

ІМПУЛЬСНЕ СУШІННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ ДЕРЕВИНИ ДУБА ЧЕРВОНОГО

О. О. ПИНЧЕВСЬКА, доктор технічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0001-8123-5490>, e-mail: olenapinchavska@nubip.edu.ua

А. К. СПІРОЧКІН, кандидат технічних наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0002-2647-3784>, e-mail: spirochkin@nubip.edu.ua
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Визначено причини здешевлення виготовленої з деревини дуба ламелі – лицьового покриття дошок для підлоги. Встановлено, що під час сушіння деревини дуба за низьких температур виникає накопичення волого у зоні біля поверхні – так зване умовне джерело волого. Це призводить до утворення світлих плям усередині пило матеріалів, які довгий час зберігались в умовах підвищеного ступеня насичення повітря та мали низьку швидкість видалення волого. Для уникнення цього дефекту запропоновано інтенсифікувати процес сушіння шляхом використання імпульсних режимів, які складаються з періодів нагрівання та охолодження деревини. У період нагрівання температура матеріалу поступово підвищується, деревина отримує тепловий удар і накопичує тепло, сушіння відбувається лише за рахунок градієнта вологості. Під час охолодження температура середовища знижується, ступінь насичення зростає і, відповідно, підвищується рівноважна вологість. У результаті поверхневі шари матеріалу зволожуються, волога по товщині деревини вирівнюється, відбувається релаксація сушильних напружень. У лабораторних умовах проведено експериментальні дослідження імпульсного сушіння заготовок із деревини дуба червоного товщиною 30 мм і 50 мм. Визначено амплітуду коливання температури – 30 °C та доцільність проведення циклічного нагрівання лише до досягнення середньої вологості матеріалу 20 %, після чого деревину потрібно висушувати до необхідної кінцевої вологості за сталої температури нагрівання. Запропоновано метод розрахунку тривалості імпульсного сушіння, який враховує особливості кінетики періодів нагрівання і охолодження пилопродукції з деревини дуба червоного товщиною 30 мм і 50 мм. Рекомендовано розглядати процес кінетики зміни температури як суму процесів циклічного нагрівання, що відбувається за поліноміальною залежністю, та циклічного охолодження, що відбувається за експоненціальною залежністю. Визначено, що співвідношення тривалості циклічного нагрівання до тривалості циклічного охолодження становить 1/3. З використанням тепломасообмінних критеріїв та визначеного експериментальним шляхом коефіцієнта вологопровідності деревини дуба червоного зроблено адекватну модель розрахунку температури деревини та відносної вологості повітря протягом циклів нагрівання та охолодження деревини. На основі отриманих результатів теоретичних і експериментальних досліджень запропоновано імпульсні режими сушіння заготовок дуба червоного різної товщини, які запобігають утворенню білих плям усередині матеріалу. Зауважено скорочення процесу у 1,5–2,4 рази та зменшення енерговитрат у 1,53 рази. Визначені експериментальним шляхом показники залишкових напружень, величини перепаду напружень у заготовках після сушіння та величини межі міцності на статичний згин показали, що якість сушіння їх відповідає I категорії якості згідно з ДСТУ 4921:2008. Порівняння отриманих значень із максимально допустимими значеннями межі міцності на розтяг поперек волокон у тангенціальному напрямку $\sigma_{\perp} = 6,5$ МПа показало запас міцності 25 %, що свідчить про можливість застосування імпульсних режимів сушіння для якісного сушіння заготовок із деревини дуба червоного.

Ключові слова: дуб червоний (*Quercus rubra*), коефіцієнт вологопровідності, імпульсні режими, якість сушіння, термін сушіння.

Актуальність. У виробників покриття для підлоги сьогодні набуває популярності швидкоростучий інтродуцент дуб червоний (*Quercus rubra*). Культури з участю дуба червоного у лісах держлісфонду Київського Полісся займають площу 2251 га (Poliakova, 1999).

До покриттів підлоги відносять як паркетну заготовку з масивної деревини, такі і покриття у вигляді паркетних дошок, що складаються з декількох шарів і мають лицьове покриття у вигляді ламелей із деревини твердих листяних порід. У технології виготовлення ламелей застосовують такі способи, як попередній розкрій пилопродукції на ламель і подальше її висушування, що супроводжується значними трудовитратами на формування сушильних пакетів, та попереднє сушіння пилопродукції з подальшим виготовленням ламелі.

