

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**БОРЯЧИНСЬКИЙ ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ**

УДК 674.047

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ СУШІННЯ ЗАГОТОВОК З ДЕРЕВИНИ ДУБА**

05.23.06 «Технологія деревообробки,  
виготовлення меблів та виробів з деревини»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Пінчевська Олена Олексіївна**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
завідувач кафедри технологій  
та дизайну виробів з деревини

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Грабар Іван Григорович**,  
Житомирський національний  
агроєкологічний університет,  
завідувач кафедри процесів,  
машин і обладнання

кандидат технічних наук, доцент  
**Шевченко Сергій Анатолійович**,  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
професор кафедри деревооброблювальних технологій  
і системотехніки лісового комплексу

Захист відбудеться «20» лютого 2018 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.004.11 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «    » січня 2018 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Н. В. Буйських

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Ощадливе використання цінних порід деревини вимагає вдосконалення технологій її переробки. Загальна кількість вирощуваних твердих листяних порід деревини в Україні знаходиться на рівні 42 %. Найпоширенішою серед них є деревина дуба звичайного (*Quercus robur*) – 24 %, а також швидкоростучий інтродуцент – дуб червоний (*Quercus rubra*). Виготовлення якісної продукції з деревини неможливо без технологічного процесу сушіння, розумна організація якого на підприємствах слугує запорукою раціонального використання природних ресурсів, економії тепло- та енергоносіїв.

Видалення вологи з деревини дуба відзначається складністю через анатомічну будову, а також значною тривалістю та енерговитратами, що впливає на собівартість продукції. Переважним способом сушіння є конвективний, який сьогодні реалізується в низькотемпературних камерах, що викликано прагненням зберегти природну міцність деревини і колір. Проте внаслідок особливостей проведення сушіння дуба звичайного за низьких температур виникає накопичення вологи у біляповерхневій зоні. Це призводить до утворення світлих плям у середині пиломатеріалів, які тривалий час знаходилися в умовах підвищеного ступеня насичення повітря та мали низьку швидкість видалення вологи. Подальший розкрій такої пилопродукції для виготовлення покриття для підлоги значно знижує його вартість. Позбутися цього браку сушіння можна за рахунок інтенсифікації процесу, а саме за рахунок підвищення температури, проте довготривала її дія знижує міцність висушеного матеріалу. Раціональним у такому випадку стає використання осцилювальних (переривчастих, імпульсних) режимів, в яких відбувається чергування короточасного нагрівання та охолодження деревини. Як їх особливість слід вказати те, що енергія витрачається лише в період нагрівання, а короточасний вплив високих температур не є руйнівним. Реалізувати такі режими можна в конвективних безкалориферних камерах, які значно дешевші порівняно зі звичайними, що також сприяє зниженню собівартості сушіння.

На сьогодні залишаються недостатньо вивченими циклічні процеси сушіння деревини дуба і як наслідок, постає питання розроблення раціональних режимних параметрів та визначення механічних властивостей деревини, висушеної за осцилювальними режимами. Використання циклічних процесів сушіння, які дозволяють зекономити енергоресурси, скоротити терміни та забезпечити бездефектний результат висушування твердих листяних порід деревини, має науково-практичну цінність для сушильних господарств деревообробних підприємств і лісового комплексу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи згідно з основними напрямками наукової діяльності кафедри технологій та дизайну виробів з деревини Національного університету біоресурсів і природокористування України, зокрема: «Розробити наукові основи формування вимог до раціонального використання деревної сировини» (номер державної

реєстрації 0112U002711, 2012–2016 рр.); «Розробити параметри інтенсифікованих режимів сушіння деревини твердих листяних порід» (номер державної реєстрації 0116U001754, 2016–2020 рр.).

**Мета та завдання дослідження.** Мета досліджень полягала у розробленні раціональних режимів осцилювального сушіння деревини дуба звичайного і дуба червоного у середовищі з підвищеною температурою за умови збереження якості та міцності матеріалу.

Для досягнення мети було поставлено наступні завдання:

- провести аналіз особливостей технології інтенсифікованого сушіння деревини та визначити параметри осцилювальних режимів сушіння заготовок дуба звичайного і дуба червоного різної товщини;
- визначити коефіцієнти вологопровідності деревини дуба звичайного і дуба червоного та кількісні значення масообмінних критеріїв;
- побудувати математичну модель процесу сушіння заготовок із деревини дуба звичайного і дуба червоного з урахуванням вищенаведених параметрів;
- визначити якість сушіння за ДСТУ 4921:2008 заготовок з деревини дуба звичайного і дуба червоного за запропонованими режимами та механічні властивості висушених заготовок;
- запропонувати конструкцію сушильної камери для реалізації сушіння деревини осцилювальними режимами;
- перевірити отримані результати лабораторних досліджень у промислових умовах і впровадити їх у виробництво.

*Об'єкт дослідження* – процес конвективного сушіння деревини твердих листяних порід.

*Предмет дослідження* – інтенсифікація сушіння заготовок із деревини дуба звичайного і дуба червоного шляхом використання осцилювальних режимів.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі застосовано такі методи досліджень: експериментальні – для отримання фактичних значень фізичних і механічних властивостей деревини дуба звичайного і дуба червоного, висушеного за осцилювальними режимами; емпіричних досліджень – для встановлення параметрів осцилювальних режимів сушіння; математичної статистики – для аналізу та обробки результатів експериментальних досліджень і перевірки адекватності моделей; теорії тепломасоперенесення – для побудови теоретичної моделі осцилювального сушіння пилопродукції; чисельний – для розрахунку тривалості процесу сушіння за осцилювальними режимами.

**Наукова новизна одержаних результатів.** На основі експериментальних досліджень та методів математичного моделювання вирішено науково-практичне завдання інтенсифікації процесу сушіння заготовок із деревини дуба звичайного і дуба червоного за умови збереження якості висушувального матеріалу та зниження енерговитрат.

Розроблено раціональні режими осцилювального сушіння заготовок із деревини дуба звичайного і дуба червоного, в основу яких покладено положення теорії тепломасоперенесення – розподіл температури в необмеженій пластині, та результати власних експериментальних досліджень.

Уперше визначено коефіцієнти вологопровідності деревини дуба звичайного і дуба червоного.

Запропоновано метод розрахунку терміну сушіння, який враховує особливості кінетики періодів нагрівання та охолодження деревини.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено спосіб інтенсифікованого сушіння деревини (патент України на корисну модель № 111100) та конструкцію сушарки для його реалізації.

Апробовано режимні параметри осцилювального сушіння деревини дуба звичайного у промислових умовах (акт проведення експериментальних досліджень від 24.07.2017 р.) та прийнято до використання на ТОВ «Веланс» (акт впровадження від 04.07.2017 р.).

Отримані результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри технологій та дизайну виробів з деревини Навчально-наукового інституту лісового і садово-паркового господарства Національного університету біоресурсів і природокористування України під час викладання дисциплін «Технологія сушіння і захисту деревини» для ОС «Бакалавр»; «Теорія теплового оброблення деревини», «Актуальні проблеми механічного оброблення деревини» для ОС «Магістр».

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень та основні положення дисертаційної роботи щорічно обговорювалися на міжнародних наукових і науково-практичних конференціях: «Студентство у вирішенні науково-практичної проблеми XXI століття» (м. Київ, 2012 р.); «Науковий пошук студентства у розвитку довкілля» (м. Київ, 2013 р.); «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (м. Вороніж, Російська Федерація, 2014 р.); «Виклики XXI століття та їхнє вирішення у лісовому комплексі й довкіллі» (м. Київ, 2015 р.); «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2015 р.); «Актуальні проблеми лісового сектору та садово-паркового господарства» (м. Київ, 2016 р.); «Сучасні технології та матеріали деревообробки» (м. Київ, 2016 р.); «Перспективи науково-практичного співробітництва у вирішенні сучасних проблем переробки низькотоварної деревини» (м. Київ – Вінниця, 2016 р.); «Здоров'я лісів, екосистемні послуги та лісові продукти для суспільства» (м. Київ, 2017 р.); «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2017 р.); «Contribution of young scientists on forestry, wood processing technologies and horticulture» (м. Київ, 2017 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Усі дослідження проведено за безпосередньою участю здобувача. Автором виконано огляд джерел наукової літератури за темою дисертації, лабораторні дослідження, узагальнення та математичну обробку результатів експериментів, їх апробацію. Аналіз та обговорення результатів досліджень, інтерпретацію та формулювання основних положень висновків, підготовку публікацій за результатами досліджень було здійснено за участю наукового керівника.

У публікаціях, підготовлених у співавторстві, здобувачу належить: [1, 6] – аналіз проблем сушіння деревини в промислових конвективних сушильних камерах; [4, 11, 14, 15] – постановка задачі, проведення й аналіз

результатів експериментальних досліджень сушіння деревини дуба звичайного і дуба червоного; [5, 10, 12] – аналіз кінетики сушіння дубових заготовок за підвищених температур осцилювальними режимами; [7] – запропоновано осцилювальний режим сушіння деревини дуба; [16] – запропоновано конструкцію сушильної установки для сушіння дубових заготовок осцилювальними режимами.

