

УДК 674.038.6.047:66.047.3.049.6, 630*847.2, 674.047.3

№ держреєстрації 0123U100276

Інв. №

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002

тел. +38(057) 7003888 <https://biotechuniv.edu.ua>, info@btu.kharkiv.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Валерій МИХАЙЛОВ

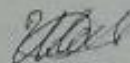
ЗВІТ

ПРО НАУКОВОДОСЛІДНУ РОБОТУ

**«ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА РЕСУРСООЩАДНОЇ
ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ ДЛЯ ВИРОБІВ, ЯКІ
ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ ЗЗОВНІ ПРИМІЩЕНЬ»**

(остаточний)

Керівник НДР
д.т.н., доцент



Шевченко С.А.

Рукопис закінчено 15 листопада 2024 року

Результати цієї роботи розглянуто науково-технічною радою факультету лісового господарства, деревооброблювальних технологій та землевпорядкування, протокол №2 від 18.12.2024 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР
докт. техн. наук



15.11.2024

Шевченко С.А.
(розділи 2, 3, 5, 6,
висновки)

Старший викладач



15.11.2024

Тупчий О.М.
(вступ, розділи 1, 4)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 38 стор., 2 таблиці, 7 рис., 29 джерел.

СУШИЛЬНА КАМЕРА, ДЕРЕВИНА, РІВНОВАЖНА ВОЛОГІСТЬ,
ЗОВНІШНЄ ВИКОРИСТАННЯ, ТЕПЛОВА ЕНЕРГІЯ,

Об'єкт дослідження – процес сушіння пиломатеріалів для зовнішнього використання в конвективній камері періодичної дії.

Мета роботи - зменшення витрат ресурсів у процесі сушіння пиломатеріалів для зовнішнього використання.

Методи дослідження: аналітичне математичне моделювання, методи теорії сушіння деревини, методи теорії дослідження операцій, методи теорії оптимізації та методи математичної статистики.

Визначено вплив кінцевої вологості деревини на втрати теплової енергії через огороження сушильної камери та витрати енергій на випаровування води. На прикладі м. Харків шляхом оцінювання середньої рівноважної вологості деревини за результатами метеоспостережень обґрунтовано, що раціональним значенням кінцевої вологості при сушінні деревини для експлуатації в зовнішніх умовах є 14%.

Розроблено методику оптимізації номінальної потужності енергетичної установки для опалення сушильних камер з урахуванням впливу її вихідної потужності на ККД та можливого зменшення продуктивності сушильних камер при недостатньому забезпеченні їх тепловою енергією.

Показано доцільність використання додаткового контуру теплоносія з порівняно невисокою температурою для опалення сушильних камер на початкових етапах сушіння.

Економічний ефект від використання запропонованих заходів обумовлюється зменшенням витрат палива для опалення сушильних камер. Перспективним напрямом подальших досліджень є використання відновлювальних джерел енергії в системі опалення сушильних камер.

ABSTRACT

Report on research work: 38 pages, 2 tables, 7 figures, 29 sources.

KILN DRYER, WOOD, EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT, OUTDOOR USE, THERMAL ENERGY

The object of research is the process of drying lumber for outdoor use in a convective periodic kiln dryer.

The purpose of the work is to reduce resource consumption in the process of drying lumber for outdoor use.

Research methods: analytical mathematical modeling, wood drying theory methods, operations research theory methods, optimization theory methods, and mathematical statistics methods.

The influence of the final moisture content of wood on the loss of thermal energy through the kiln dryer enclosure and the energy consumption for moisture evaporation was determined. Using the example of the city of Kharkiv, by evaluating the average equilibrium moisture content of wood based on the results of meteorological observations, it was substantiated that the rational value of the final moisture content when drying wood for operation in outdoor conditions is 14%.

A method for optimizing the nominal power of a power module for heating kiln dryers has been developed, taking into account the impact of its output power on efficiency and the possible reduction in the productivity of kiln dryers in the event of insufficient provision of thermal energy.

The feasibility of using an additional coolant circuit with a relatively low temperature for heating drying chambers at the initial stages of drying is shown.

The economic effect of using the proposed measures is due to the reduction in fuel consumption for heating kiln dryers. A promising direction for further research is the use of renewable energy sources in the heating system of kiln dryers.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК	6
ВСТУП	8
1 ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ	9
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	12
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІНЦЕВОЇ ВОЛОГОСТІ НА ВИТРАТИ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ СУШІННІ ДЕРЕВИНИ	14
3.1 Фактори впливу кінцевої вологості на споживчі властивості та витрати теплової енергії при сушінні деревини	14
3.2 Методи дослідження	15
3.3 Визначення числових показників, що характеризують вплив кінцевої вологості сушіння деревини на витрату теплової енергії.....	15
4 ОБҐРУНТУВАННЯ КІНЦЕВОЇ ВОЛОГОСТІ ДЕРЕВИНИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ЗОВНІШНІХ УМОВАХ (НА ПРИКЛАДІ м. ХАРКІВ).....	20
4.1 Методика дослідження.....	20
4.2 Оцінювання рівноважної вологості деревини в зовнішніх умовах (на прикладі м. Харків)	21
5 МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ СУШИЛЬНИХ КАМЕР	24
5.1 Методика дослідження.....	24
5.2 Особливості сушильної камери періодичної дії як споживача теплової енергії	24
5.3 Методика оптимізації номінальної потужності енергетичної установки для опалення сушильних камер	26
6 ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛОНОСІЯ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ СУШИЛЬНИХ КАМЕР НА ПОЧАТКОВИХ ЕТАПАХ СУШІННЯ	31
ВИСНОВКИ	34
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	36

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК

B – обсяг виробництва пиломатеріалів без врахування обмеження потужності енергетичної установки, грн;

Π – витрати на паливо без врахування обмеження потужності енергетичної установки, грн;

h – відносна вологість повітря;

i – етап сушіння;

j – індекс вихідної потужності енергетичної установки;

K, K_1, K_2 – коефіцієнти;

P_B – розрахункова потужність втрат тепла через огороження базової конструкції, кВт;

P_B – розрахункова потужність втрат тепла через огороження вдосконаленої конструкції, кВт;

P_{Dr} – середня потужність споживання теплової енергії сушильної камери, Вт;

p_i – ймовірність перебування сушильної камери на i -у етапі сушіння;

t – тривалість етапу сушіння, год;

t_i – ймовірність перебування сушильної камери на i -у етапі сушіння;

t_{Σ} – сумарна тривалість сушіння, год;

T – температура повітря, °C;

P_{Drsum} – середня потужність споживання теплової енергії всіма сушильними камерами, Вт;

p_i – ймовірність перебування сушильної камери на i -у етапі сушіння;

P_{in} – середня потужність споживання енергії палива енергетичною установкою, Вт;

P_i – потужність споживання сушильної камери на i -у етапі сушіння, Вт;

$P_{In\ lim}$ – середня потужність споживання енергії палива енергетичною установкою з урахуванням її обмеженої потужності, Вт;

p_j – імовірність роботи енергетичної установки з j -м значенням вихідної потужності;

P_j – вихідна потужність енергетичної установки, Вт;

P_{nom} – номінальна вихідна потужність енергетичної установки, Вт;

k – коефіцієнт забезпечення сушильних камер тепловою енергією;

$P_{Out\ lim}$ – середня вихідна потужність енергетичної установки з урахуванням обмеження максимальної потужності, Вт;

K – коефіцієнт споживання енергії;

E – ефект від обмеження потужності енергетичної установки, грн;

$P_{nom\ opt}$ – оптимальне значення номінальної потужності енергетичної установки, Вт;

ΔB – зменшення обсягу виробництва пиломатеріалів внаслідок обмеження потужності енергетичної установки, грн;

$\Delta \Pi$ – зменшення витрат на паливо внаслідок обмеження потужності енергетичної установки, грн;

ΔE – економія теплової енергії, кВт·год;

W – рівноважна вологість деревини;

w – коефіцієнт.

