

Згідно з формою № Н-9.02
Наказ Міністерства освіти і
науки, молоді та спорту України
29 березня 2012 року № 384

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Інститут деревообробних технологій і дизайну

Кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини та
безпеки життєдіяльності

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

на тему «Дослідження загального екологічного сліду в процесі термічної
модифікації деревини»

Виконав: студент 6 курсу, групи ДМТ-61м

Спеціальність 187 «Деревообробні та
меблеві технології»

Суль Б.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник Андрашек Й.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Кушпін А.С.
(прізвище та ініціали)

2
Згідно з формою № Н-9.02

Наказ Міністерства освіти і науки

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Інститут	Деревообробних технологій і дизайну
Кафедра	Технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності
Освітньо-кваліфікаційний рівень	Магістр
Спеціальність технології»	187 «Деревообробні та меблеві технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф.

Кшивецький Б.Я.

“15” вересня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Суль Богдану Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: “Дослідження загального екологічного сліду в процесі термічної модифікації деревини”

Керівник роботи: Андрашек Йосип Володимирович, доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом вищого навчального закладу від “10” червня 2025 року № С- 344

2. Строк подання студентом роботи до 20.12.2025 року.

3. Вихідні дані до роботи _____

Різні процедури покращують властивості деревини, а завдяки екологічній прийнятності, термічна обробка деревина є однією з найчастіше використовуваних. Через її широке використання виникла потреба дослідити екологічні наслідки такого процесу термічної обробки, а також вплив шкідливих речовин та видів сполук, що вивільняються під час процесу, та їхня токсичність.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

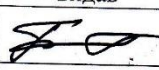
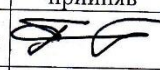
1. Аналіз стану питання та задачі досліджень.

2. Дослідження екологічного сліду технологічного процесу термічної модифікації деревини.

3. Охорона праці і довкілля.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Конструкція термокамери, технологічна схема виготовлення термічно
 модифікованої деревини та слайди з презентації результатів теоретичних і
 експериментальних досліджень

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Доц. Сомар Г.В.		

7. Дата видачі завдання _____ 03.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Аналіз стану питання	до 01.10.25	
	Експериментальні дослідження	до 15.11.25	
	Обробка результатів експериментальних досліджень	до 10.12.25	
	Оформлення пояснювальної записки і підготовка презентації	до 20.12.25	

Студент



Суль Б.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



Андрашек Й.В.

(прізвище та ініціали)

Анотація

В Магістерській роботі з дослідження екологічного сліду в технологічному процесі виготовлення термічно модифікованої деревини на тему: “Дослідження загального екологічного сліду в процесі термічної модифікації деревини” (“Study of the total ecological footprint in the process of thermal modification of wood”) наведено огляд хімічних змін під час термічної обробки деревини та їхнього складу стосовно впливу на навколишнє середовище. Деревина є одним з найбільш використовуваних будівельних матеріалів завдяки своїм фізичним та технологічним властивостям. Різні процедури покращують її властивості, а завдяки екологічній прийнятності, термічна обробка деревини є однією з найчастіше використовуваних. Термічна обробка викликає зміни клітинних стінок та деградацію основних компонентів структури деревини (целюлоза, геміцелюлози, лігнін) та екстрактивні речовини. Геміцелюлози, як найнестабільніші компоненти руйнуються першими, а потім целюлоза та остаточно лігнін. Результати деградації у зміні хімічного складу та хімічних реакціях зміни кольору, що спричиняє технологічну проблему оскільки обробка деревини прагне зробити колір максимально однорідним. Однорідність кольору та колірний відтінок отримують в процесі обробки парою та термічної обробки. Температура обробки є найважливішим фактором, що спричиняє всі зміни. Через його широке використання виникла потреба дослідити екологічні наслідки такого процесу термічної обробки, а також вплив шкідливих речовин та видів сполук, що вивільняються під час процесу, та їхня токсичність. Приведені результати кількісного аналізу шкідливих речовин, що виділяються в процесі термічної модифікації деревини. Встановлені основні чинники шкідливих речовин стосовно їх впливу на довкілля. Розроблені міроприємства із забезпечення очищення викидів, що утворюються в процесі термічної модифікації деревини для запобігання шкідливого впливу на довкілля. Виконані дослідження з енергоспоживання, як найважливішого чинник впливу на довкілля на етапі

виробництва термічно модифікованої деревини. Показана доцільність заміни термомасла і електричної енергії для нагрівання деревини в термокамері на топкові гази не тільки з економічної, але й з екологічної точки зору.

Ключові слова: термічна модифікація деревини ; деградація деревини ; фізичні та хімічні властивості ; механічні властивості ; переваги та ризики.

Abstract

In the Master's thesis on the study of the ecological footprint in the technological process of production of thermally modified wood on the topic: "Study of the total ecological footprint in the process of thermal modification of wood" an overview of chemical changes during heat treatment of wood and their composition in relation to the impact on the environment is given. Wood is one of the most used building materials due to its physical and technological properties. Various procedures improve its properties, and due to its environmental acceptability, wood heat treatment is one of the most commonly used. Heat treatment causes changes in cell walls and degradation of the main components of the wood structure (cellulose, hemicellulose, lignin) and extractive substances. Hemicelluloses, as the most unstable components, are destroyed first, followed by cellulose and finally lignin. The results of degradation are in the change in chemical composition and chemical reactions of color change, which causes a technological problem since the treatment of wood seeks to make the color as uniform as possible. Color uniformity and color shade are obtained in the process of steam treatment and heat treatment. Processing temperature is the most important factor causing all changes. Due to its widespread use, it became necessary to investigate the environmental consequences of such a heat treatment process, as well as the effects of harmful substances and types of compounds released during the process and their toxicity. The results of quantitative analysis of harmful substances released in the process of thermal modification of wood are presented. The main factors of harmful substances in relation to their impact on the environment have been identified. Measures have been developed to ensure the purification of emissions generated in the process of thermal modification of wood to prevent harmful effects on the environment. Studies have been carried out on energy consumption as the most important factor of environmental impact at the stage of production of thermally modified wood. The expediency of replacing thermal oil and electrical energy for heating wood in a thermal chamber with flue

gases is shown not only from an economic, but also from an environmental point of view.

Keywords:thermal modification of wood; degradation of wood; physical and chemical properties; mechanical properties; benefits and risks.

Зміст

1. Хімічні зміни в процесі термічного модифікування деревини.....	11
1.1. Зміни та деградація основних хімічних компонентів	11
1.2. Екологічні проблеми.....	15
1.3. Мета роботи і задачі виробничих досліджень.....	21
2. Методика і результати виробничих досліджень.....	23
2.1. Методика проведення виробничих досліджень	23
2.2. Результати виробничих досліджень.....	31
2.3. Висновки і рекомендації.....	38
3. Охорона праці.....	39
3.1. Техніки безпеки роботи з термокамерою.....	39
3.2. Заходи з пожежної безпеки.....	41
Список використаних джерел.....	44
Додатки.....	48

Вступ.

Деревина є одним з найпоширеніших будівельних матеріалів з дуже хорошими естетичними, акустичними, тепло- та теплоізоляційними властивостями і механічними властивостями; але з деякими недоліками- такі як розмірна анізотропна нестабільність через гігроскопічність та низька міцність. Для покращення властивостей використовується термічна обробка деревини, яка завдяки своїй екологічній прийнятності стала кращим варіантом порівняно з хімічною модифікацією (яка також дуже часто використовується). Термічна обробка деревини – це процес, під час якого хімічна структура клітинних стінок змінюється лише за наявності тепла, тиску і вологи в середовищі з низьким вмістом кисню в середовищі без додавання хімікатів. Структурна модифікація приводить до таких змін, як зменшення щільності для води, покращена розмірна стабільність, більша стійкість до біорозкладу, рівномірні зміни кольору до темніших тонів. Водночас є негативні зміни, такі як зниження механічних властивостей, поява тріщин та світлового вицвітання в процесі експлуатації. Процес складається з сушіння, обробки паром та термічна модифікація. Тривала термічна модифікація підвищує розмірну стабільність та довговічність деревини, але водночас зменшує щільність і механічні властивості (крім твердості). Це призводить до крихкості та підвищене розтріскування. Продовжуючи тривалість процесу через хімічні зміни, колір деревини також змінюється. Спостережувані зміни- у структурі клітинних стінок можна головним чином пояснити до розпаду геміцелюлози, оскільки вона є термічно менш стабільною, ніж целюлоза, тоді як лігнін деструктирується в широкому діапазоні температур. Зміна кольору є хімічно дуже складне явище, яке досліджувалося протягом тривалого часу. Тривалий вплив тепла приводить до темніння деревини (що часто є метою) або вирівнює колір деревини між ядром і заболонню. З деякими видами деревини, обробка паром може спричинити побічні ефекти, такі як зниження міцності або поява

тріщин. Загалом, термічну обробку деревини можна класифікувати як процес, що покращує його поточні властивості або обробляє деревину таким чином, щоб вона набула нових властивостей. Після закінчення терміну служби така деревина не повинна представляти небезпеку для навколишнього середовища, більшу ніж немодифікована деревина. Оброблену деревину слід розглядати як нетоксичну і яка не повинна виділяти жодних небезпечних речовин під час обробки або на пізніших етапах використання. Через це постає потреба дослідити викиди шкідливих речовин від таких процесів на довкілля та екологію загалом.

1. Хімічні зміни в процесі термічного модифікування деревини.

1.1. Зміни та деградація основних хімічних компонентів.

Термічна обробка викликає зміни клітинної стінки та структури полімерів, що впливає на їхні властивості та також безпосередньо впливає на хімічне розкладання деревини, тобто деградація його основних компонентів (геміцелюлози, целюлоза, лігнін) та екстрактивні речовини (Рисунок 1.1.).



Рисунок 1.1. Механізми хімічних реакцій термічної модифікації деревини.

Хімічні зміни, спричинені нагріванням, залежать від тривалості та температура обробки, де температура є головним фактором. В межах температури від 20 до 100°C деревину сушать, починаючи з втрати вільної води і закінчуючи втратою зв'язаної води до досягнення бажаного вмісту вологи (МС). При використанні сухого способу виробництва термодеревини її висушують практично до абсолютно сухого стану.

