

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 витрат енергії в процесі сушіння подрібненої деревини  
в стрічкових сушарках»

Виконав: студент 6 курсу, групи ДМТ-61м

Спеціальність 187 «Деревообробні та  
меблеві технології»

Гачевський О.А.  
(прізвище та ініціали)

Керівник Андрашек Й.В.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент Гайда С.В.  
(прізвище та ініціали)

Згідно з формою № Н-9.02

2

Наказ Міністерства освіти і

## НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

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

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф.

Кшивецький Б.Я.

"15" вересня 2025 року

### ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гачевському Олександрю Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: “Дослідження витрат енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках”

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 15.12.2025 року.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

Виконати теоретичні і експериментальні дослідження витрат теплової і електричної енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках в залежності від товщини килима і фракційності подрібненої деревини

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

Розділ 1. Стан питання і задачі дослідженьРозділ 2. Порядок виконання і результати виробничих дослідженьРозділ 3. Результати виробничих досліджень

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Конструкція стрічкової сушарки, технологічна схема сушіння подрібненої  
 деревини в стрічковій сушарці 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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 15.09.2025 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

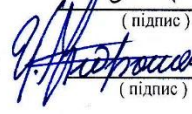
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Аналіз стану питання	до 01.10.25	
	Експериментальні дослідження	до 15.11.25	
	Обробка результатів експериментальних досліджень	до 30.11.25	
	Оформлення пояснювальної записки і підготовка презентації	до 15.12.25	

Студент

  
Гачевський О.А.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
Андрашек Й.В.

(підпис) (прізвище та ініціали)

## Анотація

Магістерська робота з темою: «Дослідження витрат енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках» присвячена дослідженню витрат енергії як теплової так і електричної в технологічному процесі висушування подрібненої деревини. Виконаний літературний аналіз особливостей характеристик подрібненої деревини та приведені особливості в перевагах і недоліках стосовно сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках.

Розроблена методика визначення витрат теплової і електричної енергії яка для здійснення процесу сушіння в стрічкових сушарках. За результатами статистичного оброблення зроблений аналіз витрат теплової і електричної енергії в залежності від фракційності подрібненої деревини та товщини висушуваного килиму. Представлені графічні залежності зміни питомих витрат теплової і електричної енергії в залежності від зміни вище приведених параметрів подрібненої деревини в технологічному процесі сушіння в стрічкових сушарках.

За результатами виробничих досліджень в сушарці марки ATSS 1/800 розроблені конкретні технологічні рекомендації з енергоощадного використання теплової і електричної енергії в процесі використання обладнання на виробництві.

В розділі Охорона праці розроблений комплекс міроприємств для забезпечення безпечної експлуатації стрічкової сушарки на виробництві і створення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці обслуговуючого персоналу.

В загальному обсяг магістерської роботи (пояснювальної записки) становить 50 сторінок і 15 слайдів презентаційних матеріалів виконаних досліджень і їх результатів.

## **Abstract**

Master's thesis on the topic: "Study of energy consumption in the process of drying shredded wood in belt dryers" is devoted to the study of energy consumption, both thermal and electrical, in the technological process of drying shredded wood. A literature analysis of the features of the characteristics of shredded wood is carried out and the features of the advantages and disadvantages of drying shredded wood in belt dryers are given.

A method for determining the consumption of heat and electricity has been developed, which is used to carry out the drying process in belt dryers. Based on the results of statistical processing, an analysis of heat and electricity consumption was made depending on the fractionality of shredded wood and the thickness of the carpet to be dried. Graphical dependencies of changes in specific consumption of heat and electricity depending on the change in the above parameters of shredded wood in the technological process of drying in belt dryers are presented.

Based on the results of production studies in the ATSS 1/800 dryer, specific technological recommendations for the energy-saving use of heat and electricity in the process of using equipment in production have been developed.

In the section Labor protection, a set of measures has been developed to ensure the safe operation of the belt dryer in production and the creation of normal sanitary and hygienic working conditions for service personnel.

In total, the volume of the master's thesis (explanatory note) is 50 pages and 15 slides of presentation materials of the research performed and their results.

## **ЗМІСТ**

### **ВСТУП**

### **Розділ 1. СТАН ПИТАННЯ**

- 1.1. Характеристика подрібненої деревини для сушіння.....8
- 1.2. Особливості сушіння подрібленої деревини в стрічкових сушарках.....12
- 1.3. Визначення витрат енергії в стрічкових сушарках.....16
- 1.4. Мета і завдання виробничих експериментів.....18

### **Розділ 2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ВИРОБНИЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

- 2.1. Характеристика подрібненої деревини для досліджень.....20
- 2.2. Загальна характеристика стрічкової сушарки ATSS-800.....23
- 2.3. Порядок обліку електричної і теплової енергії.....25

### **Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИРОБНИЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....29**

- 3.1. Обробка результатів виробничих досліджень витрат.....29
- 3.2. Технологічні рекомендації з мінімізації витрат енергії в стрічкових сушарках.....35

Список літературних джерел.....37

ДОДАТКИ.....39

## ВСТУП

Розвиток та використання чистої та відновлюваної енергії має фундаментальне значення для скорочення викопного палива яке створює негативний вплив на навколишнє середовище. Деревні гранули і брикети – приклад чистої відновлюваної енергії і вважаються одним із заміників викопного палива. Пелети зі змішаної біомаси це більше стале джерело енергії і на міжнародних ринках та за належної підтримки ці види палива мають великий потенціал майбутнього. Використання біомасових пелет створює новий ринок можливості в сільськогосподарському секторі, зменшує залежність від викопного палива та скорочує викиди парникових газів, пов'язані з їх використанням.

Якість та властивості деревних брикетів (гранул) залежать від технології сушіння, яка використовується для конкретного застосування. Найпоширеніші сушарки біомаси використовують принцип конвекції. Переваги та недоліки різних сушильних технологій оцінюються на основі таких параметрів, як сушильне середовище, температура та тривалість процесу. Вибір параметрів залежать від обладнання кінцевого користувача. Термін окупності початкових інвестицій 3–4 роки для двох типів технології сушіння з використанням димових газів та застосування гарячої води отриманої в котлах які працюють на спаленні деревинних відходів.

Різні автори обговорюють вплив технологій сушіння на якість гранул чи брикетів з подрібненої деревини. Оцінюють вплив двох параметрів – вологості та викидів летких вуглеводнів – на якісні властивості деревних гранул чи брикетів. Автори дійшли висновку, що рівень летких речовин що викидають вуглеводні після сушіння залежать від місця розташування та часу перебування тирси в сушарці: Технології сушіння з довшим час перебування призвів до більших викидів терпенів. Додаткові методи сушіння також можуть впливати на навколишнє середовище. Низький рівень викидів летких вуглеводнів покращує енергетичний вміст тирси, а також зменшує

забруднення повітря покращує робоче середовище та середовище навколо сушарок.

## Розділ 1. СТАН ПИТАННЯ

### 1.1. Характеристика подрібненої деревини для сушіння.

Подрібнена деревина характеризується своїм змінним розміром частинок, неправильною формою та такими властивостями, як вміст вологи, щільність і склад, які можуть значно відрізнятися залежно від вихідного матеріалу. Це робить його корисним для таких застосувань, виготовлення паливних гранул чи брикетів, підстилка для тварин, оскільки його можна адаптувати для різних цілей за допомогою обробки. Ключові властивості включають його органічний склад, відносно високу здатність утримувати вологу та потенційну можливість хімічного забруднення сполучними речовинами або обробкою.

#### *Фізичні характеристики*

- Змінний розмір частинок: На відміну від пилопродукції з однаковими розмірами, подрібнена деревина не є однорідною і може варіюватися від дрібного пилу до великих фрагментів. На розмір і форму впливає обладнання для подрібнення та спосіб перероблення деревини.
- Неправильна форма: подрібнені шматочки мають неправильну форму через механічний процес подрібнення.
- Вміст вологи: Вміст вологи може змінюватися залежно від джерела походження подрібненої деревини та способу обробки.
- Щільність: на щільність впливає щільність оригінальної деревини та будь-яке ущільнення, яке відбулося під час обробки, наприклад, при виробництві фанери. Нижчий вміст вологи може призвести до більшої насипної щільності.

#### *Хімічні та термічні характеристики*

- Склад: Подрібнена деревина є органічною, але може містити хімічні забруднювачі з клеїв, фарб та обробки, особливо в продуктах після споживання. Сорткування деревини перед подрібненням може значно зменшити це забруднення.

- Теплотворна здатність: Чиста подрібнена деревина з низьким вмістом вологи може мати високу теплотворну здатність, що робить її підходящим промисловим паливом.
- Піроліз: процес розкладання (піроліз) починається при різних температурах, при цьому деякі компоненти розкладаються в певних точках (наприклад, геміцелюлоза вище 200°C, лігнін вище 225°C і целюлоза вище 300°C).

### *Інші характеристики*

- Здатність утримувати вологу: подрібнена деревина має хорошу здатність поглинати та повільно віддавати вологу, що робить її корисною як паливо або підстилковий матеріал.
- Здатність до біологічного розкладання: це біорозкладний матеріал, хоча швидкість розкладання варіюється залежно від типу та розміру деревини.
- Боротьба з ерозією: як мульча, вона забезпечує захисний шар, який допомагає пригнічувати бур'яни, запобігати ущільненню ґрунту та контролювати ерозію від дощу та вітру.

Використання в композитах: властивості подрібнених частинок, такі як площа поверхні, впливають на їх продуктивність при використанні в композитних матеріалах, таких як ДСП.

Загальний вигляд фракційності подрібненої деревини для різних сфер застосування і утворення показаний на рисунку 1.1.



Технологічна тріска: довжина: 20-60 мм, товщина: до 30 мм.



Спеціальна технологічна тріска (стренди) для виробництва плит OSB: довжина: 75 до 150 мм, ширина: 10 до 25 мм, товщина: 0,5 до 0,75 мм.



Стружка для виробництва деревостружкових і деревоволокнистих плит: довжина-до 40 мм, товщина-до 1 мм.



Тирса: після лісопилних рам і круглопилкових верстатів (*крупна*: довжина-до 5 мм, товщина-до 2 мм), після стрічкопилкових верстатів (*дрібна*: довжина-до 3 мм, товщина-до 1 мм).

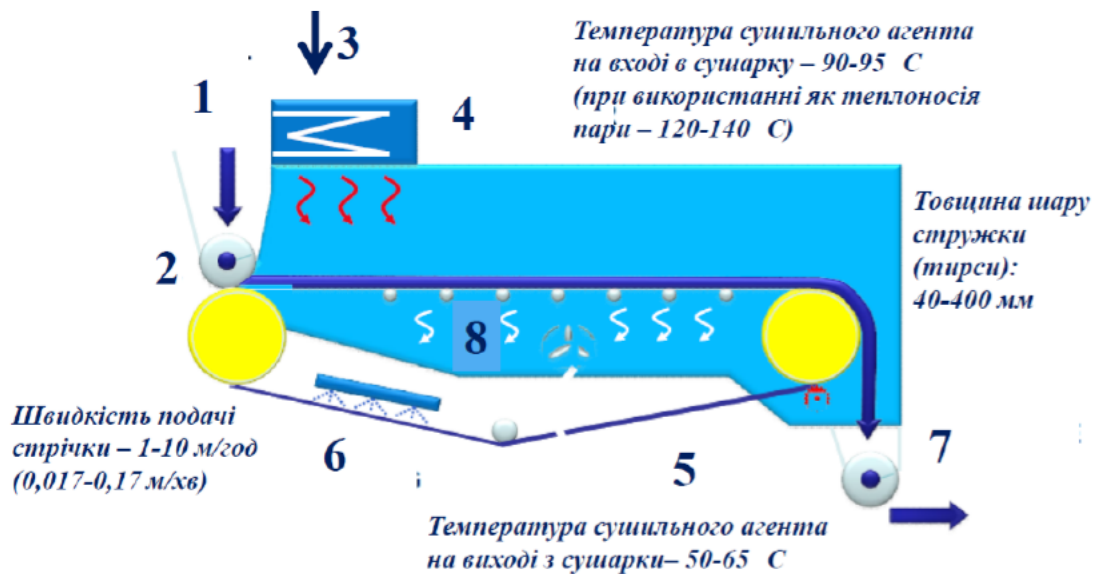
Рисунок 1.1. Загальна характеристика фракційності подрібненої деревини.

