

УДК 631.364:621.311.243

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162948

Результати експериментальних досліджень процесу сушіння дубового шпону у геліосушарці

М. І. Бабич, Р. Є. Кригуль, С. П. Шаповал, Н. О. Толстушко, С. В. Коробка, М. М. Толстушко

Розроблено нову конструкцію геліотермічної сушильної установки з активною системою використання сонячної енергії. Запропоновано для діагностики основних параметрів повітрообміну у геліосушарці і прогнозування інтенсивності протікання тепломасообмінних процесів сушіння дубового шпону використовувати автоматичну систему керування К1-102. Це дозволяє підвищити технологічну та енергетичну ефективність процесу сушіння дубового шпону у геліосушарці в 2 рази.

Визначено закономірності впливу фізичних параметрів навколишнього середовища та погодозалежних факторів на тепло-, масо- і вологообміні процеси сушіння дубового шпону у геліосушарці. Наведено оцінку енергетичних, кінетичних та динамічних параметрів процесу сушіння дубового шпону. Експериментально визначено тривалість технологічного процесу сушіння у геліосушарці. Досліджено робочі характеристики об'єкта сушіння, залежно від поставлених технологічних задач (прогрівання або сушіння матеріалу) за стандартних режимів сонячного освітлення і типових метеорологічних умов.

Встановлено, що необхідно регулювати повітрообмін, вологовиділення, раціональне видалення вологого теплоносія, концентрацію надходження сонячної енергії відносно прогнозованої зміни мінімальних та максимальних піків коливань погодозалежних факторів. Це є важливим для інтенсифікації процесів сушіння дубового шпону і зниження питомих енергетичних витрат на процес сушіння за рахунок сонячної енергії.

Отримані результати можна використати під час розробки та вдосконалення технічних засобів сушіння дубового шпону, для підвищення технологічної та енергетичної ефективності процесу

Ключові слова: сонячна енергія, геліосушарка, температурно-вологісні поля, тепломасоперенесення, інтенсифікація, конвективне сушіння

1. Вступ

Якісне сушіння дубового шпону є одним з найбільш затребуваних технологічних процесів у лісовому комплексі України. Сьогодні на ринку існує багато високотемпературних автоматизованих апаратів для високоякісного сушіння деревини в «м'яких режимах». Проте їх застосування є нерентабельним за невеликих об'ємів переробки пиломатеріалів у малих побутово-господарських столярних цехах. Це насамперед пов'язано з високими капітальними вкладеннями. Крім цього, великою проблемою для малих побутово-господарських столярних цехів, які надають послуги відносно сушіння пиломатеріалів є кінцева якість

деревини після сушіння. Також зустрічаються непоодинокі випадки, коли у зв'язку з незадовільними результатами сушіння пиломатеріалів, власникам малих побутово-господарських столярних цехів доводиться відшкодовувати збитки замість отримання прибутку.

На даний час за оцінками споживачів – лісозаготівельних організацій наприклад, ТзОВ «Зоря» у м. Корці Рівненської області (Україна), геліотермічні сушильні агрегати (геліосушарки), ще не мають масового використання, в регіонах Західної України, бо попит на сушіння пиломатеріалів значно випереджає пропозицію. Тому, що більшість геліосушарок була розроблена дослідниками для країн з різними видами субтропічного клімату, а їхнє дослідження проведено в лабораторних умовах або за допомогою комп'ютерного моделювання.

У зв'язку із цим, для запобігання таких ситуацій необхідно застосовувати сучасні сушильні агрегати, зокрема геліотермічні установки з активною системою використання сонячної енергії і автоматизованою системою керування за технологічним процесом сушіння. Це дозволить мінімізувати виробничі економічні і енергетичні фактори та здійснювати контроль сушіння на всіх його етапах. Тому, розроблення даного виду сушильного обладнання, що працює за рахунок сонячної енергії є ідеальним рішенням для виконання поставленої задачі.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогодні існує багато варіантів та різновидів конструктивних виконань геліотермічних або сонячних сушильних агрегатів, що використовуються в лісовому комплексі України. Головними елементами енергетичного блоку цих агрегатів є повітряний колектор та сушильна камера. Зокрема, у роботі [1] було розроблено нову конструкцію геліосушарки тепличного типу для сушіння пиломатеріалів. Крім цього, у роботі досліджено процес конвективного сушіння березового шпону у пакеті. На підставі тереотично-експериментальних досліджень визначено коефіцієнти тепло- та масопередачі залежно від швидкості руху теплоносія, коефіцієнт внутрішньої дифузії вологи із листів шпону та встановлена його залежність від температури. Однак не описано, як відбувається кінетика та енергетика повітрообміну під час вологовиділення та видалення вологого теплоносія з геліосушарки.

Автори у праці [2] розробили нову конструкцію геліосушарки тунельного типу. Обґрунтовано числовий метод розв'язання математичної моделі розрахунку напружень та розподілу вологи у буковому шпоні під час сушіння та сформульовано задачу оптимізації цієї моделі. Запропонували багатоступеневий режим конвективного сушіння букового шпону за рахунок розв'язання задачі оптимізації. Однак розробити загальний технологічний режим сушіння букового шпону у геліосушарці неможливо, а тільки стабілізувати теплотехнічні параметри теплоносія в сушильній камері в ході процесу сушіння. Тому, що під час сушіння пиломатеріалів за вологості матеріалу W , % та маси пиломатеріалів m , кг теплотехнічні параметри теплоносія суттєво залежать від фізичних параметрів навколишнього середовища. Зокрема, потоку сонячної енергії, температури і вологості повітря, атмосферного тиску, швидкості і сили вітру. А їхнє співпа-

діння та повторюваність впродовж двох послідовних періодів сушіння тривалістю 24 години малоімовірна.

У роботі [3] наведено результати експериментальних досліджень процесу конвективного сушіння дубового шпону при різних тепловологісних режимах у конвективній камерній геліосушарці. Побудовано криві сушіння дубового шпону при різних тепловологісних режимах в конвективній камерній геліосушарці. Проаналізовано вплив параметрів тепловологісного режиму сушіння на швидкість сушіння дубового шпону. Однак автори не проаналізували як впливають енергетичні, кінетичні та динамічні параметри теплоносія і висушуваного матеріалу на тепломасообмінні характеристики процесу сушіння дубового шпону у конвективній камерній геліосушарці.

Автори у праці [4] розробили стаціонарну конвективно-радіаційну геліосушарку коридорного типу. Було розглянуто процеси зміни температури повітря у стаціонарній конвективній-радіаційній геліосушарці коридорного типу під час сушіння дубового шпону. Обґрунтовано та сформульовано граничні умови зміни температури вологості і вологовмісту повітря (теплоносія) необхідних для вирішення рівнянь теплопровідності під час сушіння дубового шпону. Однак під час обґрунтування граничні умови зміни температури вологості і вологовмісту повітря (теплоносія) необхідних для вирішення рівнянь теплопровідності під час сушіння дубового шпону невраховано вологовміст вихідного потоку теплоносія.

В роботі [5] досліджено вплив структури лущеної фанерної сировини на механізм протікання процесів сушіння пиломатеріалів. Досліджено кінетику сушіння на прикладі трьох різних порід деревини, а саме берези, дуба, бука. Виконано ряд досліджень відносно випаровування води з пласкої поверхні лущеної фанерної сировини берези, дуба, бука та оцінено межі прогріву піддослідного матеріалу. Досліджено процес випаровування вологи для трьох груп зразків різних порід, обчислена швидкість протікання сушіння, а також визначені основні фактори, що впливають на перебіг процесу. Однак у тонкій лущеній фанерній сировині товщиною від 3 до 6 мм результат встановлення показників вологовиділення не можна вважати достатньо еквівалентним. Тому, що у тонких листах шпону важко встановити зону відведення теплоти та вологи з центру висушуваного матеріалу на поверхню через невеликі температурні градієнти.