**Публікації.** Основні результати дисертаційного дослідження викладено у 16 наукових працях, з яких 2 статті в наукових фахових виданнях України, 2 статті в наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття в науковому виданні іншої держави, стаття в іншому науковому виданні, патент України на корисну модель та 9 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотацій, вступу, огляду наукової літератури, матеріалів і методів дослідження, результатів експериментальних досліджень та їхнього обговорення, висновків і списку використаних джерел літератури (203 найменування, з яких 37 латиницею) та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 193 сторінки комп'ютерного тексту, роботу проілюстровано 38 рисунками, 28 таблицями та 8 додатками.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, показано наукову новизну і практичне значення виконаної роботи. Наведено дані про апробацію одержаних експериментальних результатів та визначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі «**Стан питання**» проаналізовано існуючі технології сушіння деревини, результати попередніх досліджень зміни її властивостей під дією високих температур та визначено напрям досліджень.

Деревина дуба має високі фізико-механічні показники і є затребуваною у багатьох галузях промисловості України, таких як столярно-будівельне (несучі будівельні та інші конструкції, покриття для підлоги, віконні та дверні блоки), меблеве, бондарне виробництво тощо.

Аналіз кінетики сушіння показав, що видаленню вологи з твердих листяних порід деревини притаманні певні особливості: значна тривалість процесу; вибагливість до режимних параметрів сушіння, зумовлених температурно-вологісними межами; ризик виникнення поверхневих і внутрішніх тріщин чи зміни кольору у процесі сушіння тощо (Селюгін М. С., Кречетов І. В., Серговський П. С., Шубін Г. С., Білей П. В., Соколовський Я. І., Simpson W. та ін). Це, в першу чергу, пояснюється анатомічною будовою деревини – речовинами, що утворюють мікроструктуру цих порід (Уголев Б. Н., Галкін В. П., Вінтонів І. С.). Поширення сьогодні низькотемпературного сушіння пов'язане з необхідністю збереження механічних властивостей та природного кольору деревини. Проте сушіння у «водяних» камерах знижує швидкість видалення вологи, подовжує термін сушіння і, відповідно, підвищує

його собівартість. Крім того, у дуба спостерігається виникнення такого браку сушіння на початковому етапі, як локальне висвітлення кольору в середині матеріалу. Природа цього явища пов'язана з утворенням уявного «джерела вологи» (Пінчевська О. О.), яке виникає за довготривалої дії теплого насиченого повітря на деревину.

Актуальним є інтенсифікація конвективного процесу сушіння твердих листяних порід деревини, особливо його початкової стадії, яке зменшить потужність умовного «джерела вологи» за рахунок підвищення температури сушильного агента. Однак, тривала дія високої температури  $t_{нагр} > 60^\circ\text{C}$  на деревину з вологістю  $W_{ном} > 30\%$  спричиняє різке зменшення її міцності (Соколов П. В., Серговський П. С.). Раціональним у такому випадку стає використання осцилювальних режимів, сутність яких полягає в циклічному сушінні матеріалу, що складаються з періодів нагрівання та охолодження (Мінгазов М. Г., Захаржевський В. Г., Шишкіна Є. Є., Косарін А. А., Любовицький П. В., Miliū G., Kolin V., Remond R., Perre P. та ін.).

В основу створення переривчастих режимів покладено принцип осцилювальних процесів, що спостерігаються при атмосферному сушінні або сушінні з використанням сонячної енергії в геліосушарках (Тепнадзе М. І., Озарків І. М.), коли деревина вдень нагрівається, а вночі охолоджується. Застосування осцилювальних режимів, на відміну від сушіння в геліосушарках, дає можливість регулювати параметри сушильного агента залежно від характеристики матеріалу. Складність полягає у визначенні раціональних режимів, а саме рівня температури нагрівання, амплітуди осцилювання, параметрів ступеня насичення повітря за різних циклів сушіння, тривалості процесу.

Визначено, що з позиції взаємодії вологи із деревиною для правильного описання процесів сушіння необхідно деталізувати видалення вологи під час нагрівання та охолодження протягом конвективного осцилювального сушіння.

У другому розділі **«Обґрунтування режимних параметрів осцилювального сушіння деревини»** теоретично обґрунтовано кінетику сушіння деревини під час використання осцилювальних режимів за підвищених температур.

Аналіз динаміки сушіння деревини показав можливість прискорення процесу видалення вологи з матеріалу за рахунок циклічного нагрівання та охолодження пилопродукції, які відіграють різну роль у процесах тепломасоперенесення (Ликов О. В.). У період циклічного нагрівання із підвищенням температури в сушильній камері вологість повітря поступово знижується. В таких умовах деревина отримує «тепловий удар» і накопичує тепло, сушіння відбувається лише за рахунок градієнта вологості. У поверхневих шарах деревини відбувається інтенсивне випаровування вологи, що зумовлює виникнення напружень розтягу. В період охолодження температура в середовищі камери знижується, ступінь насичення зростає і, відповідно, підвищується рівноважна вологість деревини. За рахунок того, що температура поверхневих шарів стає нижчою за центральні, в деревині виникає позитивний градієнт температури, що зумовлює міграцію вологи з більш

нагрітих шарів у менш нагріті. В результаті поверхневі шари матеріалу звожуються, перепад вологи по товщині деревини зменшується, відбувається релаксація напружень.

Періодичність циклів «нагрівання – охолодження» під час сушіння доцільно проводити лише у період, коли деревина містить вільну вологу для прискорення процесу. Подальше застосування циклів «нагрівання – охолодження» не впливає на швидкість до прискорення видалення зв'язаної вологи. Ймовірність виникнення критичних за величиною напружень надто мала, отже, після досягнення деревиною вологості  $W_{nom}=20\%$  температуру сушильного агента слід підтримувати на постійному рівні без осциляції до завершення процесу.

Для деревини дуба звичайного і дуба червоного відсутні кількісні значення коефіцієнтів вологопровідності та базисної щільності. На основі одержаних експериментальним шляхом значень щільності та коефіцієнтів вологопровідності можна визначати відповідні масообмінні критерії, необхідні для розрахунків безпечних параметрів режиму сушіння.

Висунуто гіпотезу кінетики осцилювального сушіння, яка полягає в уявленні зміни температури матеріалу за синусоїдальним законом:

$$t_{нов} = t_{сеп} + A_t \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau_{ци}} \cdot \tau_{суш}\right) + \frac{1}{2} \cdot (t_c - t_0) \cdot Ki_m \varepsilon Ko Lu, \quad (1)$$

де  $t_{нов}$  – температура поверхні деревини, °С;  $t_{сеп}$  – середнє арифметичне значень температури нагрівання та охолодження, °С;  $A_t$  – амплітуда осцилювання, °С;  $\tau_{ци}$  – тривалість одного циклу (нагрівання – охолодження), год;  $\tau_{суш}$  – тривалість процесу сушіння, год;  $t_c$  – температура середовища, °С;  $t_0$  – початкова температура деревини, °С;  $Ki_m$  – критерій Кірпічова;  $\varepsilon$  – коефіцієнт фазового перетворення вологи;  $Ko$  – критерій Косовича;  $Lu$  – критерій Ликова.

Для описання кінетики осцилювального сушіння та розрахунків режимних параметрів розроблено програму в середовищі Lazarus 1.6.4, яка дає можливість змоделювати процес циклічного сушіння за синусоїдальним законом та відобразити одержані результати на графіку зміни температури в часі (рис. 1).

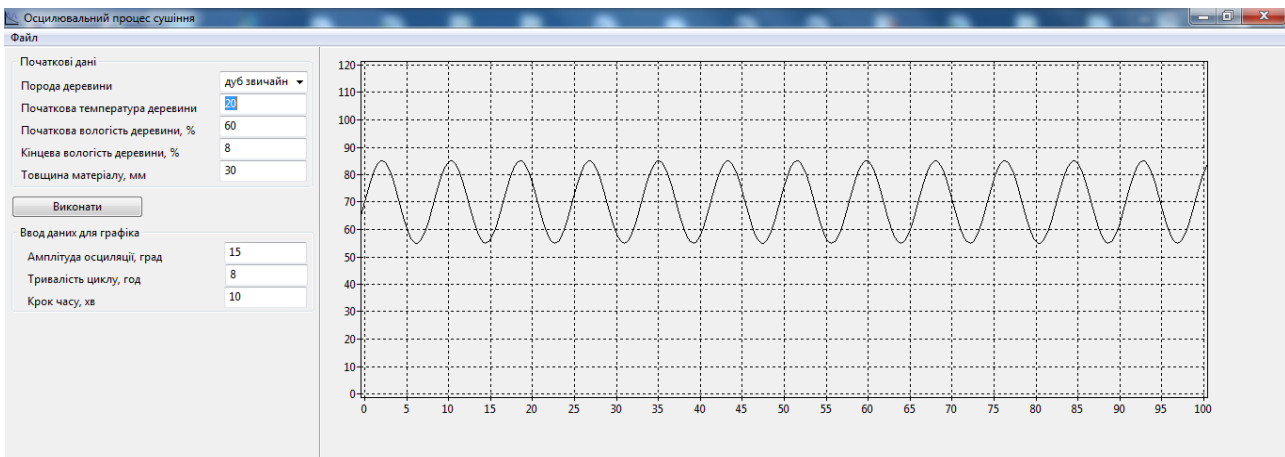


Рис. 1. Інтерфейс програми

На рис. 2 зображено алгоритм, що відображає запропоновану модель режиму осцилювального сушіння пилопродукції.