## 1.2. Особливості сушіння подрібленої деревини в стрічкових сушарках

Стрічкові конвеєрні сушарки для деревної тріски дозволяють скоротити час (тривалість) сушіння вдвічі, одночасно подвоюючи якість продукції. Саме це може забезпечити для вашого виробництва правильна стрічкова конвеєрна сушарка для деревної тріски. Ці потужні машини трансформували промисловість біомаси та деревообробки, створюючи безпрецедентні можливості для підприємств, готових оптимізувати свої процеси сушіння. Незалежно від того, чи керуєте ви невеликим підприємством, чи контролюєте виробництво на промисловому рівні, розуміння того, як максимізувати продуктивність вашої стрічкової конвеєрної сушарки для деревної тріски, не просто корисне, а й необхідне для того, щоб залишатися конкурентоспроможним на сучасному швидкозмінному ринку.

У цій магістерській роботі виконаний аналіз сушарок деревної тріски зі стрічковими конвеєрами, розкриваючи секрети продуктивності, які ветерани галузі вдосконалили протягом десятиліть практичного досвіду. Від проривів у сфері енергоефективності до стратегій технічного обслуговування, які подовжують термін служби обладнання до 40%, ми розкриваємо критичні фактори, що відрізняють пересічні операції від надзвичайних.

Принципова технологічна схема роботи стрічкової сушарки для сушіння будь-якого виду подрібненої деревини показана на рисунку 1.2.



1- завантаження подрібненої деревини); 2- двох-шнековий механізм завантаження для забезпечення рівномірності товщини килиму за шириною стрічкової сушарки; 3- подача свіжого повітря в калорифер; 4 – калорифер з оребрених алюмінієвих труб ; 5– вологий сушильний агент після сушіння; 6 - щітки очищення стрічки за допомогою розпиленої води; 7– висушена подрібнена деревина до заданої вологості.

Рисунок 1.2. Принципова технологічна схема роботи стрічкової сушарки для сушіння будь-якого виду подрібненої деревини.

Стрічкова конвеєрна сушарка для деревної тріски є вершиною технології безперервного сушіння біоматеріалів. На відміну від роторних барабанних сушарок, ці системи використовують перфоровану конвеєрну стрічку, яка транспортує деревну тріску через кліматично контрольовані камери, де точний потік повітря ефективно та рівномірно видаляє вологу.

Ключові компоненти стандартної стрічкової конвеєрної сушарки для деревної тріски включають:

- Перфорована сталева або сітчаста конвеєрна стрічка
- Кілька зон сушіння з контрольованою температурою
- Системи циркуляції повітря та теплообміну
- Датчики вологості та автоматизоване керування

- Механізми завантаження та розвантаження

Така конфігурація забезпечує безпрецедентний контроль над процесом сушіння, що дозволяє досягти постійного вмісту вологи у всіх оброблюваних матеріалах, чого традиційні системи пакетного сушіння просто не можуть зрівнятися.

Переваги сушарок деревної тріски на стрічкових конвеєрах стають очевидними при порівнянні показників продуктивності:

- Чудова рівномірність вологості : стрічкові системи досягають рівномірності вологості  $\pm 2\%$  порівняно з типовою варіацією  $\pm 5-8\%$  для роторних сушарок.
- Енергоефективність : Сучасні стрічкові конвеєрні сушарки споживають на 15-30% менше енергії, ніж аналогічні системи з обертовими барабанами.
- Дбайливе поводження з матеріалом : метод стрічкового транспортування призводить до зменшення деградації матеріалу та зменшує утворення дрібних частинок на 50%.
- Точний контроль температури : багатозонна конструкція дозволяє налаштовувати криві сушіння, зберігаючи якість матеріалу.
- Зниження ризику пожежі : нижчі робочі температури та кращий розподіл матеріалу мінімізують утворення гарячих точок.

Дані переваги стрічкових сушарок показують, що перехід на стрічкові конвеєрні сушарки деревної тріски зазвичай забезпечує окупність інвестицій протягом 12-24 місяців лише завдяки економії енергії та покращенню якості продукції.

Контроль температури є найважливішим фактором продуктивності сушарки деревної тріски зі стрічковим конвеєром. Ідеальний підхід включає:

- Поступове температурне зонування : починаючи з 62-73°C у початкових зонах, поступово збільшуючи до 84-86°C у середніх зонах, а потім знижуючи до 73-74°C у кінцевих зонах.
- Адаптивне керування : впровадження регулювання температури за допомогою датчиків на основі вмісту вологи в матеріалі.

- Системи рекуперації тепла : захоплення тепла відпрацьованих газів та перенаправлення його на попереднє нагрівання вхідного повітря, що підвищує ефективність до 25%.

Але слід пам'ятати, що підвищення робочої температури на 5°C зазвичай відповідає збільшенню споживання енергії на 7-10%, тому метою є оптимізація, а не максимізація.

Ефективність видалення вологи значною мірою залежить від правильного управління потоком повітря:

- Протитечийний розподіл повітря : Розташування вентиляторів для створення повітряного потоку, протилежного руху матеріалу, максимізує ефективність витяжки.
- Калібрування швидкості : Підтримка швидкості повітря через шар товщиною 100-400 міліметрів за хвилину для оптимального видалення вологи без надмірного споживання енергії.
- Створення турбулентності : Стратегічне розташування повітряних дефлекторів для запобігання утворенню каналів та забезпечення рівномірного сушіння по всій ширині стрічки.

Запровадження комплексної оптимізації потоку повітря, зазвичай приводить про покращення загальної ефективності сушіння на 15-20%.

Те, як ви завантажуєте свою стрічкову конвеєрну сушарку для деревної тріски, безпосередньо впливає на її продуктивність:

- Оптимальна глибина шару : Підтримка глибини 100-250 міліметрів для стандартної деревної тріски забезпечує баланс між пропускною здатністю та ефективністю сушіння.
- Рівномірний розподіл : впровадження систем розподілу, які забезпечують рівномірний розподіл матеріалу по всій ширині стрічки.
- Контроль швидкості подачі : синхронізація подачі з вмістом вологи — уповільнення для вологих матеріалів, збільшення для сухіших.

Випробування, проведені провідними виробниками обладнання, показують, що правильне завантаження стрічки може покращити пропускну здатність на 12-18%, одночасно зменшуючи споживання енергії на 8-10%.

Для більшості сушарок деревної тріски зі стрічковими конвеєрами вхідна вологість від 40 до 60% є ідеальним балансом між ефективністю обробки та споживанням енергії. Матеріали з вологістю понад 60% можуть потребувати попереднього сушіння або тривалішого часу витримки, тоді як матеріали з вологістю нижче 40% можна обробляти швидше за допомогою скоригованих температурних профілів.

Рівномірний розмір подрібненої деревини (фракційність) суттєво впливає на продуктивність. Ідеальний діапазон розмірів для більшості сушарок деревної тріски зі стрічковим конвеєром становить 12-25 мм за найбільшим виміром. Завелика тріска створює нерівномірне сушіння та потенційні вологі плями, тоді як частинки замалого розміру можуть обмежувати потік повітря через шар тріски та створювати пожежну небезпеку. Сучасні підприємства зазвичай впроваджують системи додаткового подріблення (молоткові дробарки) перед сушаркою, щоб забезпечити однорідність розміру.

Важливим аспектом раціональної роботи стрічкової сушарки залишається правильний вибір джерела теплової енергії які можуть бути:

- Опалення біомасою : використання деревних відходів для отримання теплової енергії (економія коштів на 70-80% порівняно з природним газом).
- Електричне опалення : Для невеликих систем або місць з низькими витратами на електроенергії.
- Рекуперація відхідного тепла : інтеграція з іншими процесами для використання теплової енергії, яка втрачається в іншому випадку.

Оптимальний вибір залежить від місцевих витрат на енергію, цілей сталого розвитку та наявної інфраструктури.

Сезонні коливання суттєво впливають на продуктивність стрічкового конвеєра для сушарки деревної тріски, що вимагає адаптивного управління:

- Літня експлуатація : Вища вологість навколишнього середовища вимагає більш агресивних параметрів сушіння та потенційно зниження пропускної здатності (сезонне коригування 5-10%).

- Зимова експлуатація : Холодніші вхідні матеріали потребують додаткового нагрівання в початкових зонах, але загалом дозволяють збільшити пропускну здатність.
- Сезонні коливання деревини : Різні сезони заготівлі дають матеріали з різними характеристиками вологості, що вимагає постійного коригування параметрів.

Підприємства, що впроваджують протоколи сезонного коригування, повідомляють про підвищення цілорічної ефективності на 8-12% порівняно зі статичними операційними параметрами.

Ринок сушарок для деревної тріски зі стрічковими конвеєрами продовжує швидко розвиватися, і варто стежити за кількома новими тенденціями:

- Оптимізація на основі штучного інтелекту : системи машинного навчання, які постійно коригують робочі параметри на основі характеристик вхідного матеріалу та бажаних вихідних характеристик.
- Удосконалена рекуперація енергії : Системи теплообміну наступного покоління вловлюють до 85% відпрацьованого тепла для повторного використання.
- Гібридні технології сушіння : поєднання стрічкових конвеєрних систем з додатковими методами сушіння, такими як мікрохвильове або вакуумне сушіння, для конкретних застосувань.
- Скорочення викидів : Нові технології фільтрації та очищення зменшують викиди летких органічних сполук на 60-80% порівняно з обладнанням попереднього покоління.

Галузеві аналітики прогнозують, що ці інновації призведуть до підвищення загальної ефективності системи на 15-20% протягом наступних п'яти років.

Стрічкова конвеєрна сушарка для деревної тріски є однією з найважливіших інвестицій для будь-якого деревообробного підприємства. Впроваджуючи вище описані – оптимізуючи температурні профілі, ефективно керуючи потоком повітря, дотримуючись найкращих практик завантаження та

підтримуючи суворий графік технічного обслуговування – ви можете повністю реалізувати потенціал свого обладнання.

Дотримання цих рекомендацій, зазвичай дозволяє досягнути:

- Зниження витрат на енергію на 20-30%
- Збільшення пропускної здатності на 15-25%
- Покращення консистенції продукту на 35-45%
- Збільшення терміну служби обладнання на 30-40%

Незалежно від того, чи розглядаєте ви можливість встановлення своєї першої сушарки для деревної тріски зі стрічковим конвеєром, чи хочете оптимізувати існуючу систему, ці принципи продуктивності забезпечують основу для досконалості експлуатації. Конкурентні переваги, отримані завдяки правильному впровадженню — стабільна якість продукції, зниження експлуатаційних витрат та покращення виробничих потужностей — позиціонують перспективні підприємства для довгострокового успіху на дедалі вимогливішому ринку.

