

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

СПРОЧКІН АНДРІЙ КОСТЯНТИНОВИЧ

УДК 674.047

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНЕ СУШІННЯ ПИЛОПРОДУКЦІЇ

05.23.06 – технологія деревообробки, виготовлення меблів
та виробів з деревини

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2015

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 технології деревообробки

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

кандидат технічних наук, доцент
Єрошенко Андрій Михайлович,
Чернігівський національний технологічний університет, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки

Захист відбудеться «__» _____ 2015 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.004.11 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою, 03041, м. Київ, вул. Генерала Родімцева, 19, навчальний корпус № 1, кімната 97

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України, за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розісланий «__» _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Н. В. Буйських

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Деревина є цінною екологічно чистою виробничою сировиною, яка широко використовується в різних галузях промисловості. Волога, що міститься в ній, створює певні перешкоди під час виготовлення та експлуатації готової продукції. Для видалення вологи використовують технологічну операцію сушіння.

У зв'язку зі зміною специфіки роботи деревообробних підприємств – відмовою від парового теплопостачання та підвищенням вимог до якості сушіння – відбувся перехід на водяне теплозабезпечення, що сприяло застосуванню іншої технології, з використанням низькотемпературних режимів, котра виключає початкове прогрівання пилопродукції за підвищених температур у насиченому середовищі.

Наразі деревина все більше використовується як конструкційний матеріал, і вироби з неї повинні мати високі показники міцності. Відомо, що сушіння низькотемпературними режимами ($t \leq 60$ °C) за будь-якої тривалості обробки не знижує експлуатаційної міцності деревних виробів. Традиційно в промисловості застосовують технологічні розрахунки – визначення тривалості процесу та продуктивності обладнання. Розроблені для парових камер, вони ґрунтуються на використанні рівняння вологопровідності, що призводить до значної (30–50 %) похибки, так як у традиційному методі розрахунку тривалості сушіння не враховано ймовірнісного характеру початкових і граничних умов.

Низькотемпературне сушіння пилопродукції вимагає побудови чіткого алгоритму розрахунку тривалості з урахуванням термодинамічних особливостей протікання процесу та стохастичного характеру початкових і граничних умов, що продовжить життєвий цикл виробів з деревини та збереже лісові ресурси.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в межах науково-дослідної роботи згідно з основними напрямками наукової діяльності кафедри технології деревообробки Національного університету біоресурсів і природокористування України, зокрема: «Розробити ресурсозберігаючі технології переробки низькосортної деревини» (номер державної реєстрації 0110U003497, 2010–2012 рр.); «Розробити наукові основи формування вимог до раціонального використання деревної сировини» (номер державної реєстрації 0112U002711, 2012–2016 рр.).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є вдосконалення технологічних параметрів низькотемпературного сушіння пилопродукції шляхом аналізу особливостей технології, визначення величини та фізичного змісту термодинамічних коефіцієнтів.

Поставлена мета досягається вирішенням таких задач:

– провести аналіз особливостей технології сушіння в сучасних конвекційних камерах;

– провести дослідження з визначення фізичного змісту термодинамічних коефіцієнтів, що характеризують процес видалення вологи з деревини під час низькотемпературного сушіння;

– провести дослідження впливу мікроскопічної будови деревини різних порід на процес видалення вологи;

– провести дослідження зі встановлення величин термодинамічних параметрів для визначення тривалості низькотемпературного сушіння пилопродукції;

– розробити метод розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння пилопродукції в сучасних конвекційних камерах із врахуванням ймовірнісних початкових і граничних умов.

Об'єкт дослідження – процес низькотемпературного сушіння пилопродукції.

Предмет дослідження – встановлення залежності технологічних параметрів низькотемпературного сушіння пилопродукції від термодинамічних особливостей проведення процесу в конвекційних камерах.

Методи досліджень. У дисертаційній роботі використано: методи емпіричних досліджень – для встановлення особливостей кінетики низькотемпературного сушіння пилопродукції в сучасних камерах та визначення фізичного змісту термодинамічних коефіцієнтів у рівнянні поточної вологості пилопродукції; термогравіметричні методи – для дослідження кінетики сушіння пилопродукції в лабораторних і промислових умовах та визначення термодинамічних коефіцієнтів; методи растрової електронної мікроскопії – для дослідження мікроскопічної будови деревини різних порід; методи статистичного аналізу – для обробки результатів експериментальних досліджень; чисельні методи – для визначення тривалості низькотемпературного сушіння пилопродукції в сучасних камерах.

Наукова новизна одержаних результатів. Вирішення науково-практичної задачі визначення тривалості низькотемпературного сушіння пилопродукції базується на основних положеннях термодинаміки і враховує вплив технологічних особливостей процесу та ймовірнісних початкових і граничних умов.

Уперше запропоновано розглядати низькотемпературне сушіння пилопродукції як релаксаційний процес.

Встановлено присутність активаційного механізму, що підтверджено наявністю двох енергій активації у процесах сушіння деревини. На основі емпіричних кінетичних залежностей видалення вологи з деревини за різних температур, виходячи з рівняння Арреніуса, знайдено числові значення енергії активації для різних її порід.

Встановлено взаємозв'язок між розмірами порожнин деревини різних порід та величиною енергії активації, яка характеризує процес видалення вологи під час сушіння.

Уперше отримано значення коефіцієнта, який враховує нерівномірність розподілення аеродинамічного поля в камері та початкової вологості пиломатеріалів із розрахунку тривалості сушіння.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у наступному:

– запропоновано спосіб визначення термодинамічних коефіцієнтів, який дає можливість спрогнозувати значення поточної вологості пилопродукції під час сушіння в сучасних конвекційних камерах за будь-якої температури в межах низькотемпературного процесу;

– запропоновано метод розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння на основі розв'язку рівняння поточної вологості пилопродукції по відношенню до часу;

– розроблено уточнений табличний метод розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння в сучасних камерах із врахуванням нерівномірності розподілення аеродинамічного поля в камері та дисперсії початкової вологості в партії пиломатеріалів.

Особистий внесок здобувача. Встановлення актуальності теми, формування мети і задач досліджень здійснено здобувачем разом із науковим керівником, а основні ідеї та результати дисертаційної роботи належать авторові. У публікаціях, виконаних у співавторстві, авторові належить такий внесок: [1] – постановка задачі, проведення експериментальних досліджень та аналіз отриманих результатів; [4] – постановка задачі, запропонований спосіб визначення термодинамічних коефіцієнтів; [5] – постановка задачі, аналіз існуючого методу розрахунку тривалості сушіння та запропоноване його уточнення; [7] – проведення експериментальних досліджень та визначення енергії активації видалення вологи з деревини; [8] – постановка задачі, аналіз зв'язку вологи з деревиною; [9] – аналіз особливостей низькотемпературного сушіння пилопродукції; [11] – постановка задачі, методика визначення термодинамічних коефіцієнтів; [12] – аналіз способів розрахунку тривалості сушіння пилопродукції; [15] – постановка задачі, аналіз експериментальних досліджень; [17] – аналіз способів сушіння пилопродукції; [18] – постановка задачі, аналіз результатів досліджень; [19] – проведення експериментальних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на:

– міжнародній науково-практичній конференції «Освіта, наука та інновації у лісовому і садово-парковому господарстві України в контексті регіональних та глобальних викликів» (Київ, 2010 р.);

– міжнародній науково-практичній конференції «Ліс, довкілля, технології: наука та інновації» (Київ, 2012 р.);

– міжнародній науково-практичній конференції «Ліси, парки, технології: сьогодення та майбутнє» (Київ, 2013 р.);

– міжнародній науково-технічній конференції «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса» (Кострома, 2013 р.);

– міжнародній науково-практичній конференції «Екологічнобезпечні ресурсозберігаючі технології оброблення деревини» (Київ, 2013 р.);

– міжнародній науково-практичній конференції «Лісове і садово-паркове господарство ХХІ сторіччя: актуальні проблеми та шляхи їх вирішення» (Київ, 2014 р.);

– міжнародній науково-технічній конференції «Эколого-ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве» (Вороніж, 2014 р.)