За температури від 180 до 250 °С, яка зазвичай використовується для термічної модифікації дерева, піддається значній хімічній обробці перетворення, а за температур вище 250 °С процес обуглювання починається з утворення CO₂ та інші продукти піролізу (Естевес та Перейра, 2009). Кубовський та інші (2020) виконали термічну модифікацію-фракціонування дерева за температури від 160 до 210 °С і дійшов висновку, що чим вища температура обробки, тим краща довговічність, стабільність та біологічні властивості дерева стали (за винятком механічних властивостей, що знижуються в таких умовах). ІЧ-спектроскопія з перетворенням Фур'є показали, що термічна обробка призводить до збільшення кількості карбоксильних груп у лігніні з розщепленням аліфатичних бічних ланцюгів та де-етоксильовання. Розкладання геміцелюлози призводить до деацетилювання, а оцтова кислота, що вивільняється, каталізує гідроліз полісахаридних ланцюгів. Цей процес відбувається більш помітно за температури 180 °С, що призводить до зменшення молекулярної маси та збільшення полідисперсності. Окрім розщеплення полісахариду ланцюги зшивання реакції мають місце за температури 210 °С, зі збільшенням молекулярної маси та полідисперсії. Фенгель та Вегенер (1984) стверджують, що геміцелюлоза є найбільш чутливими структурним компонентом і піддаються термічній деградації, оскільки вони є першими які розкладаються за температур від 160 до 260 °С. Реальний стан для цього полягає в їхній низькій молекулярній масі та розгалуженій структурі, яка сприяє швидшому розкладанню порівняно з іншими компонентами, які присутні в деревині. Однак, Фунаока та ін.(1990) зазначили, що деградація геміцелюлози починається вже за температури 100 °С, а целюлоза і вміст лігніну залишається постійним до 150 °С.

Розкладання целюлози призводить до зниження гідроксильних груп та утворення О-ацетильних груп. Шляхом подальшого створення перехресних зв'язків між деревними волокнами, деревина стає більш гідрофобною.

Одночасно целюлоза розкладається з утворенням оцтової та мурашиної кислот, а співвідношення лігніну збільшується по мірі екстракції речовини з геміцелюлози та целюлози які зв'язуються з ним. Кристалічність целюлози збільшується шляхом термічної модифікації до 200 °С через деградацію його аморфної частини, що пов'язано не лише з температурою, а й з тривалістю термічної обробки та призводить до зниження доступності здатність гідроксильних груп до молекул води. Mitsui in.(2008) припустив, що гідроксильні групи в целюлозі розкладаються в такому порядку: аморфна, напівкристалічна та кристалічна області. Оцтова та мурашина кислота, що утворюється під час термічної обробки, збільшується при гідролізі геміцелюлози та целюлози. Деградація лігніну помітна за нижчих температур, але відбувається з нижчою швидкістю розкладання полісахаридів, тоді як за вищих температур спостерігається реакція конденсації та збільшення молекулярної ваги. У дослідженні, проведеному Бургуа та Гайон (1988) на приморській сосні повторно показали, що вміст лігніну за тієї ж температури збільшувався, коли тривалість процесу була більшою ніж звичайно. Такі ж результати були зареєстровані для інших порід деревини де вміст геміцелюлози значно вищий та фактично зменшувався зі збільшенням температури та тривалості оброблення. Зниження вмісту геміцелюлози було виявлено, що він більший, ніж у целюлозі. Значного зниження вмісту геміцелюлози почалося за температури вище 180 °С. Через структурну гетерогенність геміцелюлози, це важко виявити під впливом тільки тепла. Ксилантосан є найбільш реакційноздатною деревною геміцелюлозою, і пентозани зазвичай дуже чутливі до деградації та реакції дегідратації. Наприклад, вміст пентозану у сосновій деревині, обробленій протягом 7 годин при 130 °С зменшився з 11% до 9,1%. Як зазначалося, вміст целюлози було зменшено порівняно з контрольною вибіркою, але меншою мірою в порівнянні з геміцелюлозами. Найбільші та найменші найкращі зміни вмісту целюлози при всіх термічних обробках були виявлені при 170 °С протягом 4 годин та при 210 °С протягом 12 години (Тюмента in., 2010). Підвищуючи температуру

вище 200 °С, термічний розклад целюлози і утворення летких продуктів відбувається швидко. Котілайнен (2002) дійшов висновку, що найінтенсивніший термічний розпад відбувається за температури в діапазоні від 200 °С до 260 °С. Нижча термостабільність як різниця між геміцелюлозою та целюлозою зазвичай пояснюється відсутністю кристалічності. Зміни клітинних стінок та окремих хімічних компонентів деревини також призводять до таких змін, як забарвлення. Перванта ін.(2006) та Кох (2008) стверджують, що це одне з найпоширеніших явищ, що трапляються під час обробки паром та сушінні деревини. Вважається, що основні фактори, що беруть участь у хімічних реакціях є окисненням та конденсацією фенольних сполук, але зміни кольору також можуть бути спричинені шляхом гідролізу, хоча в багатьох випадках причини є невідомо. Досліджуючи вплив геміцелюлози, лігніну та екстрактивних речовин на колір, Сундквіст та Морен (2012) виявили, що екстрактивні речовини беруть участь у формуванні кольору під час гідротермальної обробки деревини. Це також було доведено Вібергом (1996) у його дослідження сосни звичайної (Сосна звичайна) та в Норвегії ялина (Ялина звичайна). Результати показали, що протягом процесу сушіння екстрактивні речовини рухаються до поверхню, роблячи її червонішою, тоді як речовини, що дають жовтий колір, залишаються всередині. Вище зазначені автори зробили висновок, що ця зміна кольору зумовлена концентрацією низькомолекулярних вуглеводів та нітрогену на поверхні під час сушіння деревини. Подібні результати були отримані методом Сандовала-Торессата ін.(2012) для висушених у вакуумі зразків дуба. Вони дійшли висновку, що насичення збільшується зі збільшенням температури та що жовтий відтінок посилюється тепловий ефект з червоним відтінком, пов'язаним з екстракцією. Зміни кольору вимірювали на поверхні оскільки такі речовини, як цукри, феноли, антиоксиданти та інші рухаються від центру до поверхні деревини шляхом випаровування води та утримуються там. Згідно з Вайтом та Дітенбергером (2001), Теплове потемніння деревини спричинене термічним розкладом геміцелюлози та лігніну і може починатися

при температурі нижче 65 °С (залежно від рН деревини, вологості) вміст ґрунту, нагрівальне середовище та період експозиції, а також породи деревини). Косиковата ін.. (2019) використано ЯМР (обертання з перехресною поляризацією вуглецю за допомогою магічного кута обертання) спектроскопія ядерного магнітного резонансу для характеристики теоретичних структурних змін в полімерах клітинної стінки під час сушіння та визначена часткова деполімеризація лігніну та зміни в аморфних та кристалічних частинах целюлози. Це траплялося, коли деревину обробляли перегрітою парою при температурі 135 °С, що також вплинуло на зміну кольору. Перванта ін. (2008) стверджують, що відомо, що нагрівання зменшує вміст соку яскравість деревини (у всіх порід), з різною інтенсивністю, залежно від вологості, температури та тривалості процесу. Внутрішній джерело процесу на зміну кольору волоського горіха вивчав Шар'єта ін. (1998). Колір заболоні змінювався паралельно з тривалістю процесу, зі зменшенням значення яскравості після збільшення значення червоного компонента. Браунер і Конвей (1994) також вивчали зміну кольору волоського горіха та заявили, що чорний горіх (заболонь) змінює колір після 4-6 годин обробки парою при температурі 100-190°С 120 °С. У цьому конкретному випадку потемніння було в ширину та глибину. Бергер (2001); Сундквіст (2002); Алента ін.(2002); Шар'єта ін.. (2002); Кохта ін.(2003); Стенудд (2004); Томпсонта ін.. (2005); Роуелл (2006) пропонують переконатися, що основні реакції зміни кольору, спричинені в деревині під час обробки парою - це окислення, гідроліз, полімеризація фенольних сполук, ферментативні реакції та термічний розпад лігніну та геміцелюлози.

1.2. Екологічні проблеми.

Зростаюче використання термічно оброблених матеріалів зробило необхідним дослідити вплив шкідливих речовин, що утворюються в процесі таких обробок на навколишнє середовище, зокрема особливо щодо можливого

утворення озону в низах атмосфери або тропосферного озону, що негативно впливають на людей, тварин і рослини. Токсичність шкідливих речовин, а також їх типи, вивільнені під час процесу, були перераховані. Світові стандарти встановлюють суворі обмеження на викиди летких речовин органічних сполук, що утворюються під час сушіння деревини. У Європі ці обмеження наразі передбачено Регламентом про граничні значення для забруднювачів повітря зі стаціонарних джерел [NN 42/2021] та Положення про граничні значення впливу небезпечних речовин на роботі та на біологічних гранично допустимих значеннях використання [NN 13/2009]. Гранично допустимі значення впливу є середніми концентраціями речовин (газів, парів, аерозолів, пил) у повітрі на робочому місці в зоні дихання працівників за температури 20 °C та тиску повітря 1013 мбар, що, згідно з сучасними даними, не завдавати шкоди здоров'ю протягом восьми годин щоденного робочого часу. У таблиці 1.1 наведено гранично допустимі значення впливу для речовини, які найчастіше отримують шляхом термічної обробки деревини, можливих небезпек, які вони спричиняють, та їхній шкідливий вплив.

Гранично допустимі значення впливу шкідливих речовин, що містяться в результаті термічної обробки деревини

Таблиця 1.1.

Речовина	Гранично допустимі значення впливу, мг/м ³	Небезпеки та шкідливий вплив
Ацетальдегід	90	Подразнює слизові Канцерогенність
Формальдегід	2,5	Дуже токсичний Канцерогенність
Метанол	260	Дуже токсичний Шкідливий для шкіри Легкозаймистий
Мурашина кислота	9	Їдкий
Отова кислота	25	Їдкий

Дослідження летких органічних сполук (ЛОС) в атмосфері показало, що хімія атмосфери є складним, а їхня деградація та трансформація реакції можуть відбуватися в газовій та водній фазах. Органічні екстракти, що виділяються під час процесу сушіння деревини містять терпени, метанол, оцтову кислоту, формальдегід, смоляні та жирні кислоти. У звичайній деревині під час перебування в термокамері такі сполуки потрапляють у атмосферу у вигляді туману і чути неприємні запахи які можуть викликати занепокоєння щодо навколишнього середовища та у деяких випадках проблеми зі здоров'ям. Харлі та Касс (1994) вказують на те, що деякі токсичні сполуки містяться в навколишньому повітрі, утворюються в атмосфері як продукти окислення інших летких органічних сполук, а ці продукти окислення, наприклад, α -пінен, формальдегід, ацетон, пінональдегід та гліюксаль. Також були знайдені терпени які швидко реагують з озоном, гідроксильними або нітратними радикалами для отримання різних органічних сполук. Макдональдта ін.. (2002) провели дослідження сосни та виявили, що акумулятивні компоненти конденсуються з водяною парою під час процесу вакуумного сушіння. Цими ЛОС були переважно монотерпени, метанол, формальдегід, фурфурол та дитерпени. Крім того, було помічено, що кількість кисню та вуглецю свідчать про повторне збільшення концентрації органічних сполук. Бічота та ін. (1966) також виявили шкідливі речовини, такі як мурашина, оцтова та левулінова кислоти, фурфурол, гідроксиметилфур-фурал, формальдегід та ацетальдегід в аналізі конденсату при вакуумному сушінні ясеня, бука та дуба. Аналіз конденсату, отриманого під час сушіння каліфорнійської сосни (Сосна променева) в експериментальній вакуумній сушарці показала, що конденсат містив 10% монотерпенів та спиртових монотерпенів (ендоборнеол, α -терпінеол та 1,4-терпінеол), метанол, оцтова кислота, формальдегід, фурфурол та дитерпени як органічні сполуки. Значення БСК (міра кількості кисню, необхідного бактеріям для розкладання

