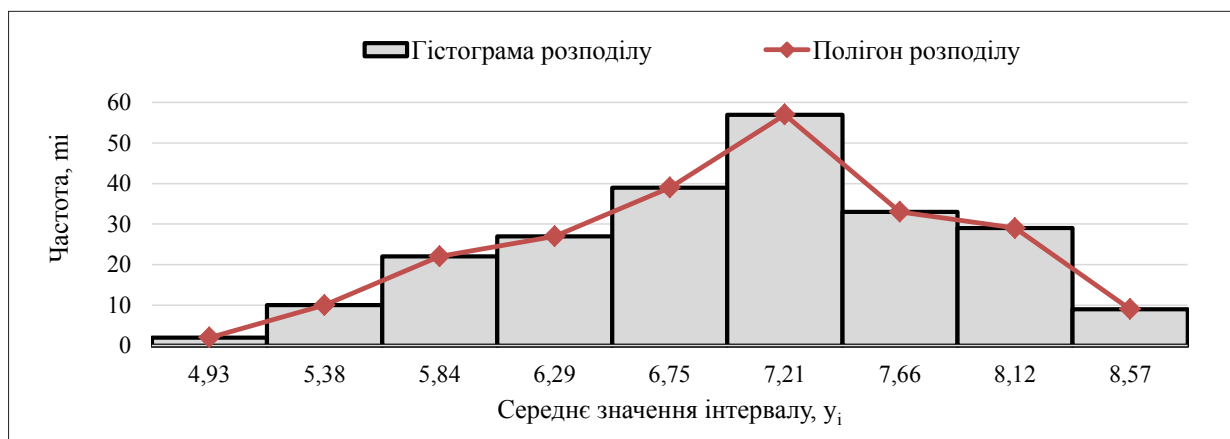


Рис. 4. Полігон розподілу кінцевої вологості заготовок з деревини дуба висушених у конвективній сушильній камері
Fig. 4. Distribution polygon of the final moisture content of oak wood blanks dried in a convection drying chamber

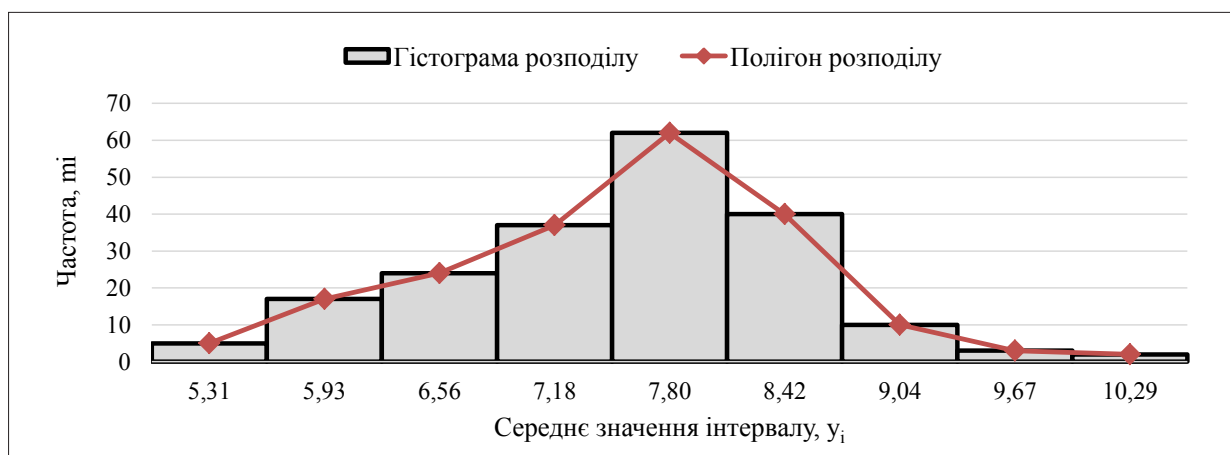


Рис. 5. Полігон розподілу кінцевої вологості заготовок з деревини дуба висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері

Fig. 5. Distribution polygon of the final moisture content of oak wood blanks dried in a vacuum-convection drying chamber

Нормативний показник відхилення вологості окремих заготовок для II категорії якості від заданої кінцевої вологості $W_{к.зад.}=8\%$ становить $\Delta W_{к.зад.}=\pm 1,5\%$. Однак, у конвективній сушильній камері 56 заготовок з вибірки у 228 шт. мають вологість нижчу $W_{к.зад.}\leq 6,4\%$, що не відповідає нормативному показнику за II категорією якості. Заготовок з вологістю $W_{к.зад.}\geq 9,6\%$ виявлено не було. У вакуумно-конвективній сушильній камері також частина заготовок не відповідають вимогам II категорії якості сушіння: 30 заготовок мали вологість нижчу $W_{к.зад.}\leq 6,4\%$ і п'ять заготовок мали вологість вищу $W_{к.зад.}\geq 9,6\%$.