Публікації. Основні результати роботи опубліковано в 19 працях: із них – 4 статті у фахових виданнях України, 4 – в наукових виданнях іншої держави, 2 статті – в інших наукових виданнях, свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, 8 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків. Основна частина викладена на 121 сторінці, з яких 119 сторінок – основний текст, проілюстрована 40 рисунками та 21 таблицею. Список використаної літератури включає 201 назву.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано доцільність та актуальність теми дисертації, визначено мету й задачі дослідження, показано наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів. Наведено дані про апробацію отриманих результатів та визначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі – «**Стан питання**» – наведено аналіз літературних джерел із теми дисертаційної роботи та визначено напрям досліджень.

У розділі проаналізовано особливості низькотемпературного сушіння пилопродукції та встановлено доцільність більш детального його вивчення, оскільки наразі – це найпоширеніший спосіб сушіння в деревообробній галузі.

На основі аналізу літературних джерел визначено, що технологічні розрахунки процесу конвекційного сушіння пилопродукції засновані на теорії тепло-масоперенесення в капілярно-пористих матеріалах О. В. Ликова, адаптованій для деревини П. С. Серговським, Г. С. Шубіним, І. В. Кречетовим і П. В. Білеєм.

Встановлено, що для подальшого розвитку й удосконалення технології сушіння необхідно враховувати особливості руху та видалення вологи з деревини різних порід, що характеризується різною анатомічною будовою під час сушіння низькими температурами і відсутності прогрівання в насиченому середовищі з підвищеною температурою.

Одним з основних технологічних параметрів у процесі сушіння деревини є тривалість. Вивченню цього питання багато уваги приділяли вчені з усього світу: F. Tuttle, H. Tiemann, B. A. Поснов, I. M. Федоров, П. С. Серговський, Г. С. Шубін, W. Simpson, A. Г. Гороховський. Існуючі методи розрахунку тривалості не враховували особливостей перенесення вологи в разі використання сучасних режимів обробки, а саме: s-подібний характер кривих кінетики сушіння за рахунок утворення «уявного» джерела вологи та ймовірнісних характеристик деревини й агента сушіння. Для описання процесу сушіння в сучасних низькотемпературних камерах О. О. Пінчевською

запропоновано рівняння кінетики сушіння, що враховує комплексну дію вологопровідності та термовологопровідності, розв'язок якого дав змогу отримати рівняння для визначення перехідної вологості на кожному етапі сушіння пилопродукції:

$$W_{пер}^{(n)} = (W_{пер}^{(n-1)} - W_p^n) [D_1 e^{-K_1 t} - D_2 e^{-K_2 t}] + W_p^n, \quad (1)$$

де K_1, K_2 – термодинамічні коефіцієнти.

Для подальших розрахунків кінетики низькотемпературного сушіння пилопродукції, а саме – тривалості процесу, потрібно визначити та пояснити фізичний зміст термодинамічних коефіцієнтів K_1 і K_2 .

Аналіз наявних проблем у технології сушіння пилопродукції в сучасних низькотемпературних камерах уможливив сформулювати задачі досліджень.

Другий розділ роботи – **«Термодинаміка низькотемпературного сушіння»** – присвячений дослідженню аспектів кінетики низькотемпературного сушіння пилопродукції в сучасних камерах.

У роботах попередніх дослідників термодинамічний коефіцієнт K_1 розраховували через коефіцієнт вологопровідності, який визначався методом контактного зволоження. Цей метод є довготривалим і займає декілька місяців. Коефіцієнт K_2 визначали методом наближення промислових і теоретичних кривих кінетики сушіння.

Відомо, що кінетичний процес видалення вологи з деревини відбувається за експоненціальним законом. Це дає змогу розглядати його з позиції релаксаційних процесів і представити у вигляді рівняння:

$$m_{nom} = m_n e^{-\frac{t_{imm}}{\tau_1}}, \quad (2)$$

де, m_{nom} – маса вологого зразка в процесі сушіння через інтервал часу t_{imm} ;

m_n – маса зразка на початку процесу сушіння;

τ_1 – час релаксації процесу видалення вологи з деревини.

Попередні експериментальні дослідження кінетики сушіння за різних температур дали змогу встановити наявність активаційного механізму в процесах низькотемпературного сушіння деревини.

Експоненціальний характер кінетики низькотемпературного сушіння дав змогу встановити аналітичний зв'язок між термодинамічними коефіцієнтами K_1 і K_2 та часом релаксації, виходячи з розмірної аналогії:

$$K_1 = 1/\tau_1, \quad (3)$$

$$K_2 = 1/\tau_2. \quad (4)$$

Наявність температурної залежності кінетики сушіння дає можливість представити ці релаксаційні процеси в арреніусовській формі:

$$\tau_1 = \tau_{01} e^{\frac{E_{a1}}{kT}}, \quad (5)$$

$$\tau_2 = \tau_{02} e^{\frac{E_{a2}}{kT}}, \quad (6)$$

де E_{a1} та E_{a2} – енергії активації, що характеризують процес видалення вологи з деревини вологістю, відповідно, нижче та вище межі насичення;

τ_{0_1}, τ_{0_2} – передекспоненційні множники, що відповідають абсолютно сухому стану деревини.

Для підтвердження розвинених положень щодо феноменологічного трактування термодинамічних коефіцієнтів проведено відповідні експериментальні дослідження.

У третьому розділі – «**Методика експериментальних досліджень**» – наведено методики експериментальних досліджень із визначення термодинамічних коефіцієнтів; досліджень мікроскопічної будови деревини; дослідження тривалості сушіння.

Методика визначення термодинамічного коефіцієнта K_1 полягає у визначенні температурної залежності часу релаксації процесу видалення вологи з деревини τ_1 . Для цього проводять дослідження зміни маси зразків у процесі сушіння в лабораторних умовах. Для досліджень використовують зразки малого розміру, відібрані з різних частин стовбура шляхом випадку. Процес сушіння проводять за сталої температури. У результаті отримують графіки кривих зміни маси зразків у процесі сушіння.

Досліди повторюють для різних значень температури і будують криві змін маси зразків для визначення часу релаксації τ_1 з рівняння (2) у вигляді:

$$\ln\left(\frac{m_n}{m_{nom}}\right) = f(t), \quad (7)$$

Методом графічного диференціювання визначають енергію активації процесу, що дає змогу розрахувати термодинамічний коефіцієнт K_1 у рівнянні поточної вологості пилопродукції для будь-якої температури в процесі низькотемпературного сушіння.

Методика визначення термодинамічного коефіцієнта K_2 полягає у визначенні температурної залежності часу релаксації потужності «уявного» джерела вологи τ_2 . Попередні дослідження з визначення термодинамічного коефіцієнта K_2 за методикою аналогічною K_1 , показали, що джерело вологи складно відстежити в лабораторних умовах, оскільки інерційність сушіння поодинокого зразка є значно меншою, ніж штабелю матеріалу, що відбувається під час сушіння у промислових камерах. Тому для визначення коефіцієнта K_2 запропоновано провести дослідження кінетики сушіння в промислових умовах за методикою, що передбачає такі кроки:

- перед початком процесу сушіння вимірюють середню початкову вологість у партії пиломатеріалів;
- у процесі сушіння періодично, через однакові проміжки часу, контролюють температуру сушильного агента в камері, рівноважну вологість та поточну вологість пилопродукції;
- після проведення процесів для кожного дослідного сушіння будують експериментальні та розрахункові криві кінетики сушіння за рівнянням (1) без урахування впливу «уявного» джерела вологи. За різницею експериментальної та розрахункової кривих будують профіль уявного джерела вологи, з якого

методом графічного диференціювання визначають час релаксації та енергію активації джерела вологи, що виникає на початку процесу під час сушіння пилопродукції від початкової вологості до вологості межі насичення клітинної стінки.

За допомогою визначеної енергії активації видалення вологи встановлюють температурну залежність часу релаксації потужності «уявного» джерела вологи, що дає змогу розрахувати термодинамічний коефіцієнт K_2 в рівнянні поточної вологості пилопродукції.