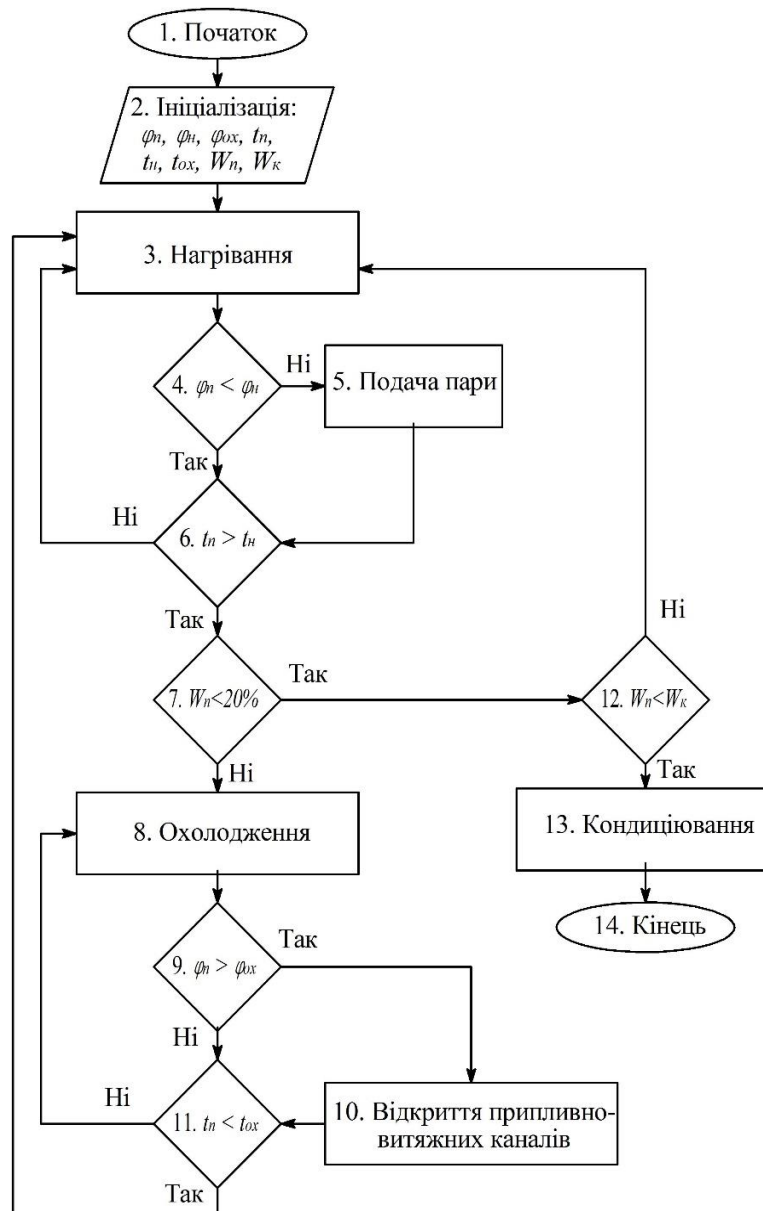


Рис. 2. Алгоритм процесу сушіння пилопродукції за осцилювальним режимом

Для визначення кількісних значень осцилювальних режимів конвективного сушіння пилопродукції, які характеризуються багаторазовим короткочасним нагріванням деревини, необхідно враховувати величину температури і вологості сушильного агента в період нагрівання, визначити безпечну для якості сушіння амплітуду коливання температури та вплив рівня температури нагрівання на механічні властивості матеріалу.

У третьому розділі «Методика експериментальних досліджень» наведено методику визначення раціональних режимних параметрів осцилювального сушіння деревини дуба звичайного і дуба червоного; методики визначення фізико-механічних властивостей висушеної деревини. Методичні принципи експериментальних досліджень роботи наведено на рис. 3.

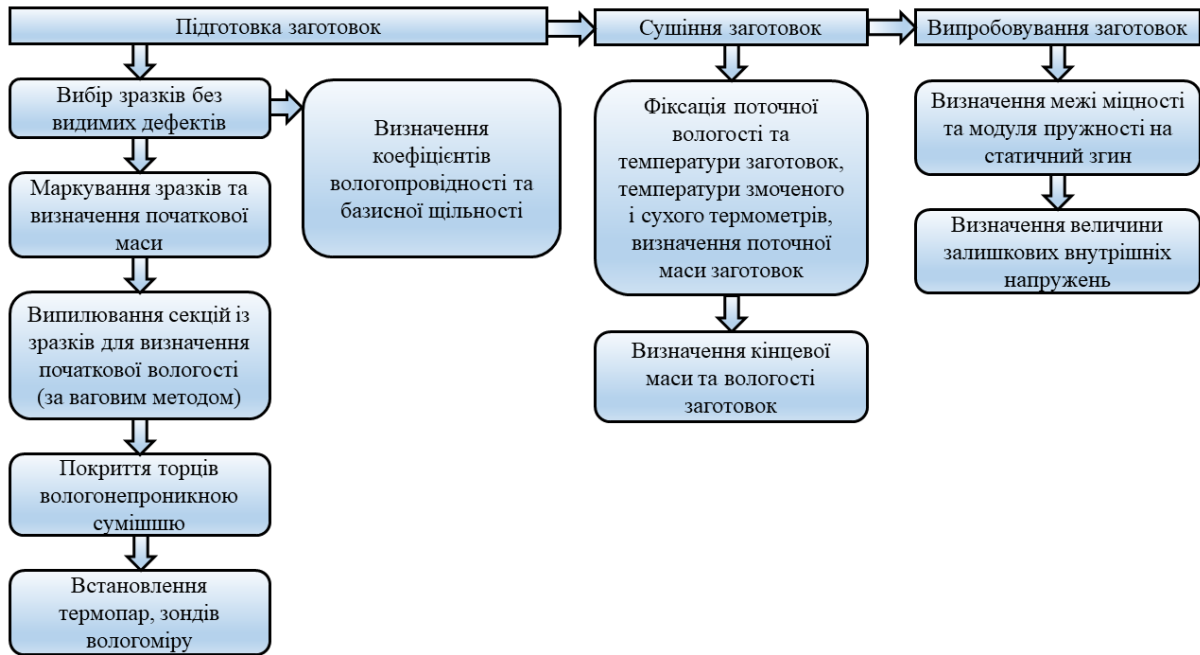


Рис. 3. Етапи експериментальних досліджень

Значення коефіцієнтів вологопровідності одержано за методом контактного зволоження (Серговський П. С., Алпаткіна Р. П.). Для визначення коефіцієнтів вологопровідності та базисної щільності відібрано зразки дуба звичайного та дуба червоного походженням із Житомирської області. Загальна кількість дослідів з урахуванням раніше отриманого коефіцієнта варіації  $V_a=7,7\%$  становила 32 шт.

Для дослідження основних режимних параметрів обрано заготовки дуба звичайного та дуба червоного без видимих дефектів товщиною 25 мм, 30 та 50 мм, що відповідає товщині промислових пиломатеріалів, які найчастіше використовуються у різних виробах із деревини. Ширина експериментальних зразків становила 85–90 мм. Сушіння проводили в лабораторному сушильному пристрої, оснащеному системою автоматичного керування процесом (рис. 4).



Рис. 4. Лабораторна сушильна установка

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 Б. Н. Уголева за ГОСТ 11603-73. Визначення механічних властивостей висушеної деревини (межі міцності та модуля пружності при статичному згині) виконували відповідно до вказівок стандартних методик. Для досліджень залучали випробувальну машину Р-5.

Застосування під час сушіння осцилювальних режимів за підвищених температур відрізняється тим, що в період нагрівання для уникнення швидкого видалення вологи і, відповідно, розтріскування матеріалу в камеру необхідно подавати насичену пару.

У четвертому розділі «Результати експериментальних досліджень» наведено результати визначення коефіцієнтів вологопровідності, базисної щільності деревини дуба звичайного і дуба червоного, а також основних параметрів осцилювальних режимів процесу сушіння та механічних властивостей висушених заготовок.

Для визначення кількісних значень амплітуди коливань температури у процесі сушіння заготовок з деревини дуба, що запобігають розтріскуванню матеріалу, було проведено попередні експериментальні дослідження. Встановлено, що найбільша швидкість видалення вологи зі зразків – 1,81 %/год, спостерігається під час коливань температури зразка з амплітудою у 30 °С.