### **1.3. Визначення витрат енергії в стрічкових сушарках.**

Витрати енергії в технологічному процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках поділяються на дві складові:

- електрична енергія яка витрачається на роботу центробіжних вентиляторів (основна частина витрат електричної енергії), привід стрічки сушарки, механізмів завантаження і розвантаження подрібненої деревини, циркуляційного і регулювального обладнання подачі теплоносія (гарячої води) в тепловій системі, системи автоматичного контролю і управління роботою стрічкової сушарки;
- теплова енергія (гаряча вода) яка подається в пластинчаті калорифери стрічкової сушарки і витрачається для нагрівання сушильного агента який проходячи через шар висушуваної подрібненої деревини випаровує вологу.

Облік використання кількості електричної енергії в кВт·год здійснювався за допомогою лічильника електричної енергії який здійснює облік споживання електричної енергії всім обладнанням і пристроями стрічкової сушарки в період її роботи.

Облік використання кількості теплової енергії яка використовується в процесі роботи стрічкової сушарки здійснювався за допомогою теплового лічильника. Для визначення реального споживання теплової енергії необхідно знати два показники: кількість гарячої води в кубічних метрах яка проходить через калорифери стрічкової сушарки за одиницю часу (за годину) і різницю температур на вході і виході гарячої води з калорифера. Знаючи вище приведені показники розраховують витрати теплової енергії за формулою (1):

$$Q = C \cdot G \cdot (t_1 - t_2), \text{ мДж} = 1,163 \cdot G \cdot (t_1 - t_2), \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (1)$$

Де:

$C$  – теплоємність води, кДж/кг·°С;

$G$  - об'єм теплоносія (гарячої води), який проходить крізь калорифери в м<sup>3</sup>/год (т/год);

$t_1$  і  $t_2$  – відповідно температура теплоносія (гарячої води) при вході і виході з калориферів стрічкової сушарки, °С.

Для визначення питомих витрат енергії як електричної так і теплової для сушіння одного кубічного метра подрібненої деревини окрім витрат кількості енергії необхідно знати продуктивність роботи стрічкової сушарки яка визначалася за наступним виразом (2):

$$A = S \cdot H \cdot v \cdot k, \text{ м}^3/\text{год} \quad \dots \quad (2)$$

Де:

$S$  – робоча ширина стрічки стрічкової сушарки, м;

$H$  - товщина шару подрібненої деревини, м;

$v$  – швидкість подачі подрібненої деревини (швидкість руху стрічки) м/год;

$k$  – коефіцієнт об'ємного наповнення (щільність) подрібненої деревини.

Знаючи вище приведені показники виконували розрахунок питомих витрат електричної і теплової енергії які реально вирачаються для сушіння одиниці об'єму (кубічного метра) подрібненої деревини за формулою (3):

$$q = Q/A, \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3 \text{ (мДЖ}/\text{м}^3) \quad (3)$$

Де:

Q – витрати електричної чи теплової енергії, кВт·год (мДЖ);

A - продуктивність роботи стрічкової сушарки м<sup>3</sup>/год;

#### 1.4. Мета і завдання виробничих експериментів.

Не зважаючи на беззаперечні переваги стрічкових сушарок для сушіння подрібненої деревини залишається відкритим питання оптимізації енергозбереження в процесі роботи сушарки в залежності від фракційності подрібненої деревини, товщини килиму висушуваної подрібненої деревини і швидкості руху стрічки. Дана магістерська робота присвячена визначенню зміни питомих витрат електричної і теплової енергії в процесі роботи стрічкової сушарки в залежності від зміни вище приведених показників. В процесі виконання виробничих експериментальних досліджень забезпечувалася умова дотримання необхідної кінцевої вологості подрібненої деревини і її рівномірності висихання за шириною і товщиною килиму. Виходячи з вище приведено була сформована мета магістерської роботи, встановлений об'єкт дослідження і визначені задачі які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети.

**Мета дослідження** - мінімізація витрат електричної і теплової енергії в стрічкових сушарках в залежності від виду (фракційності) подрібненої деревини, товщини і швидкості руху килиму.

**Об'єкт дослідження** – вимірювання витрат електричної і теплової енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках.

**Предмет дослідження** – вплив фракційності подрібненої деревини і параметрів килиму на питомі витрати електричної і теплової енергії в стрічкових сушарках.

Для досягнення вище приведеної мети магістерської роботи необхідно вирішити такі задачі:

- зробити методику виробничих досліджень витрат електричної і теплової енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках;
- в реальних виробничих умовах виконати дослідження витрат енергії в процесі сушіння подрібненої деревини різної фракційності, товщини висушуваного матеріалу і швидкості руху стрічки;
- виконати статистичну обробку результатів виробничих експериментальних даних витрат електричної і теплової енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках за різних умов виконання процесу;
- запропонувати технологічні рекомендації енергоощадної технології сушіння подрібненої деревини в стрічкових конвективних сушарках в залежності від різної фракційності, товщини висушуваного матеріалу і швидкості руху стрічки.

## **Розділ 2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ВИРОБНИЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **2.1. Характеристика подрібненої деревини для досліджень.**

Виробничі експериментальні дослідження виконувалися дистанційно на підприємстві “Тартак” яке розташоване в Польщі. Вибір даного підприємства для проведення досліджень обґрунтований тим, що була забезпечена можливість сушіння подрібненої деревини різної фракційності. На підприємстві експлуатується стрічкова сушарка ATSS-800 польської фірми AMS-elektronik до системи автоматичного контролю і управління був наданий доступ. Також слід врахувати і таку обставину, що стрічкова сушарка оснащена лічильником теплової енергії, а лічильник для обліку використання електричної енергії встановлений окремо для даної стрічкової сушарки.

Підприємство використовує подрібнену деревину для виготовлення паливних брикетів. Подрібнена деревина на підприємстві сама різноманітна. Для розкрою круглих лісоматеріалів на необрізні пиломатеріали використовується вертикальний стрічковопилковий верстат PREMULTINI. Тирса після розкрою на даному обладнанні за допомогою аспіраційної системи подається в бункер-накопичувач з рухомою підлогою. В подальшому з бункера-накопичувача тирса шнековим транспортером подається безпосередньо в завантажувальний пристрій стрічкової сушарки. Загальний вигляд тирси після вертикального стрічковопилкового верстата PREMULTINI показана на рисунку 2.1. Особливість даної тирси полягає в її дрібній дисперсійності (досить дрібна фракція) і дану обставину необхідно враховувати в процесі сушіння на стрічкових конвективних сушарках. Практика використання стрічкових сушарок показала, що одночасно доцільно сушити подрібнену деревину близьку за фракційним складом. На даному підприємстві виконується така рекомендація і зберігання подрібненої деревини різної фракційності відбувається в окремих бункерах-накопичувачах.



*Рисунок 2.1. Загальний вигляд фракційності тирси після вертикального стрічковопилкового верстата PREMULTINI.*

Для розкрою круглих лісоматеріалів хвойних порід на підприємстві використовуються круглопилкові верстати. Також круглопилкові верстати використовуються на обрізних і прирізних верстатах для виготовлення необрізних пиломатеріалів і заготовок. Тирса після круглопилкових верстатів за допомогою аспіраційних систем подається в окремі бункери-накопичувачі. Загальний вигляд тирси після круглопилкових верстатів показаний на рисунку 2.2.



*Рисунок 2.2. Загальний вигляд фракційності тирси після круглопилкових верстатів.*

Кускові відходи які утворюються на різних стадіях технологічного процесу розкрою круглих лісоматеріалів на обрізні пиломатеріали і заготовки (горбилі, обзолні рейки, торцьові відрізки та інші) на рубальних машинах переробляються на технологічну тріску яка також використовується для виготовлення паливних гранул. Технологічна тріска після рубальних машин за допомогою за допомогою стрічкового конвейєра подається в бункер-накопичувач. Загальний вигляд технологічної тріски після рубальної машини показаний на рисунку 2.3.



*Рисунок 2.3. Загальний вигляд технологічної тріски в бункері-накопичувачі.*

Роздільне накопичення подрібненої деревини у вигляді тирси після вертикального стрічковопилкового верстату, круглопилкових верстатів та технологічної тріски дозволило спростити проведення виробничих експериментальних досліджень для різної фракційності подрібненої деревини. Сушіння подрібненої деревини в стрічковій сушарці відбувається окремо для кожного виду фракційності.

## 2.2. Загальна характеристика стрічкової сушарки ATSS-800

На підприємстві для сушіння подрібненої деревини різної за складом фракційності використовується стрічкова сушарка ATSS-800. До основних характеристик стрічкової сушарки ATSS-800 відносяться:

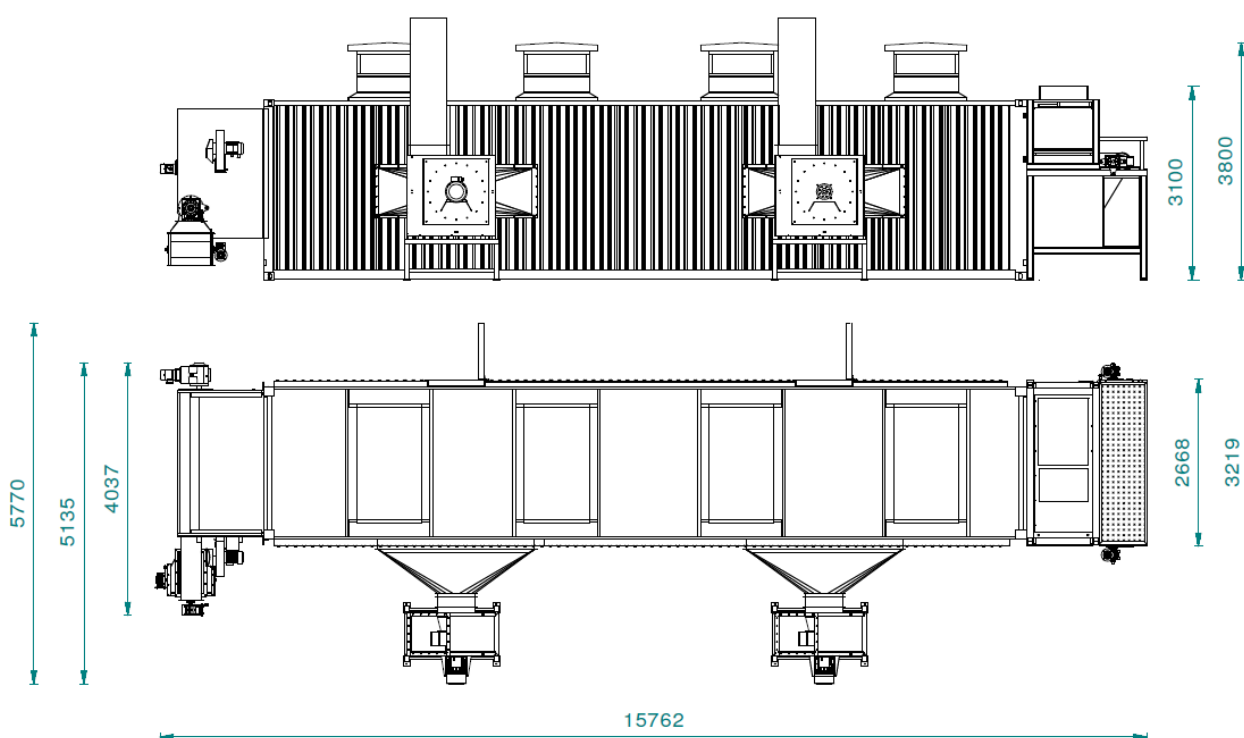
- габаритні розміри (дов. вис., шир.) – 15,8 x 5,2 x 3,8 [м]
- вага – до 12 000 кг
- потужність вентиляторів – 44 кВт
- потужність механізмів – 11 кВт
- загальна потужність - до 51 кВт (циклічна робота)
- загальна теплова потужність – 1360 кВт (вхідне повітря температурою 10°C, відносною вологістю 60%, загальна потреба повітря 60 000м<sup>3</sup>/год)
- теплоносій – гаряча вода температурою 90°C на вході і 70 °C на виході з калориферів стрічкової сушарки
- температура сушильного агента – біля 85 °C
- базовий вхідний продукт – тирса, технологічна тріска
- випаровування води – до 800 кг/год
- споживання води – очищення стрічки: біля 2000 літрів/тиждень

До основних переваг стрічкової сушарки ATSS-800 відносяться:

- компактний ергономічний дизайн, простота транспортування, простота в обслуговуванні, надійність;
- простота встановлення і монтажу;
- подача повітря зверху вниз через висушуваний продукт;
- можливість сушіння подрібненої деревини різної фракційності;
- висока якість виготовлення з використанням нержавіючих матеріалів в зонах контакту з висушуваним матеріалом нержавіючих ;
- можливість роботи в постійному або циклічному режимах;

- система змішування висушеної подрібненої деревини;
- автоматична система управління рухом стрічки;
- автоматична система очищення стрічки;
- автоматична система управління роботою стрічкової сушарки MS-301.