(наприклад, органічні компоненти, присутні у воді/стічних водах) і ХСК (хімічне споживання кисню; тобто загальне вимір'яне використання всіх хімічних речовин (органічних та неорганічних) у воді/стічні води), для експериментального конденсату з вакуум-сушарки вказує на той факт, що конденсат потрібно очищувати для того, щоб зменшити концентрацію органічних сполук. За даними Мейєса та Оксанена (2002), викиди ЛОС від термічно обробленої деревини є нижчими в порівнянні з висушеною на повітрі деревиною, оскільки викиди терпенів, таких як пінен, камфен та лімонен під час сушіння необробленої деревини вищі, ніж для термічно обробленої деревини. Подібні результати були отримані Манніненом та ін. (2002), чий результати показують, що викиди ЛОС від висушеного на повітрі білої сосна (Сосна звичайна) були приблизно у вісім разів вищими ніж з термічно обробленої деревини та склалися з α -пінен, 3-карнен, гексанал, 2-фуранкарбоксальдегід, оцтова кислота та 2-пропанон. Пітерста ін.(2008) встановив, що фурфурал та 5-метилфурфурал є основними викидами з термічно обробленої деревини. Де-які дослідження, в яких, застосовували теплове оброблення незалежно від температури, формальдегід утворився внаслідок розпаду лігніну та інших вуглеводні.

Висновки за результатами літературних досліджень.

Термічна обробка є одним з найпоширеніших видів обробки деревини, яке призводить до змін у структурі клітинної стінки, деградації основних компонентів (геміцелюлози, целюлози та лігніну) та екстрактивних речовин, а також зміни у хімічному складі. Зміни, що відбуваються внаслідок термічної обробки залежить від температури та тривалості оброблення, і значною мірою від способу здійснення термічної модифікації через що результати відрізняються для тієї ж породи деревини. Оброблена деревина призводить до зниження гігроскопічності з позитивним впливом на розмірну стабільність, довговічність, але дуже часто з негативним впливом на механічні властивості,

які знижуються (за винятком твердості, що призводить до збільшення крихкості). У дослідженнях деградації основних хімічних компонентів деревини, більшість результатів показали, що геміцелюлоза є найбільш нестабільним компонентом, і вона є першою яка розкладається через її низьку молекулярну масу та розгалужену структуру. Далі йде целюлоза, яка є термічно більш стабільною завдяки своїй кристалітній структурі. Лігнін є більш нестабільним за нижчих температур, тоді як за вищих температур відбувається збільшення молекулярної ваги. Основні компоненти також впливають на зміну кольору деревини, що є поширеним явищем під час термічної обробки. Найпоширеніші причини знебарвлення є реакціями фенольних сполук та реакціями термічного розкладу геміцелюлози та лігніну. Хоча термічна обробка є найбільш екологічно безпечним і прийнятним процесом, оскільки він виконується в контрольованих умовах за наявності тепла та вологи без хімічних добавок, багато летких органічних сполук утворюються та вивільняються леткі органічні сполуки (ЛОС), такі як спирти, смоли, терпени, мурашина та оцтова кислоти, смоли та жирні кислоти, альдегіди, фурфурали. Через підвищений інтерес до використання термічно обробленої деревини та сполук, що утворюються в атмосфері під час процесу необхідно дослідити його вплив на екологію. Слід наголосити, що після термічної обробки деревина є екологічно чистою і прийнятною, що означає, що вона не є токсичною і що після закінчення свого життєвого циклу вона не становить небезпеки для навколишнього середовища.

Дослідження з використанням оцінки життєвого циклу (LCA) показують, що хоча термічна модифікація вважається екологічно чистим процесом через відсутність доданих хімікатів, вона має екологічний слід, головним чином зумовлений високим енергоспоживанням, необхідним для процесу термічної обробки. Загальна екологічна ефективність часто залежить від джерела енергії, що використовується, та тривалого терміну служби продукту, який воно забезпечує.

Ключові висновки щодо екологічного сліду:

Енергоспоживання: Найважливішим чинником впливу на довкілля на етапі виробництва є енергія, необхідна для нагрівання деревини до температур від 160°C до 240°C. Наприклад, спалювання мазуту є основним джерелом викидів у деяких виробничих установках. Однак компанії можуть пом'якшити цей вплив, використовуючи чистіші виробничі технології, наприклад, перепрофілювання деревної тирси як палива для котлів, що зменшує залежність від зовнішніх, невідновлюваних джерел енергії.

Вуглецевий слід: Вуглецевий слід «від колиски до воріт» у фінському термомодифікованому дерев'яному виробі становив від 225 до 396 кг CO₂ еквіваленту на кубічний метр (кг CO₂ екв/м³), що часто є порівнянним або меншим за деякі тропічні тверді породи листяної породи. Важливо, що при врахуванні всього життєвого циклу термічно модифікована деревина зазвичай зберігає більше біогенного вуглецю, ніж виділяється під час виробництва, що сприяє загальному позитивному вуглецевому балансу.

Викиди: Процес генерує газоподібні, тверді та рідкі викиди, включаючи леткі органічні сполуки з самої деревини. Ефективні технології контролю забруднення повітря є необхідними для управління цими виходами та подальшого підвищення екологічної ефективності.

Переваги для продовження терміну служби: Основна екологічна перевага термічної модифікації полягає у підвищеній довговічності та подовженні терміну служби дерев'яної продукції (наприклад, у зовнішніх умовах, таких як фасади чи настили). Довший термін служби означає менше циклів заміни та рідше обслуговування (наприклад, зменшує потребу в поверхневих покриттях), що суттєво знижує загальний вплив на довкілля життєвого циклу порівняно з необробленими або навіть хімічно обробленими альтернативами.

Регіональна варіація: Конкретний вплив на довкілля може суттєво відрізнятися залежно від регіональних факторів, таких як джерело сировини, відстані транспортування та локальний енергетичний баланс мережі (наприклад, гідроенергія проти вугільної енергії).

Підсумовуючи, дослідження показують, що термічна модифікація деревини є сталою альтернативою хімічному обробленню, особливо якщо враховувати переваги подовженого терміну служби продукту. Загальний екологічний слід можна мінімізувати за рахунок ефективності процесів, відновлення енергії (наприклад, використання деревних відходів як палива) та відповідального постачання сировини.

1.3. Мета роботи і задачі виробничих досліджень.

За результатами літературних досліджень екологічного впливу термічно модифікованої деревини на довкілля була сформована мета магістерської роботи, об'єкт та предмет дослідження, а також розроблені задачі виробничих експериментальних досліджень.

Мета роботи – дослідження екологічного сліду від енергоспоживання за умови використання топкових газів для нагрівання в процесі термічного модифікування деревини.

Для досягнення сформованої мети магістерської роботи необхідно вирішити наступні виробничі задачі:

- виконати аналіз ключових факторів екологічного впливу технологічного процесу виготовлення термічно модифікованої деревини;
- зробити аналіз екологічного сліду від енергоспоживання термокамери за використання різних видів теплової енергії;
- розробити методіку виробничих досліджень з використання топкових газів для нагрівання термокамери в процесі термічної модифікації деревини;

- виконати статистичну обробку результатів виробничих експериментальних досліджень;
- розробити рекомендації з використання топкових газів для нагрівання термокамери в технологічному процесі термічної модифікації деревини.

Об'єкт дослідження – термокамера з тепловою системою нагрівання топковими газами.

Предмет дослідження – енергоспоживання топкових газів в процесі термічної модифікації деревини.

2. Методика і результати виробничих досліджень.

2.1. Методика проведення виробничих досліджень

Екологічний слід або вплив модифікованої деревини на навколишнє середовище необхідно досліджувати у відповідності до етапів життєвого циклу згідно EN15804. Етапи життєвого циклу, розділені на модулі відповідно до EN15804 приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

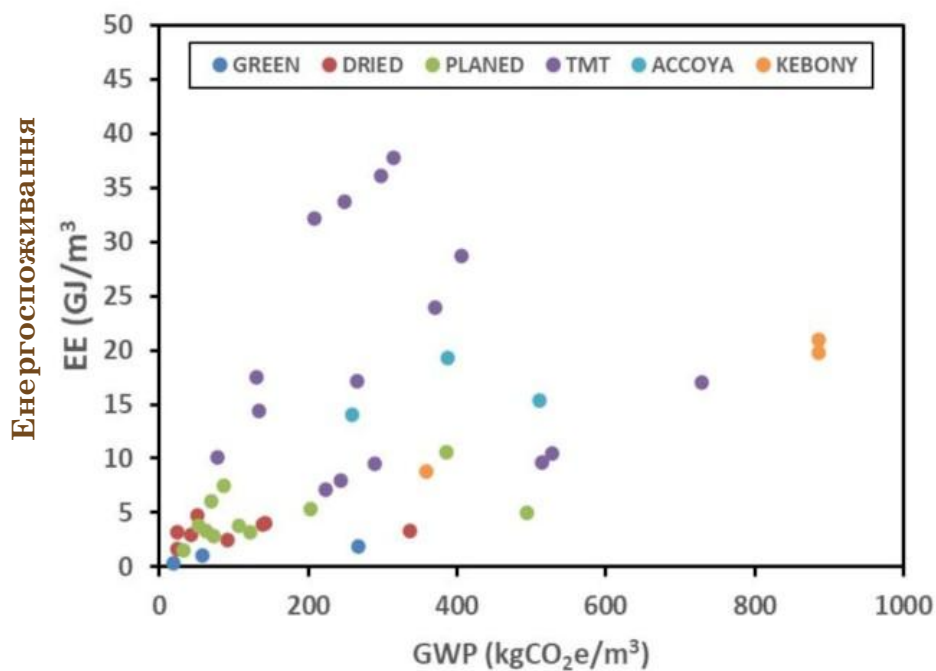
Етапи життєвого циклу, розділені на модулі відповідно до EN15804

Модуль	Етап життєвого циклу	Опис
A1	Виробництво	Постачання сировини
A2	Виробництво	Транспорт
A3	Виробництво	Виробництво
A4	Будівництво	Транспорт
A5	Будівництво	Встановлення
B1	Використання	Використання
B2	Використання	Технічне обслуговування
B3	Використання	Ремонт
B4	Використання	Заміна
B5	Використання	Реконструкція
B6	Використання	Використання енергії в операційній діяльності
B7	Використання	Використання води в операційній діяльності
C1	Кінець життя	Деконструкція/знесення
C2	Кінець життя	Транспорт
C3	Кінець життя	Переробка відходів
C4	Кінець життя	Утилізація
Д	Поза життєвим циклом	Повторне використання/відновлення/переробка

Магістерська робота присвячена дослідженню двох параметрів – втілену енергію (EE) або енергоспоживання та потенціал глобального потепління (GWP/ПГП) на етапі життєвого циклу А3. Іншими словами проведені дослідження з використання різних видів енергії для нагрівання термокамери в процесі термічного модифікування деревини.