Дослідження мікробудови деревини з визначенням розмірів анатомічних елементів, що безпосередньо беруть участь у процесі видалення вологи з деревини під час сушіння, проводять за допомогою растрової електронної мікроскопії та газо-адсорбційного методу.

Дослідження кінетики сушіння пилопродукції в сучасних камерах з метою визначення його тривалості проводять у промислових умовах за методикою, що включає визначення розсіювання початкової вологості пилопродукції, розсіювання її кінцевої вологості та аеродинамічного поля сушарки. Методична сітка дослідів наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Умови проведення дослідження кінетики сушіння пилопродукції для визначення тривалості процесу

№ серії дослідів	Порода деревини	Товщина пилопродукції, мм
1	Сосна	30; 40; 50
2	Дуб	30; 40; 50
3	Вільха	30; 40; 50

У четвертому розділі – «Результати експериментальних досліджень» – наведено результати експериментальних досліджень із визначення термодинамічних коефіцієнтів та дослідження мікробудови деревини різних порід.

Кінетичні криві сушіння пилопродукції від початкової вологості, нижчої межі насичення клітинної стінки, в сучасних камерах змінюються за експоненціальним законом. При цьому в рівнянні поточної вологості (1) буде наявна одна термодинамічна складова, що характеризується коефіцієнтом K_1 .

Дослідження з визначення коефіцієнта K_1 проводили для зразків, обраних шляхом випадку з деревини вільхи, дуба та сосни за умови відсутності у них вад. Сушіння проводили за фіксованих значень температури в межах від 40 до 100 °С у сушильній шафі з автоматичним регулюванням температури 2В – 151. Умови проведення досліджень наведено в табл. 2.

В результаті проведених досліджень для кожного зразка побудовані логарифмічні криві кінетики сушіння як відношення початкової маси зразка $m_{поч}$ до поточної $m_{пот}$ (рис.1).

**Умови проведення експериментальних досліджень із визначення
термодинамічного коефіцієнта K_1**

Порода	Температура, °C	Розміри зразків, мм			Початкова вологість зразків, $W_{поч}$, %
		L	B	h	
Сосна дуб вільха	40	103 ± 2	84 ± 2	28 ± 2	25 ± 1,5
	60				
	80				
	100				

Шляхом графічного диференціювання знайдено час релаксації для кожної породи за різних температур (табл. 3).

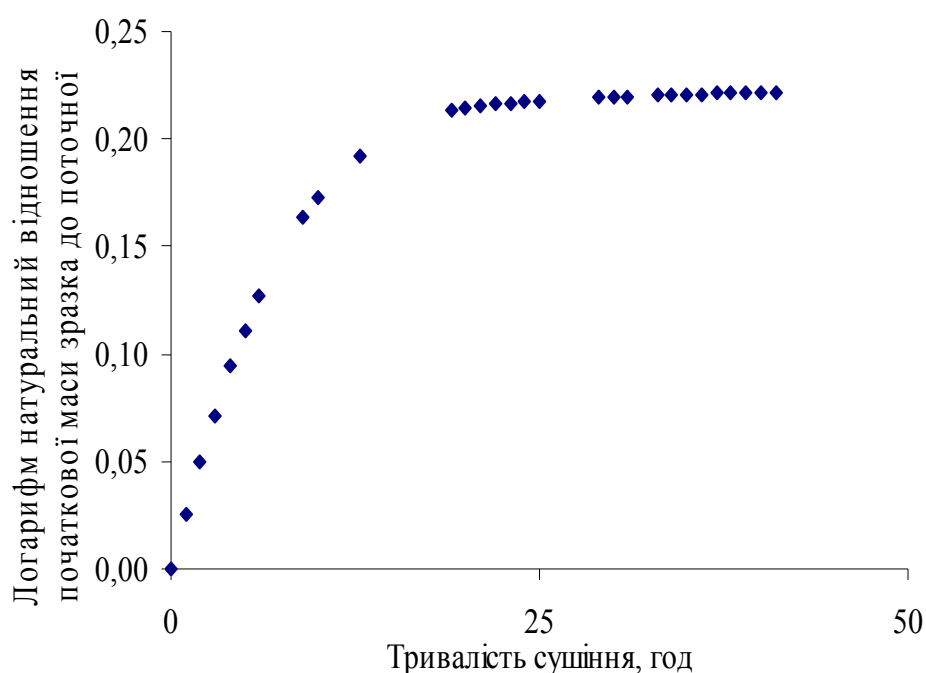


Рис. 1. Логарифмічна кінетична крива відношення початкової маси зразка $m_{поч}$ до поточної маси $m_{пот}$ у процесі сушіння зразка з деревини сосни за температури 100°C.

Енергія активації процесу видалення вологи з деревини визначалась за допомогою методу Арреніуса з графічних логарифмічних залежностей часу релаксації τ_1 від температури. Особливості низькотемпературного сушіння пов'язані з вузьким інтервалом температур, де залежність $\ln \tau_1$ від $1/T$ виявилася лінійною. Це дало змогу не враховувати значення τ_0 під час розрахунку енергії активації, оскільки вона визначається виключно кутом нахилу даної прямої (рис. 2).

Час релаксації сушіння деревини різних порід

Температура середовища $T, ^\circ\text{C}$	Час релаксації τ_1 , год.		
	Дуб	Сосна	Вільха
40	618	297	317
60	316	152	162
80	175	84	90
100	103	50	53

Розрахунки показали, що видалення вологи з деревини усіх досліджуваних порід характеризується однаковою енергією, її значення становить $E_{a_1} = 0,30 \pm 0,03 \text{ eV}$.

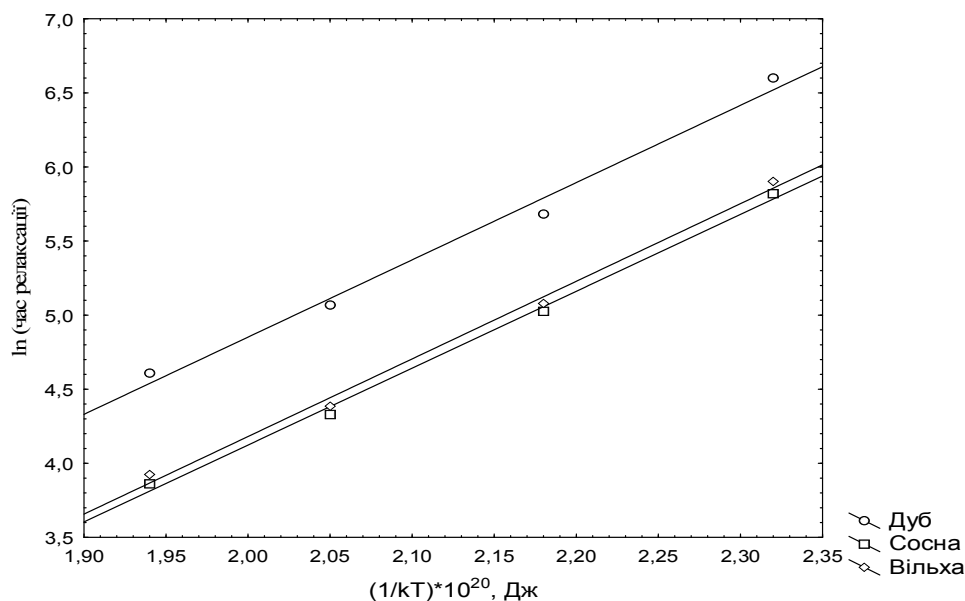


Рис. 2. Логарифмічна залежність часу релаксації від оберненої температури

Припинення активаційного механізму в процесі низькотемпературного сушіння, що відповідає абсолютно сухому стану деревини, характеризується передекспоненційним множником τ_{0_1} . Кількісні значення τ_{0_1} визначаються шляхом екстраполяції прямої. Встановлено, що вони залежать від породи: для дуба $\tau_{0_1} = 0,009026$ год, для сосни $\tau_{0_1} = 0,004347$ год, а для вільхи $\tau_{0_1} = 0,004627$ год. Визначено, що τ_{0_1} залежить від густини деревини, що зумовлено особливостями мікроскопічної будови різних порід деревини.