Креслення загального вигляду і основні габаритні розміри стрічкової сушарки ATSS-800 показані на рисунку 2.4.



*Рисунок 2.4. Загальний вигляд і основні габаритні розміри стрічкової сушарки ATSS-800.*

Загальний вигляд стрічкової сушарки ATSS-800 на виробництві показаний на рисунку 2.5. Стрічкова сушарка розташована в піднавісі для захисту від дощу і снігу. Виходячи з цього до стрічкової сушарки додатково змонтовані трубопроводи для забору свіжого повітря і викиду випаруваної вологи з висушуваного матеріалу. Влаштування додаткових повітропроводів не приводить до якогось надмірного збільшення споживання електричної енергії.



*Рисунок 2.5. Загальний вигляд стрічкової сушарки ATSS-800 на підприємстві.*

### **2.3. Порядок обліку електричної і теплової енергії**

Облік електричної енергії здійснювався за допомогою трьохфазних лічильників з трансформаторами струму. Облік електричної енергії яка використовується для роботи стрічкової сушарки ведеться індивідуально (встановлений окремий лічильник з трансформатором струму). Дана обставина дозволяла проводити заміри електричної енергії у визначений методикою період в залежності від часу роботи стрічкової сушарки або об'єму висушеної подрібненої деревини. Це значно спрощувало виробничі дослідження для встановлення витрат електричної енергії для різних видів (фракційності) подрібненої деревини і товщини килиму (шару) матеріалу який підлягав сушінню. Привід двигунів вентиляторів і рухомої стрічки здійснюється через інвертори (частотні перетворювачі) для встановлення необхідної продуктивності вентилятора при заданому перепаду тиску в процесі проходження сушильного агента через шар висушуваного матеріалу в стрічковій сушарці. Швидкість руху стрічки визначався значеннями біжучої вологості висушуваної подрібненої деревини. Визначальним фактором для визначення швидкості руху стрічки є відповідність фактичної кінцевої

вологості подрібненої деревини встановленому значенню. Подрібнена деревина яка використовується для виготовлення паливних гранул повинна мати кінцеву вологість в межах 10-12%. Контроль кінцевої вологості висушеної подрібненої деревини здійснюється системою автоматичного контролю і управління стрічковою сушаркою. Вимірювання вологості здійснюється дієлькометричним способом. В процесі проведення виробничих досліджень виконувалося визначення кінцевої вологості висушеної подрібненої деревини ваговим способом. На протязі години здійснювали відбір 40 проб для визначення кінцевої вологості подрібненої деревини. Результати замірів заносили в журнал спостережень. Далше виконували статистичну обробку результатів спостережень і графічий розподіл кінцевої вологості подрібненої деревини. Приклад реультатів досліджень кінцевої вологості тирси після круглопилкових верстатів (ваговим способом) приведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Розподіл кінцевої вологості після сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках ATSS-800 (тирса після круглопилкових верстатів, товщина килиму 200 мм)

№ з/п	1	2	3	4	5	6	7	8
1	11,07	11,03	11,10	11,00	10,64	10,30	11,21	11,13
2	10,83	10,66	11,04	10,82	10,65	10,53	11,06	11,02
3	10,79	10,68	11,08	10,82	10,94	10,89	11,09	10,83
4	10,92	10,89	11,06	10,81	10,94	10,84	11,03	10,95
5	11,05	11,04	11,05	10,69	10,82	10,92	11,06	11,04

№	Межі інтервал.		Yi-сер	mi-част	Yi*mi	(Yi- $\bar{y}$ ) <sup>2</sup>	(Yi- $\bar{y}$ ) <sup>2</sup> *mi
	Yін	Yів					
1	10,3	10,43	10,365	0	0	0,0827	0
2	10,43	10,56	10,495	14	146,93	0,02483	0,347621671
3	10,56	10,69	10,625	5	53,125	0,00076	0,003802112
4	10,69	10,82	10,755	9	96,795	0,010491	0,094416529
5	10,82	10,95	10,885	4	43,54	0,054021	0,216084114
6	10,95	11,08	11,015	0	0	0,131351	0
7	11,08	11,21	11,145	1	11,145	0,242482	0,242481635
				33	351,535		0,904406061

Графічна інтерперетація розподілу кінцевої вологості тирси після круглопилкових верстатів показана на рисунку 2.6.

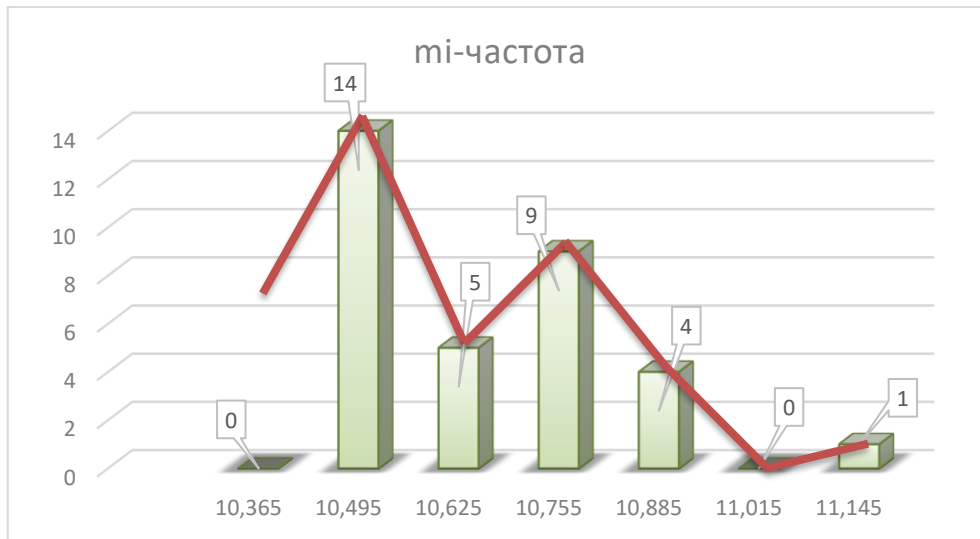


Рисунок 2.6. Графічна інтерпретація результатів досліджень кінцевої вологості тирси після сушіння в стрічковій сушарці ATSS-800.

Як видно з графіка фактичні значення кінцевої вологості тирси після сушіння в стрічковій сушарці ATSS-800 знаходяться в межах 10-12%. Так як цього вимагають технічні умови стосовно необхідного рівня кінцевої вологості подрібненої деревини для виготовлення паливних гранул.

Визначення витрат електричної енергії встановлювався за показами трьохфазного лічильника з трансформатором струму. Одержані покази множили на коефіцієнт струму лічильника який становить – 100. Отримані результати в кВтгод перетворювали в МДж домножаючи на 3,6. Перетворення в мегаджоулі здійснювалося для порівняння витрат теплової і електричної енергії.

Визначення витрат теплової енергії виконувався за допомогою теплового лічильника. Як було описано вище витрати теплової енергії визначалися за показами лічильника на основі даних кількості теплоносія в кубічних метрах за годину і температури теплоносія на вході і виході з калориферів стрічкової конвективної сушарки ATSS-800.

Контроль температури теплоносія на вході і виході з калориферів вибирали з архіву даних роботи автоматичної системи управління і керування

роботою стрічкової конвективної сушарки. Приклад архіву даних приведений в додатках. Загальний вигляд теплового лічильника показаний на рисунку 2.7.



*Рисунок 2.7. Загальний вигляд теплового лічильника стрічкової сушарки ATSS-800*

## Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИРОБНИЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1. Обробка результатів виробничих досліджень витрат.

В процесі виробничих досліджень для сушіння в стрічковій конвективній сушарці ATSS-800 використовувалася подрібнена деревина трьох видів:

- Тирса після вертикального стрічковопилкового верстату;
- Тирса після круглопилкових верстатів;
- Технологічна тріска.

Під час виробничих досліджень

Під час виробничих досліджень витрат електричної і теплової енергії в технологічному процесі сушіння подрібненої деревини різних фракцій експерименти проводилися для кожного виду окремо.

В процесі проведення досліджень швидкість руху стрічки не регламентувалася. Швидкість стрічки визначалася системою автоматичного контролю і управління за результатами зміни біжучої вологості подрібненої деревини в різних зонах сушарки за довжиною і значенням кінцевої вологості деревини. Фактор досягнення необхідної кінцевої вологості визначався вирішальним і визначальним в роботі стрічкової сушарки.

Змінними факторами в процесі досліджень були: вид (фракційність) подрібненої деревини і товщина килиму (шару) який підлягає сушінню. В дослідженнях товщина килиму складала: 100; 140; 220; 260 і 300 міліметрів. Досягнення необхідної висоти шару подрібненої деревини і рівномірний розподіл висоти шару за шириною стрічкової сушарки здійснювалося за допомогою двошнекового розподільчого пристрою який знаходиться в завантажувальному супорті стрічкової сушарки. Висота шару формувалася шляхом переміщення супорта вверх-вниз по відношенню до стрічки сушарки. Загальний вигляд двошнекового розподільчого пристрою показаний на рисунку 2.8.



*Рисунок 2.8. Загальний вигляд двошнекового розподільчого пристрою супорта завантаження стрічкової сушарки.*

Температура сушильного агента на вході в шар висушуваного матеріалу в першій зоні сушарки встановлюється в залежності від значення початкової вологості висушуваної подрібненої деревини. Необхідне значення температури досягається за допомогою трьохходового клапана який регулює подачу теплоносія (гарячої води) в перший калорифер. Окрім цього здійснюється контроль біжучої вологості подрібненої деревини на виході з першої зони сушіння. Якщо трьохходовий клапан відкривається повністю і не вдається досягти заданого значення біжучої вологості на виході з першої зони, то за допомогою інвертора збільшуються обороти (що збільшує напір) центробіжного вентилятора який подає сушильний агент в висушуваний килим. Якщо і цього не достатньо, то автоматична система керування зменшує швидкість руху стрічки до цих пір, поки вологість подрібненої деревини не стане нижчою заданого рівня. Аналогічно відбувається процес керування в другій зоні стрічкової сушарки.