ВСТУП

Сушіння деревини є одним з найбільш енергоємних процесів переробляння деревини [1, 6], оскільки більша частина вологи, що міститься у свіжозрубаній деревини, повинна випаритися (незалежно від способу підведення теплоти до деревини та виведення вологи із сушильної камери). При цьому переважну частину використовуваної енергії нині одержують шляхом спалення відходів переробляння деревини, що супроводжується значними викидами вуглецевого газу.

Звернемо увагу на те, що, відповідно до принципу каскадного використання біомаси [14], деревна біомаса повинна використовувати відповідно до найвищої економічної та екологічної цінності в наступному порядку пріоритетів:

- виробу з деревини;
- продовження терміну служби виробів з деревини;
- повторне використання деревини,
- переробка деревини;
- біоенергетика;
- утилізація.

Отже, використання будь-якої деревини як палива, відповідно до [14], передбачається фактично лише у випадку неможливості чи недоцільності її іншого використання. Усе це й обумовлює актуальність досліджень з енергозбереження при сушінні деревини.

1 ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

Для видалення вологи з деревини лише в Німеччині станом на 2012 р. використовувалось близько 5000 сушильних камер, а у всьому світі – близько 150 тисяч [17]. При цьому переважна більшість сушильних камер є конвективними камерами [1, 8], яким притаманні високі енерговитрати, а сумарні річні викиди CO₂ по всьому світу від їх діяльності становили 40 млн. т., і такі викиди відбуваються протягом багатьох десятиріч поспіль [17].

Наразі провідні фірми з конструювання та виробництва сушильних камер використовують у своїх розробках чимало заходів, спрямованих на використання відновлювальної енергії та зменшення витрат енергії.

Серед конструктивних рішень звернемо увагу, насамперед, на впровадження заходів з рекуперації теплової енергії для запобігання її викиданню в зовнішнє середовище і спрямування на нагрівання повітря, яке надходить у сушильні камери. Така рекуперація теплової енергії переважно використовуються в сушильних камерах безперервної дії (т.зв. сушильних тунелях), де тепло забирається з вихідної ділянки і спрямовується на ділянку початкового нагрівання деревини. Прикладом такої розробки є сушильний тунель фірми Valutec – TC SCA Bollsta. Однак у зв'язку з дуже малим використанням сушильних тунелів на вітчизняних підприємствах, більший інтерес становлять системи рекуперації, призначені для передачі тепла між різними камерами періодичної дії [17]. При цьому тепле вологе повітря переноситься із сушильної камери, де сушіння завершується, у камеру, де деревина потребує нагрівання. Певним недоліком такого рішення є використання громіздкої системи повітропроводів і заслінок, які з'єднують сушильні камери. Звернемо увагу на те, що використання рекуперації в сушильних тунелях є в значній мірі передбачуваним на етапі проектування і може здійснюватися в усталеному режимі. Натомість системи передача теплоти між окремими камерами, де відбуваються незалежні процеси сушіння деревини, піддається впливу численних випадкових факторів, таких як

випадкові тривалості сушіння та температури агента сушіння на різних його етапах (обумовлені різноманіттям порід деревини та відмінністю товщини дощок). Такі випадкові відмінності в станах сушильних камер цеху призведуть до зменшення ефективності використання системи рекуперації порівняно з її максимально можливою передавальною здатністю. При цьому чим менша кількість сушильних камер охоплена такою системою рекуперації, тим меншою буде її ефективність внаслідок згаданих випадкових факторів. Тож більш перспективними є системи рекуперації, подібні використуванню у сушильній камері Muhlbock-Vanisek 1306, де вхідне повітря із припливно-витяжних каналів, проходячи через систему рекуперації тепла, нагрівається за допомогою вологого повітря, що викидається з камери.

Зважаючи на те, що сушіння деревини в сушильних камерах потребує значних витрат енергії на випаровування води [9], актуальним є обґрунтування кінцевої вологості при сушінні деревини для виробів, призначених для зовнішнього використання.

Хоча відомі випадки здійснення тривалих досліджень рівноважної вологості деревини в складі виробів з неї на місці експлуатації [13, 22], у світовій практиці визначення рівноважної вологості деревини типово здійснюється аналітичним методом, який є значно менш трудомістким, аніж тривале експериментальне дослідження вологості зразків деревини.

Обчислення рівноважної вологості деревини здійснюється за допомогою формул, які виражають її через температуру та відносну вологість навколишнього повітря [28]. Певно, найбільш часто використовується формула, рекомендована Лабораторією лісових продуктів Лісової служби Міністерства сільського господарства США [29]. Наприклад, визначення середньої рівноважної вологості деревини для 252 міст США й 122 міст за межами США за даними Національної Океанічної й Атмосферної Адміністрації США [27], було здійснене із використанням зазначеної формули, як і визначення середньої рівноважної вологості деревини для умов зовнішнього використання [25] і [26].

Ще одним приклад визначення середньої рівноважної вологості в межах країни є її обчислення для більш ніж 50 міст Південної Кореї [11, 19]. Однак у сучасній спеціальній літературі не виявлено даних про рівноважну вологість деревини в Україні.

Ряд досліджень, наприклад, [20, 23], стосуються використання теплових насосів у конденсаційних сушильних камерах. Однак конденсаційні камери потребують більше електроенергії, яка є відносно дорогою, що обмежує їх використання.

Спалювання деревини, зокрема, з метою опалення сушильних камер ускладнюється порівняно великим вмістом води в ній (до того ж, цей вміст води збільшується з часом внаслідок гігроскопічності деревини та життєдіяльності мікроорганізмів [3, 7]), що призводить до зменшення теплоти згоряння [10]. Для збільшення ефективності енергетичної установки застосовують конденсацію води з топкових газів [18], однак для охолодження системи конденсації потрібен потік теплоносія порівняно невисокої температури (зазвичай, до 40 °C). Звернемо увагу й на те, що коефіцієнт корисної дії енергетичної установки зменшується при зменшенні її навантаження.

Усе більше розробок стосуються використання відновлюваної енергії - насамперед сонячної [21]. Звісно, вони є найбільш ефективними в країнах із цілорічним жарким кліматом, але є й дослідження перспектив використання сонячного випромінювання та конструкцій для його використання для опалення сушильних камер в умовах України [5].