Автори у праці [6] проаналізували особливості процесу сушіння пиломатеріалів, а саме дубового шпону. Запропонували нову конструкцію камерної конвективної геліосушарки. Обґрунтована доцільність використання імітаційного моделювання процесу сушіння дубового шпону та його програмна реалізація. Однак у роботі відсутня оцінка робочих характеристик, а саме енергетичних характеристик геліосушарки за стандартних режимів сонячного освітлення і типових метеорологічних умов.

Основним напрямом наукової роботи [7] є аналіз кінетики сушіння соснового шпону у тунельній геліосушарці напівтепличного типу. Автори установили режими обезводнення та розробили шляхи інтенсифікації процесу, які засновані на застосуванні теплоносія з низьким вологовмістом. Проаналізовано

результати і встановлено тривалість процесів сушіння соснового шпону за різних режимів. Запропоновано рівняння, що дає змогу з достатньою точністю визначати тривалість процесу сушіння соснового шпону у тунельній геліосушарці напівтепличного типу. Однак в запропонованій методиці не приймається до уваги перевірка отриманих даних абсолютної і відносної вологості за рівноважного вологовмісту. Зокрема, для оцінки правильності визначення довільної сухої маси висушеного матеріалу.

Обґрунтування найкращих режимів роботи геліотермічних сушильних агрегатів із забезпеченням найбільшої ефективності і інтенсивності процесу сушіння з мінімальними енергетичними витратами є важливим завданням. Оскільки складність даного процесу обумовлена перебігом взаємозалежних, а саме енергетичних, кінетичних, динамічних параметрів та тепломасообмінних процесів і високою мінливістю фізичних властивостей деревини.

Одночасно, залишається мало досліджуваним питання ефективності процесу сушіння деревного шпону за рахунок використання сонячної енергії та сушильних апаратів засновані на її принципі роботи. Водночас більшість розроблених конструкцій існуючих геліосушарок виконано для країн зі спекотним кліматом, а їхній принцип роботи та процес сушіння досліджено у лабораторних умовах або за допомогою імітаційних-моделей під час комп'ютерного моделювання. Тому відомі конструкції геліосушарок потребують модифікації та удосконалення з метою підвищення ефективності роботи в умовах помірного континентального клімату Західної України та зменшення капітальних і експлуатаційних затрат.

Наведені аргументи дали змогу визначити основні напрями підвищення технологічної та енергетичної ефективності процесу сушіння з використанням сонячної енергії. Відсутність на ринку сушильних апаратів такого типу формує задачу розробки конструкції геліосушарки з раціональними технологічними параметрами, яку можна було б використовувати для малих побутово-господарських столярних цехів.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою даного дослідження є інтенсифікація процесу сушіння дубового шпону з використанням сонячної енергії шляхом об'єднання у єдиний енергетичний блок в геліосушарці повітряного колектора та сушильної камери.

Відповідно до поставленої мети необхідно було виконати такі завдання:

- оцінити робочі характеристики (енергетичні характеристики сушильного апарата, тепломасообмінні характеристики процесу сушіння дубового шпону) геліосушарки за стандартних режимів сонячного освітлення і типових метеорологічних умов;
- дослідити технологічний процес сушіння пиломатеріалів у геліосушарці залежно від товщини нарізки та фізичних параметрів навколишнього середовища;
- провести натурні випробування геліосушарки.

4. Матеріали та методи обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів геліосушарки

4.1. Обґрунтування технологічної схеми та структури геліосушарки

В лісовому комплексі України геліотермічні установки з активною системою використання сонячної енергії знайшли широке застосування, зокрема в побутово-господарських столярних цехах. Наприклад, для зберігання та сушіння малих об'ємів до 1 м^3 пиломатеріалів, а саме шпону дуба.

Міні-геліосушарка з плоским повітряним колектором для сушіння дубових пиломатеріалів наведена рис. 1 і 2. Даний прототип геліотермічної сушильної установки був розроблений на кафедрі енергетики Львівського національного аграрного університету (Україна) [8]. Технологічний процес сушіння дубових пиломатеріалів був досліджений на кафедрі обладнання лісового комплексу та теорії машин і механізмів Луцького національного технічного університету (Україна). Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів геліосушарки та методики їхніх розрахунків, стосовно рекомендації в частині створення параметричних рядів відносно продуктивності, габаритних розмірів установки, маси завантаження висушуваного матеріалу, приведено у роботі [8].

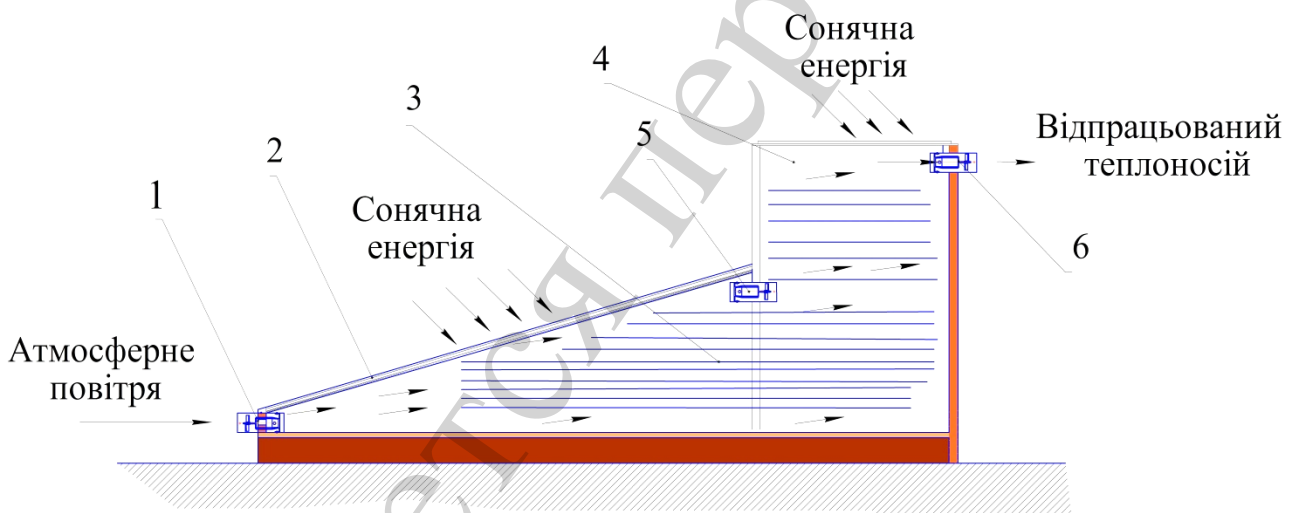


Рис. 1. Технологічна схема геліосушарки: 1 – осьовий нагнітальний вентилятор; 2 – повітряний колектор; 3 – висушувальний матеріал (шпон); 4 – сушильна камера; 5 – осьовий нагнітальний вентилятор, 6 – витяжний осьовий вентилятор