Результати досліджень витрат електричної енергії в процесі сушіння різних видів подрібненої деревини в стрічковій сушарці приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Питомі витрати електричної енергії в процесі сушіння різних видів (фракційності) подрібненої деревини в стрічкових сушарках АТSS-800 для різної товщини килиму

Товщина шару, мм	100	140	180	220	260	300
Питомі витрати МДж./куб.метр: тирса стр.	32	36	48	62	67	73
тирса круглопилкові	25	29	39	51	54	64
технологічна тріска	21	26	33	44	48	54

На рисунках 2.9. і 2.10 показана графічна інтерпретація результатів зміни питомих витрат електричної енергії в залежності від фракційності подрібненої деревини і товщини шару висушуваного матеріалу.

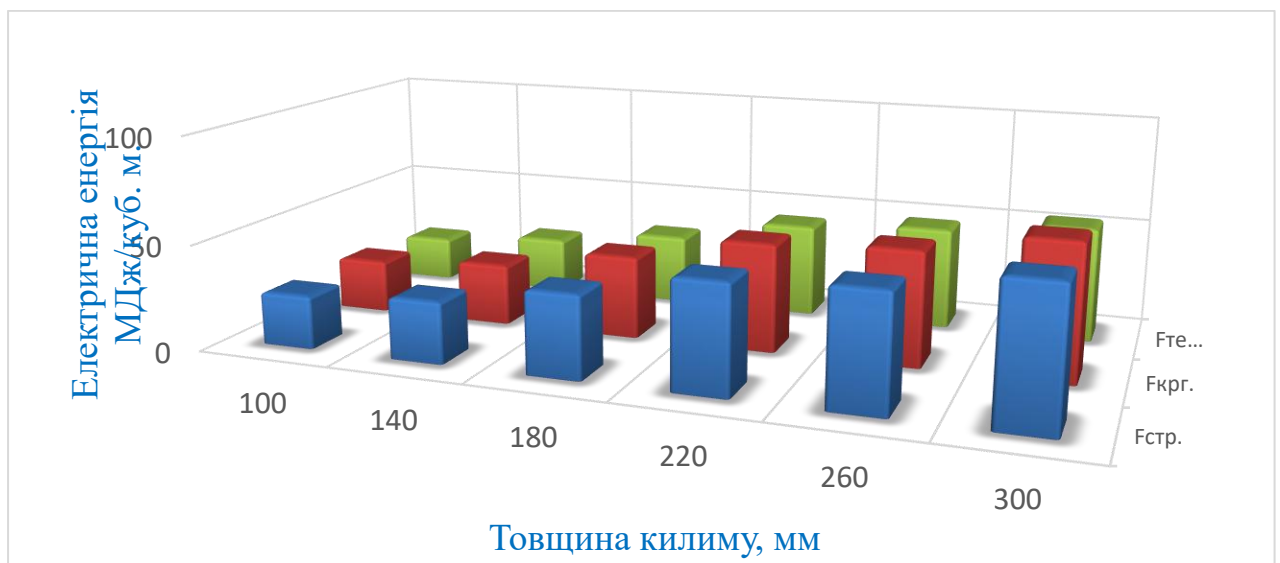


Рисунок 2.9. Діаграми зміни питомих витрат електричної енергії в стрічковій сушарці в залежності від фракційності і товщини шару висушуваного матеріалу.

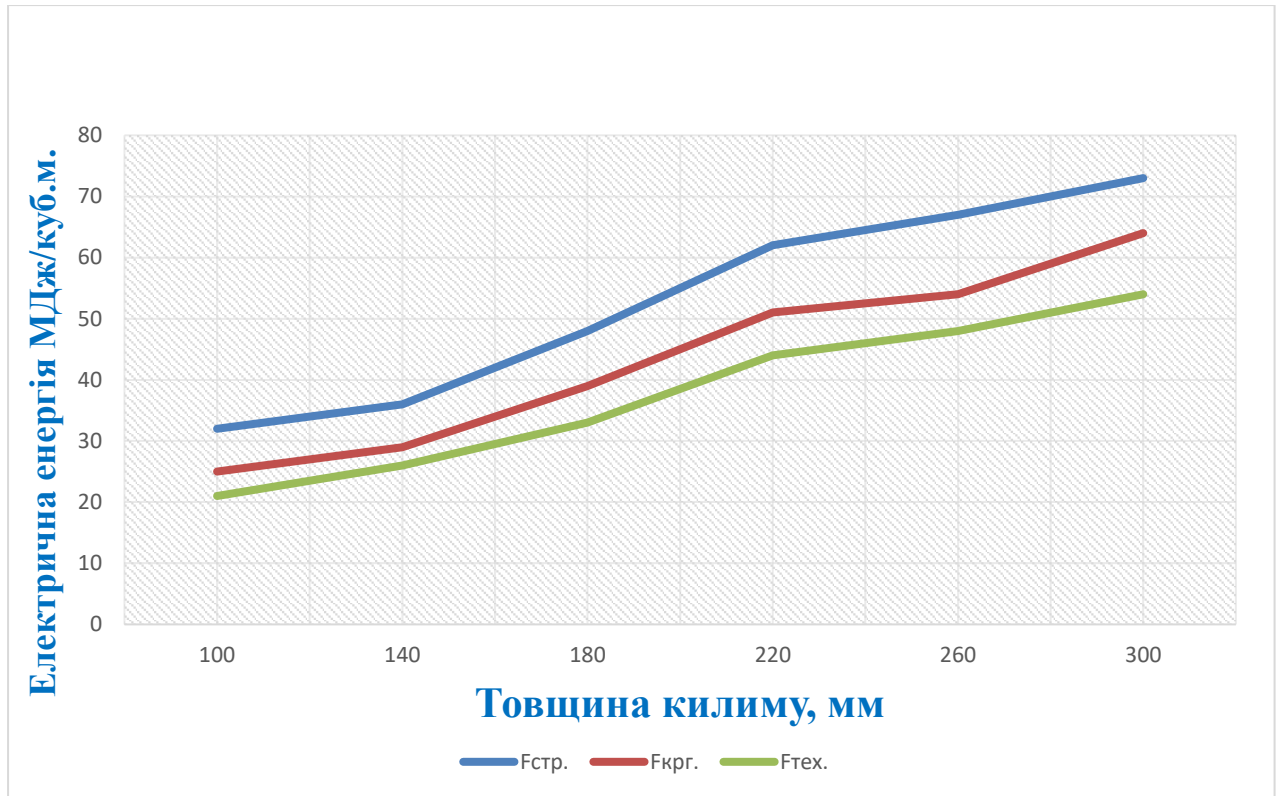


Рисунок 2.10. Графіки зміни питомих витрат електричної енергії в стрічковій сушарці в залежності від фракційності і товщини шару висушуваного матеріалу.

Результати досліджень витрат теплової енергії в процесі сушіння різних видів подрібненої деревини в стрічковій сушарці приведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3.

Питомі витрати теплової енергії в процесі сушіння різних видів (фракційності) подрібненої деревини в стрічкових сушарках ATSS-800 для різної товщини килиму

Товщина шару, мм	100	140	180	220	260	300
Питомі витрати МДж/куб.метр: тирса стр.	881	763	544	615	673	862
тирса круглопилкові	941	823	744	655	783	1040
технологічна тріска	1050	965	847	812	922	1164

На рисунках 2.11. і 2.12 показана графічна інтерпретація результатів зміни питомих витрат теплової енергії в залежності від фракційності подрібненої деревини і товщини шару висушуваного матеріалу.

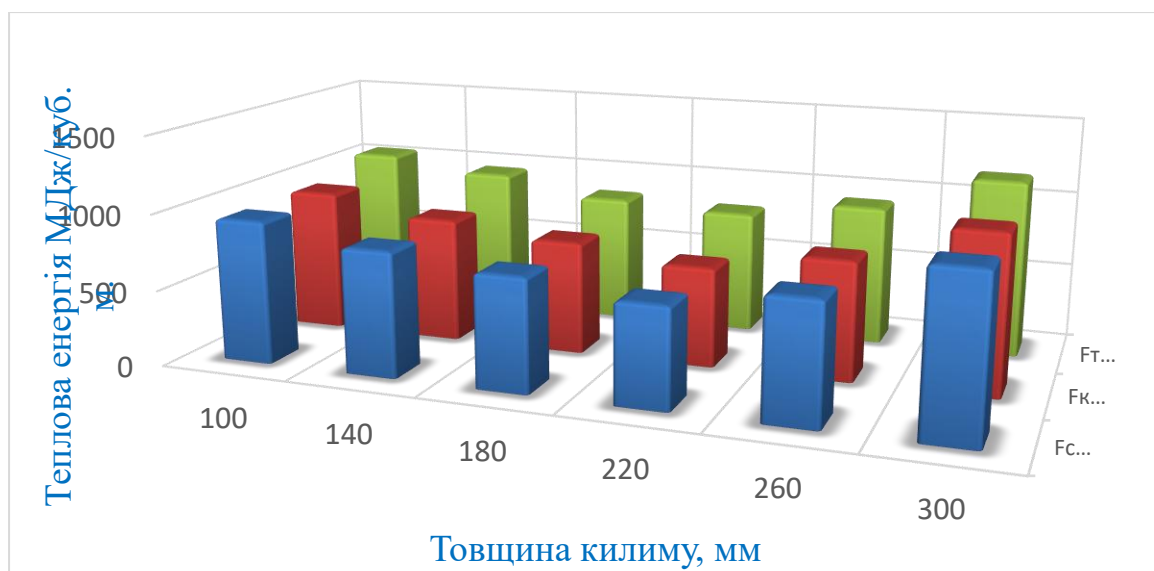


Рисунок 2.11. Діаграми зміни питомих витрат теплової енергії в стрічковій сушарці в залежності від фракційності і товщини шару висушуваного матеріалу.

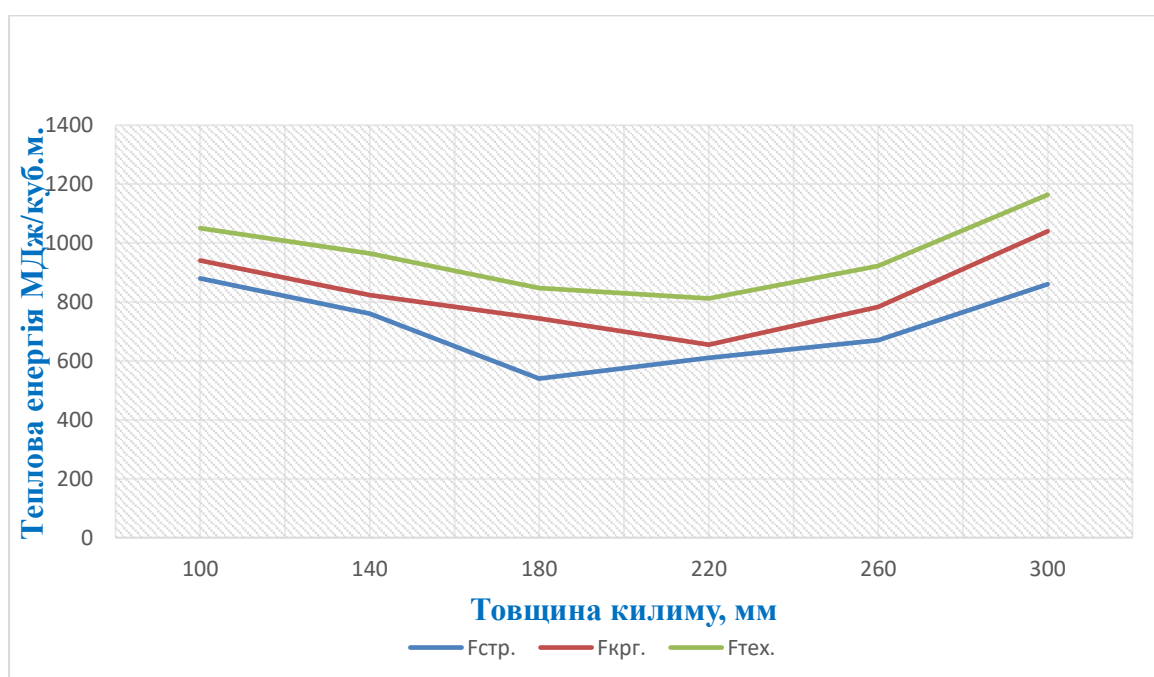


Рисунок 2.12. Графіки зміни питомих витрат теплової енергії в стрічковій сушарці в залежності від фракційності і товщини шару висушуваного матеріалу.