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

Заощадження ресурсів при сушінні деревини є комплексною задачею, окремі складові якої можна розділити на такі, які реалізуються безпосередньо під час технологічного процесу сушіння деревини, та заходи, які вживаються на етапі проектування сушильного цеху та вибору енергетичного обладнання для опалення сушильних камер.

При сушінні деревини, вироби з якої будуть експлуатуватися зовні приміщень, доцільно дотримуватися кінцевої вологості, якомога ближчої до рівноважної вологості на місці її майбутньої експлуатації. Практичний вибір такої раціональної кінцевої вологості ускладнюється відсутністю даних щодо рівноважну вологість деревини в місцевостях України в сучасних літературних джерелах.

Звернемо увагу на ще один аспект економії теплової енергії для опалення сушильних камер для деревини, пов'язаний із втратами тепла в енергетичній установці. Оскільки температура агента сушіння в камері та температура навколишнього повітря змінюються в широких межах, як і швидкість випаровування вологи з деревини, то пропорційно змінюється й споживана камерою тепла потужність. Отже, актуальною є задача обґрунтування номінальної потужності енергетичної установки для опалення сушильних камер для деревини, споживана потужність яких варіюється в широких межах.

Оскільки деякі сучасні режими сушіння деревини (залежно від породи), які надають перевагу якості сушіння перед збільшенням продуктивності сушильних камер, використовують доволі низький температури агента сушіння на початкових етапах сушіння (близько 30-40 °C), то доцільно проаналізувати можливість використання теплоносія відповідно зменшеної температури, який може постачатись із системи конденсації вологи в енергетичній установці.

Тож задачами даного дослідження є

1. Дослідження впливу кінцевої вологості на витрати теплової енергії при сушінні деревини..

2. Обґрунтування кінцевої вологості деревини для використання в зовнішніх умовах (на прикладі м. Харків)

3. Методика оптимізації номінальної потужності енергетичної установки для опалення сушильних камер

4. Визначення перспектив використання низькотемпературного теплоносія для опалення сушильних камер на початкових етапах сушіння.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІНЦЕВОЇ ВОЛОГОСТІ НА ВИТРАТИ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ СУШІННІ ДЕРЕВИНИ

3.1 Фактори впливу кінцевої вологості на споживчі властивості та витрати теплової енергії при сушінні деревини

Одним із параметрів технологічного процесу, від якого залежать витрати теплової енергії на його здійснення, є кінцева вологість деревини.

В умовах експлуатації деревина набуває рівноважної вологості, відповідної кліматичним умовам середовища, у якому виріб з деревини перебуває. Причому тривалість такого перехідного процесу може бути доволі великою й вимірюватися тижнями чи навіть місяцями (залежно від розміру виробу чи зразка).

Якщо виріб з деревини має меншу вологість, ніж середня рівноважна вологість для певного місця експлуатації, то виріб поглине певну кількість вологи. Отже, можна зробити висновок, що його сушіння до вологості менше експлуатаційної призвело до перевитрат енергії. Ці перевитрати енергії охоплюють як безпосередньо витрати теплової енергії на випаровування вологи з деревини, так і інші пов'язані із цим процесом витрати - втрати теплової енергії через всі види огорожень сушильної камери та через ґрунт внаслідок збільшеної тривалості сушіння до вказаної зменшеної вологості, витрати енергії на роботу вентиляторів; опосередковано мають місце і різноманітні втрати, обумовлені перевитратою часу роботи сушильної камери. Серед таких втрат звернемо увагу на наступні:

- зменшення виробничої потужності сушильного цеху;
- зменшення виробництва висушених пиломатеріалів за строк експлуатації сушильної камери, що, у свою чергу, призводить до перевитрати ресурсів на її виготовлення;
- перевитрати енергії при роботі енергетичного обладнання, яке постачає теплоносії до сушильної камери.

Якщо ж виріб з деревини надійде на місце експлуатації із вологістю більшою, ніж притаманна цьому місцю середня рівноважна вологість, то відбуватиметься видалення вологи в навколишнє середовище, яке буде супроводжуватися усиханням деревини (що, по суті, еквівалентно зменшенню об'єму деревини, яка виконує певні функції, та недоотриманню її замовником) та іншими вологісними деформаціями деревини (жолоблення тощо), що теж є небажаним.

3.2 Методи дослідження

Дослідження будемо здійснювати, використовуючи теорію сушіння деревини та метод регресійного аналізу для обробки експериментальних даних з літературних джерел.

3.3 Визначення числових показників, що характеризують вплив кінцевої вологості сушіння деревини на витрату теплової енергії

Для визначення числових показників, що характеризують вплив кінцевої вологості сушіння деревини на витрату теплової енергії для сушіння деревини, проаналізуємо результати експерименту із сушіння необрізних дубових дощок товщиною 50 мм у сушильній камері з об'ємом завантаження близько 50 м³ за 35% заповнення штабеля пиломатеріалами [4] та розрахункові оцінки втрат теплової енергії через огороження камери, опубліковані в [4]. Зокрема, у роботі [4] наведено дані про початкову та кінцеву вологість деревини та середню температуру агента сушіння по етапах сушіння, а також розрахункові втрати тепла через огороження базової та вдосконаленої конструкції з сандвіч-панелей (з товщиною теплоізоляційного шару мінеральної вати 100 мм і 150 мм відповідно) на різних стадіях процесу сушіння залежно від місяця року.

Це дає змогу обчислити тривалість кожного з етапів сушіння за формулою:

$$t = \frac{\Delta E}{P_B - P_B}, \quad (3.1)$$

де t – тривалість етапу сушіння, год;

ΔE – економія теплової енергії, кВт·год;

P_B – розрахункова потужність втрат тепла через огороження базової конструкції, кВт;

P_B – розрахункова потужність втрат тепла через огороження вдосконаленої конструкції, кВт.

Результати обчислення тривалості перебування сушіння камери на різних етапах сушіння, обчислена за формулою (3.1), наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Тривалості етапів сушіння необрізних дубових дощок товщиною 50 мм з початкової вологості 80% до кінцевої вологості 8%

Етап сушіння	Вологість деревини початкова	Вологість деревини кінцева	Тривалість, год	Імовірність перебування на даному етапі сушіння
1	80%	72%	93	0,079
2	72%	53%	270	0,230
3	53%	42%	206	0,175
4	42%	31%	267	0,228
5	31%	27%	58	0,049
6	27%	19%	108	0,092
8	19%	8%	172	0,146

За цими даними обчислено сумарну тривалість сушіння вказаних дощок та ймовірність перебування сушильної камери на певному етапі сушіння за формулами (3.2, 3.3):

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n t_i , \quad (3.2)$$

$$p_i = \frac{t_i}{t_{\Sigma}} , \quad (3.3)$$

де t_i – ймовірність перебування сушильної камери на i -у етапі сушіння;

t_{Σ} – сумарна тривалість сушіння, год;

p_i – ймовірність перебування сушильної камери на i -у етапі сушіння.

Ці дані, наведені в табл. 3.1, можуть використовуватись для визначення числових характеристик теплової потужності, споживаної сушильною камерою.

Це дало змогу обчислити моменти часу, відповідні початку та завершенню роботи сушильної камери на відповідних етапах сушіння.