Оскільки E_a та τ_0 є параметрами низькотемпературного процесу сушіння, це дає змогу розрахувати значення часу релаксації τ_1 , а, отже, й термодинамічного коефіцієнта K_1 для різних порід деревини.

Для визначення термодинамічних характеристик стадії початкового прогрівання матеріалу були проведені експериментальні дослідження кінетики низькотемпературного сушіння пилопродукції в промислових умовах. Отримано значення зміни вологості та режимних параметрів у процесі сушіння, за якими побудовано експериментальні та розрахункові криві кінетики. Проведено 16 сушінь у промислових умовах, що уможливило встановити наявність та життєвий цикл «уявного» джерела вологи.

Для аналізу потужності проведено розрахунок кривих кінетики сушіння за рівнянням (1). Для кожного сушіння були визначені профілі вологості «уявного» джерела, описані такою залежністю:

$$W'_{\max} = (at - bt^2) \times e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (8)$$

де W'_{\max} – максимальна потужність «уявного» джерела вологи, %;

a , b – параметри життєвого циклу «уявного» джерела вологи, котрі визначаються експериментальним шляхом (табл. 4).

τ_2 – час релаксації потужності «уявного» джерела вологи.

Таблиця 4

Параметри «уявного» джерела вологи

Порода	Дуб		Сосна		Вільха	
	50	80	52	80	52	80
$T, ^\circ\text{C}$	50	80	52	80	52	80
$a, \%/ \text{год}$	0,1190	0,3061	0,1578	0,4055	0,1736	0,4578
$b, \%/ \text{год}^2$	0,0004	0,0012	0,0012	0,0032	0,0014	0,0041

Для визначення температурної залежності потужності «уявного» джерела вологи проведено дослідження за різних температур і встановлено, що максимальна потужність зростає зі збільшенням температури. Визначено, що період розвитку джерела вологи до максимального значення є незмінним для різних порід у проміжку температур 50–80 °С.

Установлена наявність температурної залежності затухання потужності «уявного» джерела вологи, це дало змогу виявити присутність активаційного механізму в його життєвому циклі.

Значення енергії активації «уявного» джерела вологи визначені із залежності $\ln \tau_2$ від $1/T$ методом графічного диференціювання, а передекспоненційний множник τ_{0_2} встановлено шляхом екстраполяції прямих (табл. 5).

Таблиця 5

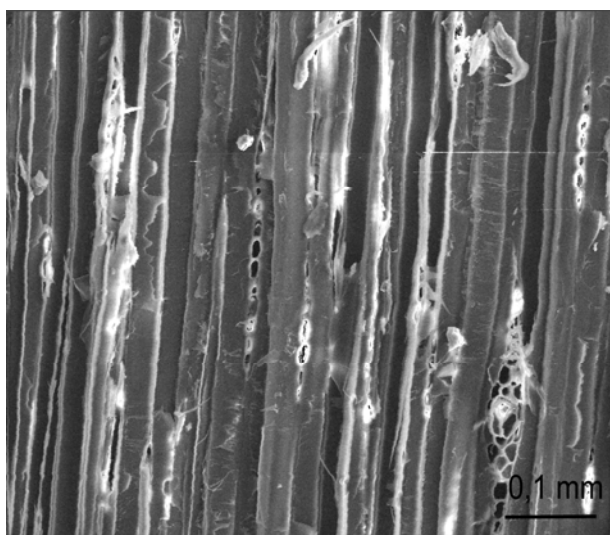
Параметри життєвого циклу «уявного» джерела вологи у процесі низькотемпературного сушіння різних порід деревини

Порода	Дуб		Сосна		Вільха	
	50	80	52	80	52	80
$T, ^\circ\text{C}$	50	80	52	80	52	80
$\tau_2, \text{год}$	559	1189	316	458	270	1563
$\tau_{0_2}, \text{год}$	$4,0 \times 10^6$		$3,4 \times 10^4$		$9,7 \times 10^{11}$	
Ea_2, eB	0,25		0,13		0,62	

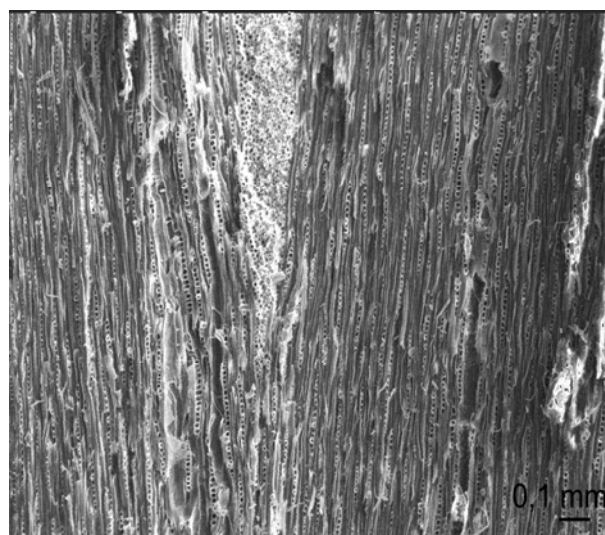
Отримані результати дали змогу визначити термодинамічний коефіцієнт K_2 в рівнянні поточної вологості пилопродукції (1).

На процес видалення вологи з деревини під час сушіння впливають особливості її мікробудови. Для встановлення цих особливостей були проведені електронномікроскопічні дослідження з використанням растрового електронного мікроскопа (JEOL JSM – 35) Інституту фізики НАН України. Отримані цифрові мікроснімки дали можливість установити середні розміри мікропорожнин поверхні досліджуваних порід деревини (рис. 3).

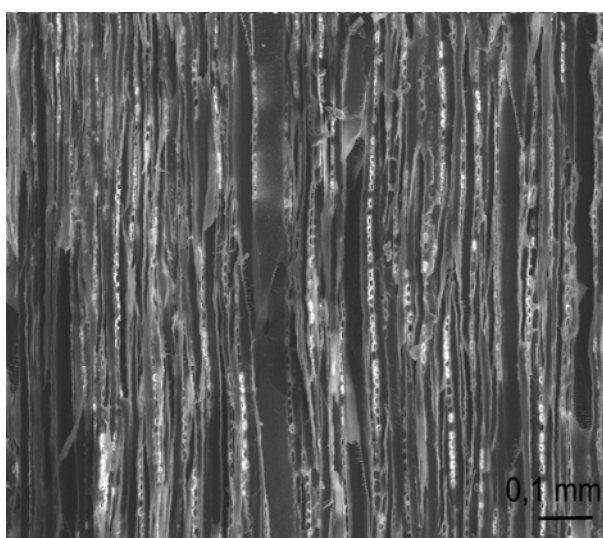
Оскільки передекспоненційний множник τ_{0_1} залежить від густини деревини, а густина, в свою чергу, залежить від розмірів порожнин (табл. 6), це дає підставу стверджувати про наявність зв'язку між передекспоненційним множником τ_{0_1} та середнім розміром порожнин.



а)



б)



в)

Рис. 3. Цифрові мікроснімки поверхні тангенціального зрізу деревини: а) сосна; б) дуб; в) вільха

Результати вимірювання середніх діаметрів порожнин

Порода	Середній діаметр, мкм	
	Судини, волокна лібриформу, трахеїди	Пори
Дуб	12,4	1,6
Вільха	16,6	3,5
Сосна	21,9	5

Встановлений розмірний спектр для зразків різних порід. У результаті статистичного оброблення отриманих даних визначено, що ймовірнісний розподіл порожнин за розмірами в деревині всіх досліджуваних порід не підпорядковується закону нормального розподілу.

П'ятий розділ – «**Розрахунок тривалості сушіння пиломатеріалів у сучасних низькотемпературних камерах**» – присвячений розробці методу розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння в сучасних конвекційних камерах на основі розв'язку рівняння поточної вологості пилопродукції (1), уточненню існуючого табличного методу із врахуванням мінливості початкових та граничних умов, а також обґрунтуванню ефективності використання представленого методу розрахунку тривалості.