Зв'язок між втіленою енергією (енергоспоживанням) та потенціалом глобального потепління для немодифікованих та модифікованих виробів з масиву деревини, з опублікованих енергетичних продуктивних документів та літературних даних мають вигляд показаний на рисунку 2.1.

ЗВ'ЯЗОК МІЖ ВТІЛЕНОЮ ЕНЕРГІЄЮ ТА ПОТЕНЦІАЛОМ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ ДЛЯ НЕМОДИФІКОВАНИХ ТА МОДИФІКОВАНИХ ВИРОБІВ З МАСИВУ ДЕРЕВИНИ, З ОПУБЛІКОВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОДУКТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ТА ЛІТЕРАТУРИ



Потенціал глобального потепління (ПГП)

Рисунок 2.1. Зв'язок між втіленою енергією (енергоспоживанням) та потенціалом глобального потепління для немодифікованих та модифікованих виробів з масивної деревини.

В принципі, зі збільшенням ступеня обробки деревини має спостерігатися збільшення як втіленої енергії (енергоспоживанням), так і

викидів GWP (потенціал глобального потепління ПГП). Ця тенденція очевидна в даних, але є деякі очевидні випадки, які мають значно вищий GWP порівняно з основною групою, та інші, які мають набагато вищу втілену енергію, ніж можна було б передбачити за лінією тренду.

Втілена енергія термічно модифікованої деревини (ТМТ), часто визначається як первинна енергія, що використовується у виробництві, а також первинну енергію, що використовується для транспортування матеріалів і товарів, необхідних для виробничого процесу. Це визначення стосується початкової втіленої енергії, яка пов'язана зі стадією «від колиски до воріт заводу» (модулі А1–А3, EN15804) життєвого циклу продукту. Іноді це називають початковою втіленою енергією. У деяких визначеннях також включаються транспортування до будівельного майданчика (А4) та енергія, що використовується на місці для монтажу або встановлення продукту (А5). Енергія, що використовується для обслуговування та реконструкції продукту, називається повторюваною втіленою енергією, а там, де також враховується кінець терміну служби, враховується внесок енергії знесення. Втілена енергія не включає експлуатаційну енергію, яка може бути пов'язана з продуктом, наприклад, опалення будівлі. Зазвичай використовуються МДж (або ГДж) на одиницю маси, об'єму або на визначену функціональну одиницю, хоча деякі працівники повідомляють про це як кВт·год (=3,6 МДж). Транспортування матеріалів на будівельний майданчик може суттєво впливати на втілену енергію та вплив GWP будівельних матеріалів. Як зазначалося вище в магістерській роботі будуть проведені дослідження двох параметрів – втілену енергію (ЕЕ) або енергоспоживання та потенціал глобального потепління (GWP/ПГП) тільки на етапі життєвого циклу А3.

В принципі, зі збільшенням ступеня обробки деревини має спостерігатися збільшення як втіленої енергії (енергоспоживання), так і викидів GWP (потенціал глобального потепління (GWP/ПГП)). Ця тенденція (рисунок 2.1) очевидна в даних, але є деякі очевидні випадки, які мають значно вищий GWP

порівняно з основною групою, та інші, які мають набагато вищу втілену енергію, ніж можна було б передбачити за лінією тренду. Стосовно термічно модифікованої деревини втілена енергія (енергоспоживання) коливається в межах від 7,5 до 36 ГДж/м³. Так само великі розбіжності для термічно модифікованої деревини спостерігаються стосовно викидів GWP (потенціал глобального потепління (GWP/ПГП)). Для цього показника дані змінюються з 100 до 500 кгCO₂ е /м³, а інколи досягають і 700 кгCO₂ е /м³. Така велика розбіжність між даними втіленої енергії (енергоспоживання) і викидів GWP (потенціал глобального потепління (GWP/ПГП)) в життєвому циклі термічно модифікованої деревини зумовлена наступними причинами:

- Використання різних способів термічної модифікації деревини;
- Породою деревини яка використовується для модифікації;
- Умов виростання і способом заготівлі деревини;
- Транспортними витратами на стадіях виготовлення і використання термічно модифікованої деревини та рядом інших причин.

Для сухого способу термічного модифікування деревини твердих листяних порід в Європі можна прийняти наступний рівень середньозважених величин для:

- втілена енергія (енергоспоживання) – 12 ГДж/м³;
- викиди GWP (потенціал глобального потепління (GWP/ПГП))- 400 кгCO₂ е /м³.

Дослідження втіленої енергії (енергоспоживання) та викидів GWP (потенціал глобального потепління (GWP/ПГП)) виконувалися на підприємстві з торгівельною маркою “Long Life Wood” в місті Львові. Фізично термокамера підприємства розташована в селі Давидів за 15 кілометрів від Львова. Загальний вигляд термокамери показаний на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2. Фотографія загального вигляду термокамери для термічної модифікації деревини підприємства “Long Life Wood”.

Камера для термічної модифікації деревини власного виготовлення. Корпус камери зроблений з залізничної цистерни в якому в торці встановлені двері які відкриваються за допомогою спеціального механізму. В нижній частині термокамери змонтовані рейки для завантаження на візках деревини яка підлягає термічній модифікації. Нагрівання термокамери відбувається за допомогою термомасла. В нижній частині термокамери влаштовані масляні сорочки які нагрівають нижню частину камери від якої тепло передається вверху і здійснюється нагрівання деревини за всім об’ємом термокамери. Нагрівання термомасла здійснюється за допомогою електричних нагрівачів (ТЕНів). Нагрівачі розташовуються в трьох коробах в нижній частині камери. Загальний вигляд теплової системи термокамери показаний на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3. Загальний вигляд теплової системи термокамери “Long Life Wood”.

Для компенсації теплового розширення термомасла в технологічному процесі роботи термокамери в задній торцьовій частині влаштований розширювальний бак. Загальний вигляд розширювального баку видно на рисунку 2.3. Електрична потужність ТЕНів складає в загальному 60 кВт. Електричні нагрівачі розташовані в трьох ваннах за довжиною камери. Помпа для циркуляції термомасла не передбачена. Циркуляція відбувається природнім способом. Нагріте масло піднімається вгору в сорочках для нагрівання де охолоджується і природньо зливається вниз у ванни де розташовані електричні нагрівачі.

Для забезпечення рівномірності розподілу температурного поля за об'ємом термокамери в верхній частині в спеціальній рамі розташовані осьові реверсивні вентилятори. Електродвигун приводу вентиляторів розташований поза межами камери. Така конструкція термокамери дозволяє використовувати відносно не дорогий звичайний електродвигун. Вал вентилятора всередині камери має спеціальний високотемпературний підшипник розташований в рамі вентиляторів. Другий підшипник валу

вентиляторів розташований ззовні. Привід валу вентилятора від електродвигуна здійснюється через клиноремінну передачу.

Для обліку використання електричної енергії в електричній шафі термокамери влаштований трьохфазний лічильник електроенергії з трансформатором струму.

В січні-лютому 2025 року на підприємстві виконана реконструкція термокамери для термічної модифікації деревини. Мета реконструкції полягала в зміні системи нагрівання термокамери. Теплова система камери була залишена в незмінному вигляді. Додатково камера була оснащена трубами для нагрівання термокамери за рахунок енергії топкових газів які проходять по прокладеним в термокамері трубах. Принципова технологічна схема теплової системи термокамери нагрівання топковими газами від спалювання деревинних відходів показана на рисунку 2.4.

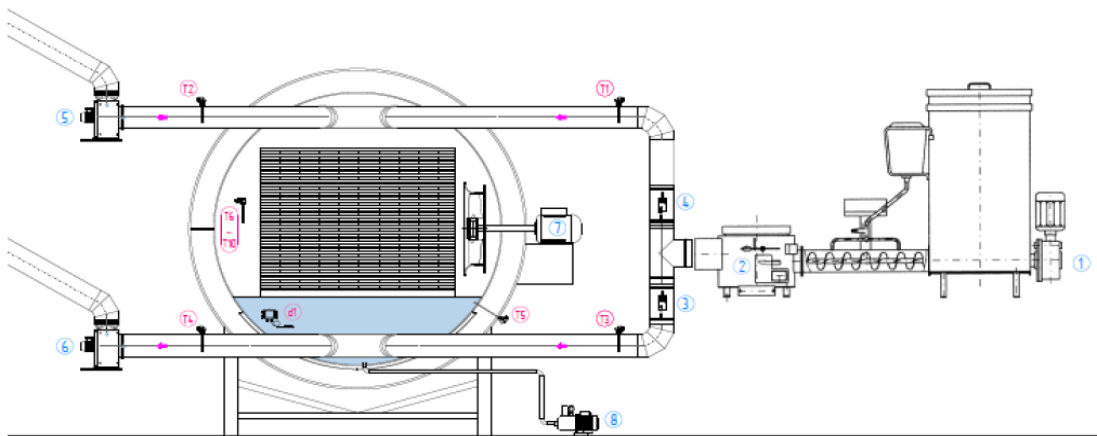


Рисунок 2.4. Принципова технологічна схема теплової системи термокамери нагрівання топковими газами від спалювання деревинних відходів.

- 1- Бункер для тирси; 2-Спалювач деревинних відходів; 3-Шибер з виконавчим механізмом Velito на нижній димовій трубі для нагрівання як термокамери так і водяного басейну для зволоження; 4-Шибер з виконавчим механізмом Velito на верхній димовій трубі для нагрівання термокамери; 5-Вентилятор топкових газів верхньої системи нагрівання; 6-Вентилятор топкових газів нижньої системи нагрівання; 8-Помпа для подачі води в басейн термокамери.

