Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет аграрних технологій та екології

(повне найменування факультету)
Кафедра лісового господарства

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

Оптимізація використання хвойної сировини під час рубок головного користування у соснових культурах

спеціальність 205 Лісове господарство
(шифр і назва спеціальності)
освітня програма «Лісове господарство»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЛГм-21
ПАСЕВИЧ Ярослав Васильович

_____
(підпис)
Керівник:
к.т.н., доцент
ГЕРАСИМЧУК Олександр Павлович

_____
(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«___» _____ 2025 р.
д.с.-г.н., професор,
гарант освітньої програми:
МАЗЕПА Василь Григорович

_____
(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *аграрних технологій та екології*
Кафедра *лісового господарства*
Ступінь вищої освіти: *магістр*
Галузь знань: *20 Аграрні науки і продовольство*
Спеціальність: *205 Лісове господарство*
Освітня програма: *«Лісове господарство»*
ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____*В. Волянський*
«___» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Пасевичу Ярославу Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

«Оптимізація використання хвойної сировини під час рубок головного користування у соснових культурах»

Керівник роботи: *Герасимчук Олександр Павлович, к.т.н., доцент*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «28» червня 2025 р. №427//01-07

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «09» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи *Нормативно база (Лісовий кодекс України, Правила рубок головного користування, Санітарні правила. Таксаційні характеристики пробних площ (ПП-1 і ПП-2, по 0,10 га).*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):

Розділ 1. Огляд літератури та нормативних засад

Розділ 2. Об'єкт та методика досліджень

Розділ 3. Ресурсний потенціал, втрати та якість хвої у процесі рубок головного користування

Розділ 4. Оптимізаційні рішення для інтегрованої заготівлі хвойної сировини під час рубок головного користування

Висновки та рекомендації. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Мета, завдання, об'єкт, предмет, дослідження. 2. Рубки головного користування. 3, 4. Напрями використання хвойної сировини та вимоги до її якості. 5,6 Технології відділення хвої від гілок і підготовки до переробки.7. Об'єкт та вихідні дані досліджень. 8 Методика оцінювання потенційних обсягів хвойної сировини на лісосіках. 9 Методика аналізу технологічного процесу та втрат хвої. 10. Методика техніко-економічного порівняння традиційної та інтегрованої технологій. 11. Критерії оптимізації та система показників ефективності. 12. Ресурсний потенціал хвойної сировини під час рубок головного користування.13. Втрати хвої під час традиційної технологічної схеми рубок. 14. Втрати хвої під час традиційної технологічної схеми рубок. 15. Інтегрована технологія заготівлі хвої під час рубок головного користування. 16. Висновки та рекомендації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1,2,3,4	*Герасимчук О.П.*		

7. Дата видачі завдання *«30» серпня 2025 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Обґрунтування теми*	*13.09.2025 р.*	
2	*Розділ 1. Огляд літератури та нормативних засад*	*27.09.2025 р.*	
3	*Розділ 2. Програма, методика та об'єкт досліджень*	*11.10.2025 р*	
4	*Розділ 3. Ресурсний потенціал, втрати та якість хвої у процесі рубок головного користування*	*08.11.2025 р.*	
5	*Розділ 4. Оптимізаційні рішення для інтегрованої заготівлі хвойної сировини під час рубок головного користування*	*2911.2025 р.*	
6	*Висновки та рекомендації*	*09.12.2025 р.*	
7	*Формування списку використаних джерел*	*04.12.2025 р.*	
8	*Формування додатків*	*04.12.2025 р.*	
9	*Оформлення ілюстративного матеріалу*	*06.12.2025 р.*	
10	*Інструментальна перевірка на академічний плагіат*	*06.12.2025 р.*	
11	*Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту*	*09.12.2025 р.*	

Здобувач вищої освіти _____ *Пасевич Я.В.*
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ *Герасимчук О.П.*
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пасевич Я.В. Оптимізація використання хвойної сировини під час рубок головного користування у соснових культурах. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Лісове господарство» спеціальності 205 «Лісове господарство». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і рекомендацій, списку використаних джерел, додатків.