Для сушіння пилопродукції сьогодні використовують конвекційні камери, що обігріваються гарячою водою. Під час сушіння деревини дуба за низьких температур виникає накопичення вологи у зоні біля поверхні – так зване умовне джерело вологи (Pinchevska, Spirochkin, Sedliacik & Oliynyk, 2016). Це призводить до утворення світглих плям усередині пиломатеріалів, які довгий час зберігались в умовах підвищеного ступеня насичення повітря та мали низьку швидкість видалення вологи. Утворення плям знижує вартість ламелі. Позбавитись цього браку можна за рахунок інтенсифікації процесу сушіння шляхом підвищення температури сушильного агента. Однак тривала дія високої температури $t_{нагр} > 60$ °С на деревину з вологістю більше ніж $W_{ном} > 30$ % сприяє різкому зменшенню її міцності. Через це постала необхідність розроблення раціональних режимів проведення процесу

сушіння пилопродукції з деревини дуба червоного.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Видаленню вологи з твердих листяних порід деревини притаманні певні особливості: значна тривалість процесу; вибагливість до режимних параметрів сушіння, зумовлених температурно-вологісними межами; ризик виникнення браку чи зміни кольору у процесі сушіння тощо (Pinchevska, Koval & Marchenko, 2012; Wegener & Fengel, 1987). Це передусім пояснюється анатомічною будовою деревини – речовинами, що утворюють мікроструктуру цих порід (Vintoniv & Uholiev, 2007).

Одним зі шляхів інтенсифікації процесу сушіння пилопродукції є використання імпульсних режимів, сутність яких полягає у чергуванні періодів нагрівання та охолодження (Miliū & Kolin, 2008; Remond & Perre, 2008). Під час сушіння імпульсними режимами цикли нагрівання та охолодження відіграють різну роль у процесах тепломасоперенесення (Lykov, 1956). У період нагрівання температура матеріалу поступово підвищується, деревина отримує тепловий удар і накопичує тепло, сушіння відбувається лише за рахунок градієнта вологості. Під час охолодження температура середовища знижується, ступінь насичення зростає і, відповідно, підвищується рівноважна вологість. Температура всередині деревини перевищує температуру поверхневих шарів. За рахунок цієї різниці в деревині виникає позитивний градієнт температури, що зумовлює міграцію вологи з більш нагрітих шарів до менш нагрітих. У результаті поверхневі шари матеріалу зволожуються, волога по товщині деревини вирівнюється, відбувається релаксація сушильних напружень (Pleschberger, Hansmann, Müller & Teischinger,

2013). Оскільки у період охолодження деревини не витрачається енергія, то це призводить до значного зменшення її витрат (Kosarin, 2012; Miliū & Kolin, 2008) та зменшення собівартості процесу на 24 % (Kosarin, 2012). Щодо впливу періодичного нагрівання на тривалість сушіння висловлюють неоднозначні думки, зокрема, скорочення процесу у 1,5–2 рази для деревини бука і дуба зазначено у (Lubovitsly, 1986), протилежну думку висвітлено у роботах (Bond & Espinoza, 2016; Salin, 2003). Проте усі дослідники зауважують покращення якості сушіння.

Для визначення кількісних значень параметрів імпульсних режимів сушіння пилопродукції потрібно враховувати величину температури і вологості сушильного агента під час нагрівання, визначити безпечну для якості сушіння амплітуду коливання температури та вплив рівня температури нагрівання на механічні властивості матеріалу. Періодичність циклів «нагрівання – охолодження» під час сушіння доцільно проводити лише у період, коли деревина містить вільну вологу. Подальше застосування таких циклів не впливає на швидкість видалення зв'язаної вологи (Pleschberger, Hansmann, Muëller & Teischinger, 2013; Miliū & Kolin, 2008). Після досягнення деревиною вологості $W_{ном} = 20$ % температуру сушильного агента слід підтримувати на постійному рівні до досягнення пилопродукцією заданої кінцевої вологості (Welling, Riehl & Zerhau, 2004; Folvik & Magnar, 2004).

В основу створення імпульсних режимів покладено принцип переривчастих процесів, що спостерігаються за атмосферного сушіння або сушіння з використанням сонячної енергії у геліосушарках (Тернадзе, 1986; Hasan & Langrish, 2016), коли деревина вдень нагрівається, а вночі охолоджується. Застосування імпульсних режимів, на

відміну від сушіння в геліосушарках, дає можливість регулювати параметри сушильного агента залежно від характеристики висушуваного матеріалу. Складність полягає у визначенні раціональних режимів, оскільки відомі аналітично розраховані параметри відрізняються як за рівнем температури та амплітудою її коливань, рівнем відносної вологості, так і за тривалістю циклів «нагрівання – охолодження» навіть для пилопродукції однієї породи і товщини (Kosarin, 2012; Shyshkina, 2006). Отже, на сьогодні немає теоретично підтверджених та експериментально перевірених режимів інтенсифікованого сушіння деревини дуба червоного, які б не викликали утворення «умовного джерела вологи», що спричиняє виникнення світлих плям у внутрішніх шарах пилопродукції.