Запропоновано метод розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння пилопродукції на основі розв'язку рівняння (1) по відношенню до часу, із врахуванням визначених термодинамічних коефіцієнтів. Для розрахунку тривалості використано результати дослідження кінетики сушіння пиломатеріалів із деревини дуба, вільхи та сосни товщиною 30 мм у промислових умовах. Під час досліджень процеси сушіння було поділено на етапи, відповідно до яких фіксували значення температури, поточної та рівноважної вологості, розраховуючи їх тривалість для кожного етапу окремо. Відповідно, визначали час релаксації процесу видалення вологи з деревини τ_1 та час релаксації «уявного» джерела вологи τ_2 й термодинамічні коефіцієнти K_1 і K_2 для кожного етапу сушіння.

Оскільки розв'язок (1) щодо часу є трансцендентним рівнянням, то для визначення тривалості використано обчислювальне середовище *Mathcad*. Визначено, що термодинамічний коефіцієнт, котрий характеризує «уявне» джерело вологи K_2 , має вплив на процес лише під час сушіння від початкової вологості до вологості 25 %, на подальших етапах сушіння прийнято $K_2 = 0$. Загальна тривалість низькотемпературного сушіння визначається за сумою тривалості всіх етапів.

Для перевірки отриманих результатів проведено порівняння розрахункової та експериментальної тривалості сушіння пиломатеріалів (рис. 4).

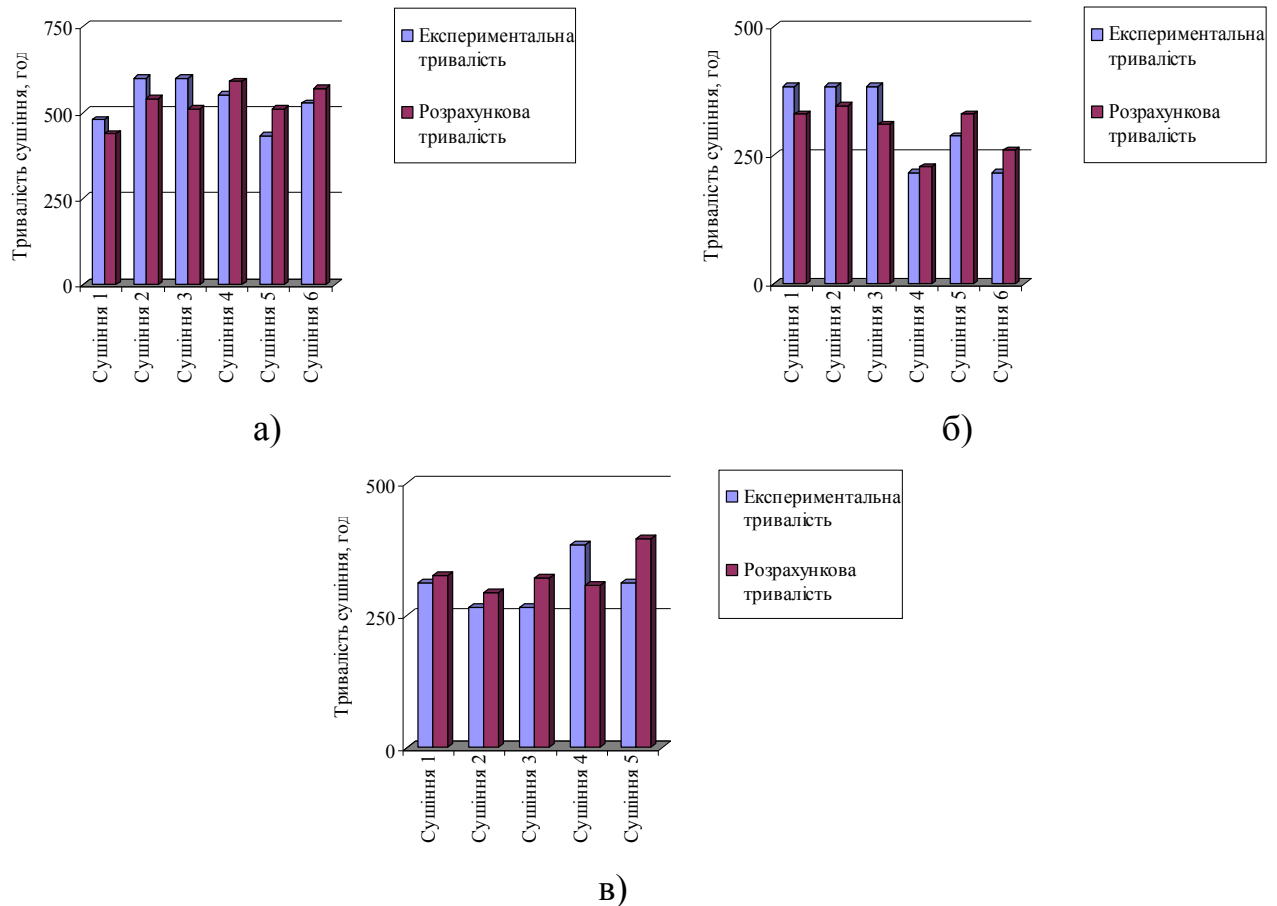


Рис. 4. Порівняння розрахункової та експериментальної тривалості сушіння пиломатеріалів товщиною 30 мм: а) з дуба; б) з вільхи; в) з сосни

Для перевірки можливості використання запропонованого методу розрахунку тривалості сушіння пиломатеріалів у сучасних низькотемпературних камерах проведено перевірку однорідності дисперсій експериментальних та розрахункових даних за критерієм Фішера та середніх значень за критерієм Стьюдента.

Отже, запропонований метод розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння пиломатеріалів у сучасних камерах дає змогу отримати результати, адекватні експериментальним даним, та може бути рекомендований для визначення тривалості саме сушіння, без врахування кондиціонування та кінцевої вологообробки.

У разі, якщо експериментальна тривалість є вищою за розрахункову, в камері могла бути наявна висока нерівномірність аеродинамічного поля, і, відповідно, необхідно більше часу, аби середня вологість у партії пиломатеріалів набула необхідного значення.

Метод визначення тривалості сушіння на основі розв'язку рівняння (1), як і відомий графо-аналітичний, мають спільний недолік – їх використання потребує значних затрат часу й неможливе без застосування спеціалізованих обчислювальних програм та графіків, що істотно ускладнює їх використання для інженерних розрахунків. У такому разі найбільш доцільним є табличний метод визначення тривалості сушіння пиломатеріалів. Порівняння

розрахункових значень тривалості сушіння, отриманих за допомогою традиційного табличного методу з експериментальними даними для сучасних низькотемпературних камер показало, що похибка між ними знаходиться на рівні 40–50 %. Це пов'язано з тим, що процес сушіння не є детермінованим із середніми початковими та граничними умовами, і доведено в роботах попередніх дослідників. Тому розрахунок тривалості сушіння повинен враховувати ймовірнісні показники як початкових, так і граничних умов.

Запропоновано ввести коефіцієнт нерівномірності розподілення $A_{н.р}$ у формулу для розрахунку тривалості традиційним табличним методом. Його значення, виходячи з проведених досліджень, є змінним і залежить від дисперсії початкової вологості та коефіцієнта варіації швидкості циркуляції агента сушіння у штабелі. Значення коефіцієнта нерівномірності наведено в табл. 7.

Таблиця 7

Значення коефіцієнта нерівномірності розподілення $A_{н.р}$

Дисперсія початкової вологості $d_{w_n}, \%^2$	Коефіцієнт варіації швидкості циркуляції повітря у штабелі $V_v, \%$				
	≤ 25	26...35	36...50	51...70	≥ 71
≤ 30	1,00	1,07	1,11	1,20	1,30
≥ 31	1,20	1,29	1,43	1,52	1,60

Визначено необхідність збільшення коефіцієнта, що характеризує категорію режиму сушіння, оскільки зміни, що відбулися у традиційній технології сушіння та підвищення вимог до якості висушеної пилопродукції зумовили зниження температурного рівня режимів. На основі проведених експериментальних досліджень сушіння пилопродукції прийнято, що для безступеневих режимів, котрі наразі використовуються в сучасних конвекційних камерах, коефіцієнт категорії режиму сушіння становить $A_p = 2,5$.