Шляхом урахування даних про потужність втрат, наведених в [4], та обчислених тривалостей етапів сушіння побудовано залежність втрат теплової енергії через огороження сушильної камери (у відносних значеннях, наростаючим підсумком від початку сушіння) від поточної вологості деревини для середньорічної температури навколишнього повітря (див. рис. 3.1). Як видно з рис. 3.1, ця залежність є суттєво нелінійною, з різким зростанням витрат енергії наприкінці сушіння.

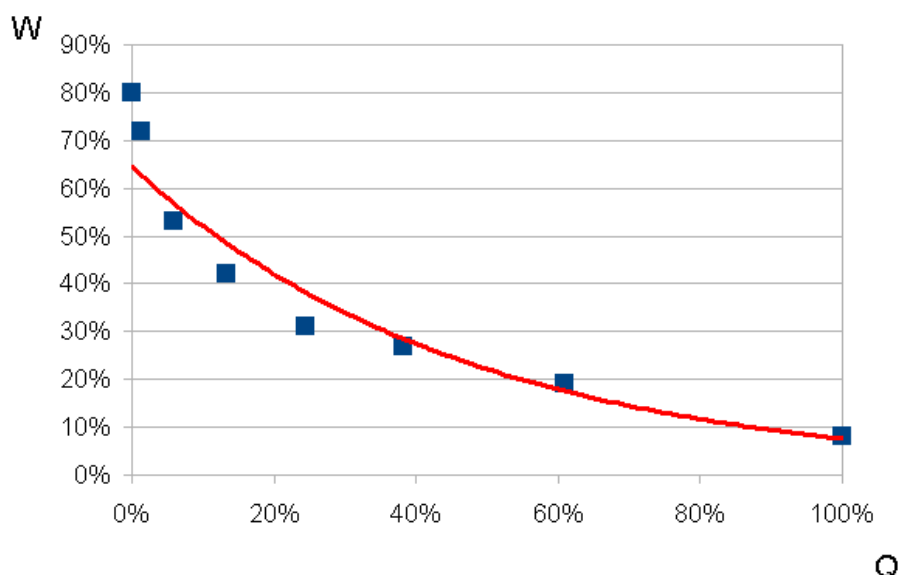


Рисунок 3.1 – Взаємозв'язок втрат теплової енергії через огороження сушильної камери (від початку сушіння) та поточної вологості деревини

Для більш детального аналізу впливу кінцевої вологості на втрати теплової енергії через огороження на рис. 3.2 наведено взаємозв'язок втрат теплової енергії через огороження сушильної камери та поточної вологості деревини, побудований для значень вологості деревини, менших ніж 30%.

На рис. 3.2 наведено також відповідну регресійну залежність, з якої слідує, що зменшення кінцевої вологості деревини на 1% призводить до збільшення втрат зазначеної складової теплової енергії на 3,25%.

Ще однією складовою витрат енергії на сушіння, залежної від кінцевої вологості деревини, є витрати на випаровування води. На рис. 3.3 наведено взаємозв'язок витрат теплової енергії на випаровування води та поточної вологості деревини. На рис. 3.3 наведено також відповідне рівняння, з якого слідує, що зменшення кінцевої вологості деревини на 1% призводить до збільшення витрат відповідної складової теплової енергії на 1,4%.

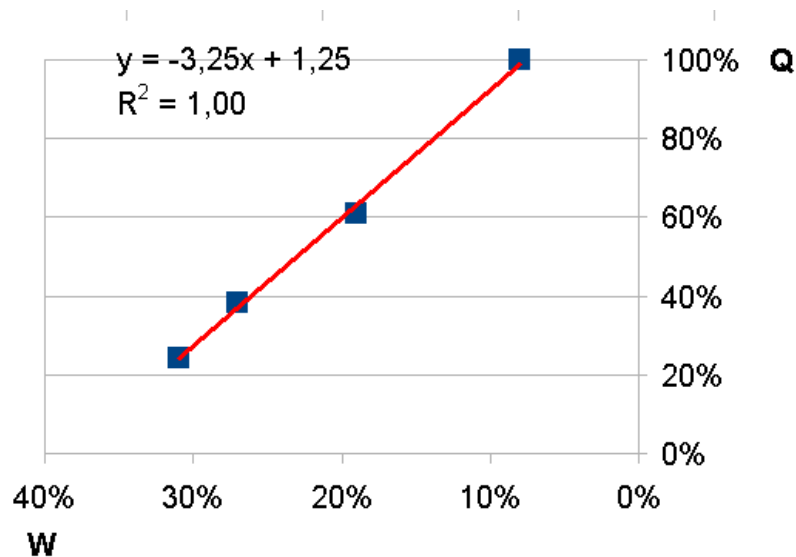


Рисунок 3.2 – Взаємозв'язок втрат теплової енергії через огороження сушильної камери та поточної вологості деревини (для значень вологості деревини, менших ніж 30%)

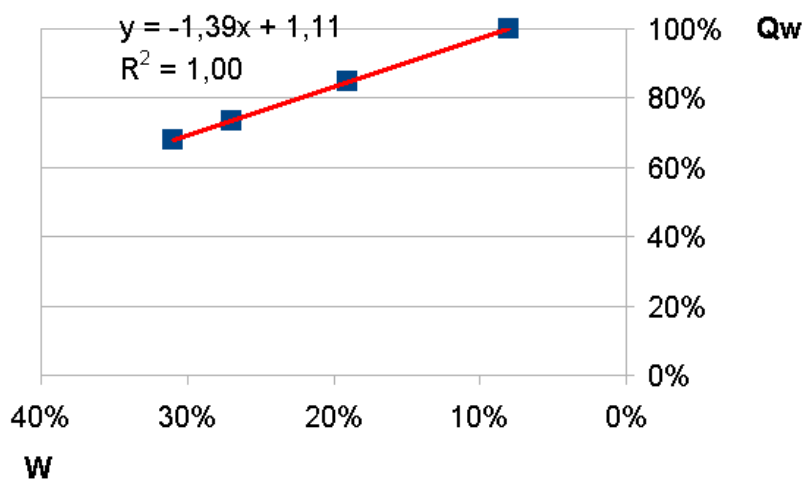


Рисунок 3.3 – Взаємозв'язок втрат теплової енергії через огороження сушильної камери та поточної вологості деревини (для значень вологості деревини, менших ніж 30%)

4 ОБҐРУНТУВАННЯ КІНЦЕВОЇ ВОЛОГОСТІ ДЕРЕВИНИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ЗОВНІШНІХ УМОВАХ (НА ПРИКЛАДІ м. ХАРКІВ)

4.1 Методика дослідження

Обчислення рівноважної вологості деревини здійснюється за допомогою формули, яка виражає її через температуру та відносну вологість навколишнього повітря [29]:

$$W = \frac{18}{w} \cdot \left(\frac{Kh}{1 - Kh} + \frac{K_1Kh + 2K_1K_2K^2h^2}{1 + K_1Kh + K_1K_2K^2h^2} \right), \quad (4.1)$$

$$w = 349 + 1,29T + 0,0135T^2, \quad (4.2)$$

$$K = 0,805 + 0,000736T - 0,00000273T^2, \quad (4.3)$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938T - 0,000303T^2, \quad (4.4)$$

$$K_2 = 1,91 + 0,0407T - 0,000293T^2, \quad (4.5)$$

де W – рівноважна вологість деревини;

w – коефіцієнт;

K, K_1, K_2 – коефіцієнти;

h – відносна вологість повітря;

T – температура повітря, °C.