Метою дослідження є визначення параметрів раціонального режиму сушіння пилопродукції з деревини дуба червоного у процесі імпульсного сушіння, що забезпечать якісне сушіння деревини зі збереженням механічних властивостей.

Матеріали і методи дослідження. Для дослідження основних режимних параметрів обрано заготовки дуба червоного без видимих дефектів товщиною 30 мм і 50 мм, що відповідає товщині промислових пиломатеріалів, які найчастіше використовують у технології виготовлення ламелі. Ширина експериментальних зразків становила 85–90 мм, середня початкова вологість коливалася у межах 45–50 %. Зразки висушували до вологості 7–8 %. Сушіння проводили у лабораторному сушильному пристрої, обсягом завантаження 0,12 м³ щільного матеріалу, оснащеному системою автоматичного керування процесом із підтримкою швидкості циркуляції сушильного агента на рівні 1,2 м/с. Температуру всередині зразків вимірювали за допо-

могою термопар. Для уникнення швидкого видалення вологи і, відповідно, розтріскування матеріалу під час нагрівання у камеру подавали насичену пару.

Для обчислення показника внутрішніх напружень висушених заготовок за відносною деформацією зубців силових секцій використовували методику ДСТУ 4921:2008 та ENV 14464:2002. Величини модуля пружності та пружних деформацій визначали згідно з методикою (Uholiev, 2007).

Визначення механічних властивостей висушеної деревини (межі міцності та модуля пружності за статичного згину) виконували відповідно до вказівок стандартної методики (EN 408:2010) з використанням випробувальної машини Р-5. Випробування проводили у приміщенні за вологості повітря 65 ± 5 % і температури навколишнього середовища 20 ± 2 °С.

Для розрахунку раціональних параметрів режиму сушіння запропоновано гіпотезу кінетики осцилювального сушіння, яка полягає в уявленні зміни температури матеріалу за синусоїдальним законом:

$$t_{surf} = t_{mid} + A_t \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_{per}} \cdot \tau_{dr}\right) + \frac{1}{2}(t_a - t_{in})Ki \cdot \varepsilon \cdot Ko \cdot Lu, \quad (1)$$

де t_{surf} – температура поверхні деревини, °С; t_{mid} – середнє арифметичне значеннь температури нагрівання та охолодження, °С;

A_t – амплітуда осцилювання, °С;

τ_{per} – тривалість одного циклу (нагрівання – охолодження), год;

τ_{dr} – тривалість процесу сушіння, год;

t_a – температура середовища, °С;

t_{in} – початкова температура деревини, °С;

Ki – критерій Кірпічова (Lykov, 1956);

ε – коефіцієнт фазового перетворення вологи (Horokhovsky, 2008);

Ko – критерій Косовича (Lykov, 1956);

Lu – критерій Ликова (Lykov, 1956).

Для визначення кількісних значень критерію Ликова Lu і критерію Кірпічова Ki необхідно мати кількісні значення коефіцієнтів вологопровідності деревини дуба, які визначають експериментальним шляхом. Для визначення коефіцієнтів вологопровідності використано метод контактного зволоження (Serhovsky & Rasev, 1987; Alpatkina, 1970). Для цього відібрано зразки деревини дуба червоного походженням із зони Полісся – найбільшого ареалу дубових лісів України. Загальна кількість дослідів з урахуванням отриманого (Alpatkina, 1970) коефіцієнта варіації $V_a = 7,7$ % становила 32 шт. Інші складові згаданих вище критеріїв та коефіцієнт фазового перетворення вологи визначали за відомими залежностями (Vintoniv, Sopushynsky & Teischinger, 2007; Horokhovsky, 2008; Kosarin, 2012; Shubin, 1990; Ozarkiv & Kopynets, 2006).

Результати дослідження та їх обговорення. Визначення параметрів режиму імпульсного сушіння проводили емпіричним шляхом. Параметри сушильного агента протягом нагрівання були такими: температура $t = 100$ °С, відносна вологість – $\varphi = 90$ – 100 %. Тривалість нагрівання зумовлено досягненням температури центру заготовок $t_{cep} = 85$ °С. Для визначення раціональної амплітуди коливань температури було проведено дослідження тривалості процесу у разі досягнення різних рівнів температури ($t_{ox1} = 25$ °С, $t_{ox2} = 55$ °С і $t_{ox3} = 70$ °С) охолодження. Визначено, що найбільша швидкість видалення вологи зі зразків характерна для амплітуди коливань періоду температури зразка, що дорівнює 30 °С, аналогічно з отрима-