Сутність даної технологічної схеми теплової системи термокамери полягає в наступному. Для спалення деревинних кускових відходів в окремому приміщенні був змонтований спалювач відходів деревини AZSD-100 польської фірми Namech. Даний спалювач дозволяє спалювати подрібнену деревину (тирса, стружка) вологістю до 50%. В основному в спалювачі проходить процес згоряння відходів отриманих після оброблення термічно модифікованих пиломатеріалів на готову продукцію (терасна дошка і планкен для обшивання будинків). Переміщення топкових газів по трубах термокамери здійснюється за допомогою вентиляторів які розташовані на виході димових труб з термокамери. Загальний вигляд розташування труб для нагрівння термокамери показаний на рисунку 2.5.

Додатково в термокамері розташовані труби для нагрівання в нижній частині. Дані труби виконують подвійну функцію, з однієї сторони вони використовуються для нагрівння деревини в процесі термчної модифікації деревини і друга їх функція – нагрівання води в басейні термокамери під час кінцевого кондиціювання для доведення кінцевої вологості термічно модифікованої деревини до рівня який визначається умовами експлуатації майбутніми виробами з термічно модифікованої деревини.

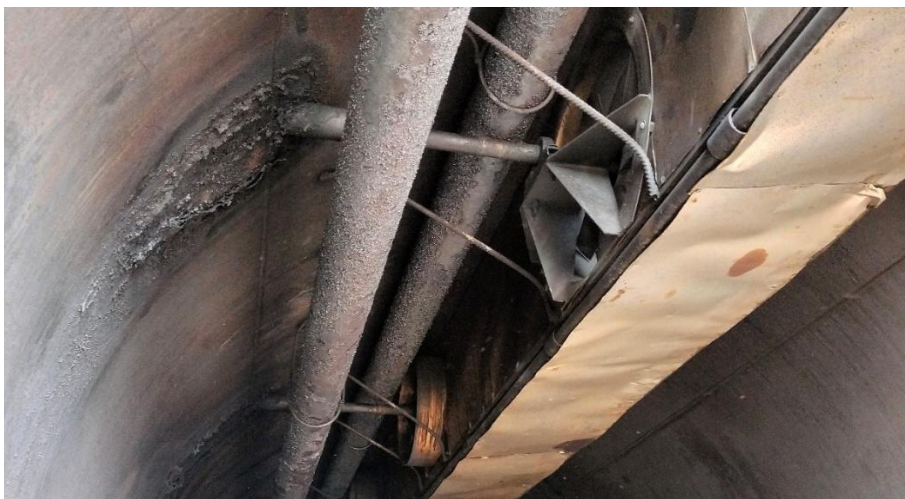


Рисунок 2.5. Загальний вигляд розташування труб для нагрівння термокамери та рами осьових вентиляторів .

В процесі термічної модифікації керування роботою термокамери відбувається наступним чином. Спалювач подрібненої деревини працює або в інтенсивному режимі або в режимі підтримки. В інтенсивному режимі за допомогою шнека подрібнена деревина подається з бункера спалювача безпосередньо в зону спалювання самого спалювача. В цьому режимі постійно працює вентилятор піддуву для подачі достатньої кількості повітря з метою забезпечення інтенсивного горіння подрібненої деревини в спалювачі. В режимі підтримки вентилятор піддуву виключається, а шнек подає подрібнену деревину в спалювач невеликими порціями для підтримання горіння. Топкові гази проходять по трубах які влаштовані у верхній і нижній частинах термокамери. Осьові вентилятори продувають агент оброблення за об'ємом термокамери. Омиваючи труби теплової системи агент нагрівається і далі проходить через штабель деревини для термічної модифікації. Переміщення агента обробки дозволяє не тільки виконати подачу теплової енергії до оброблювального матеріалу, але й забезпечити рівномірність розподілу температурного поля за об'ємом термокамери.

Реконструкція термокамери дозволила виконати дослідження з втіленої енергії (енергоспоживання) і викидів GWP (потенціал глобального потепління (GWP/ЛГП)) для різних умов нагрівання термокамери. В першому випадку коли термокамера нагрівається за допомогою електричної енергії (теплові електричні нагрівачі (ТЕНи)) і в другому випадку коли нагрівання термокамери виконується димовими газами після спалення відходів подрібненої деревини.

2.2. Результати виробничих досліджень

Результати споживання електричної енергії термокамерою були взяті з статистичних даних використання термокамери на підприємстві. Як зазначалося вище для обліку електричної енергії в електричній шафі термокамери змонтований трьохфазний лічильник з трансформатором струму. Під час завантаження термокамери відбувається запис показів лічильника і

після розвантаження термокамери також здійснюється запис в журнал спостережень показів трьохфазного лічильника. На підприємстві “Long Life Wood” термічній модифікації підлягають обрізні ясеневі пиломатеріали. Загальний об’єм завантажуваних обрізних ясеневих пиломатеріалів становить 20 кубічних метрів. Термічна модифікація відбувається за температури 195°C. Після завершення термічної модифікації термокамера охолоджується до температури 95°C і починається кінцеве кондиціонування для досягнення кінцевої вологості термічно модифікованих ясеневих пиломатеріалів рівня 6-7%. В подальшому камера охолоджується до температури 40°C і розвантажується. Середньозважена витрата електричної енергії для одного циклу термічного модифікування становить 8215 кВтгод. Що становить :

$$8215 \times 3,6 = 29574 \text{ МДж} = 29,57 \text{ ГДж};$$

З врахуванням того що об’єм завантажуваних обрізних ясеневих пиломатеріалів в термокамеру становить 20 кубічних метрів, то питомі витрати складуть:

$$29,57 / 20 = 1,48 \text{ ГДж/м}^3.$$

Для України середньозважені викиди парникових газів при виробництві електроенергії вимірюються в еквіваленті діоксиду вуглецю ((GWP) в г CO₂-екв./кВт·год) і становлять: 0,2 кг CO₂-екв./кВт·год. В перерахунку на мегаджоулі це складе: $0,2 / 3,6 = 0,056 \text{ кг CO}_2\text{-екв./МДж}$.

З врахуванням питомих витрат електроенергії на кубічний метр в процесі виробництва термічно модифікованої деревини ясеня яка становить 1,48 ГДж/м³ середньозважені викиди парникових газів складуть:

$$1,48 \times 1000 \times 0,056 = 82,88 \text{ кг CO}_2\text{-екв./м}^3.$$

В підсумку отримаємо наступні числові значення показників в процесі термічної модифікації ясеневих пиломатеріалів з використанням електричної енергії для нагрівання термокамери:

- втілена енергія (енергоспоживання) – 1,48 ГДж/м³;
- викиди GWP (потенціал глобального потепління (GWP/ПГП)- 82,88 кгCO₂ e /м³).

У випадку використання подрібненої деревини для забезпечення тепловою енергією термокамери в технологічному процесі виготовлення термічно модифікованих ясенових пиломатеріалів були отримані наступні результати.

Середньозважена витрата подрібненої деревини для виробництва теплової енергії для одного циклу термічного модифікування становить 10,3 кубічних метрів, що в перерахунку на щільну деревини складе:

$$10,3 \times 0,6 = 6,18 \text{ м}^3$$

З врахуванням нижчої теплотворної здатності подрібненої деревини 8,12 ГДж/м³ загальне використання теплової енергії становить :

$$6,18 \times 8,12 = 50,18 \text{ ГДж};$$

З врахуванням того, що об'єм завантажуваних обрізних ясенових пиломатеріалів в термокамеру становить 20 кубічних метрів, то питомі витрати складуть:

$$50,18 / 20 = 2,51 \text{ ГДж/м}^3.$$

Для України середньозважені викиди парникових газів в процесі спалювання деревини в еквіваленті діоксиду вуглецю ((GWP) в г CO₂-екв./кВт·год) і становлять: 0,4 кг CO₂-екв./кВт·год. В перерахунку на мегаджоулі це складе: $0,4 / 3,6 = 0,111$ кг CO₂-екв./МДж.

З врахуванням питомих витрат теплової енергії від спалювання подрібненої деревини на кубічний метр в процесі виробництва термічно модифікованої деревини ясена яка становить 2,51 ГДж/м³ середньозважені викиди парникових газів складуть:

$$2,51 \times 1000 \times 0,111 = 278,61 \text{ кг CO}_2\text{-екв./м}^3.$$

В підсумку отримаємо наступні числові значення показників при використанні топкових газів від спалювання подрібненої деревини для нагрівання термокамери в процесі термічної модифікації ясенових пиломатеріалів з :

- втілена енергія (енергоспоживання) – 2,51 ГДж/м³;
- викиди GWP (потенціал глобального потепління

(GWP/ПГП)- 278,61 кгCO₂ e /м³.

На рисунках 2.6. і 2.7. показана графічна інтерпретація досліджень втіленої енергії (енергоспоживання) та викидів GWP (потенціал глобального потепління (GWP/ПГП) для умов використання електричної енергії і топкових газів від спалювання подрібненої деревини для нагрівання термокамери в процесі термічної модифікації обрізних ясеневих пиломатеріалів.



Рисунок 2.6. Питомі витрати електроенергії і топкових газів в процесі термічної модифікації деревини.



Рисунок 2.7. Питомі викиди вуглекислого газу в еквіваленті в процесі термічної модифікації деревини при використанні різних видів енергії.

Величина втіленої енергії (енергоспоживання) при використанні електричної енергії для термічної модифікації обрізних ясенових пиломатеріалів становить 1,48 ГДж/м³ натомість коли для термічної модифікації використовуються топкові газы то величина втіленої енергії (енергоспоживання) зростає до 2,51 ГДж/м³. Таке суттєве зростання витрат втіленої енергії (енергоспоживання) при зміні електричної енергії на топкові газы можна пояснити наступними причинами:

- зменшенням коефіцієнта використання енергії при переході від електричної енергії на топкові газы;
- суттєво менший коефіцієнт теплопередачі гладких димових труб в порівнянні з тепловими масляними сорочками при нагріванні електричною енергією;
- необхідність додаткових досліджень з встановлення оптимальної вхідної і вихідної температури топкових газів які подаються в димову трубу термокамери в процесі термічної модифікації;
- нижчий коефіцієнт використання теплової енергії в процесі спалювання подрібненої деревини в спалювачі в порівнянні з коефіцієнтом перетворення електричної енергії в теплову при нагріванні термомасла.