Сумарні результати досліджень питомих витрат енергії (електричної і теплової) в процесі сушіння різних видів подрібненої деревини в стрічковій сушарці приведений в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4.

Сумарні питомі витрати енергії (електричної і теплової) в процесі сушіння різних видів (фракційності) подрібненої деревини в стрічкових сушарках АТSS-800 для різної товщини килиму

Вид подрібненої деревини	Витрати	Питомі витрати енергії МДж/куб.м за товщини килиму, мм					
		100	140	180	220	260	300
	енергії	100	140	180	220	260	300
	теплової	881	763	544	615	673	862
з стрічкового верстату	електричної	32	36	48	62	67	73
	загальний	913	799	592	677	740	935
	теплової	941	823	744	655	783	1040
з круглопилкового верстату	електричної	25	29	39	51	54	64
	загальний	966	852	783	706	837	1104
	теплової	1050	965	847	812	922	1164
технологічна тріска	електричної	21	26	33	44	48	54
	загальний	1071	991	880	856	970	1218

На рисунках 2.13. і 2.14 показана графічна інтерпретація результатів зміни сумарних питомих витрат енергії (електричної і теплової) в залежності від фракційності подрібненої деревини і товщини шару висушуваного матеріалу.



Рисунок 2.13. Діаграми зміни сумарних питомих витрат енергії (електричної і теплової) в стрічковій сушарці в залежності від фракційності і товщини шару висушуваного матеріалу.

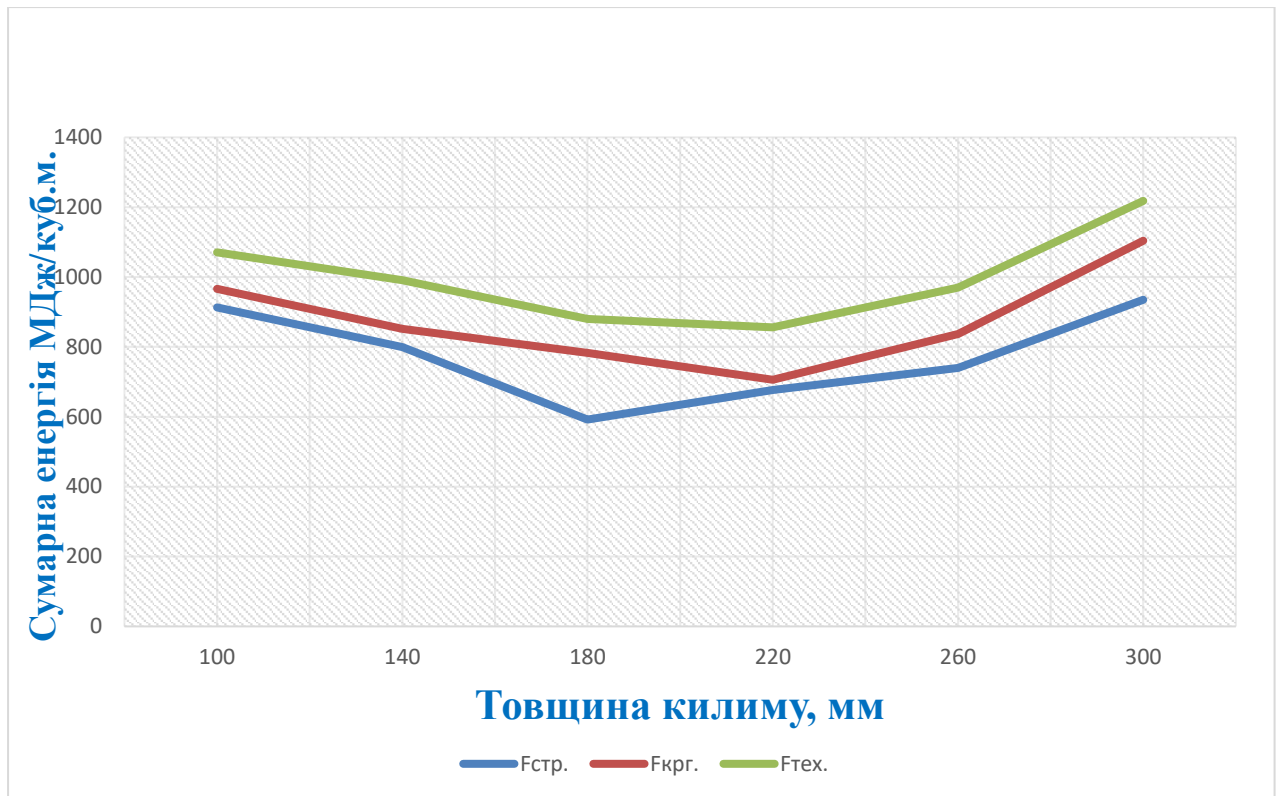


Рисунок 2.14. Графіки зміни сумарних питомих витрат енергії енергії (електричної і теплової) в стрічковій сушарці в залежності від фракційності і товщини шару висушуваного матеріалу.

### 3.2. Технологічні рекомендації з мінімізації витрат енергії в стрічкових сушарках

З приведених в таблицях 2.2; 2.3 і 2.4 результатів досліджень питомих витрат електричної і теплової енергії, а також їх сумарних значень стосовно зміни від фракційності подрібненої деревини і товщини висушуваного шару матеріалу. Графічна інтерпретація виконаних виробничих досліджень питомих витрат різних видів енергії в процесі сушіння різних видів подрібненої в стрічкових сушарках дозволяє зробити наступні висновки і рекомендації:

- Питоми витрати електричної енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках різних фракцій зростають із зростанням товщини шару висушуваного матеріалу;

- Зменшення розмірів (фракційності) подрібненої деревини приводить до зростання питомих витрат електричної енергії;
- Питомі витрати теплової енергії збільшуються із збільшенням розмірів (фракційності) подрібненої деревини;
- Питомі витрати теплової енергії зменшуються при збільшенні товщини килиму висушуваного матеріалу з 100 до 180 міліметрів і збільшуються з зростанням товщини килиму з 180 до 300 міліметрів.
- Результати досліджень сумарних питомих витрат енергії (електричної і теплової) дозволяють встановити оптимальну товщину висушуваного шару для різної фракційності подрібненої деревини з метою зменшення питомих витрат енергетичних витрат в стрічковій сушарці.

## Список використаних джерел

1. Андрашек Й. В. Мультимедійний конспект лекцій з дисципліни “Технологія сушіння і захист деревини” в форматі PDF. – Львів, 2014. – 675 с.
2. Методичні вказівки: застосування методів статистичного аналізу в деревообробленні. Частина I. – Львів: УкрДЛТУ, каф. ТВД, 2004. – 32 с.
3. Кійко О.А. Статистичні методи підвищення якості продукції деревооброблення. – Львів: Панорама. – 228 с.
4. Андрашек Й.В. Методичні вказівки для виконання курсового проекту з дисципліни «Технологія сушіння і захист деревини». – Львів: РВЦ УкрДЛТУ, 2010. – 72 с.
5. Білей П.В., Теоретичні основи теплової обробки і сушіння деревини. Коломия: Вік, 2005. -360 с.
6. Білей П.В., Павлюст В.М. Сушіння і захист деревини. Підручник. -Львів, Ліга. Прес, 2008.-312 с.
10. Mujumdar A.S. Principles, classification, and selection of dryers. Handbook of Industrial Drying. – London: Taylor ~~and~~ an Francis Group, 2021. – 1282 p
11. Chen D., Zheng Y., Zhu X. Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal con
12. George D. Basic wood properties. Forest products measurements and conversion factors. – Washington: University of Washington, College of Forest Resources, 2014.- 12 p.
13. George D. Chips, sawdust, planer shavings, bark and hog fuel. Forest products measurements and conversion factors. – Washington: University of Washington, College of Forest Resources, 2004. - 15 p.
14. Fagernas L., Brammer J., Wilen C., Lauer M., Verhoeff F. Drying of biomass for second generation synfuel production // Biomass and Bioenergy. – No. 34 (2021) pp. 1267 – 1277.

15. Simpson T.W Equilibrium Moisture Content of Wood in Outdoor Locations in the United States and Worldwide. – Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2018. – 11 p.
16. Simpson W., Tschernitz J. Importance of thickness variation in kiln drying red oak lumber. – Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. – 9 p.
17. Wood density table // <http://www.aqua-calc.com/page/densitytable> // [15.05.2022.]
18. Marouslis Z.B., Mujumdar S.A., Saravacos G.D. Spreadsheetsaided dryer design. Handbook of Industrial Drying. – London: Taylor and Francis Group, 2016. – 1282 p. dition // Bioresource Technology. – No. 107 (2012) pp. 451 – 455.