У результаті формула для визначення тривалості сушіння для сучасних конвекційних камер із теплоносієм гарячою водою набула вигляду:

$$t = t_{\text{вих}} \times A_p \times A_{\text{ц}} \times A_{\text{я}} \times A_{\text{с}} \times A_{\text{о}} \times A_{\text{н.р}}. \quad (9)$$

Порівняння розрахункових даних з експериментальними показало, що розрахунок тривалості сушіння пиломатеріалів табличним методом із запропонованими уточненнями дає кращі результати для пиломатеріалів з дуба, вільхи та сосни для всіх досліджуваних товщин (30 мм, 40 мм та 50 мм), знижуючи середню похибку до 13–20 % (рис. 5), а статистична обробка результатів розрахунків за критеріями Фішера і Ст'юдента довела їх адекватність експериментальним даним.

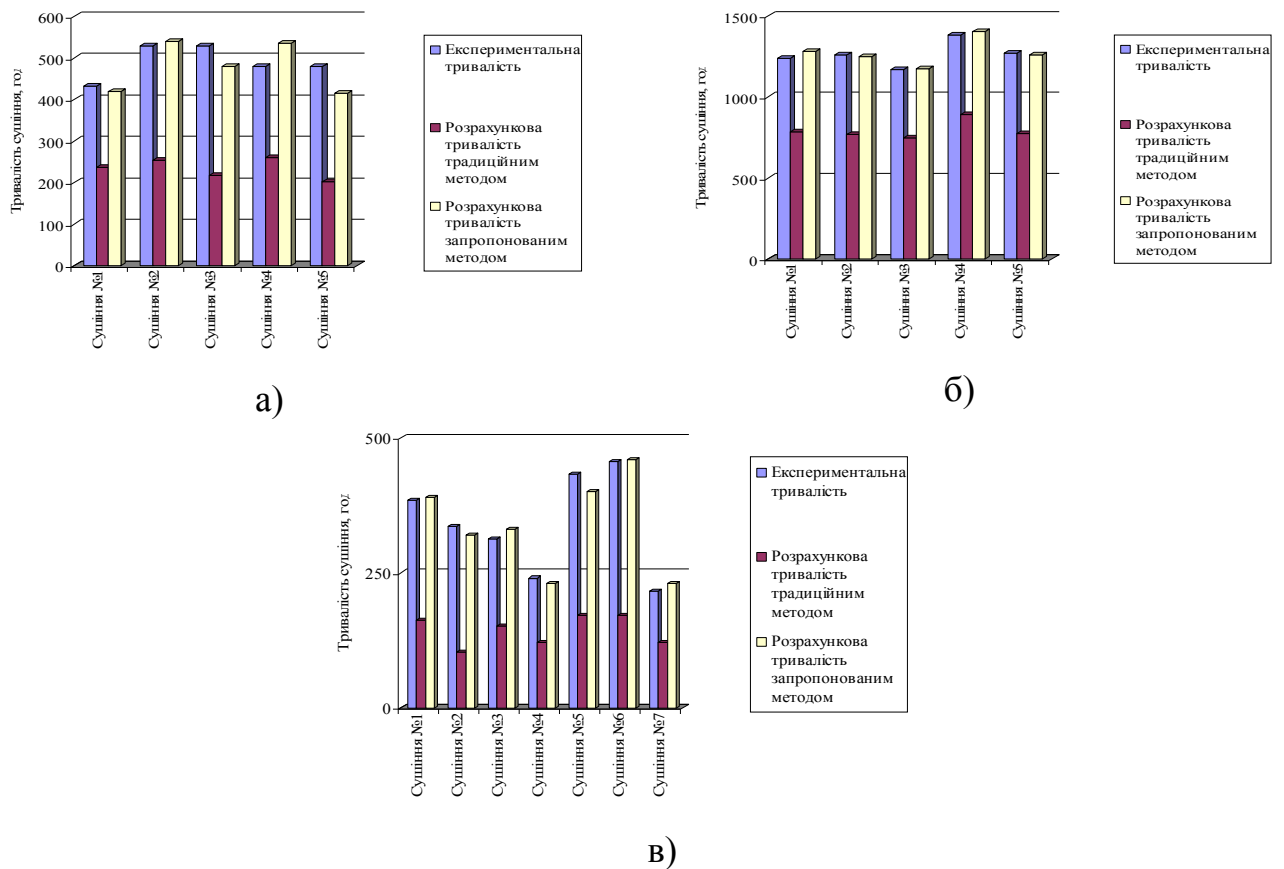


Рис. 5. Порівняння фактичної й розрахункової тривалості сушіння пиломатеріалів товщиною 40 мм: а) з вільхи; б) з дуба; в) із сосни

Для зручного використання цього методу у виробничих умовах розроблено програмне забезпечення для розрахунку тривалості сушіння із врахуванням усіх вхідних факторів, за допомогою якого можна швидко і зручно розрахувати тривалість сушіння пиломатеріалів, вказавши породу, розміри пиломатеріалів, необхідний режим сушіння, початкову та кінцеву вологість, призначити категорію якості сушіння, вказати дисперсію початкової вологості в партії пиломатеріалів та коефіцієнт варіації швидкості циркуляції повітря в камері.

Запропонований метод розрахунку тривалості сушіння пиломатеріалів може бути рекомендований під час проектування та планування роботи сучасних низькотемпературних камер. Для підтвердження його ефективності проведено технологічний розрахунок роботи сушильного цеху вітчизняного підприємства ТОВ «Юро-Ламбер».

Визначено, що у разі використання традиційного методу розрахунку тривалості сушіння під час планування роботи підприємства, річна продуктивність камери буде в 1,9 рази вищою за продуктивність, розраховану за умови використання запропонованого методу. Для виконання запланованого річного обсягу виготовлення продукції підприємству доведеться встановлювати додаткові камери, що потребує великих капіталовкладень. Інший спосіб досягти необхідного результату – інтенсифікація процесу за рахунок скорочення тривалості сушіння пилопродукції, що призведе до зниження рівня якості сушіння й обмежить сферу використання висушеної пилопродукції.

Аналіз розрахунків витрат на сушіння показав, що використання традиційного табличного методу розрахунку тривалості сушіння для планування роботи сушильного цеху з низькотемпературними камерами може призвести до виникнення річних збитків у розмірі 3124 тис. грн для середньостатистичних підприємств із продуктивністю сушильного цеху 5,4 тис. м³/рік, що підтверджує доцільність застосування табличного методу розрахунку тривалості сушіння із запропонованими уточненнями під час проектування та планування роботи сушильних цехів.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел показав, що існуючі методи розрахунку тривалості сушіння пилопродукції орієнтовані на камери з паровим теплопостачанням. Вони не враховують особливостей проведення процесу сушіння в сучасних низькотемпературних камерах, що супроводжується зміною характеру кінетики видалення вологи. Крім того, ці методи не враховують мінливості властивостей як деревини, так і параметрів сушильного агента в камері, що суттєво впливає на їх адекватність експериментальним даним.

2. На основі емпіричних кінетичних залежностей, що характеризують процес видалення вологи з деревини знайдені релаксаційні параметри цього процесу (τ_1), які уможливили розрахувати термодинамічний коефіцієнт K_1 в температурному інтервалі, що відповідає низькотемпературному сушінню. Встановлено, що процес низькотемпературного сушіння пилопродукції містить активаційний механізм, термодинамічним параметром якого є енергія активації, значення якої для різних порід становить $E_{a_1} = 4,8 \times 10^{-20}$ Дж.

3. Визначено енергію активації потужності джерела вологи E_{a_2} , за якої встановлено температурну залежність часу релаксації джерела вологи τ_2 , що дає змогу розрахувати термодинамічний коефіцієнт K_2 в рівнянні поточної вологості пилопродукції у діапазоні температур від 50 до 80 °С.