Підтверджено, що процес осцилюваного сушіння доцільно підтримувати до досягнення середньої вологості матеріалу  $W_{сер} \leq 20\%$ , оскільки коефіцієнт термовологопровідності зменшується, знижується швидкість видалення зв'язаної вологи, як і втрачається ймовірність зростання внутрішніх напружень (рис. 5). Подальше сушіння варто здійснювати за постійної температури нагрівання без етапу охолодження.

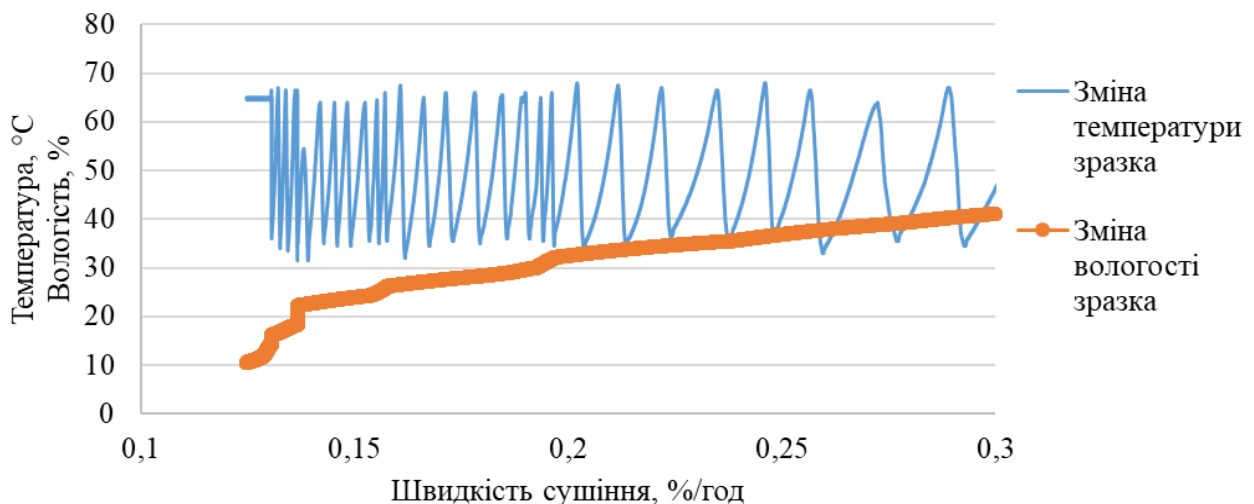


Рис. 5. Кінетика сушіння заготовок дуба червоного товщиною 50 мм

Одержана залежність коефіцієнтів вологопровідності для різних напрямків току вологи від температури свідчить про перевагу радіального напрямку (рис. 6).

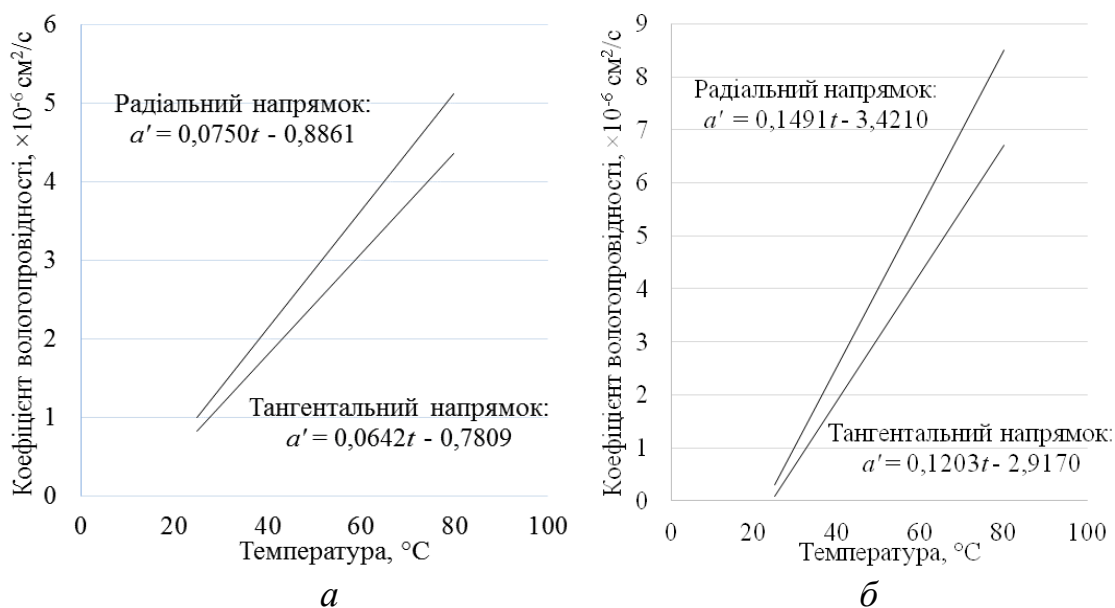


Рис. 6. Залежність коефіцієнтів вологопровідності від температури: *а* – дуба звичайного; *б* – дуба червоного.

Тобто, зі збільшенням температури коефіцієнт вологопровідності деревини дуба стрімко зростає, інтенсифікуючи переміщення вологи в матеріалі.

Середня базисна щільність деревини дуба звичайного склала  $\rho_0=595 \text{ кг/м}^3$ , а дуба червоного –  $\rho_0=570 \text{ кг/м}^3$ . Одержані значення щільності дуба звичайного відрізняються від наведених довідкових даних, що є наслідком інших природних умов зростання.

На основі проведених експериментальних досліджень визначено середні значення параметрів процесу осцилювального сушіння деревини дуба звичайного і дуба червоного (табл. 1).

Таблиця 1

**Результати експериментальних досліджень сушіння заготовок із деревини дуба звичайного та дуба червоного**

Параметр	Дуб звичайний				Дуб червоний	
	Заготовка товщиною, мм					
	25	30	50		30	50
Номер режиму сушіння	1	1	1	2	1	2
Температура «нагрівання/охолодження», °С	85/55	85/55	85/55	65/35	85/55	65/35
Кількість циклів «нагрівання/охолодження», од.	11/10	18/17	38/37	68/67	21/20	36/35
Швидкість циркуляції повітря, м/с	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,2
Середня початкова вологість, %	31,3	47,9	62,0	70,6	44,2	50,7
Середня кінцева вологість, %	8,2	8,2	11,1	10,6	9,2	8,8
Експериментальна тривалість сушіння, год	29,5	55,0	308,0	668,0	124,0	375,9
Розрахункова тривалість сушіння за рівнянням П. С. Серговського, год	113,1	147,1	686,0	1238,0	150,5	847,5
Наявність дефектів (розтріскування)	ні	ні	так	ні	ні	ні

Спостерігається значне скорочення фактичної тривалості сушіння порівняно з розрахунковою, яка не враховує вплив «теплого удару» на матеріал, що прискорює видалення вільної вологи. Встановлено невідповідність теоретичної кривої кінетики зміни температури за синусоїдальним законом з експериментальними даними, згідно з якими період нагрівання відбувається за поліноміальною, а період охолодження – за експоненціальною залежністю. Тривалість нагрівання матеріалу менша практично в 3 рази за час охолодження (рис. 7). Тому рівняння кінетики зміни температури потребувало уточнення.

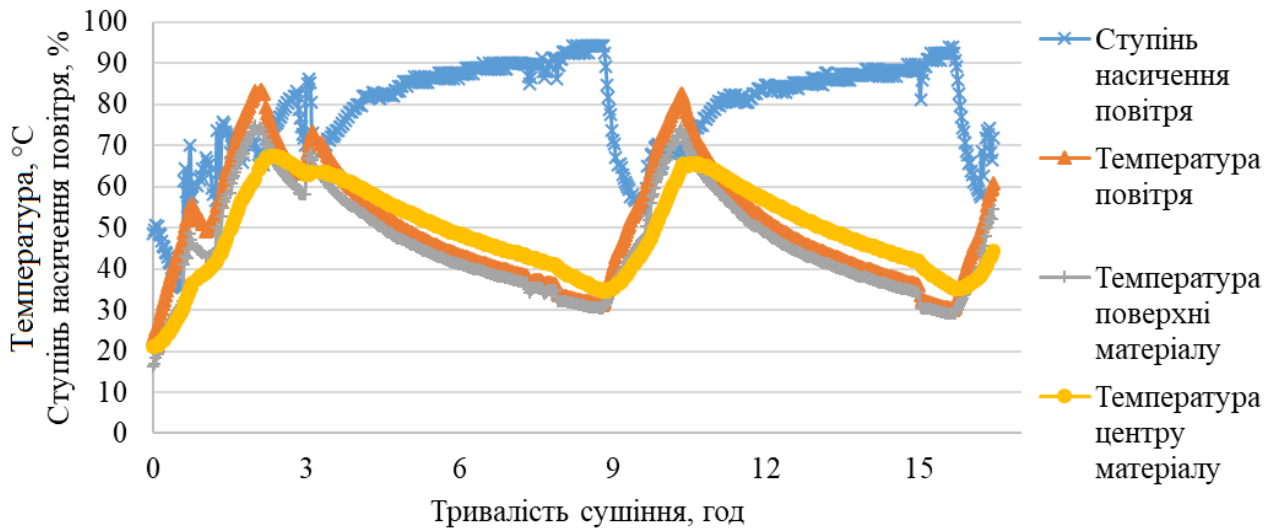


Рис. 7. Фактичні значення зміни параметрів режиму сушіння дуба червоного товщиною 50 мм на початковій стадії процесу