# Додатки

## Додаток 1.

## Архівування даних роботи стрічкової сушарки ATSS-800

0:00:00	91,62	111	99,5	2,1	20,1	2,9	18,4	1,9	18,9	0,5	17,1	0	0	78,5	48,5	598	71,3
0:00:00	91,62	111	99,5	2,1	20,1	2,9	18,4	1,9	18,9	0,5	17,1	0	0	78,5	48,5	598	71,3
0:00:01	97,31	108,87	100	2,1	21,9	3,1	19,9	2,5	21,1	2,7	16,9	0	0	79,7	61,4	489	75,7
0:00:02	99,62	107,25	97,5	2,4	25,4	4,1	23	3	25,4	2,5	16,9	4,6	16,9	87,6	68,2	429	75,7
0:00:03	100,93	105,62	95,62	2,7	28,5	3,6	26,8	3,6	29,4	4,6	16,8	4,2	16,9	89,6	69,2	362	58,7
0:00:04	101,31	104,5	94,5	10,6	32,6	3,8	30,4	4,2	34,5	2,1	16,9	4,6	16,9	87,8	71	260	61,9
0:00:05	101,18	103,56	93,75	10,9	36,8	3,8	35,8	4,7	40,4	4,9	17,2	4,9	17,2	83,1	53,4	282	60,9
0:00:06	100,62	102	92,81	10,8	39	4,1	39,5	5	44,4	1,9	17,4	4,9	17,2	86,7	44,3	274	60,9
0:00:07	99,93	100,62	91,87	10,9	41,3	4,2	44,4	5,2	49,5	1,6	17,8	4,4	17,6	86,2	53,4	298	56,4
0:00:08	98,75	98,75	90,62	10,8	42,4	10,5	47,7	12,1	52,7	4,1	18,1	4,8	18	86,6	48,3	425	36,2
0:00:09	97,68	97,43	89,5	11,1	43,5	11	51,4	11,8	55,9	13,5	18,6	2,7	18,4	86,8	37,2	434	34,9
0:00:10	96,43	95,93	88,37	11,3	43,9	4,7	53,2	4,4	57,4	7,4	18,9	7,4	18,9	85,7	31,4	456	34,9
0:00:11	95,12	94,18	87,12	11,1	44	13	54,8	14,5	58,8	7,3	19,5	7,3	19,5	83,4	29,4	462	34,9
0:00:12	93,43	92,31	85,25	11	43,9	13,2	55,3	11,4	59,2	6,2	19,7	7,3	19,5	80,6	31,7	474	34,9
0:00:13	92,06	91	83,93	10,9	43,5	6,5	55,2	8,7	58,9	10,7	19,9	10,7	19,9	78,9	29,5	489	29,1
0:00:14	90,56	89,5	82,37	10,8	43	11,6	54,7	11,9	58,3	7,9	20,2	7,9	20,2	77,1	28,2	436	28,9
0:00:15	89,25	88,25	80,87	10,8	42,6	10,6	54,1	8,2	57,6	3,9	20,4	7,9	20,2	76	32,4	438	28,9
0:00:16	87,93	86,93	79,75	10,7	41,9	11,2	53	7,9	56,4	4,2	20,4	8,1	20,4	74,9	33,1	451	28,9
0:00:17	86,37	85,43	78,25	10,4	41,4	10,2	52,2	11,6	55,5	9	20,6	7,2	20,5	74,5	43,1	447	28,9
0:00:18	85,18	84,43	77,06	10,5	40,6	9,8	50,9	6,6	54,2	0,9	20,7	7,2	20,5	74,7	50,4	440	33,4
0:00:19	83,93	83,37	76,06	10,4	40,2	12,2	50,1	10,8	53,4	2,8	20,8	8,1	20,8	74,7	39,9	436	34
0:00:20	83	82,62	75,37	10,3	39,4	9,9	48,8	7,7	52,4	6,1	20,9	7,3	20,9	73,4	35,8	436	34
0:00:21	82	81,75	74,43	10,4	38,9	10,7	47,9	9,6	51,7	6,9	21,1	6,8	21	72,8	46,7	409	34
0:00:22	81,18	80,93	73,56	9,8	38,3	10,7	46,7	12,7	50,8	9,1	21,2	9,1	21,2	73,2	35,9	405	34
0:00:23	80,18	80,12	72,87	10,2	37,9	10,3	45,9	10,1	50,1	8,5	21,2	8,5	21,2	71,4	31,4	411	36,4
0:00:24	79,5	79,5	72,25	10,4	37,2	10,4	44,7	7,6	49,1	3,6	21,2	9,2	21,3	69,9	43,5	447	34,2
0:00:25	78,68	78,68	71,37	10,5	36,8	10,8	43,8	10,5	48,4	6,7	21,3	9,2	21,3	70,8	44,6	438	34,2
0:00:26	77,93	78,06	70,81	10,4	36,4	8,8	43,1	7	47,8	10,7	21,3	9,1	21,3	70,6	32,4	456	34,2
0:00:27	77,31	77,5	70,37	10,5	35,9	7,6	42,1	5,5	46,8	8,3	21,3	8,3	21,3	68,1	36,2	456	34,2
0:00:28	76,75	76,87	69,75	10,8	35,6	11,7	41,5	10,2	46,3	7,3	21,4	8,3	21,3	67,8	47,6	494	31,6
0:00:29	76,12	76,37	69,25	10,5	35,1	12,3	40,7	12,4	45,7	9	21,4	9	21,4	68,8	36,4	538	31,6
0:00:30	75,5	75,75	68,75	10,9	34,8	10,4	40,1	5,5	45,3	14,3	21,3	14,3	21,3	68,5	34,2	551	31,6
0:00:31	75,12	75,37	68,25	10,9	34,4	8,7	39,4	4,5	44,5	5,9	21,3	14,3	21,3	68,2	45,9	545	31,6
0:00:32	74,43	74,87	67,81	10,9	34,1	11,6	38,9	12,7	44,1	3,8	21,3	8,8	21,3	67,9	36,4	562	31,6
0:00:33	74,06	74,5	67,43	10,7	33,8	10,7	38,3	9,1	43,6	13,1	21,2	13,1	21,2	67,1	30,4	562	29,9
0:00:34	73,56	74,12	67	10,7	33,5	9,1	37,8	7,7	43,2	5,8	21,1	13,1	21,2	65,1	29,9	576	29,9
0:00:35	73,25	73,81	66,75	10,8	33,2	11,4	37,3	10,6	42,7	8,3	21,1	8,9	21,1	66,1	32,1	620	29,9
0:00:36	72,81	73,43	66,37	10,8	32,9	11,4	36,9	11,5	42,4	14,7	21	14,7	21	66,3	28,3	560	29,9
0:00:37	72,43	73,18	65,87	10,9	32,7	10,1	36,6	7,6	41,9	4,7	20,9	11,6	20,9	64,9	27	500	32,2
0:00:38	72,12	73	65,62	10,6	32,4	12,5	36,1	13,9	41,3	4,8	20,9	10,8	20,9	63,9	25,9	500	32,9
0:00:39	71,81	72,81	65,31	10,4	32,1	12,6	35,8	10,8	40,9	8,4	20,9	8,1	20,9	63,2	36,7	567	32,9
0:00:40	71,56	72,68	65	11,4	31,9	10,3	35,4	7,7	40,4	8,3	20,9	2,4	20,9	64,2	42,2	651	32,9
0:00:41	71,37	72,5	64,75	11,4	31,7	12,1	35,1	10,1	39,9	9,2	20,9	10,6	20,9	65,2	32,4	705	32,9
0:00:42	71,18	72,43	64,56	10,9	31,5	10,9	34,8	7,8	39,4	11,3	20,8	14,4	20,8	65,3	28,6	722	26,7
0:00:43	71	72,31	64,31	11,3	31,3	12,1	34,6	7,3	39	6,2	20,7	14,4	20,8	65,2	27,5	754	26,9
0:00:44	70,87	72,25	64,31	11,2	31,1	12,5	34,2	13,8	38,6	8,9	20,6	9,7	20,8	64,9	26,2	762	26,7
0:00:45	70,81	72,25	64,31	10,6	30,9	9,5	33,9	4,4	38,3	11,8	20,6	11,8	20,6	64,8	25,9	758	26,7
0:00:46	70,87	72,5	64,37	11	30,8	11,2	33,6	10,1	37,8	9,1	20,6	8,6	20,7	64,7	33	749	26,7

0:00:47	71,12	73	64,75	10,3	30,6	11,2	33,3	9,5	37,6	9,3	20,6	11,8	20,6	65,1	28,8	782	26,8
0:00:48	71,5	73,56	65,12	10,4	30,4	8,1	33,1	8,2	37,3	9,3	20,5	9,1	20,6	65,6	27,9	771	26,8
0:00:49	71,93	74,06	65,62	10,4	30,3	8,2	32,9	3,8	37	8	20,5	8	20,5	65,8	30,3	734	26,8
0:00:50	72,37	74,37	66,25	10,4	30,2	8,8	32,8	8	37,1	5,9	20,4	8,4	20,4	66,3	29,5	711	26,6
0:00:51	72,62	74,43	66,62	9,7	30	7,9	32,8	7,6	37,3	4,2	20,3	7,6	20,3	66,6	27,1	705	26,6
0:00:52	72,93	74,68	66,81	9,7	29,9	9,5	32,7	6,7	37,4	6,8	20,3	8,5	20,3	66,6	25,9	705	26,3
0:00:53	73,25	75	67,18	10,1	29,7	10,4	32,8	5,5	37,8	5,7	20,3	5,8	20,3	66,9	25,1	676	26,4
0:00:54	73,62	75,43	67,68	10,3	29,7	10,3	32,8	8,7	38,1	7,1	20,4	7,7	20,3	67,2	24,8	667	26,4
0:00:55	74,06	75,93	68,12	9,9	29,6	8,2	32,9	4,2	38,4	6,2	20,4	6,9	20,4	67,4	25,2	647	26,4
0:00:56	74,62	76,5	68,81	10,2	29,5	9,8	32,9	5	38,8	3,8	20,4	9	20,4	67,2	25,5	629	26,4
0:00:57	75,06	76,87	69,37	9,5	29,4	9,3	33,1	8,7	39,1	8,5	20,5	8,5	20,5	67,4	25,4	625	26,4
0:00:58	75,56	77,37	69,87	10,4	29,4	7,5	33,1	5	39,4	7,3	20,5	7,3	20,5	67,8	25,6	629	26,4
0:00:59	76,06	77,93	70,31	10,4	29,4	8	33,1	6,5	39,4	8,2	20,6	8,2	20,6	68,2	25,9	642	26,4
0:01:00	76,62	78,62	70,93	10,9	29,3	10,8	33,1	9,7	39,4	2,8	20,6	8	20,6	68,9	26,2	616	26,4
0:01:01	77,31	79,43	71,62	10,9	29,3	10,7	33,1	8,5	39,4	2,3	20,6	7,4	20,7	69,4	26	625	26,4
0:01:02	78	80,18	72,18	11,2	29,3	9,4	33	5,4	39,4	6,8	20,7	8,3	20,7	70	25,6	634	26,4
0:01:03	78,75	81	73	10,8	29,3	10,1	33,1	6,9	39,4	5,3	20,7	8,3	20,7	69,9	26,1	607	26,4
0:01:04	79,37	81,5	73,62	11,3	29,3	10,5	33,1	9,5	39,4	8,6	20,7	8,6	20,7	69,5	26,7	611	27,1
0:01:05	80	82,12	73,93	10,9	29,3	11,1	33,1	9	39,3	8,3	20,8	8,3	20,8	69,4	26,4	640	27,1
0:01:06	80,43	82,56	74,25	11,1	29,3	11,1	33,1	6,2	39,2	3,9	20,8	8,6	20,8	69,8	26,2	647	27,1
0:01:07	81	83,06	74,62	11,4	29,3	8,3	33,1	11,6	39,1	7,3	20,8	8,6	20,8	71,3	27,6	625	27,1
0:01:08	81,43	83,5	75,06	11,2	29,4	11	33,1	10,7	39,1	6,7	20,9	6,7	20,9	71,6	26,7	660	27,1
0:01:09	81,93	84	75,37	11,6	29,4	8,2	33,1	6,4	39,1	6,4	20,9	6,4	20,9	72,6	25,8	678	27,5
0:01:10	82,37	84,5	75,56	11,4	29,4	6,2	33,1	7	39,2	5,6	20,9	9,6	20,9	73,8	25,8	685	27,5
0:01:11	82,81	84,93	76	11,7	29,5	8,9	33,2	9,1	39,3	4,6	20,9	10,8	20,9	74,1	25,8	665	27,5
0:01:12	83,37	85,43	76,62	12	29,6	9,5	33,3	6,1	39,4	4,5	20,9	5,4	20,9	74,3	25,6	660	27,5
0:01:13	83,68	85,68	76,93	11,6	29,6	9,5	33,5	7	39,7	7,6	20,9	7,5	20,9	74,9	25,8	665	27,7
0:01:14	84,18	86,25	77,25	11,8	29,7	12,5	33,6	9,8	39,9	10,9	20,9	10,9	20,9	75,7	26,1	678	27,7
0:01:15	84,25	86,56	79,18	11,3	29,7	10,2	33,7	10	40,1	6,4	21	8,3	21	62,4	21,2	651	19,3
0:01:16	84,81	87,06	78,62	11,9	29,7	10,7	33,8	7,7	40,3	0,9	21	6,6	21	70,9	25,6	705	26,1
0:01:17	85,37	87,68	78,43	10,8	29,6	11,5	33,9	6	40,5	5,8	21,1	7,8	21,1	74,6	26,7	714	26,1
0:01:18	86	88,37	78,75	11,3	29,7	9	33,9	7	40,6	4,9	21,2	7,8	21,1	76,9	28,6	740	26,1
0:01:19	86,5	88,81	79,25	11,4	29,7	8,2	34	11,2	40,8	9,2	21,2	9,2	21,2	77,8	27,8	749	26,1
0:01:20	87	89,18	79,5	10,4	29,8	3,4	34,1	5,7	41,1	4,7	21,2	8,9	21,2	78,5	27,8	762	28,6
0:01:21	87,31	89,5	79,87	11,1	29,8	8,3	34,4	7,6	41,4	3,6	21,2	7,6	21,2	78,6	29,6	754	28,3
0:01:22	87,68	89,87	80,12	11,6	29,9	9,3	34,9	8,4	42,1	10,4	21,3	10,4	21,3	79,1	28,4	754	28,4



sigma A	0,364319	-0,00010485	1,15648E-06
Sigma E	0,107076	0,009670541	0,000660332
		0,050223186	0,002918272
A/sA	2,511188	0	-0,05175952
E/sE	-81,984	0,119403835	-0,11759469
		0,124415969	-0,17951034