Стосовно викидів GWP (потенціалу глобального потепління (GWP/ЛГП)) то вони також суттєво зростають при переході нагрівання термокамери з електричної енергії на топкові газы. Потенціал глобального потепління (ЛГП) при використанні електричної енергії становить 82,88 кгСО₂ е /м³ і зростає до 278,61 кгСО₂ е /м³. Тобто викиди зростають практично в 3,4 рази. Здавалося б що зростання енергоспоживання і суттєве зростання викидів при переході від нагрівання термокамери електричною енергією до нагрівання топковими газы дають негативні результати. Але це зовсім не так, причини збільшення енергоспоживання приведені вище, а стосовно суттєвого зростання викидів від спалювання подрібненої деревини то вони чисто умовні. Деревина в процесі росту акумулювала вуглекислий газ з довкілля і при

спалюванні подрібненої деревини відбувся частковий процес повернення вуглекислого газу в оточуюче середовище без порушення загального природного балансу. З іншої сторони подрібнена деревина, що утворилася у вигляді відходів в технологічному процесі виготовлення виробів з термічно модифікованої деревини повинна бути утилізована і викиди в довкілля вона віддасть чи при спалюванні чи в процесі гниття. І використана подрібнена деревина буде менш ефективна в порівнянні з використанням її для нагрівання термокамери в процесі термічної модифікації обрізних ясенових пиломатеріалів.

Економічна доцільність перевodu термокамери з нагрівання електричною енергією до нагрівання топковими газами підтверджується наступними розрахунками. Вартість електричної енергії за один технологічний цикл роботи термокамери становить:

$$8215 \times 10,2 = 83793 \text{ гривень}$$

Прийнявши вартість подрібненої деревини рівною 850 гривень за кубічний метр (за такою ціною подрібнена деревина може бути продана) загальні витрати на один технологічний цикл роботи термокамери складуть:

$$6,18 \times 850 = 5253 \text{ гривні}$$

На рисунку 2.8 показана графічна інтерпретація економічних (грошових) витрат на теплову енергію для термічної модифікації обрізних ясенових пиломатеріалів при використанні електричної енергії і топкових газів.

ВИТРАТИ НА ТЕПЛОВУ ЕНЕРГІЮ В ПРОЦЕСІ ТЕРМІЧНОГО МОДИФІКУВАННЯ



Рисунок 2.8. Витрати на теплову енергію за один цикл роботи термокамери в процесі термічної модифікації деревини при використанні різних видів енергії.

При переході від нагрівання термокамери електричною енергією до нагрівання топковими газами загальні витрати зменшуються з 83793 гривень до 5253 гривні. Спостерігається скорочення витрат майже в 16 разів.

Дана обставина вказує і на економічну доцільність переходу від нагрівання термокамери з електричної енергії на топкові гази від спалювання подрібненої деревини.

2.3. Висновки і рекомендації

- виконаний літературний аналіз змін властивостей деревини в процесі термічної модифікації;
- приведена характеристика ключових факторів екологічного сліду стосовно термічно модифікованої деревини;
- розроблена методика виробничих досліджень енергоспоживання в процесі термічного модифікування при використанні різних видів теплової енергії;
- виконані виробничі дослідження питомих витрат енергії для нагрівання термокамери при використанні електричної енергії і топкових газів;
- виконаний аналіз енергоспоживання і викидів в довкілля в технологічному процесі термічної модифікації обрізних ясенових пиломатеріалів;
- приведений економічний розрахунок витрат на теплову енергію при використанні електричної енергії і топкових газів.

3. Охорона праці

3.1. Техніки безпеки роботи з термокамерою

Захист праці в термокамері для деревини передбачає використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), таких як рукавички, захист для очей і респіраторів, забезпечення належної вентиляції та дотримання безпечних операцій для контролю ризиків від спеки, пилу та потенційних пожеж чи вибухів. Ключові заходи безпеки включають запобігання накопиченню статичної електрики, впровадження процедур блокування/маркування для технічного обслуговування та регулярне прибирання для контролю накопичення пилу.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Захист дихання: Використовуйте респіратори, схвалені NIOSH, щоб захистити від небезпечного деревного пилу, оскільки дрібний пил із термічно модифікованої деревини може становити значну загрозу здоров'ю. За потреби слід створити програму захисту дихальних шляхів.

Захист рук і ніг: Носіть товсті брезентові або шкіряні рукавички для роботи з гарячою або грубою деревиною. Носіть захисне взуття для захисту від травм стоп при падіннях предметів.

Захист очей і обличчя: Забезпечте захист очей і обличчя, особливо якщо респіратор їх не покриває, щоб запобігти травмам від повітряних частинок.

Безпека машин і камер

Вентиляція та контроль пилу: переконайтеся, що камера оснащена герметичними вихлопними трубами, спрямованими назовні, для видалення пилу та випарів. Регулярно чистіть камеру та навколишні зони, щоб запобігти накопиченню горючого пилу, який становить ризик пожежі та вибуху.

Статична електрика: Заземлюйте всі металеві компоненти та переконайтеся, що неметалеві компоненти розроблені так, щоб обмежити накопичення статичної електрики до порогу безпеки.

Блокування: Впровадьте систему блокування для обслуговування або прибирання, щоб запобігти випадковому запуску. Використовуйте відповідні інструменти для подовження для необхідних коригувань під час роботи машини.

Запобігання вибухам: Уникайте легкозаймистих джерел у місцях з горючим пилом.

Оперативні та надзвичайні процедури

Запобігання опікам: Будьте обережні при відкритті дверей камери, щоб уникнути опіків, оскільки поверхні та матеріали можуть бути дуже гарячими.

Тепловий стрес: Контролюйте працівників на наявність ознак теплового стресу та розробляйте процедури для його контролю.

Навчання: Переконайтеся, що всі оператори пройшли ґрунтовне навчання безпечному використанню та обслуговуванню обладнання, включаючи аварійні процедури.

Оцінка ризиків: Проведіть оцінку ризиків для виявлення конкретних небезпек, таких як механічні, електричні та теплові ризики, і розробіть плани дій.

3.2. Заходи з пожежної безпеки

Для забезпечення пожежної безпеки для термокамери для деревини впроваджуйте заходи, такі як забезпечення належної вентиляції та повітряного потоку, регулярне обслуговування та очищення системи, а також контроль джерел займання. Крім того, використовуйте відповідні вогнетривкі матеріали у будівництві, проведіть ретельну оцінку ризиків і розробіть комплексний план реагування на надзвичайні ситуації.

Проектування та будівництво системи

1. **Забезпечте належну вентиляцію:** Впроваджуйте системи з високими швидкостями обміну повітря. Свіже повітря має надходити низько, а вихлоп — великим, щоб максимально контактувати з будь-яким протікаючим матеріалом.
2. **Впровадьте пожежні бар'єри:** використовуйте вогнетривкі матеріали, такі як гіпсокартон або інші методи інкапсуляції для захисту конструктивних компонентів.
3. **Обробляйте матеріали:** Якщо камера або навколишні конструкції дерев'яні, розгляньте можливість просочування деревини вогнетривким засобом або використання негорючих поверхневих покриттів для зниження займості.
4. **Контроль температур поверхні:** Підтримуйте нагріті дерев'яні поверхні нижче температур, які можуть призвести до деградації та займання (наприклад, нижче 80°C).

Експлуатація та обслуговування

Регулярно прибирайте: Регулярно оглядайте та очищайте камеру та її димоходи, щоб видалити будь-які накопичення, такі як креозот або сміття, які можуть спричинити пожежу.

Впроваджуйте протоколи прибирання: встановлюйте суворі графіки прибирання, щоб запобігти накопиченню пилу, особливо якщо процес утворює дрібний деревний пил.

Зберігайте горючі матеріали правильно: тримайте легкозаймисті рідини, папір та інші матеріали подалі від термокамери.

Пожежна безпека та готовність до надзвичайних ситуацій

Проведіть оцінку ризиків: Проведіть ретельну оцінку для виявлення всіх потенційних пожежних небезпек, включно з джерелами тепла, ризиком займання та горючими матеріалами.

Встановити системи виявлення та гасіння пожежі: Обладнайте зону відповідними системами, такими як детектори тепла та диму, а також майте відповідні вогнегасники і, можливо, автоматичну систему спринклера.

Розробіть план реагування на надзвичайні ситуації: створіть і відстоюйте план надзвичайних ситуацій, який включає процедури евакуації та чіткі інструкції щодо підняття тривоги та зв'язку з пожежною службою.

Навчайте персонал: Переконайтеся, що всі працівники проходять навчання з практик пожежної безпеки, безпечного використання обладнання та плану реагування на надзвичайні ситуації.

Список використаних джерел

1. Андрашек Й. В. Мультимедійний конспект лекцій з дисципліни “Наука про деревину” в форматі PDF. – Львів, 2024. – 275 с.
2. Андрашек Й.В., Максимів В.М., Петросюк О.М. Експериментальні дослідження кінцевої вологості термічно модифікованої деревини ясеня. Науковий вісник НЛТУ України, – Львів, 2019. № Вип. 29(2), 120-123. <https://doi.org/10.15421/40290224>.
3. Андрашек Й.В, Кушпіт О.М., Петросюк О.М. Дослідження кінцевої вологості термічно модифікованої деревини ясеня. Дев’ята міжнародна науково-практична конференція “Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем”, Том 1. 14 - 16 травня 2019 р. м. Чернігів. С. 209-211
4. Андрашек Й.В, Петросюк О.М. Математична модель зміни вологості в процесі кондиціювання термічно модифікованої деревини ясеня. The 2nd International scientific and practical conference —Topical issues of modern science, society and education (September 5-7, 2021) SPC —Sci-conf.com.ua, Kharkiv, Ukraine. 2021. 624 p.- с. 137-143.
5. Андрашек Й.В., Петросюк О.М., Моделювання полів вологості в процесі кондиціювання термічно модифікованої деревини ясеня. Науковий вісник НЛТУ України, – Львів, 2024. № Вип. 34(1), 91-96. <https://doi.org/10.36930/40340113>
6. Андрашек Й.В., Курка Р.Р., Петросюк О.М., Реалізація математичної моделі розподілу полів вологості в процесі кондиціювання термічно модифікованої деревини ясеня. Науковий вісник НЛТУ України, – Львів, 2024. № Вип. 34(2), 116-123. <https://doi.org/10.36930/40340215>
7. Андрашек Й.В., Щупаківський Р.Б. Аналіз зміни механічних властивостей термічно модифікованої деревини клена (*Acer pseudoplatanus* L.) та ялини звичайної (*Picea abies* K.) шляхом дослідження її пористої структури.