У кваліфікаційній роботі магістра розглянуто шляхи оптимізації використання хвойної сировини під час рубок головного користування у соснових культурах Полісся на основі переходу від традиційної технологічної схеми, орієнтованої на заготівлю стовбурової деревини, до інтегрованої схеми з формуванням керованого потоку крони як сировини. Запропоновано методику оцінювання потенційних обсягів хвойної сировини на лісосіках та методику аналізу втрат і погіршення якості хвої у контрольних точках технологічного ланцюга (валка, переміщення/контакт із ґрунтом, складування, відділення). Методичні положення апробовано на двох модельних пробних площах із розрахунком потенційної маси хвої, інтегрального коефіцієнта збереження та виходу фракцій за якістю. Виконано порівняльний аналіз традиційної та інтегрованої технологій організації робіт. Обґрунтовано інтегровану технологію заготівлі з використанням сучасного комплексу машин (харвестер, форвардер, процесор) і мобільного обладнання для відділення хвої, зокрема гідроструминного способу як варіанту відділення та первинного очищення. Сформульовано практичні рекомендації для лісогосподарських підприємств щодо планування майданчиків, регламентації часу зберігання та організації контролю якості партій хвойної сировини.

Ключові слова: ХВОЯ, ДЕРЕВНА ЗЕЛЕНЬ, СОСНОВІ КУЛЬТУРИ, РУБКИ ГОЛОВНОГО КОРИСТУВАННЯ, ІНТЕГРОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ, ВТРАТИ, ЯКІСТЬ, МІНЕРАЛЬНІ ДОМІШКИ, МОБІЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ, ГІДРОСТРУМИННЕ ВІДДІЛЕННЯ.

ABSTRACT

Pasevych Ya. V. Coniferous Raw Material Use Optimization during Final Fellings in Pine Plantations. Manuscript.

Master's thesis of OP «Forestry» specialty 205 «Forestry». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions and recommendations, a list of used sources, and appendices.

In the master's qualification thesis, ways to optimize the use of coniferous raw material during final felling operations in Scots pine plantations of the Polissia region are considered, based on the transition from a conventional harvesting scheme focused on stemwood production to an integrated scheme that forms a controlled flow of crown biomass as a raw material. A methodology is proposed for estimating the potential volumes of coniferous raw material on cutting areas and for analyzing losses and deterioration of needle quality at control points of the technological chain (felling, skidding/ground contact, storage, separation). The methodological provisions were tested on two model sample plots with calculations of the potential needle mass, an integral preservation coefficient, and the yield of quality-based fractions. A comparative analysis of conventional and integrated work organization technologies was carried out. An integrated harvesting technology is substantiated using a modern machine system (harvester, forwarder, processor) and mobile equipment for needle separation, including a hydraulic jet separation method as an option for separation and primary cleaning. Practical recommendations are formulated for forestry enterprises regarding site planning, regulation of storage time, and organization of quality control for batches of coniferous raw material.

Keywords: PINE NEEDLES, WOOD GREENERY, SCOTS PINE PLANTATIONS, FINAL FELLING, INTEGRATED TECHNOLOGY, LOSSES, QUALITY, MINERAL IMPURITIES, MOBILE EQUIPMENT, HYDRAULIC JET SEPARATION.

ЗМІСТ

Вступ..... 7

Розділ 1. Огляд літератури та нормативних засад..... 10

1.1. Рубки головного користування у соснових культурах..... 10

1.2. Технологічні схеми рубок головного користування і їх значення для заготівлі хвої..... 13

1.3. Напрями використання хвойної сировини та вимоги до її якості..... 16

1.4. Технології відділення хвої від гілок і підготовки до переробки..... 20

Розділ 2. Об'єкт та методика досліджень..... 25

2.1. Характеристика об'єкта дослідження 25

2.2. Вихідні матеріали та джерела даних 28

2.3. Методика оцінювання потенційних обсягів хвойної сировини на лісосіках..... 28

2.4. Методика аналізу технологічного процесу та втрат хвої..... 31

2.5. Методика техніко-економічного порівняння традиційної та інтегрованої технологій..... 33