Нормативний показник відхилення вологості окремих заготовок для II категорії якості від середнього по партії за кінцевої вологості $W_{к.факт.}=6\dots 8\%$

становить $\pm 1,5\%$. Однак, у конвективній сушильній камері шість заготовок з вибірки у 228 шт. мали вологість нижчу $W_{к.факт.}\leq 5,4\%$ і дві заготовки мали вологість вищу ($W_{к.факт.}\geq 8,6\%$), що не відповідає нормативному показнику за II категорією якості. У вакуумно-конвективній сушильній камері також частина заготовок не відповідає вимогам II категорії якості сушіння: 13 заготовок мали вологість нижчу ($W_{к.факт.}\leq 6,0\%$) і шість заготовок мали вологість вищу ($W_{к.факт.}\geq 9,2\%$).

Величина перепаду вологості за товщиною заготовок не перевищує 1,2% після сушіння дубових заготовок у конвективній камері (рис. 6, а), а максимальний перепад вологості в заготовках, висушених у вакуумно-конвективній камері становить 2,6% (рис. 6, b).

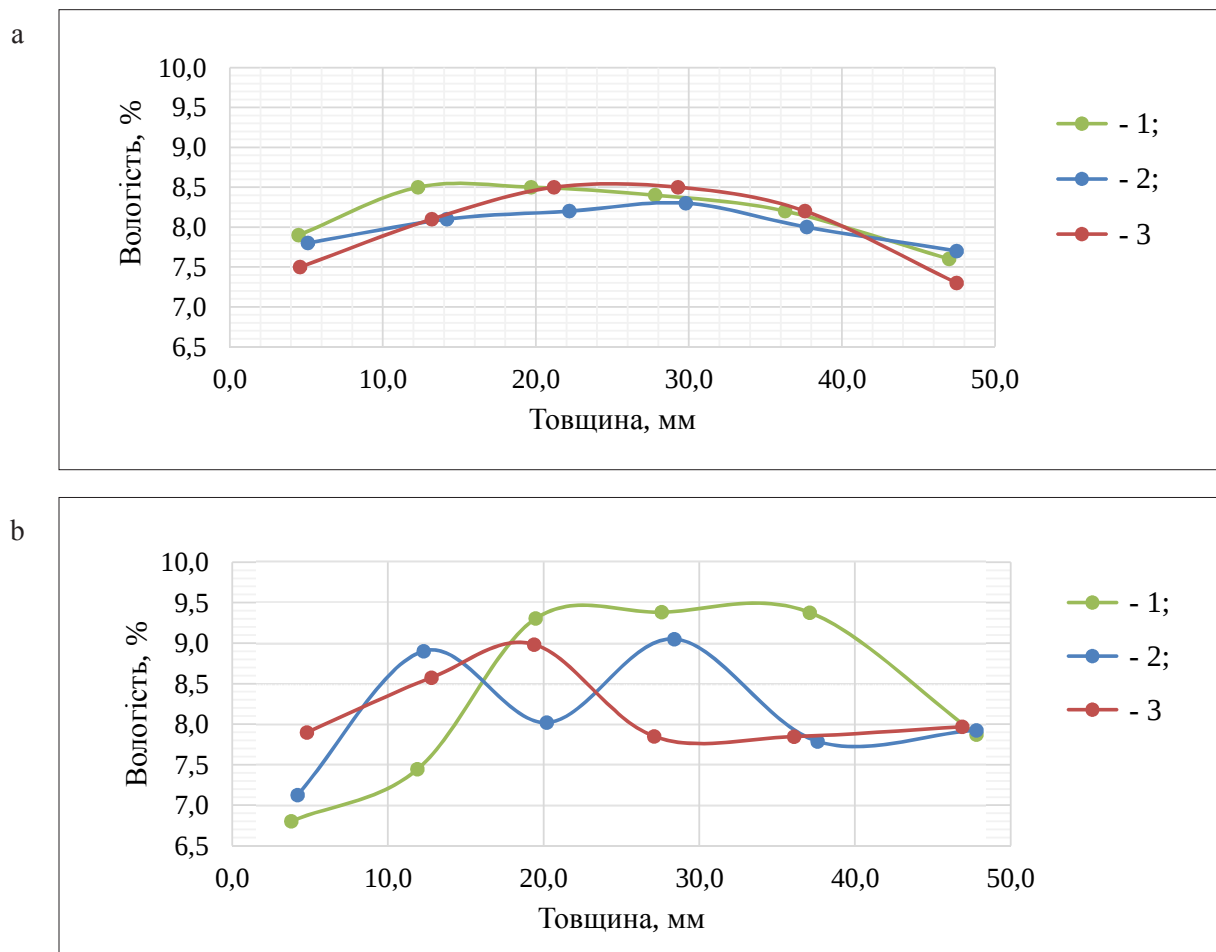


Рис. 6. Розподіл пошарової вологості в заготовках: а – після сушіння в конвективній сушильній камері (1 – зразок №199; 2 – зразок №132; 3 – зразок №145); б – після сушіння в вакуумно-конвективній сушильній камері (1 – зразок №180; 2 – зразок №110; 3 – зразок №62)

Fig. 6. Distribution of layer-by-layer moisture content in the blanks: a – after drying in a convection drying chamber (1 – specimen No. 199; 2 – specimen No. 132; 3 – specimen No. 145); b – after drying in a vacuum convection drying chamber (1 – specimen No. 180; 2 – specimen No. 110; 3 – specimen No. 62)

Додатне значення показника відносної деформації свідчить про стискаючі напруження, від'ємне – про розтягуючі напруження у зразку. Умовний показник залишкових напружень (від-

носна деформація зубців силових секцій) f_s для зразків, висушених у конвективній сушильній камері, не перевищує 2,00%, що відповідає II категорії якості сушіння. Усереднене значення за

модулем умовного показника залишкових напружень для зразків, висушених у конвективній сушильній камері, становить 0,66%. Умовний показник залишкових напружень (відносна деформація зубців силових секцій) f_{σ} для зразків висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері для дев'яти зразків не перевищує 2,00%, що відповідає II категорії якості сушіння, а одного зразка становить 2,66%, що відповідає III категорії якості сушіння. Однак, усереднене значення за модулем

умовного показника залишкових напружень для зразків, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері, становить 1,20%. Отримані результати показують, що в процесі сушіння заготовок за даних умов дослідження у вакуумно-конвективній сушильній камері залишкові напруження більші, ніж у конвективній сушильній камері (рис. 7).

Отже, отримано такі значення показників якості сушіння дубових заготовок у конвективній та конвективно-вакуумній сушильних камерах (табл.).