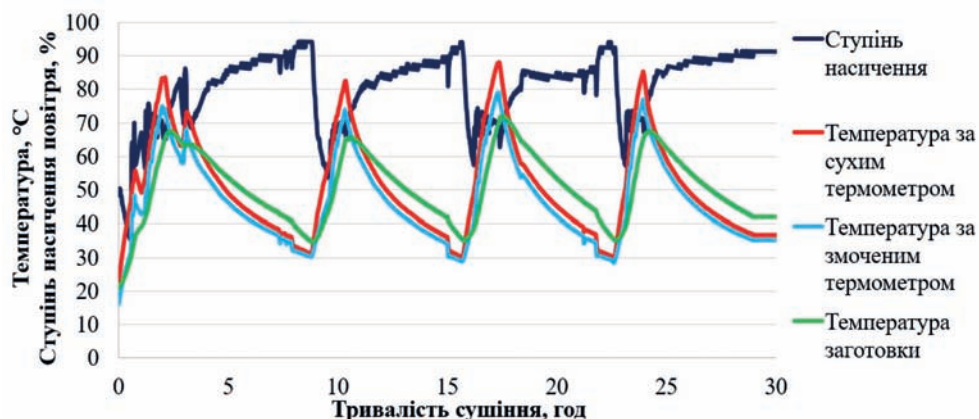


Рис. 1. Фактичні значення параметрів режиму сушіння дуба червоного завтовшки 50 мм на початковій стадії

ними (Zakharzhevsky, 1948; Minhazov & Kachalin, 1976) результатами.

Встановлено невідповідність гіпотези зміни температури за синусоїдальним законом експериментальним даним, при цьому тривалість нагрівання матеріалу є меншою майже у 3 рази за час охолодження (рис. 1).

Отримані експериментальні дані кінетики зміни температури (рис. 2) показали, що період нагрівання відбувається за поліноміальною залежністю, а період охолодження – за експоненціальною. Згідно з відмінностями кінетики зміни температури поверхні зразків, що відповідає температурі мокрої тіла, у періоді нагрівання $t_{пов. нагр}$ год, та охолодження $t_{пов. охол}$ год, скориговано висунуто гіпотезу щодо синусоїдального закону її зміни. Запропоновано розглядати окремо періоди нагрівання та охолодження:

$$\begin{cases} t_{пов. нагр} = t_{ц. нагр} + \frac{1}{2} \cdot (t_c - t_{ц. охол}) \cdot Ki_m \varepsilon Ko Lu, \\ t_{пов. охол} = t_{ц. охол} + \frac{1}{2} \cdot (t_c - t_{ц. нагр}) \cdot Ki_m \varepsilon Ko Lu, \end{cases} \quad (2)$$

де $t_{ц. нагр}$, $t_{ц. охол}$ – температура центральної частини заготовок у період нагрівання та охолодження відповідно, °C.

Загальну тривалість сушіння $\tau_{суш}$ год, за запропонованим режимом доцільно визначити за загальною кількістю циклів, що складається з суми періодів нагрівання $\tau_{нагр}$ год, охолодження $\tau_{охол}$ год, та періоду безперервного нагрівання $\tau_{безп}$ год (від вологості $W = 20\%$ до кінцевої вологості $W_k = 6-10\%$):

$$\tau_{суш} = n \cdot (\tau_{нагр} + \tau_{охол}) + \tau_{безп}, \quad (3)$$

де n – кількість циклів процесу осцилювального сушіння, шт.;

$\tau_{нагр}$ – тривалість нагрівання, год;

$\tau_{охол}$ – тривалість процесу охолодження, год;

$\tau_{безп}$ – тривалість сушіння за безперервного нагрівання до експлуатаційної вологості матеріалу від вологості $W_{пот} = 20\%$, год.

Для визначення останнього періоду сушіння за сталої температури використано рівняння (Serhovsky & Rasev, 1987):

$$\tau_{безп} = \frac{3600 \cdot S^2}{\pi^2 \cdot a'} \ln\left(\frac{W_{поч} - W_{ріє}}{W_k - W_{ріє}}\right) \quad (4)$$

де a' – коефіцієнт вологопровідності, $см^2/с$;