Отже, методика визначення рівноважної вологості за результатами метеорологічних спостережень полягає в наступному. Дані з метеорологічної бази даних [12] в частині температури та відносної вологості повітря вносяться в електронну таблицю, де для кожного дня обчислюється рівноважна вологість деревини за формулою (4.1), а потім здійснюється усереднення в межах року. Далі здійснюється усереднення по рокам спостережень.

4.2 Оцінювання рівноважної вологості деревини в зовнішніх умовах (на прикладі м. Харків)

Проілюструємо наведені вище положення прикладом обґрунтування раціонального з кінцевої вологості деревини для зовнішнього використання на прикладі м. Харків.

На рис. 4.1 наведено графіки зміни температури і відносної вологості повітря протягом 2021 р. у м. Харків, побудовані за даними метеорологічних спостережень [12], а також обчислені за формулою (4.1) значення рівноважної вологості деревини (при побудові графіка усереднення здійснювалося на 7-денному інтервалі).

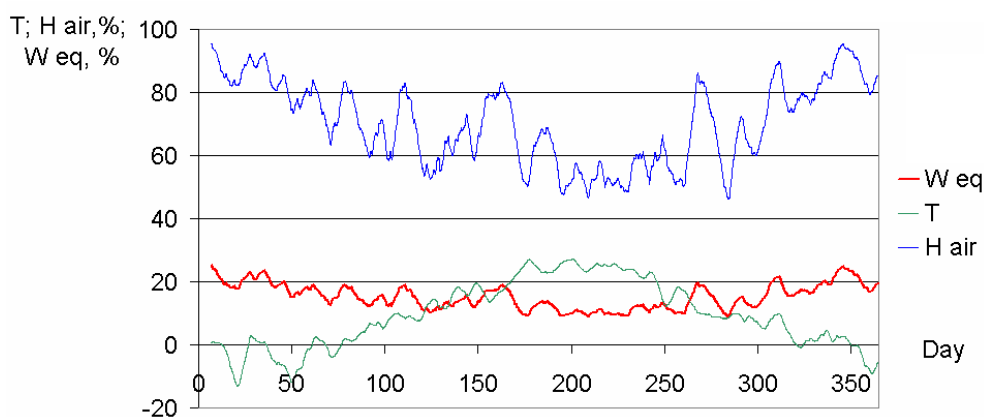


Рисунок 4.1 – Зміна температури й відносної вологості повітря та рівноважної вологості деревини протягом року (м. Харків, 2021 р.)

На рис. 4.2 наведено графіки зміни рівноважної вологості деревини в м. Харків по роках спостережень

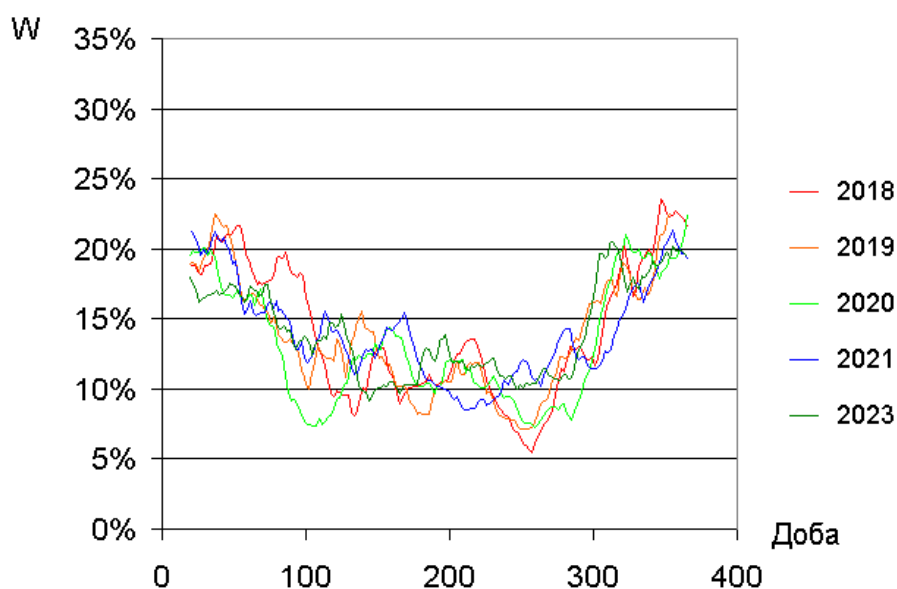


Рисунок 4.2 – Рівноважна вологість деревини в м. Харків по роках спостережень

У таблиці 4.1 наведено результати обчислень усередненої рівноважної вологості деревини в м. Харків по рокам спостережень. У таблиці 1.1 також наведено кількість діб (рівномірно розташованих у межах кожного з місяців) у році, за який враховано метрологічні дані.

Таблиця 4.1 – Рівноважна вологість деревини в м. Харків по рокам спостережень

Рік	Рівноважна вологість деревини	Кількість діб у році, за які враховано метрологічні дані
2018	14,9%	183
2019	14,1%	186
2020	13,5%	187
2021	14,3%	180
2023	14,3%	185

Визначення числових характеристик рівноважної вологості деревини за зазначені роки призвело до наступних результатів:

- математичне сподівання рівноважної вологості: 14,2%;
- середньоквадратичне відхилення рівноважної вологості: 0,5%;
- коефіцієнт варіації рівноважної вологості: 3,7%

Отже, раціональним значенням кінцевої вологості при сушінні деревини для експлуатації в зовнішніх умовах у м. Харків, установленим за результатами цих обчислень, є 14%.

5 МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ СУШИЛЬНИХ КАМЕР

5.1 Методика дослідження

Дослідження здійснюватиметься із застосуванням теорії дослідження операцій та методів статистичного аналізу.

5.2 Особливості сушильної камери періодичної дії як споживача теплової енергії

Суттєвою особливістю сушильної камери періодичної дії як споживача теплової енергії є зміна споживаної потужності із часом у широких межах. Ці зміни відбуваються як протягом циклу сушіння пиломатеріалів, так і залежно від пори року. Обумовлюється це тим, що в процесі сушіння температура агента сушіння може змінюватися від порівняно невеликих значень (близько 30-40 °C) на початку сушіння й може досягати 60-80 °C наприкінці сушіння [1, 4, 15, 16]. До того ж, змінюється й температура оточуючого середовища залежно від пори року та часу доби. Отже, як наслідок, перепад температур між внутрішньою та зовнішньою поверхнею огороження сушильної камери може змінюватися від кількох градусів до кількох десятків градусів, що призводить до пропорційної зміни потужності втрат теплової енергії через огороження камери.

Проілюструємо це графіком залежності втрат теплової енергії через огороження сушильної камери від часу (наростаючим підсумком від початку сушіння) - див. рис. 5.1, побудований із використанням даних, наведених в [4] і табл. 3.1.