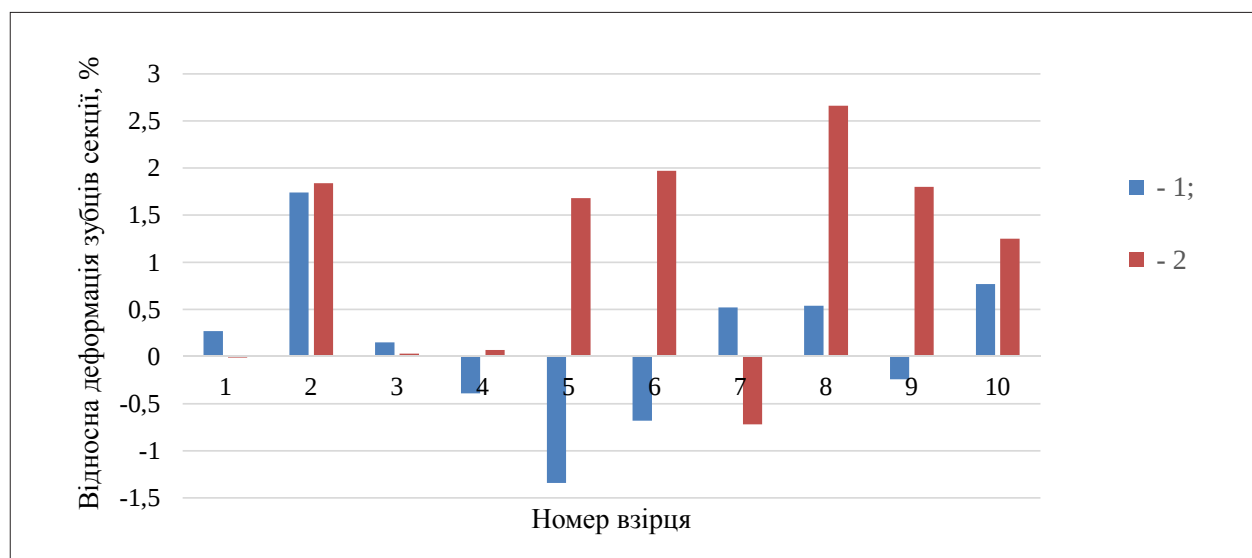


Рис. 7. Відносна деформація зубців силової секції: 1 – зразки, висушені у конвективній сушильній камері; 2 – зразки, висушені у вакуумно-конвективній сушильній камері

Fig. 7. Relative deformation of the prongs of the stress section: 1 – specimens dried in a convection drying chamber; 2 – specimens dried in a vacuum convection drying chamber

Таблиця. Показники якості заготовок з деревини дуба звичайного розміром 50×50×1000 мм після процесу сушіння

Table. Quality indicators for oak wood blanks measuring 50×50×1,000 mm after the drying process

Показники	У конвективній сушильній камері		У вакуумно-ковективній сушильній камері	
	min	max	min	max
Задана кінцева вологість партії, $W_{\text{к.зад.}}$, %	8,0		8,0	
Мінімальний ($W_{\text{к.мін}}$, %) та максимальний ($W_{\text{к.макс}}$, %) показники вологості з вибірки	4,7	8,8	5,0	10,6
Фактична середня кінцева вологість у штабелі, $W_{\text{к.факт.}}$, %	7,0		7,6	
Кількість зразків в партії, що не відповідають нормативному значенню за показником $\Delta W_{\text{к.зад.}}$ для II категорії якості сушіння ($\Delta W_{\text{к.зад.}} = \pm 1,5\%$), шт.	$\leq 6,4\%$	$\geq 9,6\%$	$\leq 6,4\%$	$\geq 9,6\%$
	56	0	30	5
Кількість зразків в партії, що не відповідають нормативному значенню за показником $\Delta W_{\text{к.факт.}}$ для II категорії якості сушіння ($\Delta W_{\text{к.факт.}} = \pm 1,5\%$), шт.	$\leq 5,4\%$	$\geq 8,6\%$	$\leq 6,0\%$	$\geq 9,2\%$
	6	2	13	6
Середньоквадратичне відхилення кінцевої вологості, S, %	0,799		0,958	
Умовний показник залишкових напружень – f_{σ} , %	0,66		1,20	

Після візуального огляду заготовок, висушених у конвективній сушильній камері, на наявність у них тріщин у партії з 228 шт. виявлено сім заготовок з торцевими тріщинами. Після візуального огляду заготовок, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері, на наявність в них тріщин у партії з 200 шт. виявлено 40 заготовок з торцевими тріщинами (рис. 8). Допустима глибина торцевої тріщини в умовах виробництва не повинна перевищувати 10 мм. Усі торцеві тріщини в заготовках були в межах допустимої норми, поверхневих тріщин виявлено не було.



Рис. 8. Торцеві тріщини в заготовках з дерева дуба

Fig. 8. End check in oak wood blanks

Результати експериментальних досліджень показали, що поздовжнє жолоблення заготовок після сушіння в конвективній камері становило від 0,79 до 1,44%, тоді як після сушіння у вакуумно-конвективній камері – від 0,53 до 1,99%. Кількість пожолоблених заготовок після процесу сушіння не перевищила 2,50%, що можна прийняти як задовільний результат, оскільки в подальшому їх торцюють і використовують у виробництві клеєних щитів.

Одним із дефектів сушіння деревини листяних порід є темні ділянки на висушених і в подальшому – на струганих заготовках. Зазвичай плям не видно на необробленій поверхні, вони стають помітними лише після калібрування. У цьому дослідженні після сушіння заготовок з деревини дуба звичайного у конвективній та вакуумно-конвективній камерах візуально суттєвих змін кольору не спостерігалось.

Дискусія (Discussion).

Внутрішні напруження в деревині як у процесі сушіння, так і після його завершення є визначальним чинником, який впливає на якість висушеного матеріалу. Величину внутрішніх напружень під час сушіння пиломатеріалів (заготовок) в літературних джерелах рекомендовано встановлювати за щільною, що виникла між двома пластинками розколотої напіл силової секції (Yin, & Liu, 2021) або за відносною деформацією зубців силової секції (Білей та ін., 2010; ДСТУ 4921:2008; Simpson, 1991). Застосування зубчастих силових секцій дає змогу визначити навіть незначні напруження та встановити їхній вид (Пінчевська, Чаусов, 2008). Згин зубців назовні вказує на наявність розтягуючих, а згин всередину – стискаючих напружень у поверхневих шарах сортименту (Simpson, 1991).