Y <sub>ih</sub>	Y <sub>iv</sub>	mi- част	z <sub>ih</sub>	z <sub>iv</sub>	F(z <sub>ih</sub> )	F(z <sub>iv</sub> )	P <sub>i</sub>	P <sub>i</sub> *N	(mi- P <sub>i</sub> *N) <sup>2</sup>	(mi- P <sub>i</sub> *N) <sup>2</sup> /P <sub>i</sub>
10,3	10,43	0	-2,3447725	-1,48021951	-0,4484	-0,3238	0,1246	4,984	24,840	4,984
10,43	10,56	14	-1,48021951	-0,61566652	-0,3238	-0,091	0,2328	9,312	21,977	23,44
10,56	10,69	5	-0,61566652	0,248886466	-0,091	0,1808	0,2718	10,872	34,480	3,7
10,69	10,82	9	0,248886466	1,113439454	0,1808	0,379	0,1982	7,928	1,149	0,3
10,82	10,95	4	1,113439454	1,977992442	0,379	0,4693	0,0903	3,612	0,151	0,0
10,95	11,08	0	1,977992442	2,842545429	0,4693	0,49495	0,02565	1,026	1,053	1,0
11,08	11,21	1	2,842545429	3,707098417	0,49495	0,49944	0,00449	0,1796	0,673	11,7

33

23,4

f= 4  
q= 5  
 $\chi^2_{\tau}$ = 9,49

## ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВИНИ



Технологічна тріска: довжина: 20-60 мм, товщина: до 30 мм.



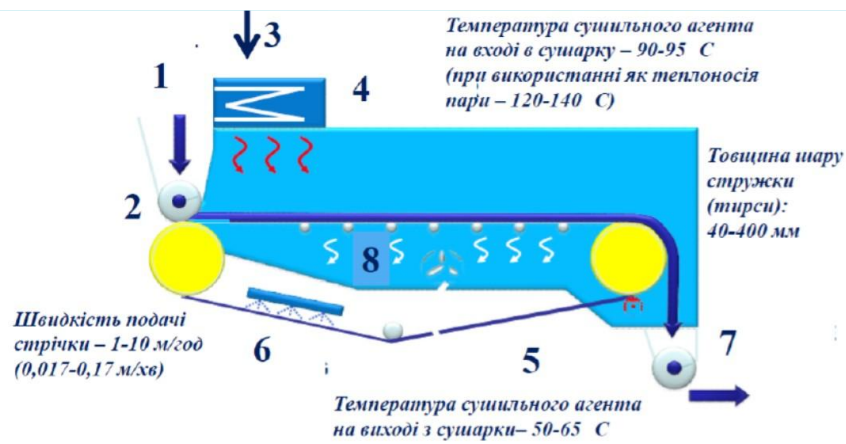
Спеціальна технологічна тріска (стренди) для виробництва плит OSB: довжина: 75 до 150 мм, ширина: 10 до 25 мм, товщина: 0,5 до 0,75 мм.



Стружка для виробництва деревостружкових і деревоволокнистих плит: довжина-до 40 мм, товщина-до 1 мм.



Тирса: після лісопильних рам і круглопилкових верстатів (**крупна**: довжина-до 5 мм, товщина-до 2 мм), після стрічкопилкових верстатів (**дрібна**: довжина-до 3 мм, товщина-до 1 мм).



1- завантаження подрібненої деревини); 2- двох-шнековий механізм завантаження для забезпечення рівномірності товщини килиму за шириною стрічкової сушарки; 3- подача свіжого повітря в калорифер; 4 – калорифер з оребрених алюмінієвих труб ; 5– вологий сушильний агент після сушіння; 6 - щітки очищення стрічки за допомогою розпиленої води; 7– висушена подрібнена деревина до заданої вологості.

3

*Мета роботи - мінімізація витрат електричної і теплової енергії в стрічкових сушарках в залежності від виду (фракційності) подрібненої деревини, товщини і швидкості руху килиму.*

5

**Об'єкт дослідження** – вимірювання витрат електричної і теплової енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках.

**Предмет дослідження** – вплив фракційності подрібненої деревини і параметрів килиму на питомі витрати електричної і теплової енергії в стрічкових сушарках.

6

### **Задачі досліджень:**

- зробити методику виробничих досліджень витрат електричної і теплової енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках;
- в реальних виробничих умовах виконати дослідження витрат енергії в процесі сушіння подрібненої деревини різної фракційності, товщини висушуваного матеріалу і швидкості руху стрічки;
- виконати статистичну обробку результатів виробничих експериментальних даних витрат електричної і теплової енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках за різних умов виконання процесу;
- запропонувати технологічні рекомендації енергоощадної технології сушіння подрібненої деревини в стрічкових конвективних сушарках в залежності від різної фракційності, товщини висушуваного матеріалу і швидкості руху стрічки.

7

## Стрічкова сушарка ATSS-800 на виробництві



8

## Подрібнена деревина яка використовувалася для проведення виробничих досліджень

*Тирса після стрічковопилкових верстатів*

*Тирса після круглопилкових верстатів*

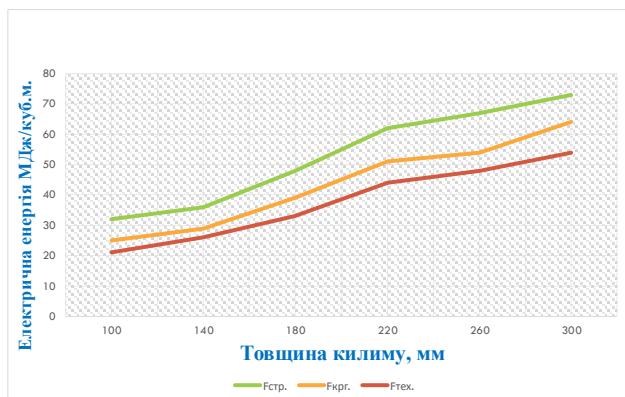
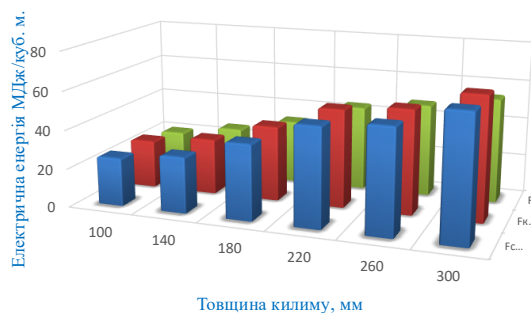
*Технологічна тріска*



9

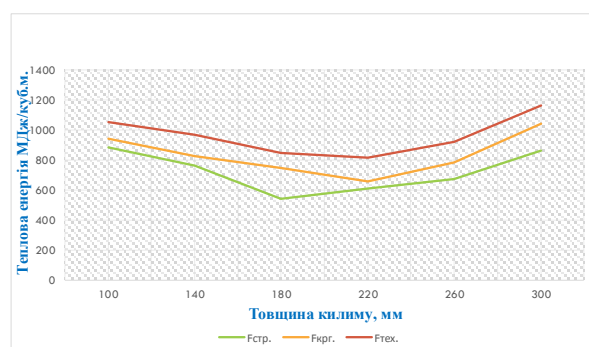


## Зміна питомих витрат електричної енергії в залежності від товщини шару і фракційності подрібненої деревини



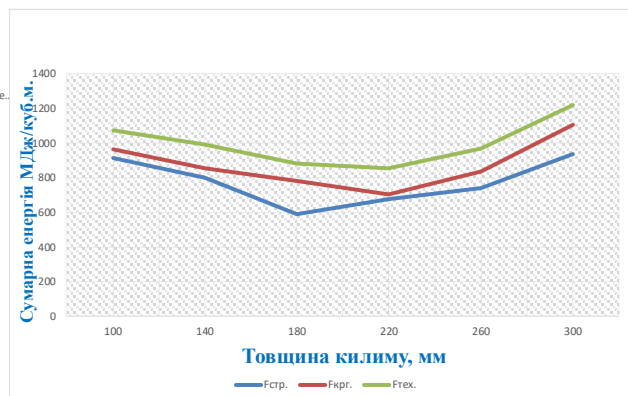
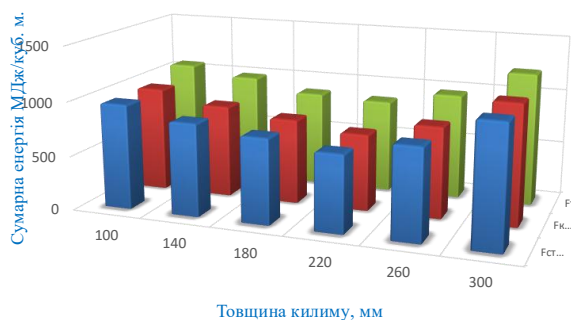
11

## Зміна питомих витрат теплової енергії в залежності від товщини шару і фракційності подрібненої деревини



12

## Зміна загальних питомих витрат енергії в залежності від товщини шару і фракційності подрібненої деревини



13

## Висновки і рекомендації

- Питомі витрати електричної енергії в процесі сушіння подрібненої деревини в стрічкових сушарках різних фракцій зростають із зростанням товщини шару висушуваного матеріалу;
- Зменшення розмірів (фракційності) подрібненої деревини приводить до зростання питомих витрат електричної енергії;
- Питомі витрати теплової енергії збільшуються із збільшенням розмірів (фракційності) подрібненої деревини;
- Питомі витрати теплової енергії зменшуються при збільшенні товщини килиму висушуваного матеріалу з 100 до 180 міліметрів і збільшуються з зростанням товщини килиму з 180 до 300 міліметрів.
- Результати досліджень сумарних питомих витрат енергії (електричної і теплової) дозволяють встановити оптимальну товщину висушуваного шару для різної фракційності подрібненої деревини з метою зменшення питомих витрат енергетичних витрат в стрічковій сушарці.

14