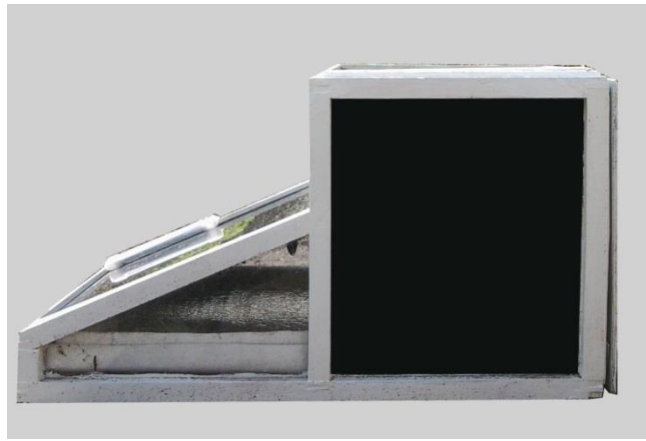


Рис. 2. Загальний вигляд геліосушарки для сушіння пиломатеріалів

Геліосушарка має рамну конструкцію розміром $2800 \times 1200 \times 1200$ мм виготовлену із струганого соснового бруса розміром 50×50 мм. Повітряний колектор 2 розмірами 1500×1200 мм розміщений на передній фронталі під кутом $\beta_{\text{опт}} = 40,4^\circ$ до горизонту та складається із світлопрозорого матеріалу і абсорбера. Світлопрозорим матеріалом є скла зі складом 72 % SiO_2 , 13 % $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, 11 % Ca , 4 % $(\text{R}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$). Абсорбер виготовлений із листової міді розміром 1000×1500 мм та обпалений газовим різакон для утворення шорсткості поверхні у 390 мкм. Поверхню абсорбера вкрили селективною фарбою товщиною шару покриття $\lambda \approx 4,40$ мкм з коефіцієнтами короткохвильового поглинання $\alpha \approx 0,92$ та довгохвильового випромінювання $\epsilon \approx 0,48$. Детальний опис конструкції та принципу роботи повітряного колектора та результати дослідження його тепло-технічних характеристик подано у роботі [9].

На бічній стінці повітряного колектора 2 зроблено вхідний канал для подачі атмосферного повітря в сушильну камеру 4. Повітря подається осьовим нагнітальним вентилятором 1 типу ebm-papst 3200J Series Axial Fan на 12 В DC потужністю 50 Вт та продуктивністю $280 \text{ м}^3/\text{год}$. Циркуляція нагрітого теплоносія зі швидкістю $1 \dots 3$ м/с у сушильній камері забезпечується осьовим нагнітальним вентилятором 5 типу ebm-papst 3200J Series Axial Fan на 12 В DC, що закріплений на поворотному шарнірному механізмі. Видалення відпрацьованого теплоносія у верхній частині сушильної камери здійснюється з регулюванням обертів осьового вентилятора 6 типу ebm-papst 3200J Series Axial Fan на 12 В DC.

Розроблена автоматична система контролю вологовиділення, вологовиділення та повітрообміну у геліосушарці, як з автономним так і мережевим живленням. Дана система укомплектована вдосконаленим панельним контролером K1-102 та датчиками контролю циркуляції, температури, вологи теплоносія і висушуваного матеріалу. Керуючим елементом у системі контролю є панельний контролер K1-102 з давачами, а виконавчим елементом є 3 осьові вентилятори. Автоматична система контролю та осьові вентилятори у автономному режимі живляться від:

- 1) двох фотомодулів Linuo/ABi-Solar P60260-D 260 Вт;
- 2) інвертора SL0912 Abi-Solar;
- 3) контролера заряду C&T Solar 3024 Pulsar;
- 4) акумуляторної батареї Ventura 12 В 150 А год.

Геліосушарка працює таким чином. Сушильна камера заповнюється дубовим шпоном 5 (розміром 0,6×2500×100 мм). Повітря з навколишнього середовища надходить у повітряний колектор, нагрівається та потрапляє в сушильну камеру. Відпрацьований теплоносієм видаляється вимушеною конвекцією в навколишнє середовище через витяжний канал.

У випадку мінливої хмарності в геліосушарці значну частину циклу сушіння складають перехідні процеси, а при тривалому затіненні та вночі – переходить у режим атмосферної сушарки.

Таким чином, розроблена конструкція геліосушарки відповідає концепції активної сонячної енергетичної установки. Водночас суміщені в один енергетичний блок повітряний колектор і сушильна камера конструктивно не відповідають класичним зразкам геліотермічним сушильним установкам. Для розробленої установки теоретично не встановлені співвідношення між енергетичними параметрами. Наприклад, неможливо окремо провести випробування повітряного колектора та сушильної камери за стандартною методикою або розрахувати теплотехнічні параметри колектора або сушильної камери чи дослідити їхню роботу та порівняти отримані дані. Зокрема якість отриманої теплової енергії залежно від зміни фізичних параметрів навколишнього середовища. Тому параметри, за якими оцінюють ефективність прийнятих рішень, встановлюються під час виконання експериментальних досліджень на основі аналізу процесу сушіння дубового шпону в геліосушарці.

4. 2. Обґрунтування технологічних параметрів висушуваного матеріалу

У процесі сушіння дубового шпону у геліосушарці впродовж доби відбувається зміна теплотехнічних параметрів теплоносія та фізичних параметрів навколишнього середовища, а саме надходження потоку сонячної енергії. Тепломасообмінні характеристики процесу сушіння, енергетичні характеристики геліосушарки і властивості деревини змінюється впродовж доби залежно від погоди й пори року. Для того щоб оцінити вологість дубового шпону користуються відносними величинами, де всі співвідношення стосуються довільної маси матеріалу.

За відношенням маси води (пари) у матеріалі, кг, до маси всього вологого матеріалу визначаємо вологість матеріалу:

$$W = \frac{m}{m + m_c}, \text{ кг/кг поточної маси матеріалу,} \quad (1)$$

де m – поточна маса води у вологому матеріалі, кг; m_c – маса сухого матеріалу, кг.

За відношенням маси води у матеріалі, кг, до маси сухої маси матеріалу визначаємо вологовміст матеріалу:

$$U = \frac{m}{m_c}, \text{ кг/кг сухої маси.} \quad (2)$$

За відношенням маси води (пари) у матеріалі, кг, до маси всього вологого матеріалу визначаємо рівноважну вологість матеріалу

$$W_{eq} = \frac{m_{eq}}{m_{eq} + m_c}, \text{ кг/кг поточної маси матеріалу,} \quad (3)$$

де m_{eq} – стан рівноважно вологовмісту, який визначається з масиву експериментальних даних, коли вони стабілізуються, кг.

За відношенням маси води (пари) у матеріалі, кг, до маси всього вологого матеріалу визначаємо рівноважний вологовміст матеріалу

$$U_{eq} = \frac{m_{eq}}{m_c}, \text{ кг/кг сухої маси,} \quad (4)$$

Вологовміст теплоносія можна визначити [10]:

$$X_i = X_o = 0,622 \cdot \frac{\frac{\varphi_a}{100} \cdot p_{va}^o}{P - \frac{\varphi_o}{100} \cdot p_{vs}^o}, \text{ кг/кг,} \quad (5)$$

де φ_a , φ_o – відповідно відносна вологість вхідного і вихідного теплоносія, %; p_{va} – тиск насиченої пари у вхідному потоці при даній температурі повітря, Па; p_{vs} – тиск насиченої пари у сушильній камері при даній температурі повітря, Па.

Наприклад для сушіння дубового шпону $m_0+m_c=7,73$ кг; $m_c=4,16$ кг; $m_0=3,58$ кг, $m_0/m_c=0,8601$; $\Delta\tau=24$ год; $U_0=75,3$ %.

де m_0 – початкова маса води у вологому матеріалі, кг; $m_0=m_c$ – початкова маса вологого матеріалу; $\Delta\tau$ – тривалість одного циклу сушіння дубового шпону, год; U_0 – початковий вологовміст, %.

Нехай маємо серію послідовних результатів вимірювання відносної вологості шпону $W_0=0,463$, $W_1=0,444$, $W_2=0,424$; $W_3=0,401$; $W_4=0,396$, яку виражають через поточні значення маси води m_{wi} і сталі значення сухої маси m_c

$$W = \frac{m_w}{m_w + m_c}, \text{ кг/кг поточної маси матеріалу} \quad (6)$$

де m_{w0} – початкова маса води у вологому матеріалі; m_{w1} – після першої доби сушіння години; m_{w2} – після другої доби сушіння тощо.