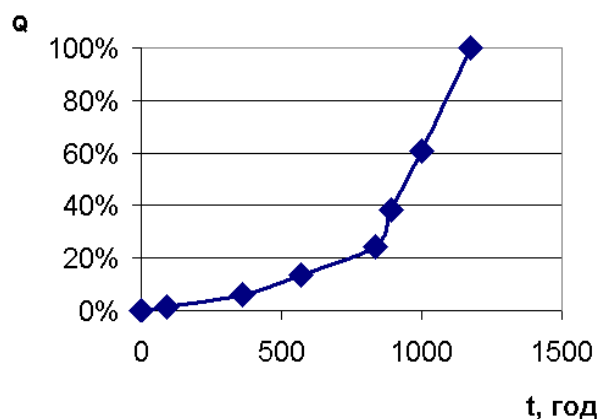


Рисунок 5.1 – Залежність відносних втрат теплової енергії через огороження сушильної камери від часу (наростаючим підсумком від початку сушіння)

Як видно з рис. 5.1, потужність теплових втрат наприкінці сушіння зростає багатократно протягом циклу сушіння. З урахуванням того, що температура навколишнього повітря вдень у літні місяці може лише незначно (на десять градусів або й менше) бути вищою за температуру агента сушіння, то це додатково збільшує варіацію споживаної теплової потужності протягом року.

Що стосується потужності витрат теплової енергії на випаровування води, то як видно з рис. 5.2 (побудованого з використанням даних, наведених в [4] і табл. 3.1), вони залишаються порівняно стабільними протягом циклу сушіння пиломатеріалів (хоча, у загальному випадку, будуть зменшуватись при переході від етапу сталої швидкості сушіння до етапу швидкості сушіння, що спадає).

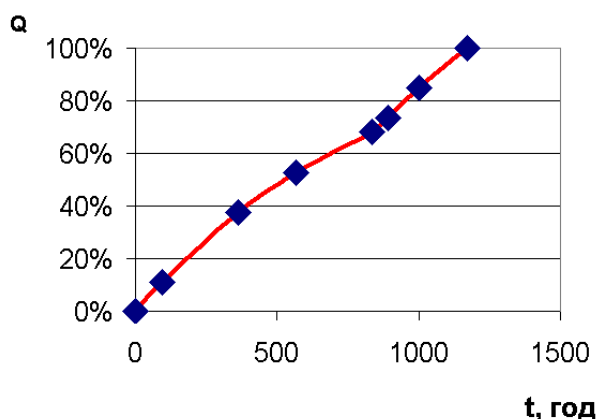


Рисунок 5.2 – Залежність відносних витрат теплової енергії на випаровування води від часу (наростаючим підсумком від початку сушіння)

5.3 Методика оптимізації номінальної потужності енергетичної установки для опалення сушильних камер

Проаналізуємо, як варіація споживаної теплової потужності сушильних камер впливає на витрати енергії палива в енергетичній установці.

Витрати енергії палива в енергетичній установці можна розділити на дві частини:

- залежні від миттєвої потужності енергетичної установки;
- незалежні від миттєвої потужності енергетичної установки.

Прикладами витрат, незалежних від миттєвої потужності енергетичної установки, наприклад, є витрати, обумовлені тепловіддачею від нагрітих поверхонь установки, температура яких не залежить від її миттєвої потужності. Зокрема, це стосується котла та трубопроводів, температура яких обумовлена максимальною температурою теплоносія, використовуваного в сушильному цеху. Передача тепла від них в оточуюче середовище може відбуватися будь-яким способом - кондукцією через проміжні елементи, конвекцією або випромінюванням.

Тож при зменшенні миттєвої потужності зазначені вище втрати тепла залишається незмінними, що призводить до зменшення коефіцієнту корисної дії (ККД) енергетичної установки. Отже, на етапі вибору енергетичної обстановки для опалення камер сушильного цеху особливу увагу слід приділити оптимізації її номінальної потужності, оскільки занадто великий резерв потужності призведе до постійної збільшеної витрати теплової енергії.

Однак, якщо потреби в тепловій енергії для сушильних камер перевищать спроможності енергетичної установки, це призведе до зменшення продуктивності однієї чи кількох сушильних камер.

Отже, постає питання оптимізації номінальної потужності енергетичної установки для опалення сушильних камер з урахуванням указаних факторів. Методику оптимізації номінальної потужності енергетичної установки для опалення сушильних камер в умовах, коли втрати теплової енергії зростатимуть

при її роботі з потужностями меншими, ніж номінальна, та втратами продукції в умовах, коли сумарна потужність, необхідна для роботи сушильних камер, буде перевищувати номінальну потужність енергетичної установки, розробимо з використанням теорії дослідження операцій.

Розпочнемо з визначення середньої потужності споживання сушильної камери:

$$P_{Dr} = \sum_i p_i P_i , \quad (5.1)$$

де P_{Dr} – середня потужність споживання теплової енергії сушильної камери, Вт;

i – етап сушіння;

p_i – імовірність перебування сушильної камери на i -у етапі сушіння;

P_i – потужність споживання сушильної камери на i -у етапі сушіння, Вт;

Тепер визначимо середню потужність споживання теплової енергії всіма сушильними камерами:

$$P_{Dr sum} = \sum_j P_{Dr j} , \quad (5.2)$$

де $P_{Dr sum}$ – середня потужність споживання теплової енергії всіма сушильними камерами, Вт.

Далі визначимо середню потужність споживання енергетичної установки за умови, що потреби сушильних камер у тепловій енергії задовольняються:

$$P_{in} = \sum_j p_j \frac{P_j}{\eta(P_j)} , \quad (5.3)$$

де P_{in} – середня потужність споживання енергії палива енергетичною установкою, Вт;

j – індекс вихідної потужності енергетичної установки;

p_j – імовірність роботи енергетичної установки з j -м значенням вихідної потужності;

P_j – вихідна потужність енергетичної установки, Вт.

Однак, як зазначалось вище, чим вищий запас потужності енергетичної установки, тим більшими є перевитрати палива.

Тож визначимо середню потужність споживання енергії палива енергетичної установки з урахуванням її обмеженої потужності:

$$P_{Out\ lim}(P_{nom}) = \sum_j p_j \min(P_j, P_{nom}), \quad (5.4)$$

де $P_{Out\ lim}$ – середня вихідна потужність енергетичної установки з урахуванням обмеження максимальної потужності, Вт;

P_{nom} – номінальна вихідна потужність енергетичної установки, Вт.

Визначаючи співвідношення (5.4) і (5.2), обчислимо коефіцієнт забезпечення сушильних камер тепловою енергією:

$$k(P_{max}) = \frac{P_{Out\ lim}(P_{max})}{P_{Drsum}}, \quad (5.5)$$

де k – коефіцієнт забезпечення сушильних камер тепловою енергією.