2.6. Критерії оптимізації та система показників ефективності..... 36

Розділ 3. Ресурсний потенціал, втрати та якість хвої у процесі рубок головного користування..... 37

3.1. Аналіз практики рубок головного користування у соснових культурах..... 37

3.2. Ресурсний потенціал хвойної сировини під час рубок головного користування..... 40

3.3. Втрати хвої під час традиційної технологічної схеми рубок..... 42

3.4. Порівняльний аналіз варіантів складування деревної зелені..... 44

3.5. Аналіз якості хвої після заготівельних операцій та складування..... 45

Розділ 4. Оптимізаційні рішення для інтегрованої заготівлі хвойної сировини під час рубок головного користування..... 48

4.1. Інтегрована технологія заготівлі хвої під час рубок головного користування..... 48

4.2. Обґрунтування операцій та обладнання інтегрованої технології..... 51
4.3. Контроль якості на етапах інтегрованої технології..... 54
4.4. Рекомендації для лісогосподарських підприємств..... 55
Висновки та рекомендації..... 59
Список використаних джерел..... 62
Додатки..... 68

ВСТУП

Актуальність теми. Соснові насадження є головною лісогосподарською породою Полісся та панівною породою в більшості деревостанів, а відповідно, ключовим об'єктом рубок головного користування. У чинній практиці лісозаготівель технологічні рішення (відвід лісосіки, прокладання волоків, організація верхнього складу, вибір машинного комплексу) традиційно орієнтовані на отримання стовбурової деревини як основного продукту, тоді як крона (деревна зелень, хвоя з дрібними гілками) здебільшого залишається у статусі лісосічних решток або використовується фрагментарно. Це призводить до втрати потенційно цінної сировини, підвищує захаращення лісосік, ускладнює виконання санітарних та протипожежних вимог і не формує економічних стимулів для залучення деревної зелені у переробку.

Водночас хвоя та деревна зелень є ресурсом для отримання продуктів різної доданої вартості (екстракти, ефірні олії, біологічно активні речовини, біостимулятори, матеріали, енергетичні продукти). Для таких напрямів критично важливими стають якість (частка хвої у масі, рівень мінеральних домішок, частка кори/деревини), час від заготівлі до переробки, а також мінімізація технологічних втрат на ключових операціях (звалювання, переміщення, складування, відділення). Саме тому актуальним є перехід до технології, де крона планується як окремий керований матеріальний потік, сумісний із правилами рубок головного користування та технологічними картами, і забезпечує стабільний вихід кондиційної хвої з мінімальними втратами та прийнятними витратами [1–3, 6–9].

Актуальність теми підсилюється необхідністю практичного узгодження заготівлі хвойної сировини з вимогами лісівничого відновлення, санітарними правилами, обмеженнями щодо захаращення та організацією робіт на лісосіках рубок головного користування, що закріплено нормативною базою України [6–9].

Мета дослідження. Обгрунтувати та розробити організаційно-технологічні рішення використання хвойної сировини під час рубок головного користування у соснових культурах, які забезпечують кероване формування потоку деревної зелені, зменшення втрат і підвищення виходу кондиційної хвої за умов дотримання чинних лісівничих та санітарно-протипожежних вимог.

Завдання дослідження:

1. Виконати огляд літератури та нормативно засад рубок головного користування і використання деревної зелені та визначити місця втрат і погіршення якості хвої

2. Обгрунтувати методику оцінювання ресурсного потенціалу хвої (потенційного, технічно доступного та кондиційного рівнів) та методику аналізу втрат у контрольних точках технологічного ланцюга.

3. Провести розрахункову апробацію методики на пробних площах.

4. Виконати порівняльний аналіз традиційної та інтегрованої технологічних схем.

5. Сформувати критерії оптимізації та систему показників ефективності.

6. Розробити пропозиції інтегрованої схеми заготівлі з обгрунтуванням операцій, машин і обладнання.

7. Сформулювати практичні рекомендації для лісогосподарських підприємств щодо планування потоку деревної зелені, контролю якості та логістики.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження лісосічний фонд рубок головного користування у рівнинних соснових культурах Українського Полісся, де переважають суцільні рубки стиглих і перестійних деревостанів з обов'язковим забезпеченням лісовідновлення.