16. ДЕРЖАВНІ БУДІВЕЛЬНІ НОРМИ УКРАЇНИ Інженерне обладнання будинків і споруд ЗАХИСНІ ЗАХОДИ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ БУДИНКІВ І СПОРУД ДБН В.2.5-27-2006
17. ПРАВИЛА УЛАШТУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК / [Електронний ресурс]. – Режим доступу до докум. : <http://misksvitlo.if.ua/wp-content/uploads/2015/09/Правила-улаштування-електроустановок.pdf>
18. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу до докум. : http://www.techno-cobalt.com.ua/up/files/normativna_baza/files/pozharka/napb.pdf
19. Про затвердження Типових норм належності вогнегасників (НАПБ Б.03.001-2004) / [Електронний ресурс]. – Режим доступу до докум. : <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0554-04>
20. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2004) / [Електронний ресурс]. – Режим доступу до докум. : <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z1410-04>
21. ПРИРОДНЕ І ШТУЧНЕ ОСВІТЛЕННЯ. ДБН В.2.5-28-2006 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу до докум. : <http://www.gorsvet.kiev.ua/wp-content/uploads/2016/08/ДБН-В.2.5-28-2006.pdf>
22. Altgen, M., Ala-Viikari, J., Tetri, T., Hukka, A., Militz, H.: Impact of elevated steam pressure during the thermal modification of Scots pine and Norway spruce. In: Proceedings of the COST Action FP0904 Workshop, Skelleftea (2014).
23. Altgen M, Hofmann T, Militz H (2016) Wood moisture content during the thermal modification process affects the improvement in hygroscopicity of Scots pine sapwood. Wood Sci Technol 50:1181–1195. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0845-x>
24. Altgen, M., & Militz, H. (2015). Effect of temperature and steam pressure during the thermal modification process. In 8th European conference on wood modification, Helsinki, Finland (pp. 226-233).

25. Altgen, M., & Militz, H. (2016). Influence of process conditions on hygroscopicity and mechanical properties of European beech thermally modified in a high-pressure reactor system. *Holzforschung*, 70, 971–979. <https://doi.org/10.1515/hf-2015-0235>
26. Miha Humar, Boštjan Lesar and Davor Kržišnik. Moisture Performance of Façade Elements Made of Thermally Modified Norway Spruce Wood. University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department for Wood Science and Technology, Ljubljana SI1000, Slovenia; bostjan.lesar@bf.uni-lj.si (B.L.); davor.krzisnik@bf.uni-lj.si (D.K.)
27. Petr Čermák, · Dominik Hess, · Pavlína Suchomelová. Mass loss kinetics of thermally modified wood species as a time–temperature function. Received: 21 January 2020 / Accepted: 16 November 2020 / Published online: 3 January 2021 © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2021.
28. Hesser, F.; Wohner, B.; Meints, T.; Stern, T.; Windsperger, A. Integration of LCA in R&D by Applying the Concept of Payback Period: Case Study of a Modified Multilayer Wood Parquet. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2017, 22, 307–316. [Google Scholar] [CrossRef]
29. Hill, C.; Norton, A.J. The Environmental Impacts Associated with Wood Modification Balanced by the Benefits of Life Extension. In Proceedings of the Seventh European Conference on Wood Modification, Lisbon, Portugal, 10–12 March 2014. [Google Scholar]
30. Tellnes, L.; Ganne-Chedeville, C.; Dias, A.; Dolezal, F.; Hill, C.; Zea Escamilla, E. Comparative Assessment for Biogenic Carbon Accounting Methods in Carbon Footprint of Products: A Review Study for Construction Materials Based on Forest Products. *iForest* 2017, 10, 815–823. [Google Scholar] [CrossRef]
31. Meyer-Veltrup, L.; Brischke, C.; Alfredsen, G.; Humar, M.; Flæte, P.-O.; Isaksson, T.; Brelid, P.L.; Westin, M.; Jermer, J. The Combined Effect of Wetting Ability and Durability on Outdoor Performance of Wood: Development and Verification of a New Prediction Approach. *Wood Sci. Technol.* 2017, 51, 615–637. [Google Scholar] [CrossRef]

32. Besnard, F.; Nilsson, J.; Bertling, L. On the Economic Benefits of Using Condition Monitoring Systems for Maintenance Management of Wind Power Systems. In Proceedings of the 2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Singapore, 14–17 June 2010; IEEE: Singapore, 2010; pp. 160–165. [Google Scholar]
33. Tellnes, L.G.F.; Alfredsen, G.; Flæte, P.O.; Gobakken, L.R. Effect of Service Life Aspects on Carbon Footprint: A Comparison of Wood Decking Products. *Holzforschung* 2020, 74, 426–433. [Google Scholar] [CrossRef]
34. Candelier, K.; Dibdiakova, J. A Review on Life Cycle Assessments of Thermally Modified Wood. *Holzforschung* 2020. [Google Scholar] [CrossRef]
35. Ferreira, J.; Herrera, R.; Labidi, J.; Esteves, B.; Domingos, I. Energy and Environmental Profile Comparison of TMT Production from Two Different Companies—A Spanish/Portuguese Case Study. *iForest* 2018, 11, 155–161. [Google Scholar] [CrossRef].

Додатки

ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ

Бажані зміни властивостей

- Зменшення рівноважної вологості;
- Покращення біологічної стійкості;
- Зменшення теплопровідності;
- Стабільність розмірів і форми.

Не бажані зміни властивостей

- Зменшення модуля пружності;
- Зменшення еластичності;
- Зменшення ударної в'язкості;
- Підвищена крихкість;
- Зменшення твердості.

Порівняння з необробленою деревиною

- Зменшення густини;
- Набуття темного кольору;
- Характерний запах;
- Зниження адгезійних властивостей в процесі склеювання.

2

НЕДОЛІКИ ТЕРМІЧНОЇ МОДИФІКАЦІЇ ДЕРЕВИНИ



3

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

Дослідження з використанням оцінки життєвого циклу (LCA) показують, що хоча термічна модифікація вважається екологічно чистим процесом через відсутність доданих хімікатів, вона має екологічний слід, головним чином зумовлений високим енергоспоживанням, необхідним для процесу термічної обробки. Загальна екологічна ефективність часто залежить від джерела енергії, що використовується, та тривалого терміну служби продукту, який воно забезпечує.

4

КЛЮЧОВІ ФАКТОРИ ЩОДО ЕКОЛОГІЧНОГО СЛІДУ

- **Енергоспоживання:** Найважливіший чинник впливу на довкілля на етапі виробництва є енергія, необхідна для нагрівання деревини до температур від 160°C до 210°C.
- **Вуглецевий слід** «від колиски до воріт» змінюється від 225 до 396 кг CO₂ еквіваленту на кубічний метр (кг CO₂ екв/м³), що часто є порівнянним або меншим за деякі тропічні тверді породи. Важливо, що при врахуванні всього життєвого циклу термічно модифікована деревина зазвичай зберігає більше біогенного вуглецю, ніж виділяється під час виробництва, що сприяє загальному позитивному вуглецевому балансу.

5

- **Викиди:** Процес генерує газоподібні, тверді та рідкі викиди, включаючи леткі органічні сполуки з самої деревини. Ефективні технології контролю забруднення повітря є необхідними для управління цими виходами та подальшого підвищення екологічної ефективності.
- **Переваги для продовження терміну служби:** Основна екологічна перевага термічної модифікації полягає у підвищеній довговічності та подовженні терміну служби дерев'яної продукції (фасади чи тераси).
- **Регіональна варіація:** Конкретний вплив на довкілля може суттєво відрізнятися залежно від регіональних факторів, таких як джерело сировини, відстані транспортування та локальний енергетичний баланс мережі (наприклад, гідроенергія проти вугільної енергії).

6

МЕТА РОБОТИ

Дослідження екологічного сліду від енергоспоживання за умови використання топкових газів для нагрівання в процесі термічного модифікування деревини.

- **Об'єкт досліджень** – термокамера з тепловою системою нагрівання топковими газами.
- **Предмет досліджень** – енергоспоживання топкових газів в процесі термічної модифікації деревини.

7

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

- виконати аналіз ключових факторів екологічного впливу технологічного процесу виготовлення термічно модифікованої деревини;
- зробити аналіз екологічного сліду від енергоспоживання термокамери за використання різних видів теплової енергії;
- розробити методичку виробничих досліджень з використання топкових газів для нагрівання термокамери в процесі термічної модифікації деревини;
- виконати статистичну обробку результатів виробничих експериментальних досліджень;
- розробити рекомендації з використання топкових газів для нагрівання термокамери в технологічному процесі термічної модифікації деревини.

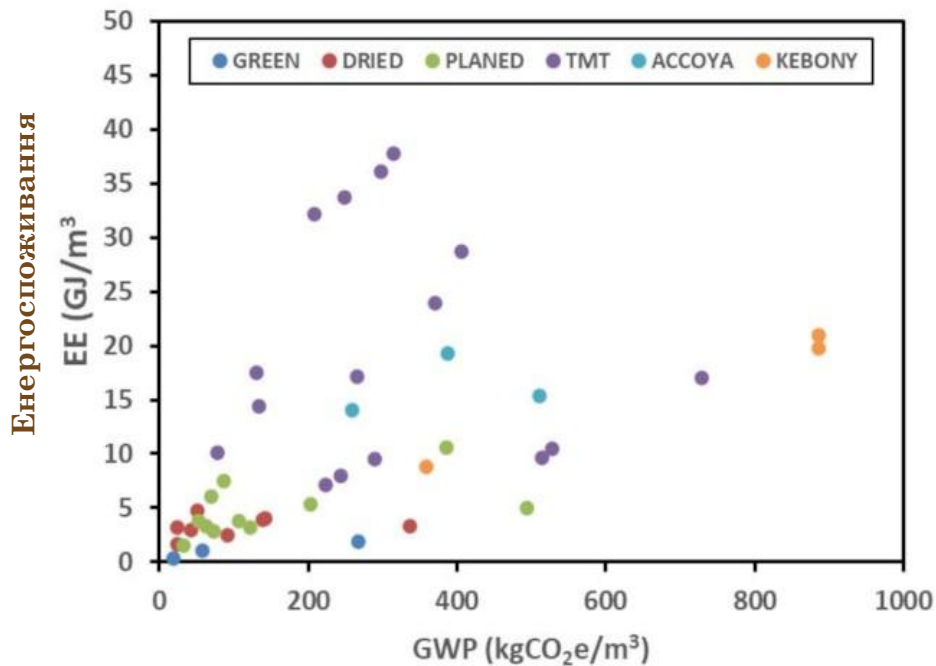
8

ЕТАПИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ, РОЗДІЛЕНІ НА МОДУЛІ ВІДПОВІДНО ДО EN15804

Модуль	Етап життєвого циклу	Опис
A1	Виробництво	Постачання сировини
A2	Виробництво	Транспорт
A3	Виробництво	Виробництво
A4	Будівництво	Транспорт
A5	Будівництво	Встановлення
B1	Використання	Використання
B2	Використання	Технічне обслуговування
B3	Використання	Ремонт
B4	Використання	Заміна
B5	Використання	Реконструкція
B6	Використання	Використання енергії в операційній діяльності
B7	Використання	Використання води в операційній діяльності
C1	Кінець життя	Деконструкція/знесення
C2	Кінець життя	Транспорт
C3	Кінець життя	Переробка відходів
C4	Кінець життя	Утилізація
D	Поза життєвим циклом	Повторне використання/відновлення/переробка