Перепад вологості за товщиною вказує на різницю у рівнях вологості у поверхневих і внутрішніх шарах сортименту і показує наскільки рівномірно відбувається процес сушіння в його середині. Якщо перепад вологості великий, то це свідчить про нерівномірність сушіння сортименту і може призвести до деформацій, появи тріщин або інших дефектів (Шостак, Ацбергер, Копинець, 2005).

У процесі сушіння також виникають напруження. Крім того, градієнти вологості, деформації та напруження існують і за товщиною. Цим можна пояснити викривлення зрізів, що спостерігається під час випробування на зубцях силових секцій або під час методу зрізів, які використовують у промисловості для оцінювання рівня напружень.

У ДСТУ 4921:2008 та EN 14298:2004 передбачено, що допустимість дефектів сушіння визначається специфікацією на продукцію. Однак, допустимі дефекти сушіння, такі як тріщини, жолоблення, зміна кольору тощо регламентуються «Керівними технічними матеріалами з технології камерного сушіння пиломатеріалів» (Білей та ін., 2010). На якість висушуваних пиломатеріалів (заготовок) мають вплив анатомічна будова деревини різних порід, якість сировини і продукції лісопиляння, стан обладнання і технологія сушіння.

Беручи до уваги анізотропію деревини та значний перепад вологості у висушуваних сортиментах, як наслідок нерівномірного всихання, може виникати розтріскування деревини (Озарків та ін., 2018; Шостак, Ацбергер, Копинець, 2005; Udovytska et al., 2024). У процесі сушіння можуть утворюватися поверхневі, торцеві та внутрішні тріщини. Поверхневі (пластові) тріщини найчастіше утворюються на початку процесу сушіння на пласті сортиментів (Wood Handbook..., 2010). Для уникнення поверхневих тріщин рекомендується застосування на початковій стадії процесу режимів, які забезпечуватимуть повільне висихання поверхні сортиментів.

Торцеві тріщини утворюються внаслідок швидкого висихання торців сортиментів, оскільки деревина висихає у напрямку вздовж волокон швидше, ніж поперек. Розміщення прокладок ближче до торця пиломатеріалів (заготовок), встановлення ефективних перегородок у сушильній камері або герметизація поперечного перерізу, зокрема, клей ПВА + тирса (Deaconu, Georgescu, & Camrean, 2023) дають змогу зменшити або запобігти утворенню торцевих тріщин.

Внутрішні тріщини можуть утворитися, коли вологість внутрішніх шарів стає нижчою від точки насичення волокна, і, відповідно, починається їхнє всихання. На цьому етапі висушені в розтягнутому стані зовнішні шари сортиментів перешкоджають вільному всиханню внутрішніх. Для запобігання виникненню внутрішніх тріщин проводять проміжну вологотеплообробку.

Також через нерівномірне висихання у різних напрямках унаслідок сушіння сортиментів може виникати їхнє жолоблення, яке може бути поздовжнім по пласті, поздовжнім по крайці, поперечним та криловатим (поздовжнє спіральне викривлення сортименту) (Ormarsson, 1999; Teischinger et al., 2023). Цих дефектів сушіння можна уникати за рахунок правильного формування штабеля та забезпечення притискання верхніх шарів штабеля, оскільки нижні шари фіксуються масою самих висушуваних сортиментів (Konopka et al., 2017; Teischinger et al., 2023).

Колір деревини також є важливим критерієм її якості. Вплив на колір деревини мають: умови зберігання сировини, вологість деревини, температура та тривалість її впливу на деревину. Колірні характеристики висушених сортиментів визначають їхні споживчі якості і, відповідно, ціну (Губер та ін., 2023). Зміна природного забарвлення, спричинена процесом сушіння, проявляється у різних формах, зокрема, у вигляді смуг, плям тощо. Найпоширенішими дефектами зміни природного забарвлення внаслідок сушіння деревини дуба є жовті забарвлення на поверхні сортименту внаслідок діяльності грибів та коричневе забарвлення зовнішніх шарів (іноді смугасте вглиб). Температура, відносна вологість агента сушіння або градієнт вологості та час їхнього впливу є найважливішими параметрами процесу сушіння, які можуть спричинити зміну кольору висушуваного матеріалу. Тому для уникнення цього потрібно підбирати низькотемпературні режими сушіння, адаптовані до конкретної породи деревини.