Одержано адекватні експериментальним даним залежності для розрахунку загальної тривалості сушіння деревини дуба звичайного та червоного за запропонованими осцилювальними режимами, що складаються із циклів нагрівання  $\tau_{нагр}$  і охолодження  $\tau_{охол}$ :

$$\tau_{суш} = n \cdot (\tau_{нагр} + \tau_{охол}) + \tau_{безп}, \quad (2)$$

де  $\tau_{нагр}$  – тривалість нагрівання, год;  $\tau_{охол}$  – тривалість охолодження, год;  $\tau_{безп}$  – тривалість сушіння за безперервного нагрівання до експлуатаційної вологості матеріалу від вологості  $W_{ном}=20\%$ , год;  $n$  – кількість циклів «нагрівання – охолодження», од., визначається за регресійними рівняннями:

$$n_{д.зв.} = (36 \cdot W_{поч} - 256) \cdot S - 0,615 \cdot W_{поч} + 4,772, \quad (3)$$

$$n_{д.черв.} = (14 \cdot W_{поч} - 85) \cdot S + 0,033 \cdot W_{поч} - 5,623, \quad (4)$$

де  $W_{поч}$  – початкова вологість матеріалу, %;  $S$  – товщина заготовки, м.

Перевірка одержаних рівнянь для рівня значущості 5% підтвердила адекватність моделей (для дуба звичайного – за критерієм Стьюдента  $t_{розр}=0,09 < t_{табл}=2,05$ ; за критерієм Фішера  $F_{розр}=1,13 < F_{табл}=2,48$ ; для дуба червоного –  $t_{розр}=0,01 < t_{табл}=2,05$ ;  $F_{розр}=1,10 < F_{табл}=2,98$ ).

З урахуванням особливостей кінетики циклів нагрівання і охолодження регресійне рівняння тривалості сушіння матеріалу в період осциляції можна представити у вигляді:

для дуба звичайного:

$$\begin{cases} \tau_{нагр} = ((0,05 \cdot S - 0,002) \cdot W_k - 1,2 \cdot S + 0,104) \cdot t_{нагр} + \\ + (0,148 - 3,3 \cdot S) \cdot W_k + 154,35 \cdot S - 9,28; \\ \tau_{охол} = ((-5,00 \cdot S + 0,17) \cdot \ln(W_k) + 9,30 \cdot S - 0,399) \cdot t_{охол} + \\ + (348,20 \cdot S - 12,26) \cdot \ln(W_k) - 733,00 \cdot S + 32,38; \end{cases} \quad (5)$$

для дуба червоного:

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

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

Перевірка теоретичних рівнянь тривалості циклів нагрівання та охолодження (рис. 8) підтвердила адекватність моделей (табл. 2).

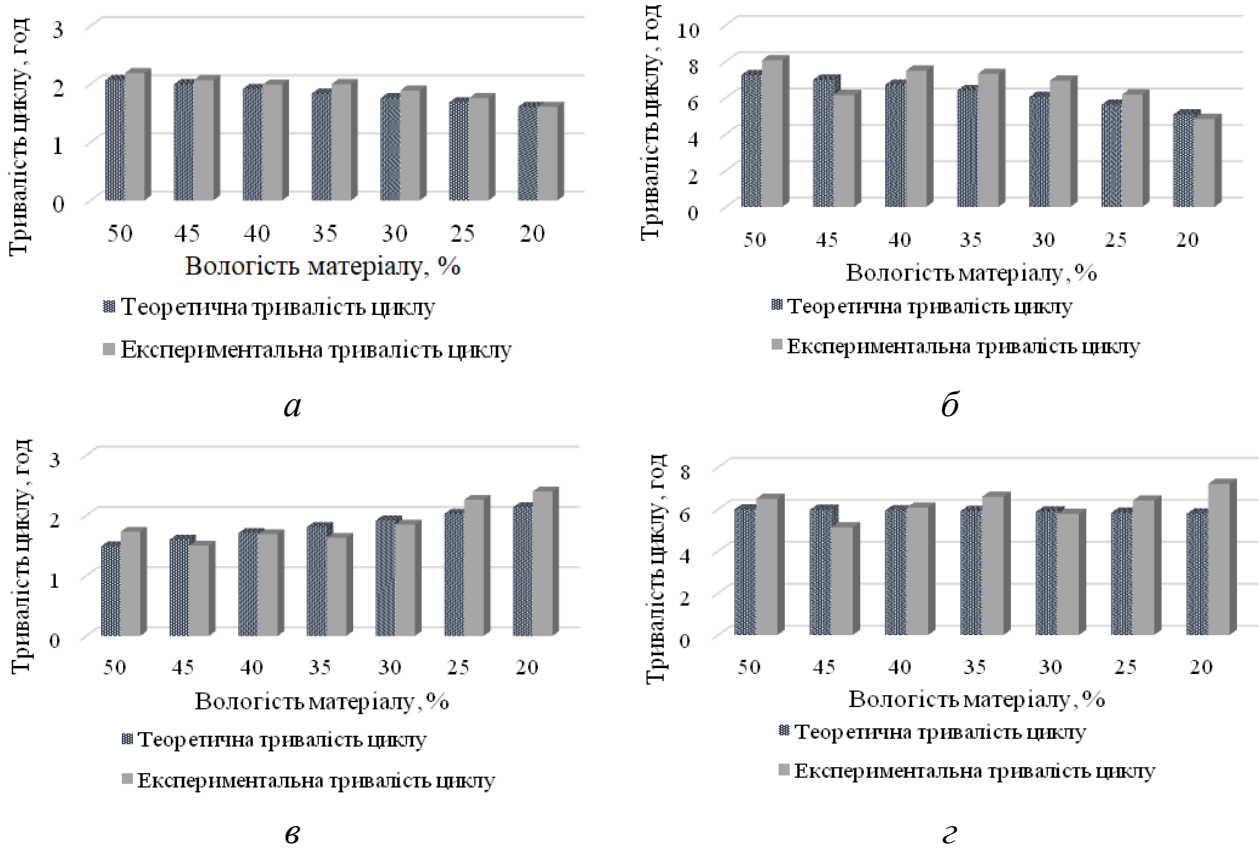


Рис. 8. Зіставлення експериментальної та розрахункової тривалості циклів сушіння заготовок товщиною 50 мм дуба звичайного: *а* – нагрівання; *б* – охолодження; та дуба червоного: *в* – нагрівання; *г* – охолодження.

**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> <sub>розр.</sub>	<i>t</i> <sub>крит.</sub>	<i>F</i> <sub>розр.</sub>	<i>F</i> <sub>табл.</sub>
Дуб звичайний	нагрівання	1,00	2,07	1,15	2,82
	охолодження	0,14	2,07	1,30	2,82
Дуб червоний	нагрівання	0,20	2,09	2,13	2,82
	охолодження	0,41	2,07	1,31	2,82

Для визначення тривалості останнього періоду сушіння  $\tau_{безп}$ , год, за сталої температури використано рівняння П. С. Серговського:

$$\tau_{безп} = \frac{3600 \cdot S^2}{\pi^2 \cdot a'} \ln\left(\frac{W_{ноч} - W_p}{W_k - W_p}\right), \quad (7)$$

де  $W_p$  – рівноважна вологість деревини, %.

Виявлено, що під час сушіння за високої температури колір деревини темнішає та більш чітко відображається текстура. У заготовок товщиною 50 мм, висушених жорстким режимом № 1, простежуються внутрішні тріщини, тоді як у заготовок, висушених м'яким режимом № 2 та у заготовок товщиною 25 і 30 мм недопустимих дефектів не спостерігалось (рис. 9).



Рис. 9. Результат сушіння заготовок дуба звичайного, висушених за осцилювальними режимами: *а* – жорстким режимом № 1; *б* – м'яким режимом № 2.

За результатами визначення величини деформацій зубців силових секцій з висушених заготовок із деревини дуба, одержані значення відповідають I категорії якості сушіння. Порівняння отриманих значень величини внутрішніх напружень у тангентальному напрямку  $\sigma_m=0,8-1,7$  МПа з максимально допустимими значеннями межі міцності показало запас міцності у 25 %.

Встановлено, що значення межі міцності на статичний згин висушених заготовок із деревини дуба звичайного за запропонованим режимом менші на 6,3 %, а дуба червоного – більші на 15,0 % від значень межі міцності заготовок, які висушували за нормативним режимом.

Проведені дослідження сушіння заготовок деревини дуба осцилювальними режимами за підвищених температур довели можливість одержання якісної продукції без наявності білих плям у середині матеріалу.