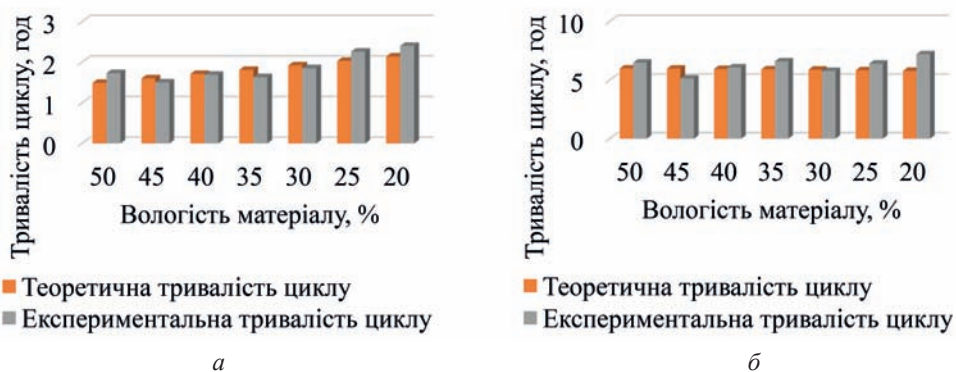


Рис. 2. Зіставлення експериментальної та розрахункової тривалості циклів сушіння заготовок товщиною 50 мм дуба червоного: а – нагрівання; б – охолодження

1. Результати перевірки адекватності моделей для значень тривалості за різних періодів сушіння

Порода	Період сушіння	<i>t</i> -критерій Стьюдента		<i>F</i> -критерій Фішера	
		<i>t</i> _{розр}	<i>t</i> _{крит}	<i>F</i> _{розр}	<i>F</i> _{табл}
Дуб червоний	нагрівання	0,20	2,09	2,13	2,82
	охолодження	0,41	2,07	1,31	2,82

$W_{поч}$, W_k , $W_{рів}$ – відповідно вологість початкова, кінцева та рівноважна, %;
 S – товщина матеріалу, см.

Для визначення кількості циклів «нагрівання – охолодження» залежно від товщини матеріалу та початкової вологості запропоновано емпіричне рівняння:

$$n = (14 \cdot W_{поч} - 85) \cdot S - 0,333 \cdot W_{поч} - 5,623. \quad (5)$$

Перевірка одержаного рівняння для рівня значущості 5 % підтвердила адекватність моделі (за критерієм Стьюдента $t_{розр} = 0,01 < t_{табл} = 2,05$; за критерієм Фішера $F_{розр} = 1,10 < F_{табл} = 2,98$).

З урахуванням особливостей кінетики циклів нагрівання і охолодження регресійне рівняння тривалості сушіння

матеріалу у період імпульсного нагріву представлено у вигляді:

$$\begin{cases} t_{нагр} = ((0,005 \cdot S - 0,0012) \cdot W_k + 0,65 \cdot S + 0,05) \cdot t_{нагр} + \\ + (0,14 - 2,00 \cdot S) \cdot W_k + 75,05 \cdot S - 6,54; \\ t_{охол} = ((1,65 \cdot S - 0,069) \cdot \ln(W_k) - 10,17 \cdot S + 0,264) \cdot t_{охол} + \\ + (4,08 - 86,48 \cdot S) \cdot \ln(W_k) + 474,92 \cdot S - 10,09, \end{cases} \quad (6)$$

де W_k – кінцева вологість матеріалу, %;
 $t_{нагр}$, $t_{охол}$ – температури нагрівання і охолодження відповідно (за табл. 1), °С.

Перевірка теоретичних рівнянь тривалості циклів нагрівання та охолодження (рис. 2) підтвердила адекватність моделей (табл. 1).

Для визначення ступеня насичення φ агента оброблення у різні періоди імпульсного сушіння запропоновано рівняння:

$$\begin{cases} \varphi_{нагр} = 100^{1 - (0,006 + 10^{-5} (120 - t_c)^{1,46}) (t_c - n \cdot t_{нагр,пот} + \frac{1}{2} (t_c - t_0) \cdot K_{im} \cdot \varepsilon_{KoLu})^{1,074 + 10^{-17} (146 - t_c)^{7,77}} \\ \varphi_{охол} = 100^{1 - (0,006 + 10^{-5} (120 - t_c)^{1,46}) (t_c - n \cdot t_{охол,пот} + \frac{1}{2} (t_c - t_0) \cdot K_{im} \cdot \varepsilon_{KoLu})^{1,074 + 10^{-17} (146 - t_c)^{7,77}} \end{cases}, \quad (7)$$

де t_c – температура середовища сушильної камери, °С.

Для розрахунку відповідних критеріїв у рівняннях (2) і (7) використано отримані експериментальним шляхом значення середньої базової щільності деревини дуба червоного – $\rho_0 = 570 \text{ кг/м}^3$, а також залежності коефіцієнтів вологостійкості від температури у тангенціальному та радіальному напрямках:

– для радіального напрямку:

$$a' = (0,1491 \cdot t - 3,4210) \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

– для тангентального напрямку:

$$a' = (0,1203 \cdot t - 2,9170) \cdot 10^{-6}. \quad (9)$$

Відповідно до отриманих результатів теоретичних і експериментальних досліджень запропоновано імпульсні режими сушіння заготовок з деревини дуба червоного (табл. 2).