Висновки (Conclusions).

1. Фактична середня кінцева вологість партії заготовок з деревини дуба після процесу сушіння у конвективній камері становила 7,0%, у вакуумно-конвективній – 7,6%. Відхилення від заданої кінцевої вологості для заготовок, висушених у конвективній сушильній камері, є більшим, ніж у вакуумно-конвективній.

2. Середньоквадратичне відхилення вологості окремих заготовок, висушених у конвективній сушильній камері, від середнього значення становить 0,799 і є меншим від середньоквадратичного відхилення вологості окремих заготовок, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері (0,958). Отже, у конвективній сушильній камері процес сушіння відбувається рівномірніше.

3. Усереднене значення за модулем умовного показника перепаду вологості за товщиною для заготовок, висушених у вакуумно-конвективній сушильній камері, становить $f_s = 1,20\%$, а для заготовок, висушених у конвективній сушильній камері – $f_s = 0,66\%$. Отже, умовний показник залишкових напружень f_s (відносна деформація зубців силових секцій) не перевищує 1,50% і в обох випадках відповідає I категорії якості сушіння. Залишкові напруження після вакуумно-конвективного сушіння у два рази більші, ніж після конвективного.

4. У вибірці з 228 шт. заготовок, висушених у конвективній сушильній камері, було виявлено 7 шт. з торцевими тріщинами, у вибірці з 200 шт. заготовок, висушених у вакуумно-конвективній – 40 шт. Усі торцеві тріщини в заготовках були в межах допустимої норми, тобто не перевищували 10 мм. Поверхневих тріщин виявлено не було.

5. Кількість пожолоблених заготовок у процесі сушіння не перевищує 2,5%, що можна прийняти як задовільний результат, оскільки ці заготовки після операції торцювання можна використати у виробництві клеєних щитів.

Конфлікт інтересів (Conflicts of Interest).

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Список літератури (References)

- Andrashek, Yo.V., & Humeniuk, Zh.Ya. (2003). Standardization and quality of the drying lumber. *Scientific Bulletin of the Ukrainian State Forestry University*, 13(2), 122-124. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2003/13_2/122_Andrashek_13_2.pdf [Андрашек, Й.В., Гуменюк, Ж.Я. (2003). Стандартизація та якість сушіння деревини. *Науковий вісник УкрДЛТУ*, 13(2), 122-124] (in Ukrainian)
- Biley, P.V., Kopynets, Z.P., & Labaj, V. Yo. (2010). Principles of the rational modes of thin lumber drying. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 20(15), 75-78. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2010/20_15/75_Bil.pdf [Білей, П.В., Копинець, З.П., Лабай, В.Й. (2010). Принципи побудови раціональних режимів сушіння тонких пиломатеріалів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 20(15), 75-78] (in Ukrainian)
- Bilej, P.V., & Pristavskyy, B.I. (2012). Efficiency analysis of convective wooddrying. *Scientific*

- Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 22(10), 116-119. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2012/22_10/116_Bil.pdf [Білей, П.В., Приставський, Б.І. (2012). Аналіз ефективності конвективного сушіння деревини. *Науковий вісник НЛТУ України*, 22(10), 116-119] (in Ukrainian)
- Biley, P.V., Sokolovskiy, I.A., Pavlyust, V.M., & Kunynets, 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)
- Brunner-Hildebrand (1987). *Drying lumber*. Buchdruckwerkstätten Hannover GmbH, Hannover. [Brunner-Hildebrand (1987). *Die Schnittholztrocknung*. Buchdruckwerkstätten Hannover GmbH, Hannover. 322 s.] (in German)
- Câmpean, M., & Lazarescu, C. (2016). Considerations upon the drying of oak lumber. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 9(58), No. 1, 37-42. Retrieved from: https://webbut.unitbv.ro/index.php/Series_II/article/view/830
- Deaconu, I.-T., Georgescu, S.-V., & Campean, M. (2023). Drying Behaviour of 50 mm Thick Turkey Oak Lumber. *Applied Sciences*, 13, 10676. <https://doi.org/10.3390/app131910676>
- DSTU 4921:2008 *Sawn timber. Assessment of drying quality*. Edition is official. Kyiv: State standard of Ukraine. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=86996 [ДСТУ 4921:2008 *Пилопродукція. Оцінювання якості сушіння*. Видання офіційне. Київ: Держстандарт України] (in Ukrainian)
- DSTU 4922:2002 *Timber and sawn wood. Determination methods damp*s. Kyiv: State 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*. Видання офіційне. Київ: Держстандарт України] (in Ukrainian)
- EN 14298:2004 *Sawn timber – Assessment of drying quality*. Retrieved from <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/aa69f719-6a33-442c-95a0-bbd7dd3c679f/en-14298-2004?srsltid=AfmBOory6btIbQWK1ko3qhuPeDwaGIw5KZbB4pOhOuXy0XNULCqTCDJw>
- 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>
- Huber, Yu., Kopynets, Z., Humeniuk, Zh., Shchupakivskyy, R., & Partyka, V. (2023). Evaluation of color variability of sliced oak veneer in the process of its manufacture. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 25, 178-186. <https://doi.org/10.15421/412315> [Губер, Ю.М., Копинець, З.П., Гуменюк, Ж.Я., Щупаківський, Р.Б., Партика, В.П. (2023). Дослідження колірних характеристик струганого шпону з деревини дуба звичайного в процесі його виготовлення. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 25, 178-186] (in Ukrainian)
- Konopka, A., Barański, J.A., Vilkovská, T., & Klement, I. (2017). The impact of the drying process on the deformation of the beech and oak wood samples. *Forestry and Wood Technology*, 99, 168-173. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/321192035_The_impact_of_the_drying_process_on_the_deformation_of_the_beech_and_oak_wood_samples
- Kopynets, Z.P., & Shchupakivskyy, 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. Retrieved from <https://forestwoodworking.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/122/309>
- 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. Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.36930/conf150.3.6> [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 р. Львів: НЛТУ України] (in Ukrainian)
- Mayevskyy, V.O., Moroz, R.O., Kopynets, S.V., Ferents, O.B., Shchupakivskyy, 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)
- Ormarsson, S. (1999). *Numerical Analysis of Moisture-Related Distortion in Sawn Timber*. Doctoral thesis, monograph. Göteborg: Chalmers University of Technology, Dep. of Structural Mech. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/341877999_Numerical_Analysis_of_Moisture-Related_Distortions_in_Sawn_Timber
- Ozarkiv, I.M., Kobrynovuch, M.S., Humeniuk, Z.H., & Petryshak, I.V. (2018). Control of tense-deformed state and moisture of wood in heat and mass transfer during drying process. *Scientific Bulletin of the*

Ukrainian National Forestry University, 28(10), 81-84. <https://doi.org/10.15421/40281017> [Озарків, І. М., Кобриневич, М. С., Гуменюк, Ж. Я., Петришак, І. В. (2018). Контроль напружено-деформованого стану і вологості деревини в тепломасообмінних процесах сушіння. *Науковий вісник НЛТУ України*, 28(10), 81-84] (in Ukrainian)

Pinchevska, O. O., & Chaurov, M. G. (2008). The quaschins of the assessment of sawn timber drying quality. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 18(4), 85-91. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2008/18_4/85_Pinczewska_18_4.pdf [Пінчевська, О. О., Чаусов, М. Г. (2008). Оцінка якості сушіння пиломатеріалів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 18(4), 85-91] (in Ukrainian)

Simpson, W. T. (1991). Dry kiln operator's manual. In *Agriculture Handbook*; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA. Retrieved from: https://www.woodweb.com/knowledge_base/Dry_kiln_operators_manual.html?fb_locale=fr_FR

SIST-TS CEN/TS 14464:2010 *Sawn timber – Method for assessment of case-hardening*. Retrieved from <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/81983382-51e7-4547-a2b0-f3c94ec5265a/sist-ts-cen-ts-14464-2010?srsltid=AfmBOor09TgRShIjL5Q8u6tJO4lcHFK25eFkLIWwIG34hCs71THPnCRM>

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. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2005/15_4/index.htm [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)

Teischinger, A., Avramidis, S., Hansmann, Ch., & Mayrhofer, A. (2023). Sawn Timber Steaming and Drying. In P. Niemz, A. Teischinger, D. Sandberg (Eds.), *Springer Handbook of Wood Science and Technology* (pp. 1167-1210). https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_23

Yin, Q., & Liu, H.-H. (2021). Drying Stress and Strain of Wood: A Review. *Applied Sciences*, 11, 5023. <https://doi.org/10.3390/app11115023>

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), No 2, 111-126. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2024.17.66.2.7>

Wood Handbook – Wood as an Engineering Material (2010). Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 508 p.