4. За допомогою растрової електронної мікроскопії визначено середні розміри порожнин деревини дуба, вільхи та сосни, які беруть безпосередню участь у процесі видалення вологи під час низькотемпературного сушіння, що дало змогу проаналізувати характер залежності кінетики сушіння від розподілення порожнин по розмірах. Установлено взаємозв'язок між розмірами порожнин та передекспоненційним множником τ_{0_1} .

5. Розроблено метод розрахунку тривалості саме сушіння на основі розв'язку рівняння поточної вологості пиломатеріалів по відношенню до часу, із врахуванням запропонованих методик визначення термодинамічних коефіцієнтів. Статистична обробка результатів розрахунків довела його адекватність експериментальним даним: $F_{розр} < F_{табл}$ на 57 % та $t^c_{розр} < t^c_{табл}$ на 61 %. Це дає змогу рекомендувати запропонований метод для визначення тривалості в дослідницьких цілях у разі розширення специфікації висушеного матеріалу та вибору раціональних режимів.

6. Результати експериментальних досліджень сушіння пилопродукції з деревини дуба, вільхи та сосни у сучасних промислових низькотемпературних камерах зумовили введення у табличний метод розрахунку тривалості сушіння коефіцієнта нерівномірності $A_{n,p}$, значення якого знаходяться в межах від 1 до 1,6 – залежно від розсіювання початкової вологості пилопродукції і швидкості циркуляції сушильного агента по матеріалу та збільшення коефіцієнта режиму сушіння до значення $A_p = 2,5$.

7. Метод розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння в сучасних конвекційних камерах із запропонованими уточненнями впроваджений у виробництво на вітчизняних підприємствах ТОВ «Юро–Ламбер», ДП «Малинське ЛГ» та ТОВ «ГОДА» показав необхідність диференціації вартості сушіння пилопродукції за категоріями якості.

8. Використання запропонованого методу розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння пилопродукції із врахуванням її призначення під час планування роботи сушильного цеху дасть змогу отримати продукцію необхідного рівня якості без додаткових грошових витрат та запобігти виникненню річних збитків у розмірі 3,1 млн грн для середньостатистичних підприємств із продуктивністю сушильного цеху 5,4 тис м³/рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Олійник Р. В. Особливості розрахунку тривалості процесу при сушінні соснових пиломатеріалів безступеневими режимами / Р. В. Олійник, **А. К. Спірочкін** // Сборник научных трудов «Современные строительные конструкции из металла и древесины». – Одесская государственная академия строительства и архитектуры. – Одесса: ООО «Внешрекламсервис». – 2012. – С. 168–172. *(Здобувачем особисто поставлена задача, проведені експериментальні дослідження та проаналізовані отримані результати).*

2. Спірочкін А. К. Апробація методу визначення тривалості сушіння пилопродукції з деревини сосни / **А. К. Спірочкін** // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія: Системотехніка і технології лісового комплексу. – 2013. – Вип. 136. – С. 36–42.

3. Спірочкін А. К. Експериментальна перевірка розрахунку тривалості процесу сушіння пиломатеріалів різних порід деревини / **А. К. Спірочкін** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2013. – Вип. 185. – Ч. 2. – С. 237–242.

4. Пінчевська О. О. Фізика низькотемпературного сушіння пилопродукції / О. О. Пінчевська, Р. В. Олійник, **А. К. Спірочкін** // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. – 2014. – Вип. 24. 3. – С. 114–118. *(Здобувачем особисто поставлена задача, запропонований спосіб визначення термодинамічних коефіцієнтів).*

Статті у наукових виданнях іншої держави:

5. Пинчевская Е. А. Уточненный метод расчета продолжительности сушки пилопродукции в низкотемпературных камерах / Е. А. Пинчевская, Г. Б. Иноземцев, **А. К. Спирочкин** // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology. – 2010. – № 72. – Р. 132–135. *(Здобувачем особисто поставлена задача, проведений аналіз існуючого методу розрахунку тривалості сушіння та запропоновано його уточнення).*

6. Спирочкин А. К. К вопросу о расчете продолжительности сушки / **А. К. Спирочкин** // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology. – 2012. – № 80. – Р. – 77–80.

7. Pinchewska O. About thermodynamic coefficient estimation by low temperature treatment of sawn timbers / O. Pinchewska, R. Oliynik, **A. Spirochkin** // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology. – 2013. – № 81. – Р. – 170–174. *(Здобувачем особисто проведені експериментальні дослідження та визначена енергія активації видалення вологи з деревини).*

8. Пинчевская Е. А. Активационные процессы при сушке древесины / Е. А. Пинчевская, Р. В. Олейник, **А. К. Спирочкин** // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology. – 2013. – № 84. – Р. – 28–31. *(Здобувачем особисто поставлена задача, проведений аналіз зв'язку вологи з деревиною).*

Статті в інших виданнях:

9. Головінський Б. Л. Особливості розрахунку тривалості сушіння в низькотемпературних камерах / Б. Л. Головінський, О. О. Пінчевська, **А. К. Спірочкин** / Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: «Лісівництво та декоративне садівництво». – 2010. – Вип. 152. – Ч. 2. – С. 318–322. *(Здобувачем особисто проведений аналіз особливостей низькотемпературного сушіння пилопродукції).*

10. Спірочкин А. К. Щодо уточнення розрахунку поточної вологості пилопродукції з деревини сосни / **А. К. Спірочкин** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: «Лісівництво та декоративне садівництво». – 2011. – Вип. 164. – Ч. 3. – С. 267–270.

Авторське свідоцтво

11. Пінчевська О. О. Методика визначення активаційних процесів сушіння деревини / О. О. Пінчевська, Р. В. Олійник, **А. К. Спірочкин** // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 53760; заявл. 18.12.2013; опубл. 18.02.2014. *(Здобувачем особисто поставлена задача, запропонована методика визначення термодинамічних коефіцієнтів).*

Тези наукових доповідей:

12. Головінський Б. Л. Щодо питання розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння пилопродукції / Б. Л. Головінський, О. О. Пінчевська, **А. К. Спірочкін** // Тези доповідей учасників міжнародної науково-практичної конференції «Освіта, наука та інновації у лісовому і садово-парковому господарстві України в контексті регіональних та глобальних викликів». – НУБіП України, ННІ ЛіСПГ. – К., 2010. – С. 211–212. *(Здобувачем особисто проведений аналіз способів розрахунку тривалості сушіння пилопродукції).*

13. Спірочкін А. К. Особливості технології сушіння пилопродукції в сучасних камерах / **А. К. Спірочкін** // Тези доповідей учасників міжнародної науково-практичної конференції «Ліс. довкілля, технології: наука та інновації». – НУБіП України, ННІ ЛіСПГ. – К., 2012. – С. 295–296.

14. Спірочкін А. К. Інженерний метод розрахунку тривалості сушіння соснових пиломатеріалів / **А. К. Спірочкін** // Тези доповідей учасників міжнародної науково-практичної конференції «Ліси, парки, технології: сьогодення та майбутнє». – НУБіП України, ЛіСПГ. – К., 2013. – С. 223–224.

15. Пинчевская Е. А. Продолжительность сушки пиломатериалов в низкотемпературных камерах / Е. А. Пинчевская, **А. К. Спирочкин** // Материалы II Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса». – Кострома, 2013. – С. 54–57. *(Здобувачем особисто поставлена задача, проведений аналіз експериментальних досліджень).*

16. Спірочкін А. К. Розрахунок тривалості сушіння пиломатеріалів різних порід деревини в виробничих умовах / **А. К. Спірочкін** // Збірник тез доповідей учасників міжнародної науково-практичної конференції «Екологічнобезпечні ресурсозберігаючі технології оброблення деревини». – Київ, 2013. – С. 29–31.