За результатами проведених сушінь за запропонованими режимами виявля-

но, що у заготовок обидвох товщин недопустимих дефектів не спостерігалося, колір деревини став темнішим, більш чітко проявилася текстура. Після розкрою пиломатеріалів на ламелі білих плям не було виявлено (рис. 3).

Порівняння отриманих результатів тривалості сушіння за запропонованими імпульсними режимами із розрахунковими значеннями тривалості сушіння за традиційними безперервними режимами (Serhovskyy & Rasev, 1987) показало скорочення тривалості процесу у 1,5–2,4 рази залежно від товщини заготовок.

За відносною деформацією силових секцій визначено, що відповідно до оцінки внутрішніх напружень за ДСТУ 4921: 2008 висушені заготовки відповідають I категорії якості сушіння. Для кількісної оцінки напруженого стану зразків дуба червоного товщиною 50 мм були побудовані епюри напружень (рис. 4) і визначені величини перепаду напружень після сушіння режимом, на-

2. Рекомендовані імпульсні режими сушіння деревини дуба червоного

Середня вологість, %	Режимні параметри	Товщина пиломатеріалу, мм	
		30	50
>30	Температура середовища t_c , °С	100	80
	Температура заготовок $t_{нар}$, °С	85	65
	Температура охолодження $t_{охол}$, °С	55	35
	Ступінь насичення повітря φ , %	95	95
30–25	Температура середовища t_c , °С	100	80
	Температура заготовок $t_{нар}$, °С	85	65
	Температура охолодження $t_{охол}$, °С	55	35
	Ступінь насичення повітря φ , %	50	79
25–20	Температура середовища t_c , °С	100	80
	Температура заготовок $t_{нар}$, °С	85	65
	Температура охолодження $t_{охол}$, °С	55	35
	Ступінь насичення повітря φ , %	38	55
20–15	Температура середовища t_c , °С	100	80
	Ступінь насичення повітря φ , %	35	40
<15	Температура середовища t_c , °С	100	80
	Ступінь насичення повітря φ , %	35	38

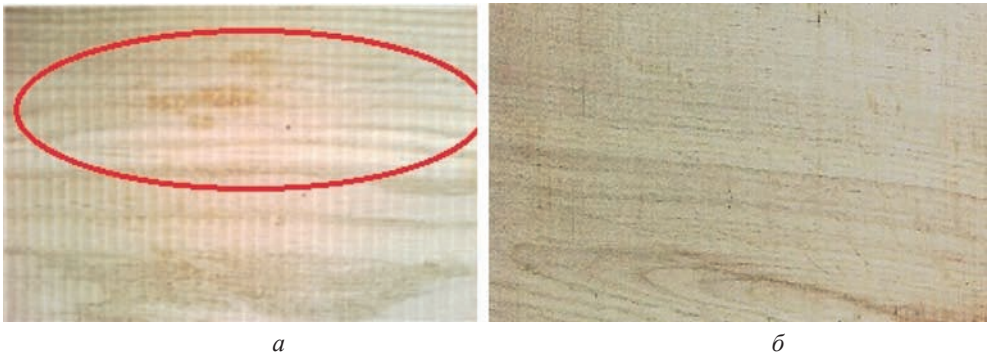


Рис. 3. Поверхня ламелей із деревини дуба, висушеного різними режимами: *a* – низькотемпературним із наявністю білих плям; *б* – циклічним – з однорідним забарвленням

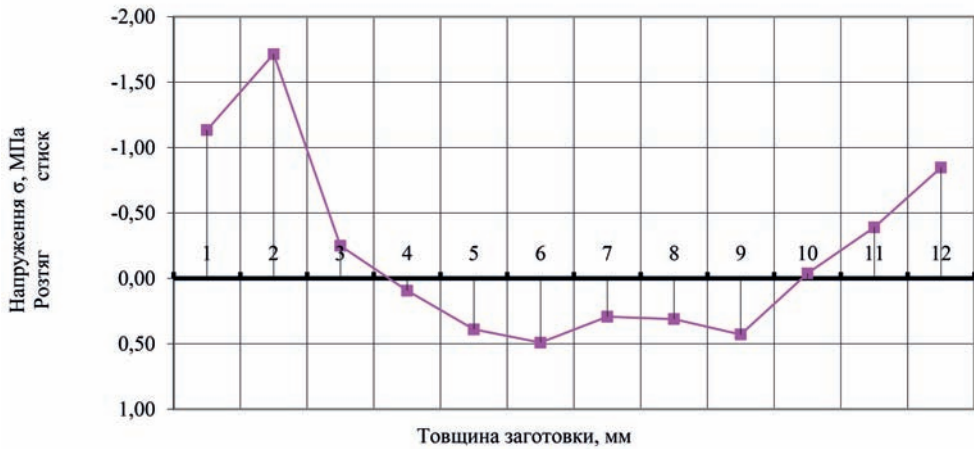


Рис. 4. Епоора залишкових напружень зразка № 2

веденим у табл. 2. Порівняння отриманих значень із максимально допустимими значеннями межі міцності на розтяг поперек волокон у тангенціальному напрямку $\sigma_m = 6,5$ МПа показало запас міцності 25 %, тобто висушені заготовки не повинні за подальшого оброблення деформуватися.