У п'ятому розділі «Ефективність інтенсифікації осцилювального сушіння заготовок з деревини дуба звичайного і дуба червоного» запропоновано рівняння розрахунку ступеня насичення агента сушіння заготовок із деревини дуба звичайного та дуба червоного у безкалориферних сушильних камерах, визначено раціональні режими сушіння заготовок із вищенаведеної деревини; обґрунтовано ефективність використання запропонованих режимів у промислових умовах.

Згідно з відмінностями кінетики зміни температури поверхні зразків у періоді нагрівання  $t_{нов.нагр}$ , год, та охолодження  $t_{нов.охол}$ , год, скориговано висунуту гіпотезу щодо синусоїдального закону зміни температури матеріалу – рівняння (8):

$$\begin{cases} t_{нов.нагр} = t_{ц.нагр} + \frac{1}{2} \cdot (t_c - t_{ц.охол}) \cdot Ki_m \varepsilon Ko Lu, \\ t_{нов.охол} = t_{ц.охол} + \frac{1}{2} \cdot (t_c - t_{ц.нагр}) \cdot Ki_m \varepsilon Ko Lu, \end{cases} \quad (8)$$

де  $t_{ц.нагр}$ ,  $t_{ц.охол}$  – температура центральної частини заготовок у період нагрівання та охолодження, відповідно, °С, зміни яких у часі можна визначити за адекватними регресійними рівняннями:

для дуба звичайного товщиною 50 мм:

$$\begin{cases} t_{ц.нагр} = 24,54 \cdot \tau_{нагр} - 4,48 \cdot \tau_{нагр}^2 + 35, \\ t_{ц.охол} = 65 \cdot e^{-0,08 \cdot \tau_{охол}}, \end{cases} \quad (9)$$

де  $\tau_{нагр}$  – тривалість періоду нагрівання, год;  $\tau_{охол}$  – тривалість періоду охолодження, год.

для дуба червоного товщиною 50 мм:

$$\begin{cases} t_{ц.нагр} = 20,11 \cdot \tau_{нагр} - 8,18 \cdot \tau_{нагр}^2 + 35, \\ t_{ц.охол} = 65 \cdot e^{-0,11 \tau_{охол}}. \end{cases} \quad (10)$$

Коефіцієнт кореляції запропонованого рівняння зміни температур нагрівання та охолодження з експериментальними даними засвідчив високу відповідність  $r=0,89-0,93$  (рис. 10).

З урахуванням рівняння (8) та визначених значень температури змоченого термометра (рис. 10), можна визначити ступінь насичення  $\varphi$  агента сушіння в період нагрівання для заготовок із деревини дуба:

$$\varphi_{нагр} = 100^{1-(0,006+10^{-5}(120-t_c)^{1,46}) \cdot (t_c - t_{нов.нагр})^{1,074+10^{-17}(146-t_c)^{7,77}}}. \quad (11)$$

Відповідно до одержаних результатів теоретичних і експериментальних досліджень запропоновано осцилювальні режими сушіння заготовок дуба звичайного і дуба червоного, параметри яких наведено в табл. 3.

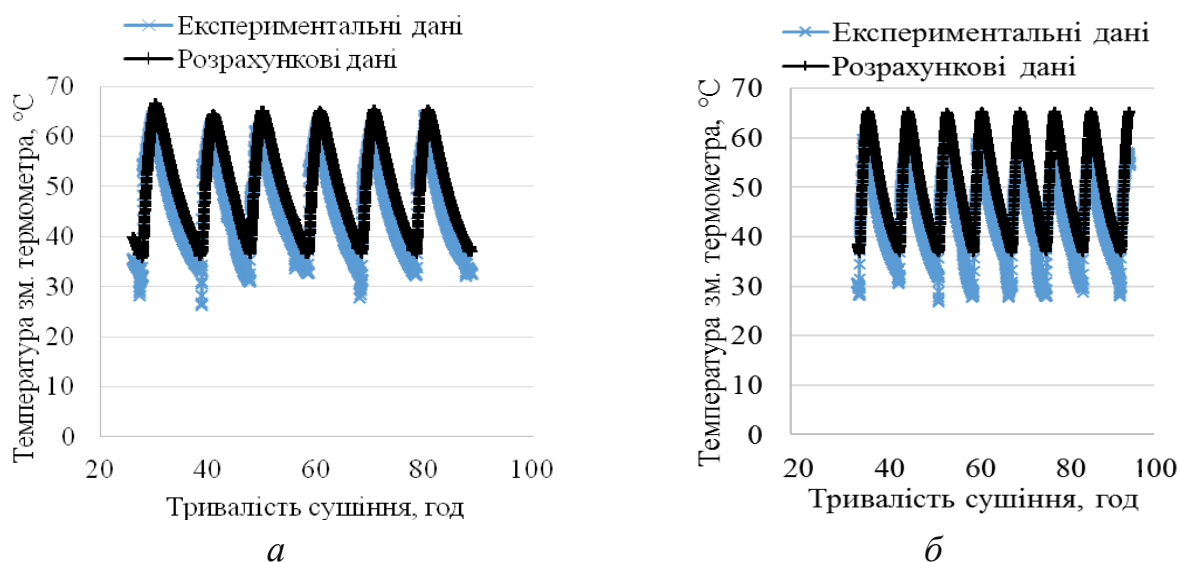


Рис. 10. Кінетика зміни температури змоченого термометра від початкової вологості  $W_{ноч}$  до поточної вологості  $W_{ном}=20\%$  при сушінні: *а* – заготовок із деревини дуба звичайного; *б* – дуба червоного товщиною 50 мм.

Таблиця 3

**Режими сушіння заготовок із деревини дуба звичайного і дуба червоного**

Середня вологість, %	Режимний параметр	Товщина заготовок, мм					
		Дуб звичайний			Дуб червоний		
		25	30	50	25	30	50
>30	Температура середовища $t_c$ , °C	100	100	80	100	100	80
	Температура заготовок $t_{нагр}$ , °C	85	85	65	85	85	65
	Температура охолодження $t_{охол}$ , °C	55	55	35	55	55	35
	Ступінь насичення повітря $\varphi$ , %	95	95	95	95	95	95
30–25	Температура середовища $t_c$ , °C	100	100	80	100	100	80
	Температура заготовок $t_{нагр}$ , °C	85	85	65	85	85	65
	Температура охолодження $t_{охол}$ , °C	55	55	35	55	55	35
	Ступінь насичення повітря $\varphi$ , %	50	50	79	55	55	82
25–20	Температура середовища $t_c$ , °C	100	100	80	100	100	80
	Температура заготовок $t_{нагр}$ , °C	85	85	65	85	85	65
	Температура охолодження $t_{охол}$ , °C	55	55	35	55	55	35
	Ступінь насичення повітря $\varphi$ , %	35	38	55	38	40	57
20–15	Температура середовища $t_c$ , °C	100	100	80	100	100	80
	Ступінь насичення повітря $\varphi$ , %	35	35	40	37	37	45
<15	Температура середовища $t_c$ , °C	100	100	80	100	100	80
	Ступінь насичення повітря $\varphi$ , %	30	35	38	30	35	38

Встановлено скорочення процесу сушіння за запропонованими рівняннями у 1,2–3,7 рази залежно від товщини та породи деревини порівняно з тривалістю сушіння за нормативними безперервними режимами (рис. 11).

Реалізувати розроблені осцилювальні режими доцільно в безкалориферних камерах із подачею нагрітого повітря у сушильний простір, перевагою яких є малоінерційність за температурою, що дозволяє досягти швидкого нагрівання та охолодження. Запропоновано конструкцію такої камери із системою контролю та регулювання параметрів повітря.

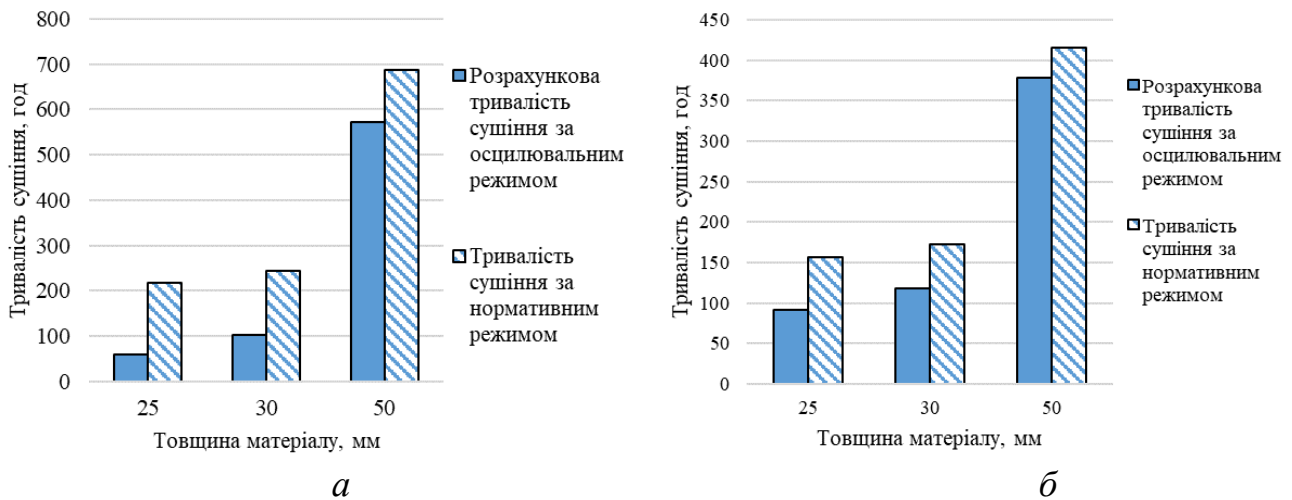


Рис. 11. Порівняння результатів розрахункової тривалості процесу за запропонованими рівняннями (2–7) із фактичною тривалістю за нормативним режимом: *а* – для дуба звичайного; *б* – для дуба червоного.