Предмет дослідження. Технічні та організаційно-технологічні рішення, що забезпечують формування окремого потоку хвойної сировини належної якості під час виконання рубок головного користування з мінімізацією втрат і забруднення.

Практична значимість роботи полягає у розробленні рекомендацій для лісогосподарських підприємств щодо: включення потоку деревної зелені у технологічні карти рубок; планування майданчиків складування та відділення; організації логістики; впровадження мінімального регламенту контролю якості; вибору раціонального сценарію інтегрованої заготівлі з урахуванням машинного комплексу та обладнання для відділення хвої [1–4]. Запропоновані підходи можуть бути використані для типових умов соснових культур Полісся та адаптовані для конкретних лісництв.

Апробація роботи. Основні положення роботи апробовано у вигляді публікації здобувача у студентському збірнику[1].

Використання інструментів штучного інтелекту. У процесі підготовки кваліфікаційної роботи як допоміжний інструмент використовувалися засоби штучного інтелекту (ChatGPT) для редагування, упорядкування та форматування тексту. Інструменти ШІ не застосовувалися як джерело емпіричних даних і не використовувалися для підміни авторського аналізу. Усі твердження, розрахунки, висновки та результати дослідження сформульовані автором на основі самостійного опрацювання вихідних матеріалів і літературних джерел.

Публікації. Пасевич Я. В. Оптимізація використання хвойної сировини під час рубок головного користування у соснових культурах : стаття (рукопис, подано до друку у студентський збірник). Луцьк, 2025

Структура та обсяг роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 78 сторінок. Основний текст займає 55 сторінок, містить 21 таблицю, 15 рисунків і 1 додаток.

Список використаних джерел містить 44 найменування, що оформлені відповідно ДСТУ.

РОЗДІЛ 1
ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА НОРМАТИВНИХ ЗАСАД

1.1. Рубки головного користування у соснових культурах

Головним користуванням називається отримання деревини шляхом вирощування стиглого лісу. Рубки головного користування – вирубування стиглих чи перестійних деревостанів для одержання деревини і заміни старих (часто розладнаних) насаджень, що супроводжується істотною зміною світлового, теплового й водного режимів та, відповідно, умов лісовідновлення, особливо за суцільного вирубування [5; 26; 28]. Місце рубок головного користування в загальній класифікації рубок лісу наведено на рис. 1.1.

Рисунок 1.1 – Місце рубок головного користування в загальній класифікації рубок лісу

В українській практиці (залежно від категорії лісів, лісорослинних умов, складу й структури деревостанів) застосовують чотири системи рубок головного

користування: вибіркову, поступову, комбіновану та суцільну [1; 5; 28] (рис. 1.2).

Рисунок 1.2 – Системи та способи рубок головного користування

Вибіркова система передбачає періодичне вилучення окремих дерев або груп без руйнування суцільності намету; ділянка постійно залишається вкрита лісовою рослинністю [1; 5; 28].

Поступова система (рівномірно-поступові, групово-поступові, смугово-поступові) характеризується поетапною вирубкою деревостану з одночасним формуванням підросту головних порід; лісовідновлення організаційно вбудоване у сам процес рубки [1; 5; 28].

Суцільна система передбачає повне вирубування деревостану (за винятком насінників, життєздатного підросту/молодняку та дерев і чагарників, що підлягають збереженню). Її домінування у виробничих соснових культурах пояснюється технологічною простотою та високою продуктивністю лісосічних робіт, але саме тут виникає найбільший ризик погіршення умов природного поновлення і найбільша потреба в організаційно-лісівничих компенсаторах [1; 5; 28].

Комбінована система є перехідним варіантом, що поєднує елементи

суцільних і поступових або вибіркових підходів (вибір способу визначається умовами місцезростання, наявністю підросту, стійкістю насадження, екологічними вимогами тощо) [5; 28].

Для рівнинних соснових насаджень Правобережного Полісся характерні суцільні рубки головного користування у стиглих і перестійних деревостанах у формі суцільнолісосічних або суцільних вузьколісосічних лісосік; їх параметри (площа/ширина лісосіки, строки примикання, обмеження щодо підросту та ін.) регламентуються чинними правилами і залежать від групи лісів, типу лісорослинних умов, наявності підросту [1; 28].