Їм відповідають поточні значення маси вологого матеріалу 7,73; 7,59; 7,48; 7,16

Тоді поточні значення маси води і сухої маси відповідно рівні:

$$0: m_{w0} = W \cdot (m_c + m_{w0}) = 0,463 \cdot 7,73 = 3,579; m_c = 7,73 - 3,579 = 4,15;$$

$$1: m_{w1} = W \cdot (m_c + m_{w1}) = 0,444 \cdot 7,59 = 3,370; m_c = 7,59 - 3,37 = 4,22;$$

$$2: m_{w2} = W \cdot (m_c + m_{w2}) = 0,424 \cdot 7,48 = 3,172; m_c = 7,48 - 3,172 = 4,308;$$

$$3: m_{w3} = W \cdot (m_c + m_{w3}) = 0,401 \cdot 7,31 = 2,931; m_c = 7,31 - 2,931 = 4,379;$$

$$4: m_{w4} = W \cdot (m_c + m_{w4}) = 0,396 \cdot 7,16 = 2,835; m_c = 7,16 - 2,835 = 4,325.$$

Середнє значення сухої маси $m_c = 4,1612$.

Тут залишкова маса води за рівноважно вологого стану m_{eq} :

$$m_{eq} = m_0 - \Sigma(\Delta m) = 3,58 - 2,69 = 0,89 \text{ кг},$$

де Δm – різниця втрата маси вологи у висушуваному матеріалі, кг.

За різницею показів при зважуванні вологого шпону m_s та сухого m_0 визначають масу закладки m . Впродовж першої і наступної доби сушіння відбувається зменшення маси висушуваного матеріалу, яке приймають рівним різниці показів ваги:

$$\left. \begin{aligned} \Delta m_1 &= m_s - m_1, \\ \Delta m_2 &= m_1 - m_2, \\ \Delta m_n &= m_{n-1} - m_n. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Під час визначення вологості дубового шпону, необхідно провести порівняння абсолютної і відносної вологості висушуваного матеріалу між співвідношеннями довільної маси матеріалу за рівноважного вологовмісту, тобто

$$U_{eq} = \frac{m_{eq}}{m_c} = \frac{0,89}{4,16} = 0,213;$$

$$W_{eq} = \frac{m_{eq}}{m_{eq} + m_c} = \frac{0,89}{4,16 + 0,89} = 0,176;$$

$$U_0 - U_{eq} = 78,1 - 19,9 = 58,2.$$

Перевірка:

$$W_{eq} = \frac{U_{eq}}{1+U_{eq}} = \frac{0,213}{1+0,213} = 0,17559. \quad (8)$$

Таким чином, абсолютна і відносна вологість висушуваного матеріалу $W_{eq}=0,176$ за рівноважного вологовмісту $U_{eq}=0,213$ з уточненням механізму масопереносу $W_{eq}=0,17559$ становить 0,00041 %. Це дає змогу стверджувати, що кінцеве значення маси $m_c=4,41$ кг та вологості $W_k=6$ % висушуваного матеріалу у процесі сушіння в геліосушарці визначено правильно.

4 3. Підготовка дубового шпону до сушіння у геліосушарці

Шпон отримують шляхом стругання пропарених брусів 1 або 2 сорту круглих лісоматеріалів [11]. Наприклад 2 сорту дуба (рис. 3) з початковою вологістю $W_s=61,2$ %, що була пропарена в пропарювальній камері (рис. 4) у 5 % розчині купоросу міді.

Пропарювання брусів проходить за температури розчину 90 °С. Після пропарення лісоматеріал ріжуть на чурки частинами по 500 мм та поміщають у шпоностругальний горизонтальний верстат (рис. 5) типу ЛФС-2587А. Методом лущення деревної (фанерної) сировини, отримуємо шпон з однієї чурки розміром 0,6×2500×100 мм з початковою вологістю $W_v=75,3$ % та масою $m=7,73$ кг (рис. 6).

Під час аналізу даних видно, що після пропарення брусів вологість матеріалу зростає з $W_s=61,2$ % до $W_v=75,3$ % а саме на $\Delta W=14,1$ % (за рахунок насичення деревини зайвою вологою).



Рис. 3. Заготовлена дубова сировина 2 сорту з початковою вологістю $W_s=61,2$ %

Сировина заготовлена на ділянці пайовиків Корецького лісництва ДП «Рівненський лісгосп», що розміщена на території кварталу № 18, відділення 48 – 17,0 га Устянської сільської ради, Корецького району, Рівненської області (Україна).



Рис. 4. Пропарювальна камера



a



б

Рис. 5. Лушення фанерної сировини горизонтальним верстатом ЛФС-2587А [12] : *a* – проекційний поперечний розріз; *б* – повздовжній розріз



Рис. 6. Необроблений сушений дубовий шпон вологістю $W=6\%$ та масою $m_c=4,41$ кг

Отриманий струганий матеріал (шпон) піддають конвективному камерному сушінню, тривалістю $\Delta\tau=52$ доби до маси $m=4,41$ кг та вологості $U=11,1$ %.

Після сушіння, шпон виймають з сушильної камери та дають вистоятися тривалістю $\Delta\tau=5$ діб для зняття внутрішньої деформації і розтріскування де він досихає до абсолютно сухого стану масою $m_c=4,16$ кг, вологістю $U=6$ % і шорсткістю поверхні 320 мкм.

4. 4. Кінетика та енергетика повітрообміну у геліосушарці

Процес повітрообміну або циркуляції теплоносія у геліосушарці полягає в продуванні висушуваного матеріалу у сушильній камері атмосферним повітрям.

Визначимо вміст води у г/м^3 та приймаємо такі позначення:

- z_0 – початковий вміст води в атмосферному повітрі на вході у геліосушарку на момент ввімкнення вентилятора;
- z – поточний вміст води теплоносія на вході у сушильну камеру геліосушарки;
- z_1 – вміст води у вхідному каналі геліосушарки;
- z_2 – швидкість волого виділення у середині геліосушарки у $\text{г/м}^3\cdot\text{с}$, $\text{г/м}^3\cdot\text{хв}$ або у $\text{г/м}^3\cdot\text{год}$;
- L – продуктивність вентилятора у $\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{хв}$ або $\text{м}^3/\text{год}$;
- V – об'єм геліосушарки, м^3 .

У довільний момент часу зміна вологовиділення у вентиляційній геліосушарці Vdz визначається балансом надходжень і витрат:

- $Lz_1d\tau$ – приріст за рахунок вмісту води у навколишньому середовищі округ геліосушарки;
- $z_2d\tau$ – приріст за рахунок газовиділення;
- $(-Lz d\tau)$ – зменшення за рахунок вентиляювання.

Співвідношення між цими приростами описується балансовим рівнянням:

$$L \cdot z_1 \cdot d\tau + z_2 \cdot d\tau - L \cdot z \cdot d\tau = V \cdot dz, \quad (9)$$

яке після ділення на $d\tau$ зведеться до вигляду:

$$L \cdot z_1 + z_2 - L \cdot z = V \cdot \frac{dz}{d\tau}; \quad \frac{dz}{d\tau} - \frac{L}{V} \cdot z = \frac{L \cdot z_1 + z_2}{V} \quad (10)$$

або

$$z' + \frac{L}{V} \cdot z = \frac{L \cdot z_1 + z_2}{V}. \quad (11)$$

Останній запис є типовим для лінійних диференціальних рівнянь першого порядку

$$y' + P(x)y = Q(x) \quad (12)$$

з тією різницею, що тут функціональні величини приймають сталі значення:

$$P(x) \Rightarrow \frac{L}{V} = \text{const} \text{ і } Q(x) \Rightarrow \frac{L \cdot z_1}{V} = \text{const}. \quad (13)$$

Подібні рівняння розв'язують за такою типовою методикою.