Тепер визначимо середню потужність споживання енергії палива енергетичною установкою з урахуванням її обмеженої потужності:

$$P_{In\ lim}(P_{max}) = \sum_j p_j \frac{\min(P_j, P_{max})}{\eta(\min(P_j, P_{max}))}, \quad (5.6)$$

де $P_{In\ lim}$ – середня потужність споживання енергії палива енергетичною установкою з урахуванням її обмеженої потужності, Вт;

На цій основі визначимо коефіцієнт споживання енергії, який характеризує вплив обмеження потужності енергетичної установки на споживання нею енергії палива та вплив номінальної вихідної потужності енергетичної установки на цей коефіцієнт:

$$K(P_{max}) = \frac{P_{In\ lim}(P_{max})}{P_{In}}, \quad (5.7)$$

де K – коефіцієнт споживання енергії.

Для подальшого порівняння впливу обмеженої потужності енергетичної установки на зменшення виробництва висушених пиломатеріалів і зменшення витрат палива визначимо відповідні показники.

Зменшення вартості продукції внаслідок обмеження потужності енергетичної установки визначимо, вважаючи, що зменшення коефіцієнта забезпечення сушильних камер тепловою енергією призводить до пропорційного зменшення виробництва висушених пиломатеріалів:

$$\Delta B(P_{max}) = B k(P_{max}), \quad (5.8)$$

де ΔB – зменшення обсягу виробництва пиломатеріалів внаслідок обмеження потужності енергетичної установки, грн;

B – обсяг виробництва пиломатеріалів без врахування обмеження потужності енергетичної установки, грн.

Тепер визначимо зменшення споживання палива (у грошовому вимірі) внаслідок обмеження потужності енергетичної установки:

$$\Delta\Pi(P_{nom}) = \Pi K(P_{nom}), \quad (5.10)$$

де $\Delta\Pi$ – зменшення витрат на паливо внаслідок обмеження потужності енергетичної установки, грн;

Π – витрати на паливо без врахування обмеження потужності енергетичної установки, грн.

Далі обчислимо результуючий ефект від обмеження потужності енергетичної установки:

$$E(P_{nom}) = \Delta\Pi(P_{nom}) - \Delta B(P_{nom}), \quad (5.11)$$

де E – ефект від обмеження потужності енергетичної установки, грн.

На цій основі сформулюємо задачу оптимізації потужності енергетичної установки:

$$E(P_{nom}) \rightarrow \max_{P_{nom}} \Rightarrow P_{nom \text{ opt}}, \quad (5.12)$$

де $P_{nom \text{ opt}}$ – оптимальне значення номінальної потужності енергетичної установки, Вт.

6 ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКО-ТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛОНОСІЯ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ СУШИЛЬНИХ КАМЕР НА ПОЧАТКОВИХ ЕТАПАХ СУШІННЯ

Для підвищення ККД у сучасних енергетичних установках використовують конденсацію вологи, яка міститься в топкових газах. Це дає змогу в значній мірі використовувати вищу теплоту згоряння палива, а не нижню теплоту згоряння (як в установках без такої конденсації). Але для того, щоб така конденсація вологи відбувалася, необхідно використовувати теплоносій порівняно низької температури для охолодження системи конденсації (зазвичай, не вище 40°C). Отже, приблизно таку температуру повинен мати теплоносій і на вході, і на виході системи конденсації.

Тож для цього є необхідним потік порівняно прохолодної води, яка буде нагріватися в системі конденсації, та потім тепло якої буде використовуватись. Звернемо увагу на те, що використання такої підігрітої води повинно відбуватися, як і робота сушильних камер, цілодобово та круглий рік, що практично унеможлиблює її використання як джерела теплоти для побутових потреб.

Проаналізуємо можливість використання теплоносія, нагрітого в системі конденсації енергетичної установки, для опалення сушильних камер. Для цього вернемо увагу на використання агента сушіння з температурою не вище 40°C у програмах сушіння деревини.

Відповідно до [2], агент сушіння такої температури рекомендується використовувати при початковому прогріванні та сушінні від початкової вологості до вологості близько 40% пиломатеріалів порівняно великої товщини з акації, граба, ясена, дуба, в'яза, ільма, береста та горіха.

У програмах сушіння [16] агент сушіння з температурою не вище 40°C рекомендується використовувати при сушінні пиломатеріалів граба, бука, ясена та дуба.

У деяких програмах сушіння [15] також використовується агент сушіння з температурою не вище 40 °C.

У таблиці 6.1 наведено результати обчислень частин втрат теплової енергії через огороження сушильної камери та витрат теплової енергії на випаровування вологи при сушінні необрізних дубових дощок товщиною 50 мм відповідно до режиму, наведеного в [4].

Таблиця 6.1 – Частини загальних витрат теплової енергії, які мають місце при температурі агента сушіння не вище 40°C при сушінні необрізних дубових дощок товщиною 50 мм

Різновид витрат енергії	Частина втрат при температурі агента сушіння не більше 30 °C	Частина втрат при температурі агента сушіння не більше 34 °C
Витрати теплової енергії через огороження сушильної камери	13%	24%
Витрати теплової енергії на випаровування вологи	53%	68%

Отже, як видно з табл. 6.1, більша частина витрати теплової енергії на випаровування вологи та близько 1/4 витрати теплової енергії через огороження сушильної камери може відбуватися при температурі агента сушіння не вище 40°C.

Таким чином, для опалення сушильних камер, принаймні на початкових етапах сушіння, може виявитись доцільним використовувати теплоносій з порівняно невисокою температурою. Це можна здійснити, якщо застосувати ще один контур циркуляції теплоносія, нагрівання якого буде відбуватися в системі конденсації вологи топкових газів енергетичної установки. Відповідно, у систему опалення сушильної камери необхідно додати керовані від системи управління електроклапани, які підключатимуть калорифери до контуру

теплоносія високої температури чи контуру теплоносія низької температури залежно від етапу програми сушіння.

Звісно, якщо потужності контуру теплоносія низької температури не вистачатиме для підтримання заданої температури агента сушіння в камері, то може здійснюватися підключення камери до контуру теплоносія високої температури, однак при цьому ККД енергетичної установки буде знижуватися внаслідок зменшення ефективності роботи системи конденсації вологи топкових газів, а витрати палива, відповідно, зростатимуть.

Що стосується початкового нагрівання то його доцільно здійснювати (або ж принаймні розпочинати) від контуру теплоносія високої температури (навіть при невисокій заданій температурі агента сушіння в камері) для пришвидшення цього етапу технологічного процесу.

Звернемо також увагу на те, що для отримання теплоносія зазначеної температури можуть достатньо ефективно використовуватися технічні засоби відновлювальної енергетики, такі як сонячні нагрівачі [5] та теплові насоси [24] (ефективність роботи яких суттєво зростає при порівняно невеликій різниці температур теплоносія на вході та на виході насосу).

ВИСНОВКИ

1. Кінцева вологість деревини суттєво впливає на витрати енергії при її сушінні. Так, обробкою літературних даних встановлено, що при сушінні необрізних дубових дощок товщиною 50 мм зменшення кінцевої вологості деревини на 1% призводить до збільшення втрат теплової енергії через огороження сушильної камери на 3,25%, а витрат енергій на випаровування води - на 1,4%.