У промислових умовах (на ФОП «Ковальчук О. В.», Житомирська обл.) було проведено експериментальні сушіння запропонованим режимом необрізних пиломатеріалів дуба звичайного товщиною 30 мм. Результати показали скорочення тривалості процесу у 1,83 раза порівняно з режимами, що використовуються на підприємстві. Дефектів сушіння не було виявлено, а дослідження якості сушіння засвідчили, що висушений матеріал відповідає II категорії якості.

Запропонована сушильна камера за рахунок менших термінів сушіння є продуктивнішою у 1,84 раза, ніж звичайні конвективні сушарки, що працюють за нормативними режимами. Використання на підприємствах розроблених режимів осцилювального сушіння в безкалориферних камерах, які перевірені у промислових умовах, забезпечує економічну ефективність за рахунок скорочення тривалості періоду сушіння та зменшення енергетичних витрат до 39,6 %.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено раціональні режими осцилювального сушіння деревини дуба звичайного і дуба червоного у середовищі з підвищеною температурою за умови збереження якості та міцності матеріалу.

1. Деревина дуба затребувана у багатьох галузях промисловості через високі декоративні та фізико-механічні показники. Процес сушіння пилопродукції з неї до експлуатаційної вологості є довготривалим і енергоємним, а під час поширеного низькотемпературного сушіння в середині матеріалу виникає брак – висвітлювання кольору внаслідок довготривалого впливу теплого насиченого повітря. Для уникнення появи такого браку сушіння актуальним стає інтенсифікація конвективного процесу сушіння шляхом використання осцилювальних режимів, які складаються з циклів короткочасного нагрівання за підвищеної температури та примусового охолодження.

2. На відміну від класичного сушіння деревини, осцилювальні процеси характеризуються періодичною дією теплової енергії. Для розрахунків режимних параметрів розроблено програму в середовищі Lazarus 1.6.4, яка дає можливість змоделювати процес циклічного сушіння. Встановлено, що періоди «нагрівання – охолодження» пилопродукції доцільно підтримувати до досягнення середньої вологості матеріалом 20 %, після чого деревину висушують до кінцевої вологості за сталої температури нагрівання.

3. Для розрахунків режимних параметрів безпечного процесу сушіння вперше визначено коефіцієнти вологопровідності та значення щільності деревини дуба звичайного та дуба червоного, що становить відповідно  $\rho_{\delta}=595 \text{ кг/м}^3$  і  $\rho_{\delta}=570 \text{ кг/м}^3$ . Порівняння одержаного значення коефіцієнта вологопровідності для тангентального напрямку деревини дуба звичайного показало незначне відхилення від довідкових даних. Коефіцієнт вологопровідності дуба червоного є більшим на 9,2 %, ніж дуба звичайного.

4. Встановлено, що для заготовок із деревини дуба звичайного і дуба червоного товщиною 25 та 30 мм температура сушильного агента під час циклічного нагрівання не повинна перевищувати  $t_c \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , для заготовок товщиною 50 мм –  $t_c \leq 80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Обґрунтовано, що в процесі циклічної зміни температури протягом сушіння амплітуда має становити  $A_T=30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

5. 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. Для обґрунтування раціональних режимних параметрів осцилювального сушіння запропоновано рівняння, яке дозволяє розрахувати ступінь насичення повітря через температуру змоченого термометра. Середнє значення коефіцієнта кореляції розрахованої температури поверхні заготовок з експериментальними даними становить  $r=0,91$ .

6. Встановлено незначне зменшення на 6,3 % межі міцності на статичний згин висушених заготовок із деревини дуба звичайного за осцилювальним режимом порівняно із заготовками, висушеними нормальним режимом. Для дуба червоного спостерігалось збільшення на 15,0 % вищенаведеного показника, що доводить життєспроможність використання короткочасного «теплого удару», який суттєво не знижує міцність висушеного матеріалу.

7. Проведені у промислових умовах експериментальні дослідження тривалості та якості сушіння необрізних пиломатеріалів дуба звичайного товщиною 30 мм за розробленим режимом показали зменшення тривалості процесу сушіння у 1,83 раза порівняно з режимами сушіння, що використовують на підприємстві. При цьому дефектів сушіння та наявності білих плям не було виявлено, висушений матеріал відповідав II категорії якості.

8. Для реалізації сушіння деревини за осцилювальними режимами запропоновано конструкцію безкалориферної сушильної камери. Встановлено, що за рахунок менших термінів сушіння вона продуктивніша у 1,84 раза, ніж «водяні» конвективні сушарки такого ж обсягу завантаження, де застосовують

м'які режими. Проведення сушіння дубових заготовок у запропонованій сушильній камері за розробленими режимами дозволить отримати якісно висушену пилопродукцію з меншою на 29–43 % собівартістю.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті в наукових фахових виданнях України:

1. **Борячинський В. В.**, Пінчевська О. О. Аналіз технології сушіння на ДП «Новоград-Волинське ДЛМГ». Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість. 2013. Вип. 39.1. С. 100–103. *(Здобувачем особисто проведено аналіз технології сушіння в промислових умовах та визначено якість висушеної пилопродукції).*

2. Пінчевська О. О., **Борячинський В. В.**, Іноземцев Г. Б. Сушіння заготовок дуба червоного осцилювальними режимами. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2016. Вип. 184. С. 16–22. *(Здобувачем здійснено постановку проблеми, обробку дослідних даних, узагальнення одержаних результатів, підготовлено висновки).*

### Статті в наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних:

3. **Борячинський В. В.** Вплив режиму обробки на якість сушіння дубових заготовок. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2016. Вип. 238. С. 223–232.

4. **Борячинський В. В.** Щодо можливості застосування підвищених температур для сушіння заготовок із деревини дуба. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. Вип. 9. Режим доступу до статті: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgoc\\_2016\\_9\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgoc_2016_9_4).

### Стаття у науковому виданні іншої держави

5. Пинчевская Е. А., Красухина Л. П., **Борячинский В. В.** Сушка дубовых заготовок повышенными температурами. Annals of Warsaw University of Life Sciences. 2016. Вип. 95. С. 321–326. *(Здобувачем здійснено експериментальні дослідження, обробку отриманих даних та їх узагальнення).*

### Стаття в іншому науковому виданні

6. Пінчевська О. О., **Борячинський В. В.**, Коробко Р. М., Білик С. І. Особливості сушіння заготовок з деревини дуба. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2013. Вип. 187.3. С. 329–333. *(Здобувачем особисто поставлено завдання раціонального використання деревини).*

### Патент України на корисну модель

7. Пінчевська О. О., Головач В. М., Коваль В. С., **Борячинський В. В.** Патент на корисну модель № 111100 Україна, МПК (2016.01) F26B 7/00. Спосіб сушіння деревини; заявник та патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № 2016 u 06568; заявлено 15.06.2016; опубліковано 25.10.2016; Бюл. № 20. *(Здобувачем особисто розроблено режимні параметри осцилювального сушіння деревини).*

### Тези наукових доповідей:

8. Борячинський В. В. Дослідження кінетики сушіння заготовок на європіддони. Студентство у вирішенні лісівничих проблем ХХІ століття: Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Київ, 30 березня 2012 року: тези доповіді. К., 2012. С. 272–273.

9. Борячинський В. В. Дослідження кінетики сушіння дубової фрези в камері фірми «Лука». Науковий пошук студентства у розвитку довкілля: Всеукраїнська науково-практична студентська конференція, м. Київ, 14–15 березня 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 255–256.