Спочатку шукають частинний розв'язок z^* для випадку $Q(x)=0$, за якого допускається розділення змінних:

$$z' + \frac{L}{V} \cdot z = 0, \quad (14)$$

$$\frac{dz}{d\tau} + \frac{L}{V} \cdot z = 0 \text{ або } \frac{dz}{z} = -\frac{L}{V} \cdot d\tau, \quad (15)$$

$$\int \frac{dz}{z} = -\frac{L}{V} \int d\tau, \quad (16)$$

$$\ln z + C = -\frac{L}{V} \cdot \tau, \quad (17)$$

$$z^* = C \cdot e^{-\frac{L}{V} \tau}. \quad (18)$$

Невідому сталу інтегрування надалі замінюємо функцією $u(\tau)$, а загальний вигляд змінної видалення вологого теплоносія з геліосушарки z_τ встановлюється залежністю:

$$z = u \cdot e^{-\frac{L}{V} \tau}. \quad (19)$$

Так визначену змінну z підставимо у початкове типове рівняння

$$\frac{d}{d\tau} \left(u \cdot e^{-\frac{L}{V} \tau} \right) + \frac{L}{V} \left(u \cdot e^{-\frac{L}{V} \tau} \right) = \frac{L \cdot z_1 + z_2}{V} \quad (20)$$

і у першому доданку виконаємо диференціювання за правилом добутку двох функцій:

$$e^{\frac{L}{V}\tau} \frac{du}{d\tau} - u \frac{L}{V} e^{\frac{L}{V}\tau} + u \cdot \frac{L}{V} \cdot e^{\frac{L}{V}\tau} = \frac{L \cdot z_1 + z_2}{V}. \quad (21)$$

Після взаємного знищення другого і третього доданків рівняння зводиться до вигляду з розділювальними змінними:

$$du = \frac{L \cdot z_1 + z_2}{L} \cdot e^{\frac{L}{V}\tau} \cdot d\tau. \quad (22)$$

Ліву частину інтегруємо з новою невідомою сталою C_1 , а праву – у межах від 0 до τ :

$$\int du = \frac{L \cdot z_1 + z_2}{V} \cdot \int_0^{\tau} e^{\frac{L}{V}\tau} \cdot d\tau, \quad (23)$$

$$u + C_1 = \frac{L \cdot z_1 + z_2}{V} \left(\frac{V}{L} \cdot e^{\frac{L}{V}\tau} - \frac{V}{L} \right) = \frac{L \cdot z_1 + z_2}{L} \left(e^{-\frac{L}{V}\tau} - 1 \right). \quad (24)$$

Змінна величина u є множником при експоненті, яка визначає зменшення вмісту вологи циркулюючого теплоносія у геліосушарці з часом і яка на початок вмикання вентилятора була рівною z_0 . Але останній вираз при $\tau=0$ перетворюється у нуль. Тому, для збереження початкового значення вмісту вологи теплоносія у геліосушарці, стали інтегрування необхідно перенести направо і надати їм значення z_0 :

$$u = \frac{L \cdot z_1 + z_2}{L} \left(e^{\frac{L}{V}\tau} - 1 \right) + z_0. \quad (25)$$

Остаточний вираз для загального розв'язку часової залежності вмісту вологи теплоносія у геліосушарці отримаємо перемноженням:

$$z = u \cdot z^* = \left[\frac{L \cdot z_1 + z_2}{L} \left(e^{\frac{L}{V}\tau} - 1 \right) + z_0 \right] \cdot e^{\frac{L}{V}\tau}. \quad (26)$$

Після перетворень вираз для поточного вмісту вологи теплоносія у геліосушарці набуде вигляду:

$$z = \frac{L \cdot z_1 + z_2}{L} \left(1 - e^{-\frac{L}{V}\tau} \right) + z_0 \cdot e^{-\frac{L}{V}\tau} \quad (27)$$

Тривалість роботи вентилятора для зменшення вмісту вологого теплоносія у геліосушарці від початкового z_0 до заданого вмісту z розраховують за формулою:

$$\tau = \frac{V}{L} \cdot \ln \frac{L \cdot (z_0 - z_1) + z_2}{L \cdot (z - z_1) + z_2}. \quad (28)$$

За відсутності волого виділення $z_2=0$ (наприклад у нічний період сушіння коли вологість атмосферного повітря в 1,5 рази менша вологості теплоносія у сушильній камері) останній вираз набуває вигляду:

$$\tau = \frac{V}{L} \cdot \ln \frac{z_0 - z_1}{z - z_1}. \quad (29)$$

За відсутності вологовиділення та вологовидалення $z_1=0$ вираз спрощується до вигляду:

$$\tau = \frac{V}{L} \cdot \ln \frac{z_0}{z}. \quad (30)$$

Найшвидше зменшується вміст води навколо вхідного каналу геліосушарки ($z_1=0$), або швидкість вологовиділення у середині геліосушарки ($z_2=0$). Відтак у геліосушарці тривалість роботи вентилятора розраховують за часом вологовидалення відпрацьованого теплоносія з геліосушарки.

Продуктивність вентилятора переважно розраховують на стаціонарний режим повітрообміну. Коли виділення води з висушуваного матеріалу компенсується притоком свіжого теплоносія, що має вміст води в 1,5 рази менший ніж теплоносій котрий був видалений з сушильної камери. Такому режиму відповідають умови

$$\tau \rightarrow \infty \text{ та } e^{-\frac{L}{V}\tau} = 0, \quad (31)$$

а поточний вміст води у теплоносії стабілізується на рівні:

$$z = \frac{Lz_1 + z_2}{L} \text{ або } L = \frac{z_2}{z - z_1}. \quad (32)$$

Тому тривалість повітрообміну у геліосушарці необхідно розраховувати окремо по кожному компоненту енергетичного блока геліотермічної установки, а саме повітряного колектора та сушильної камери. За неврахування цієї особливості повітрообмін теплоносія не буде сприйматися як ефективний. Навіть при багатократному активному вентилюванні висушуваного матеріалу коли виділення води з матеріалу компенсується притоком свіжого теплоносія у порі-

внянні із теплоносієм котрий був видалений з сушильної камери. Саме тому необхідно тепловтрати від вентилявання розраховувати пропорційно тривалості роботи енергетичного блоку геліосушарки. За сталої температури встановлюється динамічна рівновага між кількістю тепла, винесеного видаленим теплоносієм з геліосушарки і заміщеною тепловою потужністю повітряного колектора. Математично вона описується рівнянням теплового балансу:

$$\Delta Q = L \cdot c_a \cdot \Delta t, \quad (33)$$

$$P_Q = \frac{dQ}{d\tau} = G \cdot c_a \cdot (t_o - t_i), \quad (34)$$

де t_i, t_o – відповідно температури теплоносія на вході у геліосушарку та виході з неї, °C; c_a – об'ємна теплоємність повітря.; $G=dL/d\tau$ – продуктивність вентилятора.

Отже, отримані рівняння дозволяють розрахувати кінетику та енергетику повітрообміну у геліосушарці.

5. Результати дослідження технологічного процесу сушіння дубового шпону у геліосушарці

Натурні випробування геліосушарки в ТзОВ «Зоря», що розташоване у м. Корці Рівненської області (Україна), що займається не тільки вирощуванням і переробкою сільськогосподарської продукції, а також заготівлею деревини та деревообробкою на ділянці пайовиків Корецького лісництва ДП «Рівненський лісгосп». Сушіння дубового шпону 5 поліс (розміром 0,6×2500×100 мм) проводили у літній період з 1.06.2018 р. до 29.07.2018 р.

Під час натурних випробувань геліосушарки уточнювалися погодозалежні фактори та типові (сезонні) метеорологічні умови за результатами погодного моніторингу Корецької метеорологічної станції першого розряду Рівненської області (Україна) [13]. Погодозалежними факторами є надходження сонячної енергії, температура і вологість зовнішнього повітря, енергетична освітленість, атмосферний тиск, а також сили і швидкість вітру.