2. Визначення числових характеристик рівноважної вологості деревини, обчислених у залежності від температури та відносної вологості повітря за 2018-2021 і 2023 у м. Харків призвело до наступних результатів:

- математичне сподівання рівноважної вологості: 14,2%;
- середньоквадратичне відхилення рівноважної вологості: 0,5%;
- коефіцієнт варіації рівноважної вологості: 3,7%.

Рациональним значенням кінцевої вологості при сушінні деревини для експлуатації в зовнішніх умовах у м. Харків, встановленим за результатами цих обчислень, є 14%.

3. Оптимізацію номінальної потужності енергетичної установки для опалення сушильних камер доцільно здійснювати, розглядаючи теплову потужність сушильної камери як випадкову величину з певними числовими характеристиками. З урахуванням того, що зменшення номінальної потужності енергетичної установки нижче пікового споживання сушильних камер призведе до збільшення ККД (і, відповідно, зменшення втрат теплової енергії), раціональне значення цієї потужності доцільно вибрати з урахуванням можливого зменшення продуктивності камер за критерієм максимуму економічного ефекту.

4. Для опалення сушильних камер, принаймні на початкових етапах сушіння, може виявитись доцільним використовувати теплоносії з порівняно невисокою температурою. Це можна здійснити, якщо застосувати ще один контур циркуляції теплоносія, нагрівання якого буде відбуватися в системі

конденсації вологи топкових газів енергетичної установки. Відповідно, у систему опалення сушильної камери необхідно додати керовані від системи управління електроклапани, які підключатимуть калорифери до контуру теплоносія високої температури чи контуру теплоносія низької температури залежно від етапу програми сушіння.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Білей П. В., Павлюст В. М. Сушіння та захист деревини. Навчальний посібник. Львів: ТЗОВ Кольорове небо, 2008. -312 с.
2. Білей П. В., Соколовський І. А., Павлюст В. М., Кунинець Є. П. Керівні технічні матеріали з технології камерного сушіння пиломатеріалів. Ужгород: Карпати, 2010. 140 с.
3. Градиський Ю.О., Д'яконов В.І., Соседко М.О., Шевченко С.А. Термодинамічний підхід до оптимізації сушіння подрібненої деревини активним вентиляванням. *Журнал з менеджменту, економіки та технологій*. 2024. № 2. С. 85-93. URL: <https://journal-met.kh.ua/index.php?do=download&id=8627&area=static> (дата звернення: 10.10.2024).
4. Губер Ю. М., Гуменюк Ж. Я., Петришак І. В. Експериментальні дослідження тепловтрат через огороження сушильної камери. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018, т. 28, № 11. С. 85-90. DOI: 10.15421/40281116
5. Озарків І. М., Данчук М. І., Дерех О. І., Кобринович М. С. Концепція використання солей-кристалогідратів в сонячних колекторах сушильних камер. *Наукові праці Лісівничої академії наук України: збірник наукових праць*. 2015. Вип. 13. С. 231-236.
6. Пінчевська О. О., Спірочкін А. К. Технологія сушіння і захисту деревини. Частина 1. Навчальний посібник. Київ, 2021. Ч.1. 171 с.
7. Суска А.А., Д'яконов В.І., Шевченко С.А. Композитний паливний брикет зі збільшеним терміном зберігання. *Журнал з менеджменту, економіки та технологій*. 2024. № 1. С. 176-187. URL: <https://journal-met.kh.ua/index.php?do=download&id=8614&area=static> (дата звернення: 14.08.2024).
8. Сучасне лісосушильне та лісопильне устаткування / О. О. Пінчевська, З. С. Сірко, В. С. Коваль, Н. В. Марченко. Харків: ПФ “Центрінформ”, 2005. 176 с.

9. Тепломасообмінні процеси деревообробки: підручник / Білей П. В., Петришак І. В., Соколовський І. А., Сорока Л. Я. Львів: ЗУКЦ, 2013. 376 с.
10. Bošnjaković Mladen, Soldan Christian, Veljić Nataša. Influence of moisture content in wood chips on the boiler operation. 2020. 7th International Conference “VALLIS AURE” 2020. P. 0091-0101
11. Chang Kuck Moon. Seasonal Equilibrium Moisture Content (EMC) Variation and Prediction for Wood in Southern Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 1981. Vol. 54. Issue 1. P. 36-40.
12. Datos históricos climáticos en Ucrania. URL: <https://www.tutiempo.net/clima/ucrania.html> (дата звернення 08.11.2024)
13. Dietsch P., Gamper A., Merk M., Winter S. Monitoring building climate and timber moisture gradient in large-span timber structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2014. Vol. 5. P. 153-165.
14. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652.
15. Dry Kiln Operator's Manual. Agriculture Handbook No. 188. Edited by William T. Simpson. United States Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin. 1991.
16. Drying Schedules. NARDI Group. 2010,
17. Green kilns - Our Innovation. URL: <https://www.brunner-hildebrand.de/en/innovation/17kilns> (дата звернення 05.06.2024)
18. Hussam Jouhara, Navid Khordehgah, Sulaiman Almahmoud, Bertrand Delpech, Amisha Chauhan, Savvas A. Tassou. Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018. Vol. 6. P. 268-289. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.04.017
19. Jae-Myeeng Jo, Sun-Goo Kang, Chong-Supp Shim, Hee-Suk Jung. Annual Equilibrium Moisture Content of Wood in Korea. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 1982. Vol. 10. Issue 2. P. 3-11.

20. Lei Gao, Andrew Fix, Tamoy Seabourne, Yong Pei, Patrick Adegbaye, Yunho Hwang, Bao Yang, Reinhard Radermacher. A comprehensive review of heat pump wood drying technologies. *Energy*. 2024. Vol. 311. 133241
21. Luna D., Nadeau J.-P., Jannot Y. Solar timber kilns: State of the art and foreseeable developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. 13. 1446–145
22. Marcus Schiere, Bettina Franke, Steffen Franke, Andreas Müller. Comparison between Predicted and Measured Moisture Content and Climate in 12 Monitored Timber Structures in Switzerland. *Buildings*. 2021. 11. 181. DOI: 10.3390/buildings11050181
23. Minea Vasile. Efficient Energy Recovery with Wood Drying Heat Pumps. *Drying Technology*. 2012. 30. DOI: 10.1080/07373937.2012.701261
24. Oliinyk Halyna. Study of the Efficiency of Using a Heat Pump in the Heat Supply System of a Private House. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2022. № 3 (107), P. 15-20. DOI: 0.33108/visnyk_tntu2022.03.014
25. Philip H. Mitchell. Calculating the Equilibrium Moisture Content for Wood Based on Humidity Measurements. *BioResources*. 2018. 13(1). P. 171-175.
26. Phil Mitchel. Wood Products Notes. The Equilibrium Moisture Content of Wood in Exterior Locations in the United States: An Update. North Carolina State University. Department of Forest Biomaterials. 2016. 10 p.
27. William T. Simpson. Equilibrium Moisture Content of Wood in Outdoor Locations in the United States and Worldwide. United States Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. Research Note FPL-RN-0268.
28. William T. Simpson. Predicting Equilibrium Moisture Content of Wood by Mathematical Models. *Wood and Fiber*. 1973. Vol. 5. No. 1. Spring. P. 41-49.
29. Wood handbook - wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2021. 543 p.