9

ЗВ'ЯЗОК МІЖ ВТІЛЕНОЮ ЕНЕРГІЄЮ ТА ПОТЕНЦІАЛОМ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ ДЛЯ НЕМОДИФІКОВАНИХ ТА МОДИФІКОВАНИХ ВИРОБІВ З МАСИВУ ДЕРЕВИНИ, З ОПУБЛІКОВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОДУКТОВИХ ДОКУМЕНТІВ ТА ЛІТЕРАТУРИ



10

Потенціал глобального потепління (ПГП)

Структурно-технологічна схема термокамери з нагріванням топковими газами

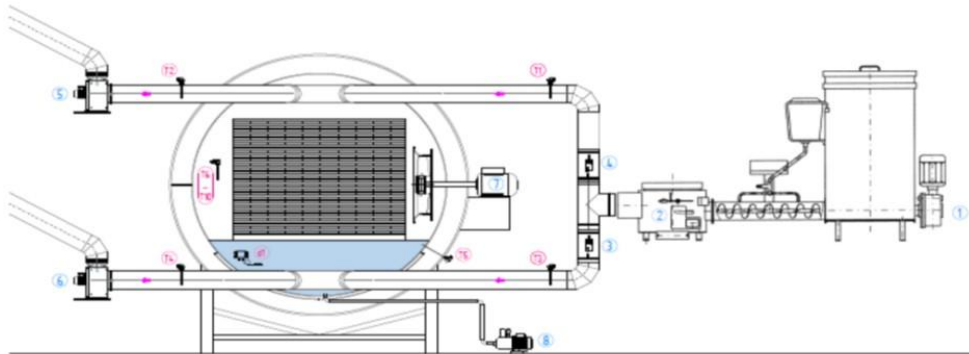


Рисунок 2.4. Принципова технологічна схема теплової системи термокамери нагрівання топковими газами від спалювання деревинних відходів.

- 1- Бункер для тирси; 2-Спалювач деревинних відходів; 3-Шибер з виконавчим механізмом Velito на нижній димовій трубі для нагрівання як термокамери так і водяного басейну для зволоження; 4-Шибер з виконавчим механізмом Velito на верхній димовій трубі для нагрівання термокамери; 5-Вентилятор топкових газів верхньої системи нагрівання; 6-Вентилятор топкових газів нижньої системи нагрівання; 8-Помпа для подачі води в басейн термокамери.

11

Термокамера фірми “Long Life Wood”



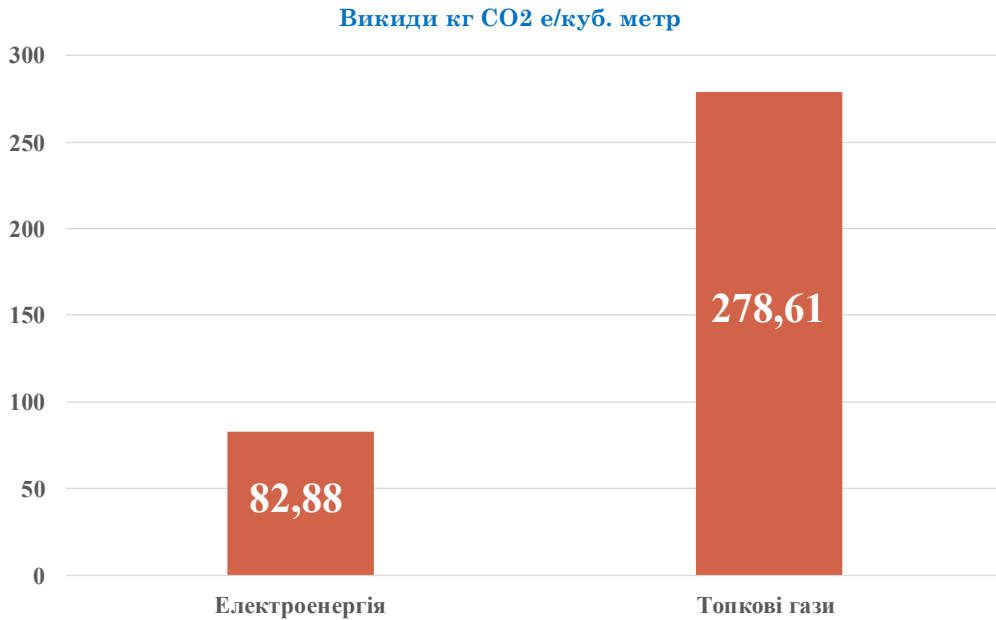
12

ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ В ПРОЦЕСІ ТЕРМІЧНОГО МОДИФІКУВАННЯ



13

ВИКИДИ В ПРОЦЕСІ ТЕРМІЧНОГО МОДИФІКУВАННЯ



ВИТРАТИ НА ТЕПЛОВУ ЕНЕРГІЮ В ПРОЦЕСІ ТЕРМІЧНОГО МОДИФІКУВАННЯ



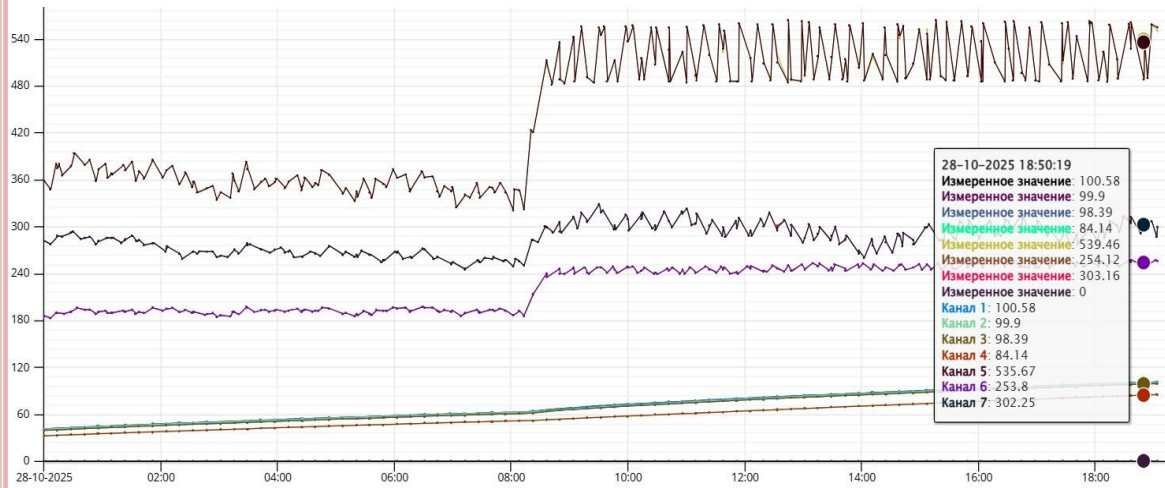
ВИСНОВКИ

- виконаний літературний аналіз змін властивостей деревини в процесі термічної модифікації;
- приведена характеристика ключових факторів екологічного сліду стосовно термічно модифікованої деревини;
- розроблена методика виробничих досліджень енергоспоживання в процесі термічного модифікування при використанні різних видів теплової енергії;
- виконані виробничі дослідження питомих витрат енергії для нагрівання термокамери при використанні електричної енергії і топкових газів;
- виконаний аналіз енергоспоживання і викидів в довкілля в технологічному процесі термічної модифікації обрізних ясенових пиломатеріалів;
- приведений економічний розрахунок витрат на теплову енергію при використанні електричної енергії і топкових газів.

16



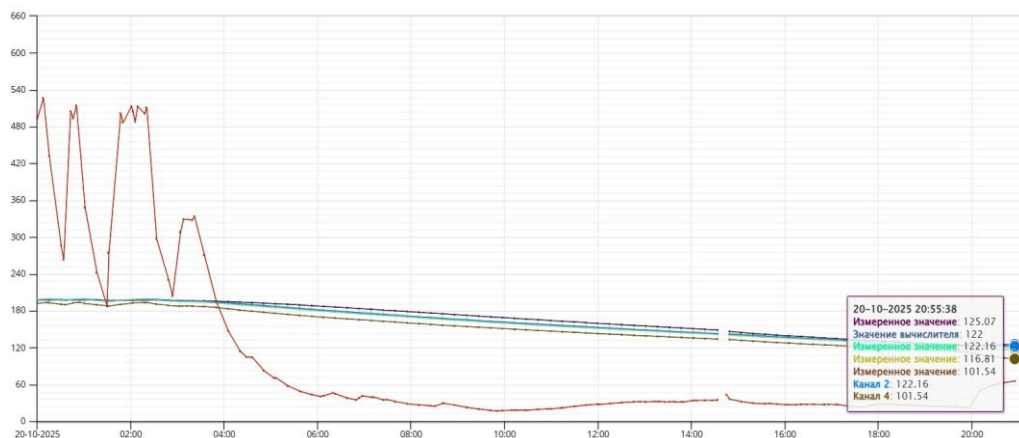
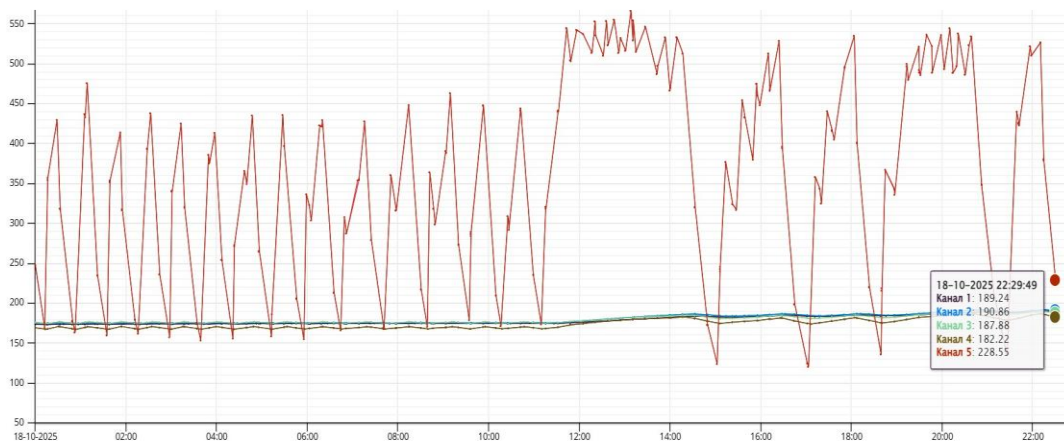
18



Розташування датчиків температури:

- T1 – верху біля дверей;
- T2 – внизу біля дверей;
- T3 – вверху в задній частині;
- T4 – датчик температури води, внизу на корпусі біля дверей;
- T5 – температура топкових газів на вході зверху;
- T6 – температура топкових газів на спільному виході;
- T7 – температура топкових газів на вході знизу.

19



20