На основі аналізу природних погодозалежних факторів виявлено, що повне співпадіння параметрів потоку сонячної енергії, температури і вологості зовнішнього повітря освітлення, атмосферного тиску, швидкості і сили вітру впродовж двох послідовних місяців малоімовірно. Тому, неупередженим фактором впливу того чи іншого параметра на кінцевий результат залишається порівняння часових залежностей відповідних величин. Наприклад, енергетичні параметри роботи геліосушарки були різними, а саме коливання піків температур та енергетичної освітленості, що наведено на рис. 7.

Енергетична освітленість, яка надходить на горизонтальну поверхню повітряного колектора під кутом $\beta_{opt}=40,4^\circ$, географічної широти (для м. Корець, Рівненська область – $50,61^\circ$) впродовж двох місяців з 1.06.2018 р. до 29.07.2018 р. коливалася у межах E від 450 Вт/м^2 до 1269 Вт/м^2 . Такі мінімальні

та максимальні піки коливань енергетичної освітленості можна пояснити хмарністю, непрозорістю та забруднюваністю атмосфери. Зокрема, якщо подивитися на стовпчикову гістограму то побачимо, що мінімальні значення енергетичної освітленості у різні періоди сушіння $\Delta\tau$ були з 13 по 20 добу або з 42 по 47 добу. Це пояснюється різкою зміною погодозалежних факторів, а саме сезоном дощів, наприклад 13.06.2018 р. погода утримувалася хмарна з опадами. Ступінь прозорості атмосфери коливався у межах від 0,42 до 0,6. Потік повітряних мас (вітер) коливався у межах від 1,3 м/с до 2,8 м/с. Максимальні піки енергетичної освітленості можна пояснити тим, що наприклад 25.06.2018 р. а саме $\Delta\tau=25$ доба періоду сушіння дубового шпону погода утримувалася ясна, без опадів. Ступінь прозорості атмосфери коливався у межах від 0,72 до 0,86. Потік повітряних мас (вітер) коливався у межах від 1 м/с до 2,2 м/с.

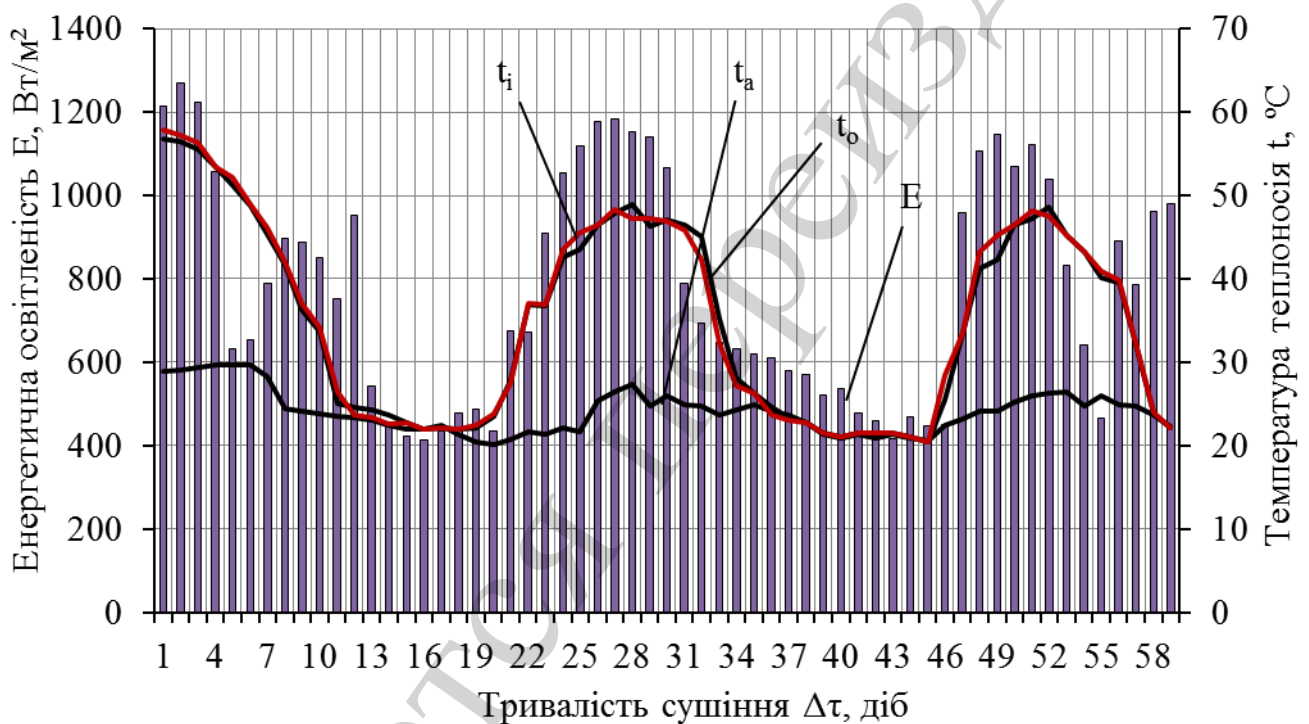


Рис. 7. Енергетичні параметри роботи геліосушарки у період з 1.06.2018 р. по 29.07.2018 р.: t_i , t_o , t_a — відповідно температура вхідного і вихідного теплоносія та навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$; E — енергетична освітленість, $\text{Вт}/\text{м}^2$

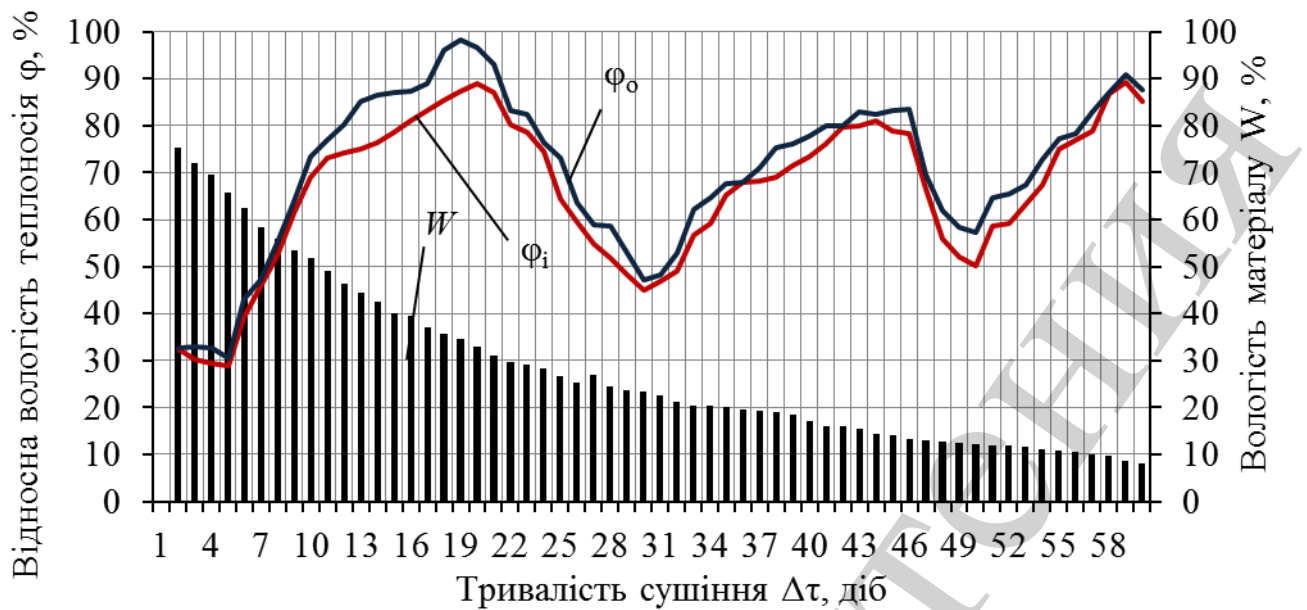


Рис. 8. Кінетичні параметри процесів вологовіддачі в геліосушарці у період з 1.06.2018 р. по 29.07.2018 р.: ϕ_i , ϕ_o – відповідно відносна вологість вхідного і вихідного потоків теплоносія, %; W – вологість висушуваного матеріалу, %