Під час випробування висушених заготовок на статичний згин виявлено, що після досягнення максимального навантаження зразки ще певний час зберігали форму перед остаточним руйнуванням. Максимальне навантаження під час руйнування за фактичної вологості зразка, висушеного кла-

сичним безперервним режимом та розробленим імпульсним, становило відповідно 3,1 кН та 3,8 кН. Отже, короточасний вплив підвищених температур сушильного агента не вплинув на механічні властивості зразків товщиною 50 мм з дуба червоного.

Висновки і перспективи. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень імпульсного сушіння заготовок із деревини дуба червоного запропоновано раціональні режими, що дають змогу уникнути виникнення білих плям усередині заготовок. Визначено, що значення межі міцності на статичний згин висушених

заготовок із деревини дуба червоного є більшими на 15,0 % від значень межі міцності для деревини, яку висушували за класичним низькотемпературним режимом.

Реалізувати розроблені осцилювальні режими доцільно в безкалориферних сушильних установках, перевагою яких є малоінерційність за тем-

пературою, тобто сушарка швидко нагрівається та охолоджується. Використання на підприємствах розроблених режимів осцилювального сушіння в безкалориферних камерах, перевірених у промислових умовах, забезпечує економічну ефективність за рахунок скорочення тривалості сушіння та зменшення енергетичних витрат до 40 %.

Список літератури

- Alpatkina, R. P. (1970). *Investigation of the moisture conductivity of wood of the main native species*. Moscow [in Russian].
- Bond, B. H., & Espinoza, O. (2016). A Decade of Improved Lumber Drying Technology. *Current Forestry Reports*, 2 (2), 106–118. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0034-z>
- EN 408:2010 – Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. iTeh Standards Store. (n.d.). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/5adc63d2-e164-4b6e-9c2d-64dd8a9d6f19/en-408-2010>.
- Folvik, K., & Magnar, S. K. (2004). *Various wood properties influencing the development of checks in knots during drying*. Advances in drying of wood. NTL-papers from COST-E15 seminars 2000-2004. 99 p.
- Hasan, M., & Langrish, T. A. (2016). Development of a sustainable methodology for life-cycle performance evaluation of solar dryers. *Solar Energy*, 135, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.036>
- Hasan, M., & Langrish, T. A. (2016). Time-valued net energy analysis of solar kilns for wood drying: A solar thermal application. *Energy*, 96, 415–426. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.081>
- Horokhovskiy, A. H. (2008). *Lumber drying technology based on modeling and optimization of heat and mass transfer processes in wood*. Ekaterinburh [in Russian].
- Kosarin, A. A. (2012). *Impulse drying technology for sawn timber*. Moscow [in Russian].
- Lubovitsky, P. V. (1986). *Drying of wood with cyclic heating (experience of enterprises)*. Moscow [in Russian].
- Lykov, A. V. (1956). *Heat and mass transfer during drying*. Moscow: Hosenerhoizdat [in Russian].
- Miliü, G., & Kolin, B. (2008). Oscillation drying of beech timber – initial experiments. End user's needs for wood material and products. *The Netherlands*, 115–124.
- Minhazov, M. H., & Kachalin, N. V. (1976). *Oscillating schedules of sawn timber drying*. Moscow [in Russian].
- Ozarkiv, I. M., Kopynets, Z. P., & Atsberher, Y. L. (2006). Methods of research of Kirpichov's criterion as the main criterion of formation of cracks during the process of wood convective drying. *Nauovyy Visnyk NLTU Ukraine*, 16.2, 81–85 p. [in Ukrainian].
- Pinchevska, O., Spirochkin, A., Sedliačik, J., & Oliynyk, R. (2016). Quality assessment of lumber after low temperature drying from the view of stochastic process characteristics. *Wood Research*, 61 (6), 871–883.
- Pleschberger, H., Hansmann, C., Müller, U., & Teischinger, A. (2013). Fracture energy approach for the identification of changes in the wood caused by the drying processes. *Wood Science and Technology*, 47 (6), 1323–1334. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0578-z>
- Poliakova, O. H. (1999). *Biotechnological features of red oak (Quercus rubra L) in artificial plantations of Kyiv Polissya*. Kyiv [in Ukrainian].
- Remond, R., & Perre, P. (2008). Drying strategies capable of reducing the stress level of a stack of boards as defined by a comprehensive dual scale model. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 10, 3–18.
- Salin, J.-G. (2003). A Theoretical Analysis of Timber Drying in Oscillating Climates. *Holzforchung*, 57 (4), 427–432. <https://doi.org/10.1515/hf.2003.063>
- Serhovskiy, P. S., & Rasev, A. I. (1987). *Hydrothermal treatment and wood preservation*. Moscow: Lesnaya promyshlennost [in Russian].
- Shubin, G. S. (1990). *Drying and heat treatment of wood*. Moscow: Lesnaya promyshlennost [in Russian].
- Shyshkina, E. E. (2006). *Drying of lumber in low capacity chambers with natural air circulation*. Ekaterinburh [in Russian].
- Tepnadze, M. U. (1986). *Schedules and technology of lumber drying in solar dryers*. Moscow [in Russian].
- Ugolev, B. N. (2007). *Wood science and forestry commodity science: Textbook*. Moscow: HOU VPO MHUL [in Russian].