17. Пінчевська О. О. Щодо способів сушіння пилопродукції / О. О. Пінчевська, **А. К. Спірочкін** // Тези доповідей учасників міжнародної науково-практичної конференції «Лісове і садово-паркове господарство ХХІ сторіччя: актуальні проблеми та шляхи їх вирішення», НУБіП України, ЛіСПГ. – К., 2014. – С. 225–226. *(Здобувачем особисто проведений аналіз способів сушіння пилопродукції).*

18. Пинчевская Е. А. Сушка пиломатериалов, как релаксационный процесс / Е. А. Пинчевская, Р. В. Олейник, **А. К. Спирочкин** // Научное издание. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. – Воронеж, 2014. – № 3. – Ч. 4 (8–4). – С. 330–334. *(Здобувачем особисто поставлена задача, проведений аналіз результатів досліджень).*

19. Пинчевская Е. А. Кинетика низкотемпературной сушки пилопродукции / Е. А. Пинчевская, Р. В. Олейник, **А. К. Спирочкин** // Тезисы докладов V Международного симпозиума РКСД «Строение, свойства и качество древесины». – М., 2014. – С. 36–37. *(Здобувачем особисто проведені експериментальні дослідження).*

АНОТАЦІЯ

Спірочкін А. К. Низькотемпературне сушіння пилопродукції. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.06 – технологія деревообробки, виготовлення меблів та виробів з деревини. – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2015.

Дисертація присвячена розв'язанню актуальної науково-практичної задачі – визначення тривалості низькотемпературного сушіння пилопродукції шляхом врахування технологічних особливостей процесу та ймовірнісних початкових і граничних умов. Установлено можливість низькотемпературне сушіння пилопродукції представляти як релаксаційний процес. Визначено, що в процесах сушіння деревини наявний активаційний механізм та знайдено числові значення енергії активації для різних порід деревини. Отримано середні розміри порожнин деревини, що беруть участь у процесі видалення вологи під час низькотемпературного сушіння, та встановлено взаємозв'язок між розмірами порожнин і часом релаксації. Запропоновано метод розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння на основі розв'язку рівняння поточної вологості пиломатеріалів з урахуванням термодинамічних особливостей проходження процесу. Вперше отримано значення коефіцієнта, що враховує нерівномірність розподілення аеродинамічного поля в камері, та дисперсію початкової вологості пиломатеріалів – для уточнення традиційного табличного методу розрахунку тривалості сушіння, що продовжить життєвий цикл виробів з деревини та збереже лісові ресурси.

Ключові слова: низькотемпературне сушіння пилопродукції, технологічні параметри, енергія активації, термодинамічні коефіцієнти, тривалість сушіння.

АННОТАЦИЯ

Спирочкин А. К. Низкотемпературная сушка пилопродукции. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.06 – технология деревообработки, изготовление мебели и изделий из древесины. – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2015.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи – определения продолжительности низкотемпературной сушки пилопродукции путём учёта особенностей процесса и вероятностных начальных и граничных условий.

Установлено, что низкотемпературная сушка пилопродукции требует построения четкого алгоритма расчета продолжительности с учетом термодинамических особенностей проведения процесса и стохастического характера начальных и граничных условий, что продлит жизненный цикл изделий из древесины и сохранит лесные ресурсы.

Проанализированы особенности низкотемпературной сушки пилопродукции. Установлена возможность представлять ее пилопродукции как релаксационный процесс. Определено, что термодинамические коэффициенты, характеризующие температурную зависимость скорости удаления влаги из древесины в процессе сушки, имеют значения обратно пропорциональные времени релаксации.

На основании результатов предварительных экспериментальных исследований установлено, что процесс низкотемпературной сушки необходимо условно разделить на два периода: сушка от начальной влажности до влажности предела насыщения клеточной стенки; и от влажности предела насыщения до конечной влажности. Причем, термодинамический коэффициент K_1 характеризует процесс удаления влаги из древесины, а термодинамический коэффициент K_2 – кинетику «мнимого» источника влаги.

Определены релаксационные параметры процесса удаления влаги из древесины, с помощью эмпирических кинетических зависимостей низкотемпературной сушки, которые позволили рассчитать термодинамический коэффициент K_1 . Рассчитано значение энергии активации процесса удаления влаги из древесины с помощью метода Аррениуса из графических логарифмических зависимостей времени релаксации τ_1 от температуры. Расчеты показали, что удаление влаги из древесины всех исследуемых пород характеризуется одинаковой энергией, ее значение составляет $E_{a_1} = 0,30 \pm 0,03$ еВ.

Установлено наличие температурной зависимости затухания мощности «мнимого» источника влаги, в результате экспериментальных исследований кинетики низкотемпературной сушки в промышленных условиях. Это позволило обнаружить присутствие активационного механизма в его жизненном цикле на стадии начального прогревания материала в камере. Определены значения энергии активации «мнимого» источника влаги из логарифмической зависимости времени релаксации от обратной температуры. Полученные результаты позволили определить термодинамический коэффициент K_2 в уравнении текущей влажности пилопродукции.

Определены средние размеры пустот древесины дуба, ольхи и сосны, которые принимают непосредственное участие в процессе удаления влаги при низкотемпературной сушке с помощью растровой электронной микроскопии. Это позволило проанализировать характер зависимости кинетики сушки от распределения пустот по размерам. Установлена взаимосвязь между размерами пустот и предэкспоненциальным множителем τ_{0_1} . Установлено размерный спектр пустот для образцов разных пород. В результате статистической обработки полученных данных определено, что вероятностное распределение не подчиняется закону нормального распределения.

Разработан метод расчета продолжительности низкотемпературной сушки пилопродукции на основании решения уравнения текущей влажности по отношению ко времени, с учетом определенных термодинамических

коэффициентов. Предложенный метод расчета позволяет получить результаты, адекватные экспериментальным данным, и может быть рекомендован для определения продолжительности только сушки без учета кондиционирования и конечной влагообработки.

Предложен уточненный табличный метод расчета продолжительности низкотемпературной сушки для проектирования и планирования работы сушильных камер в промышленных условиях с введением в него коэффициента неравномерности $A_{н.р}$, значения которого лежат в пределах от 1 до 1,6 – в зависимости от рассеивания начальной влажности пилопродукции и скорости циркуляции агента сушки по материалу, а также увеличением коэффициента режима сушки до значения $A_p = 2,5$.

Использование предложенного метода расчета при планировании работы сушильного цеха позволит получить продукцию необходимого уровня качества без дополнительных капиталовложений, и предотвратить возникновение годовых убытков в размере 3,1 млн грн для среднестатистических предприятий с производительностью сушильного цеха 5,4 тыс м³/год. Установлено, что интенсификация процесса сушки приведет к ухудшению качества высушенной продукции, соответственно, материал перейдет к низшей категории качества, что значительно ограничит область использования высушенной продукции. Кроме того, определено, что для ориентации потребителей, в случае закупки материала для изготовления определенных изделий, необходимо введение дифференциации цен на высушенную продукцию, в зависимости от категории качества сушки.

Ключевые слова: низкотемпературная сушка пилопродукции, технологические параметры, энергия активации, термодинамические коэффициенты, продолжительность сушки.

SUMMARY

Spirochkin A. K. Saw timbers low temperature drying. – On the rights of manuscript.

The thesis is for Candidate Degree of Technical Sciences with the specialty 05.23.06 – wood technology, furniture and wooden goods production. – The National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2015.

The thesis is devoted to solution of actual scientific and practical problem of determining the length of the low temperature drying of saw timbers by consideration of technological features of the process and possible initial and boundary conditions. It was set that the possibility of the low temperature drying is presented like a relaxation process. It was defined that an activation mechanism is present at the process of drying the wood and the numerical value of activation energy for different wood was found. It was received the average size of the cavities of the wood which take part in the process of the moisture removal during the low temperature drying and it was set the interconnection between the size of the cavities and the relaxation time. It was offered the method of calculating the duration of the low temperature drying based on the solution of the equate of the current humidity of saw timbers by

considering thermo-dynamic features of the process. For the first time, it was received the coefficient that considers the irregularity of distribution of aerodynamic field in the cell and variance initial moisture content of the saw timbers to clarify the traditional tabular calculating method of the length of the drying which will continue the life of the products made of wood and save the forest resources.

Keywords: the low temperature drying of saw timbers, technological parameters, activation energy, thermo-dynamic coefficients, the duration of drying

Підписано до друку 27.08.15
Ум. друк. арк. 1,1
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16
Обл.-вид.арк. 1,0
Зам. № 7692

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041
тел.: 527-81-55