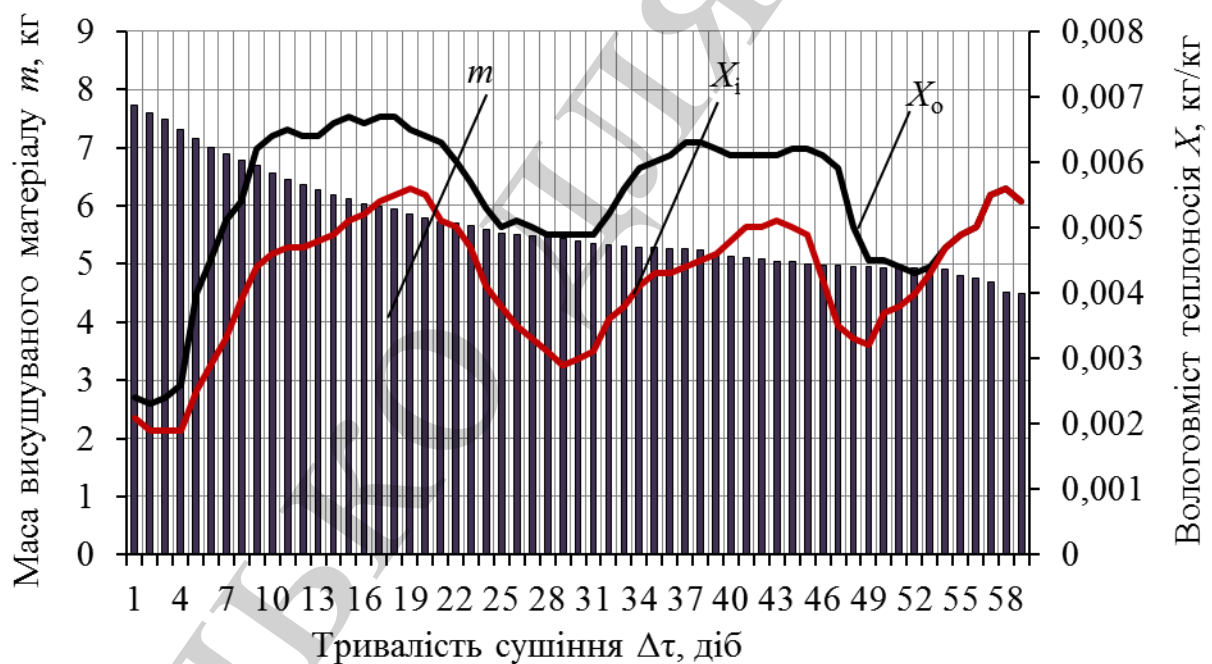


Рис. 9. Динаміка процесів масообміну в геліосушарці у період з 1.06.2018 р. по 29.07.2018 р.: X_i , X_o – відповідно вологовміст вхідного і вихідного потоків теплоносія, кг/кг; m – щодобова зміна маси висушуваного матеріалу, кг

Температура навколишнього середовища, а саме повітря на вході у геліосушарку коливалася t_a в межах від 18,5 °С до 32,3 °С. Температура теплоносія у повітряному колекторі t_i становила в межах від 20,5 °С до 57,3 °С, а на виході з сушильної камери t_o була в межах від 21,3 °С до 56,9 °С.

В ході експериментальних досліджень вимірювання температури теплотехнічних параметрів повітря (теплоносія) проводили у градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$), а під час розрахунків переводили в одиниці термодинамічної температури (K). Кореляцію адекватності результатів теоретичних і експериментальних досліджень для чистоти перевірки проводили у градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$).

Відносна вологість повітря навколишнього середовища, а саме повітря на вході у повітряний колектор коливалася φ_a від 28,9 до 82 %. Відносна вологість теплоносія на виході з сушильної камери φ_o була в межах від 30,8 до 85,3 %.

Порівняльний аналіз отриманих результатів (рис. 9) показує, що вологовміст атмосферного повітря в період випробувань X_i коливався від 0,019 до 0,0055 кг/кг , а відпрацьованого теплоносія на виході з сушильної камери X_o змінювався від 0,024 до 0,067 кг/кг .

Отож, температура теплоносія у геліосушарці коливається в межах від $18,5^{\circ}\text{C}$ до $56,9^{\circ}\text{C}$. Такі, мінімальні та максимальні піки коливань температури теплоносія у геліосушарці у різні періоди сушіння дубового шпону пов'язані з великою розбіжністю та нерівномірністю інтенсивності енергетичного потенціалу сонячної енергії. Тому, параметри теплоносія у сушильній камері із зростанням температури та пропорційним збільшенням відносної вологості повітря контролюються збільшенням циркуляції теплоносія від 1 до 3 м/с та навпаки. Таким чином, під час сушіння шпону параметри теплоносія повинні бути $t_i=25^{\circ}\text{C}$, а $t_o=31^{\circ}\text{C}$, відносна вологість повітря $\varphi_a=72,1\%$, а $\varphi_o=75,9\%$, вологовміст $X_i=0,0055\text{ кг/кг}$, а $X_o=0,067\text{ кг/кг}$. Тобто, вихідна температура, вологість теплоносія повинна бути у 1,5 рази вища порівнянні з вхідною $t_i < t_o$, $\varphi_a < \varphi_o$, $X_i < X_o$, якщо дана умова у геліосушарці не забезпечується – необхідно збільшити вимушену конвекцію теплоносія. Тому, що на стінках геліосушарки та на поверхні висушуваного матеріалі виникне явище точки роси, за рахунок перенасичення теплоносія надлишковим конденсатом водяної пари.

На завершення відзначимо, що основним недоліком геліосушарок є контроль за некерованими параметрами процесу сушіння, які зводяться до регулювання його вологості та вологовмісту, а регулювання температури можливо тільки в сторону зменшення їхніх значень. Тому що температура, вологість та вологовміст теплоносія у геліосушарці коливаються в досить широкому діапазоні в залежності від погодних умов, часу доби, інтенсивності надходження сонячної енергії. Тому, процес сушіння дубового шпону необхідно контролювати за кінетичними і динамічними параметрами процесу, а саме за зміною маси m , вологості W і вологовмісту U висушуваного матеріалу та отриманою якістю сировини.

6. Обговорення дослідження технологічного процесу сушіння дубового шпону у геліосушарці

Робота присвячена дослідженню технологічного процесу сушіння дубового шпону у розробленій геліотермічній установці з активною системою використання сонячної енергії. Крім цього, було підібрано енергетичне обладнання і розроблено автоматичну систему контролю вологовиділення, вологовидалення та повітрообміну у геліосушарці з автономним або мережевим живленням. На-

ведена система контролю виконана на базі удосконаленого панельного контролера K1-102 з давачами контролю циркуляції, температури, вологи теплоносія і висушуваного матеріалу. Автономна система живлення включає в себе два фотомодулі Linuo/ABi-Solar P60260-D 260 Вт; інвертор SL0912 Abi-Solar; контролер заряду C&T Solar 3024 Pulsar; акумуляторну батарею Ventura 12 В 150 А год. Дане технологічне рішення дає змогу геліосушарці працювати автономно без залучення централізованого енергетичного обладнання та живлення від електромережі, хоча воно передбачено у системі керування.