Investigation of the qualitative characteristics of oak-wood blanks dried in different types of drying chamber

Yu. Huber¹, Z. Kopynets², O. Oliichuk³, Zh. Humeniuk⁴, Yu. Rubinsky⁵

Wood drying plays an important role in the wood-working industry, as the quality of sawn timber or blanks after chamber drying is crucial for the aesthetic and operational characteristics of final products.

The object of the study was blanks sawn from wood of common oak (*Quercus robur*) measuring 50×50×1,000 mm. They were dried in a Kates KAD-1×6S convection drying chamber and in a Hildebrand-Brunner vacuum-convection drying chamber with a capacity of approximately 50 m³ of assortments being dried. The blanks are subsequently used for the manufacture of glued panels, therefore they were dried in a mode that will ensure obtaining lumber products of category II of drying quality. Multi-stage drying modes were used, which included the operations of initial heating, drying, final heat-moisture treatment (conditioning), and cooling. In the convection drying chamber, the temperature of the drying agent at the first stage of the mode was $t_{dr}=33^{\circ}\text{C}$, the equilibrium moisture content was $W_e=16\%$, at the last stage of the drying mode the temperature of the drying agent was $t_{dr}=60^{\circ}\text{C}$, the drying gradient was $TG=2.4$. In the vacuum-convection drying chamber, the temperature of the drying agent at the first stage of the mode was $t_{dr}=40^{\circ}\text{C}$, the equilibrium moisture content was $W_e=14\%$, at the last stage of the drying mode, the temperature of the drying agent was $t_{dr}=63^{\circ}\text{C}$, the equilibrium moisture content was $W_e=5.4\%$.

¹ Yuriy Huber – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of 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 Zoya Kopynets – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products. Ukrainian National Forestry University, 103, General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: zoya.kopynets@nltu.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8977-6953>

³ Oksana Oliichuk – master sciences, Ukrainian National Forestry University, 103, General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: lan@nltu.edu.ua

⁴ Zhanna Humeniuk – senior lecturer of 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 Yuriy Rubinsky – PhD student, Ukrainian National Forestry University, 103, General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: yuriy.rubinsky@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-3111-7989>

The test samples consisted of 228 pieces of blanks which were dried in a convection chamber and 200 pieces dried in a vacuum-convection chamber.

The influence of the drying method on the quality indicators of oak lumber blanks was determined. The specified final moisture content of the batch was $W_{f.set}=8\%$. In particular, the minimum and maximum moisture content values of the sample after drying in a convection drying chamber were as follows: $W_{c.min}=4.7\%$, $W_{c.max}=8.8\%$, after drying in a vacuum-convection drying chamber – $W_{vc.min}=5.0\%$, $W_{vc.max}=10.6\%$. The actual average final moisture content in the stack after drying in a convection drying chamber was $W_{c.act.}=7.0\%$, after drying in a vacuum-convection drying chamber – $W_{vc.act.}=7.6\%$. Mean-square deviation of the final moisture content after drying in a convection drying chamber is $S=0.799\%$, and after drying in a vacuum-convection drying chamber it is $S=0.958\%$. The conditional residual stress index after drying in a convection drying chamber is $f_{\sigma}=0.66\%$, and after drying in a vacuum-convection drying chamber it is $f_{\sigma}=1.20\%$.

The regulatory indicator of deviation of the moisture content of individual blanks for quality category II from the specified final moisture content $W_{f.set}=8\%$ is $\Delta W_{f.set.}=\pm 1.5$. However, in the convection drying chamber, 56 blanks from a sample of 228 pieces have a moisture content lower than $W_{f.set.}\leq 6.4\%$, which does not meet the regulatory indicator for quality category II. No blanks with moisture content $W_{f.set.}\geq 9.6\%$ were found. In the vacuum-convection drying chamber, some of the blanks also did not meet the requirements of drying quality category II: 30 blanks had a moisture content lower than $W_{f.set.}\leq 6.4\%$ and 5 blanks had a moisture content higher than $W_{f.set.}\geq 9.6\%$.

Thus, the obtained values of the quality indicators for drying oak-wood blanks in convection and convection-vacuum drying chambers showed that under the study conditions, the drying process occurs more evenly in the convection drying chamber.

Key words: convection drying chamber; vacuum-convection drying chamber; oak; lumber; final moisture content; residual stresses; drying.