10. Пинчевская Е. А., Коваль В. С., **Борячинский В. В.** Об ускорении сушки твердых листовых пород древесины. Актуальные направления научных исследований ХХІ века: теория и практика: Международная заочная научно-практическая конференция, г. Воронеж, Российская Федерация, 10–12 декабря 2014 года: тезисы доклада. Воронеж, 2014. Вып. 5.4. С. 230–235. *(Здобувачем особисто проведено та опрацьовано результати експериментальних досліджень).*

11. Пінчевська О. О., Коваль В. С., **Борячинський В. В.** Порівняння тривалості сушіння дубових заготовок осцилюючим режимом у сушильних шафах різної конструкції. Виклики ХХІ століття та їхнє вирішення у лісовому комплексі й довкіллі: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 7–9 жовтня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 229. *(Здобувачем здійснено опрацювання дослідних даних і аналіз результатів).*

12. Пінчевська О. О., Коваль В. С., **Борячинський В. В.** Сушіння дубових заготовок високотемпературним осцилюючим режимом. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VI Міжнародна науково-практична конференція, м. Чернігів, 19–22 травня 2015 року: тези доповіді. Чернігів, 2015. С. 130. *(Здобувачем особисто проведено та опрацьовано результати експериментальних досліджень).*

13. Борячинський В. В. Сушіння дубових заготовок різної товщини осцилюючим режимом. Актуальні проблеми лісового сектору та садово-паркового господарства: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 14–15 квітня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 183.

14. Пінчевська О. О., **Борячинський В. В.** Тривалість сушіння заготовок дуба звичайного. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VII Міжнародна науково-практична конференція, м. Чернігів, 24–27 квітня 2017 року: тези доповіді. Чернігів, 2017. С. 193. *(Здобувачем особисто проведено та опрацьовано результати експериментальних досліджень).*

15. Пінчевська О. О., **Борячинський В. В.** Сушіння заготовок дуба звичайного та червоного осцилювальним режимом. Здоров'я лісів, екосистемні послуги та лісові продукти для суспільства: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 6–7 квітня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 141. (Здобувачем особисто проведено та опрацьовано результати експериментальних досліджень).

16. **Борячинський В. В.**, Сірко З. С. Особливості сушіння заготовок дуба. Contribution of young scientists on forestry, wood processing technologies and horticulture: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 11–12 травня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 46. (Здобувачем особисто проведено та опрацьовано результати експериментальних досліджень).

## АНОТАЦІЯ

**Борячинський В. В. Інтенсифікація сушіння заготовок з деревини дуба.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.23.06 «Технологія деревообробки, виготовлення меблів та виробів з деревини». Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2018.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуального науково-практичного завдання інтенсифікації процесу сушіння деревини дуба звичайного (*Quercus robur*) і дуба червоного (*Quercus rubra*) шляхом використання осцилювальних режимів зі збереженням якості висушеного матеріалу та зниженням енерговитрат.

Розроблено методику проведення експериментальних досліджень режимних параметрів осцилювального сушіння заготовок із деревини дуба та запропоновано метод розрахунку тривалості сушіння, який враховує особливості кінетики періодів нагрівання і охолодження деревини та зміну тепло- і масообмінних критеріїв. Вперше визначено коефіцієнти вологопровідності деревини дуба звичайного і дуба червоного, що зростали в Україні. Результати досліджень сушіння заготовок із деревини дуба осцилювальними режимами в лабораторних умовах довели можливість одержання якісної продукції без наявності білих плям у середині матеріалу. Визначено показники залишкових напружень, які свідчать про відповідність матеріалу I категорії якості сушіння.

На основі отриманих результатів теоретичних і експериментальних досліджень запропоновано осцилювальні режими сушіння заготовок дуба звичайного і дуба червоного різної товщини, апробовані у промислових умовах. Для реалізації розроблених режимів сушіння деревини запропоновано конструкцію безкалориферної сушильної установки.

**Ключові слова:** дуб звичайний (*Quercus robur*), дуб червоний (*Quercus rubra*), коефіцієнт вологопровідності, осцилюючі режими, якість сушіння, внутрішні напруження, тривалість сушіння.

## АННОТАЦИЯ

**Борячинский В. В. Интенсификация сушки заготовок с древесины дуба.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.06 «Технология деревообработки, изготовления мебели и изделий из древесины». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи интенсификации сушки древесины дуба обыкновенного (*Quercus robur*) и дуба красного (*Quercus rubra*) осциллирующими режимами при условии сохранения качества высушиваемого материала и снижении энергозатрат.

Вследствие особенностей проведения сушки дуба обыкновенного при низких температурах возникает накопление влаги у поверхностной зоны материала. Это приводит к образованию светлых пятен в середине пиломатериалов, которые долгое время находились в условиях повышенной степени насыщенности воздуха и имели низкую скорость удаления влаги. Эта влага вступает в химические реакции с дубильными веществами, меняя их цвет. Образование пятен является проблемой на деревообрабатывающих предприятиях, дальнейший раскрой такой пилопродукции значительно снижает ее стоимость. Избавиться от этого недостатка сушки можно за счет интенсификации процесса.

Анализ динамики сушки древесины показал возможность ускорения процесса удаления влаги из материала за счет интенсификации процесса путем циклического нагрева и охлаждения пилопродукции. В период циклического нагрева древесина получает «тепловой удар» и накапливает тепло, интенсификация сушки происходит за счет градиентов влажности и температуры. В период охлаждения температура в камере снижается, степень насыщенности растет и, соответственно, повышается равновесная влажность. В результате поверхностные слои материала увлажняются, распределение влаги по толщине древесины выравнивается, происходит релаксация напряжений.

Разработана методика проведения экспериментальных исследований режимных параметров осциллирующей сушки древесины дуба. Заготовки из древесины дуба обыкновенного и дуба красного толщинами 25 мм, 30 и 50 мм высушивали до конечной влажности 8 %. Значения коэффициентов влагопроводности получали экспериментальным путем с использованием метода контактного увлажнения. Определение базовой плотности древесины дуба, величины внутренних напряжений, определение модуля упругости и упругих деформаций, а также исследования механических свойств высушенной древесины проводили согласно стандартных методик.

Установлено несоответствие предложенной теоретической кривой кинетики изменения температуры по синусоидальному закону с экспериментальными данными, которые показывают, что период нагрева происходит по полиномиальной, а период охлаждения – по экспоненциальной

зависимости. Продолжительность нагрева материала примерно в 3 раза меньше продолжительности охлаждения.

Предложен метод расчета продолжительности сушки, который учитывает особенности кинетики периодов нагрева и охлаждения древесины и изменение тепло- и массообменных критериев.

Впервые определены коэффициенты влагопроводности древесины дуба обыкновенного и дуба красного, произрастающих в Украине. На основании экспериментальных данных определена температура «теплого удара», которая для тонких материалов составила 100 °С, для толстых – 80 °С, а также температура охлаждения. По результатам теоретических исследований установлено значение степени насыщенности агента сушки.

Результаты исследований сушки заготовок древесины дуба осциллирующими режимами в лабораторных условиях доказали возможность получения качественной продукции без наличия белых пятен в середине материала. Во время интенсивной сушки цвет древесины темнеет, четче проявляется ее текстура. Определены показатели остаточных напряжений, свидетельствующие о соответствии материала I категории качества сушки. На основании полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований предложены осциллирующие режимы сушки заготовок дуба обыкновенного и дуба красного различной толщины, апробированные в промышленных условиях. Для реализации разработанных режимов сушки древесины предложена конструкция безкалориферной сушильной установки, которая почти в 2 раза продуктивней за счет меньших сроков сушки, чем обычные конвективные сушилки, работающие по нормативным режимам.

Использование на предприятиях предложенных экспериментальных режимов осциллирующей сушки в безкалориферных камерах, проверенных в промышленных условиях, обеспечит экономическую эффективность за счет сокращения продолжительности процесса и уменьшения энергетических затрат на 39,6 %.

**Ключевые слова:** дуб обыкновенный (*Quercus robur*), дуб красный (*Quercus rubra*), коэффициент влагопроводности, осциллирующие режимы, качество сушки, внутренние напряжения, продолжительность сушки.

## ANNOTATION

**Boriachynskyi V. V. Intensification of drying oak samples.** – The Manuscript.

The thesis for Candidate Degree of Technical Sciences with the specialty 05.23.06 Wood Technology, Furniture and Wooden Goods Production. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018.

This thesis is devoted to solving actual scientific and practical task European oak (*Quercus robur*) and red oak (*Quercus rubra*) drying intensive by using oscillating schedules with maintaining the quality of drying material and reduce energy consumption. The methodology of experimental studies of the operating parameters oscillating drying of oak wood and the method of calculation of duration

of drying, which takes into account the peculiarities of the kinetics of the periods of heating and cooling of the wood and the change of heat and mass transfer criteria. For the first time determined the diffusion coefficients wood of European oak and red oak which were grown in Ukraine. The results of studies of oak drying wood oscillating schedules in the laboratory have proved the possibility of obtaining high-quality products without the presence of white spots in the middle of the material. Identify indicators of residual stresses, which indicate the conformity of the material to the 1<sup>st</sup> level of drying quality. On the basis of the results of theoretical and experimental studies were proposed oscillating drying schedules of European oak and red oak samples of varying thickness, tested in industrial conditions. For the implementation of the developed schedules of drying wood, the design of a drying chamber is proposed.

**Key words:** European oak (*Quercus robur*), red oak (*Quercus rubra*), diffusion coefficient, oscillating schedules, the drying quality, internal stress of wood, the drying period.