Обґрунтовано технологічні параметри висушуваного матеріалу, а саме дубового шпону та підготовку його до технологічного процесу сушіння у геліосушарці. Описано кінетику та енергетику процесу повітрообміну у геліосушарці. Це дає змогу розрахувати необхідну тривалість повітрообміну у геліосушарці окремо по кожному компоненту енергетичного блока, а саме повітряного колектора та сушильної камери. Крім цього, дозволяє правильно запрограмувати контролер K1-102 для керування та контролю за технологічним процесом сушіння дубового шпону у геліосушарці.

Досліджено технологічний процес сушіння дубового шпону 5 поліс (розміром $0,6 \times 2500 \times 100$ мм), що було проведено у літній період з 1.06.2018 р. до 29.07.2018 р.

На основі порівняння отриманих енергетичних, кінетичних та динамічних параметрів встановлено, що за однакових параметрів теплоносія, тривалість сушіння шпону у геліосушарці залежить тільки від прогнозованої зміни погодозалежних факторів. Зокрема отримані дані вологості і маси висушуваного матеріалу дають змогу прогнозувати процес зневоднення дубового шпону із врахуванням повітрообміну у геліосушарці за різних фізичних параметрах навколишнього середовища. Крім цього, дослідження кінетики та динаміки сушіння дубового шпону у геліосушарці показали, що за правильного підходу до процесів тепломасообміну в умовах побутово-господарських столярних цехів процес сушіння можна значно інтенсифікувати.

На основі аналізу отриманих даних встановлено, що розробити загальний технологічний режим сушіння дубового шпону у геліосушарці неможливо, а тільки стабілізувати теплотехнічні параметри теплоносія в сушильній камері. Параметри теплоносія під час сушіння дубового шпону за вологості W від 75,3 % до 6 % повинні коливатися у межах температура $t_i=25$ °С, а $t_o=31$ °С, відносна вологість повітря $\varphi_a=72,1$ %, а $\varphi_o=75,9$ %, вологовміст $X_i=0,0055$ кг/кг, а $X_o=0,067$ кг/кг. Тобто, вихідна температура, вологість теплоносія повинна бути у 1,5 рази вища порівнянні з вхідною $t_i < t_o$, $\varphi_a < \varphi_o$ або $X_i < X_o$. Якщо дана умова не забезпечується, то необхідно у сушильній камері збільшити вимушену конвекцію перемішування повітряних мас теплоносія (активно вентилувати). Тому, що на стінках геліосушарки та на поверхні висушуваному матеріалі виникне явище точки роси. Це тому, що теплоносій досягає стану насиченості водяною парою при незмінному тиску, температурі і даному стані вологоутримання.

Однак в роботі не наведено рівняння регресії у натуральних значеннях для визначення кінетичних та динамічних параметрів. Це було б доцільним для фо-

рмулювання єдиної методики дослідження технологічного процесу сушіння дубового шпону у геліосушарці.

Крім цього, також слід зазначити, що в роботі приділено мало уваги обґрунтуванню економічної ефективності геліосушарки у процесі сушіння інших матеріалів шпону, а саме горіха, липи, тополі у різних кліматичних зонах. Зокрема, у північних, східних та південних сухих регіонах України. Тому, другим етапом проведення відповідних досліджень буде обґрунтування економічної ефективності використання геліосушарки, а також дослідження процесу сушіння інших матеріалів шпону, а саме горіха, липи, тополі у різних кліматичних зонах України. Це дасть змогу сформулювати єдину методику дослідження технологічного процесу сушіння шпону у геліосушарці та обґрунтувати економічну ефективність процесу у порівнянні з традиційними технічними засобами сушіння.

Таким чином, подані результати є початковим етапом комплексного дослідження щодо підвищення ефективності процесу сушіння деревини на підставі розробки конструкції та обґрунтування режимів роботи геліосушарки, що забезпечить зменшення затрат енергоресурсів за рахунок сонячної енергії. Розроблена конструкція геліосушарки відноситься до комплексу геліотермічних сушильних агрегатів. Дана геліосушарка була розроблена для ТзОВ «Зоря», що розташоване в зоні західного Полісся, а саме у м. Корці Рівненської області (Україна).

7. Висновки

1. Розроблено новий тип геліотермічного сушильного обладнання з активною системою використання сонячної енергії. Проаналізовано енергетичні характеристики геліосушарки, тепломасообмінні характеристики процесу сушіння дубового шпону за стандартних режимів сонячної радіації і типових метеорологічних умов.

2. Досліджено вплив фізичних параметрів навколишнього середовища та погодозалежних факторів на тепло-, масо- і вологообміні процеси сушіння дубового шпону у геліосушарці. На їхній основі побудовані гістограми енергетичних, кінетичних та динамічних параметрів процесу сушіння дубового шпону для визначення тривалості сушіння, оцінки якості висушеного матеріалу та робочих характеристик геліосушарки.

3. На основі дослідження процесу сушіння дубового шпону у геліосушарці, обґрунтовано та вперше запропоновано для діагностики основних параметрів і прогнозування інтенсивності протікання тепломасообмінних процесів за допомогою автоматичної системи керування К1-102. Показано, що використовуючи отримані дані оцінки робочих характеристик об'єкта сушіння, залежно від поставленої технологічної задачі сушіння, необхідно регулювати повітрообмін і видалення теплоносія, надходження сонячної енергії відносно зміни погоди залежних факторів. Зокрема, для інтенсифікації процесів сушіння дубового шпону (з метою зміни напрямку дії температури та вологості всередині матеріалу) та зниження питомих енергетичних витрат на процес сушіння за рахунок сонячної енергії.

Література

1. Janjai S., Intawee P., Kaewkiew J. A Solar Timber Drying System: Experimental Performance and System Modeling // *International Energy Journal*. 2010. Vol. 11, Issue 3. P. 131–144.
2. A review on development of solar drying applications / Pirasteh G., Saidur R., Rahman S. M. A., Rahim N. A. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 31. P. 133–148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.052>
3. Mustayen A. G. M. B., Mekhilef S., Saidur R. Performance study of different solar dryers: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 34. P. 463–470. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.020>
4. Multiphysics modelling of convective drying of food materials / Kumar C., Karim A., Saha S. C., Joardder M., Brown R., Biswas D. // *Proceedings of the Global Engineering, Science and Technology Conference*. Dhaka, 2012. P. 1–13.
5. Importance of wood drying to the forest transport and pulp mill supply / Zanoncio A. J. V., Carvalho A. G., Silva M. G. da, Lima J. T. // *CERNE*. 2017. Vol. 23, Issue 2. P. 147–152. doi: <https://doi.org/10.1590/01047760201723022223>
6. Seetapong N., Chulok S., Khoonphunnarai P. Thermal Efficiency of Natural Convection Solar Dryer // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 901. P. 012044. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/901/1/012044>
7. Distributed mathematical model supporting design and construction of solar collectors for drying / Amankwah E. A. Y., Dzisi K. A., van Straten G., van Willigenburg L. G., van Boxtel A. J. B. // *Drying Technology*. 2017. Vol. 35, Issue 14. P. 1675–1687. doi: <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1269806>
8. Korobka S., Babych M. Substantiation of the constructive-technological parameters of a solar fruit dryer // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, Issue 8 (85). P. 13–19. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90299>
9. Substantiation of parameters and operational modes of air solar collector / Korobka S., Babych M., Krygul R., Zdobytskyj A. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3, Issue 8 (93). P. 16–28. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132090>
10. Results of research into kinetic and energy parameters of convection fruit drying in a solar drying plant / Boyarchuk V., Korobka S., Babych M., Krygul R. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6, Issue 8 (96). P. 74–85. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147269>
11. Сажин Б. С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320 с.
12. Расев А. И. Сушка древесины. М.: Высшая школа, 1980. 181 с.
13. Results of research into technological process of fruit drying in the solar dryer / Korobka S., Babych M., Krygul R., Zdobytskyj A. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, Issue 8 (91). P. 64–73. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122816>