- Vintoniv, I. S., Sopushynsky, I. M., & Teishinger, A. (2007). *Wood science*. Lviv: Apriori [in Ukrainian].
- Wegener, G., & Fengel, D. (1987). Investigation on colour changes resulting from drying of European oakwood. *Fourth International Symposium on Wood and Pulp Chemistry*, 27 (30), 121–123.
- Welling, J., Reihel, T., & Zerhau, W. (2004). *Oscillating Drying Conditions*. Technical report.
- Zakharzhevsky, V. H. (1948). *High-speed wood drying*. Moscow: Timber industry [in Russian].
-

Pinchevska O. O., Spirochkin A. K.
OSCILLATING DRYING OF RED OAK WOOD BLANKS

The reasons for the reduction in the price of the lamella made of oak wood have been determined. It is established that during the drying of oak wood at low temperatures there is an accumulation of moisture in the near-surface zone, the so-called “conditional source of moisture”. This leads to the formation of light spots in the middle of the lumber, which have long been in conditions of high air humidity and had a low rate of moisture removal. To avoid this defect, it is proposed to intensify the drying process by using oscillating schedules, which consist of periods of heating and cooling of wood. During the heating period, the temperature of the material gradually rises, the wood receives heat stroke and accumulates heat, drying occurs only due to the moisture gradient. During cooling, the air temperature decreases, the degree of saturation increases and, accordingly, the equilibrium moisture content increases. As a result, the surface layers of the material are moistened, the moisture is leveled along the thickness of the wood, there is a relaxation of drying stresses. In the laboratory, experimental studies of oscillating drying of red oak wood blanks with a thickness of 30 and 50 mm were performed. The amplitude of temperature fluctuations is determined – 30 ° C and the expediency of cyclic heating only until the average moisture content of the material reaches 20%, after which the wood should be dried to the required final moisture content at a constant heating temperature. A method for calculating the duration of oscillating drying is proposed, which takes into account the peculiarities of the kinetics of the periods of heating and cooling of sawtimbers made of red oak wood with a thickness of 30 mm and 50 mm. It is recommended to consider the process of temperature change kinetics as the sum of the processes of cyclic heating, which occurs in polynomial dependence, and cyclic cooling, which occurs in exponential dependence. It is determined that the ratio of the duration of cyclic heating to the duration of cyclic cooling is 1/3. Using heat and mass transfer criteria and the experimentally determined coefficient of moisture conductivity of red oak wood, an adequate model for calculating wood temperature and relative humidity during wood heating and cooling cycles has been developed. Based on the obtained results of theoretical and experimental studies, oscillating drying schedules of red oak blanks of different thickness are proposed, which exclude the formation of white spots in the middle of the material. The process was reduced by 1.5–2.4 times and energy consumption was reduced by 1.53 times. Experimentally determined indicators of residual stresses, the magnitude of the stress difference in the workpieces after drying and the values of the tensile strength showed that the quality of drying corresponds to the I quality category according to DSTU 4921: 2008. Comparison of the obtained values with the maximum allowable values of tensile strength across the fibers in the tangential direction $\sigma_m = 6.5$ MPa showed a margin of safety – 25%, which indicates the possibility of using oscillating drying schedules for high-quality drying of red oak wood blanks.

Keywords: Red oak (*Quercus rubra*), moisture conductivity coefficient, oscillating schedules, drying quality, drying duration.

Отримано: 2021-03-22