З позицій теми цієї роботи принципово важливо, що технологія таких рубок історично орієнтована на стовбурову деревину, тоді як крона (гілки, хвоя) трактуються як лісосічні рештки з акцентом на пожежну/санітарну безпеку, а не як цільовий ресурс [1; 27; 28].

Вибір системи й параметрів рубки визначається сукупністю обмежень: категорією лісів і функціональним призначенням, типом лісу та умовами місцезростання, віковою структурою, наявністю та станом підросту господарсько цінних порід, ризиками ерозії ґрунтів, а також вимогами до лісовідновлення й протипожежних заходів [5; 26; 28].

Для оптимізації використання хвойної сировини (хвої) ці обмеження трансформуються в технологічні умови якості: мінімізація контакту крони з ґрунтом (домішки/забруднення), скорочення часу між звалюванням і відділенням хвої, організація руху машин (коридори/волоки) так, щоб не знищувати підріст і не погіршувати лісовідновлення [1].

Оскільки рубка стиглого лісу змінює мікроклімат і режим зволоження ґрунту, система рубок має забезпечувати відновлення: або через збереження чи формування підросту (вибіркові/поступові), або через чітко спроєктоване лісовідновлення після суцільних рубок (природне поновлення та/або створення культур, захист від конкуренції і пошкоджень, протипожежні заходи) [5; 26; 28].

У контексті соснових культур Полісся практична ціна правильного вибору системи рубок полягає в балансі між: стабільним отриманням деревини

(розрахункова лісосіка, безперервність користування), збереженням лісівничої придатності ділянки до відновлення, можливістю технологічно виділити окремий потік хвої без деградації підросту та ґрунтового покриву [1; 5] (табл 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика систем рубок головного користування для соснових культур (у прив'язці до умов заготівлі хвої)

Система рубок	Суть і спосіб	Переваги для лісовідновлення	Ризики та обмеження	Наслідки для заготівлі хвої (якість/втрати)
Вибіркова	Вилучення окремих дерев/груп без розриву намету [1; 5]	Збереження лісового середовища; постійний покрив [5]	Складніша організація робіт; вимоги до техніки/планування	Потенційно висока якість хвої (менше контакту з ґрунтом), але складніше організувати збирання в логістичний потік
Поступова	Декілька прийоми з формуванням підросту [1; 5]	Вбудоване поновлення; поступове відкриття пологу	Довший період робіт; ризик пошкодження підросту машинами	Збір хвої можливий у "вікнах" між прийомами; потрібна організація коридорів/майданчиків
Комбінована	Поєднання елементів суцільних і поступових/вибіркових [5]	Компроміс між продуктивністю і відновленням	Складність регламентів і контролю	Дає варіативність; можна "підлаштувати" під цільове вилучення крони/хвої у вибраних ділянках
Суцільна	Повне вирубування з винятками (насінники, підріст тощо) [1; 5]	Просте планування; швидке освоєння лісосік	Найсильніша зміна середовища; потреба в чітких заходах відновлення [5]	Найбільші потенційні обсяги хвої, але високий ризик забруднення/втрат — потрібна інтегрована технологія формування "потоку хвої" [1]

1.2. Технологічні схеми рубок головного користування і їх значення для заготівлі хвої

Технологічна схема рубки головного користування визначає послідовність операцій (від підготовки лісосіки до вивезення деревини) і тип машин, що працюють на лісосіці. У «традиційному» підході технологічна підготовка орієнтується на стовбурову деревину (волоки, під'їзди, верхній склад, штабелювання), а крона (хвоя з дрібними гілками) розглядається як лісосічні рештки, які або залишаються на лісосіці з урахуванням протипожежних/санітарних вимог, або використовуються епізодично як другорядна сировина [1].

Переважають дві групи технологічних схем рубок головного користування: моторно-ручні та механізовані (харвестерно-форвардерні) [1] (рис. 1.3).

а

б

Рисунок 1.3 – Машини, які застосовуються в механізованій технологічній схемі рубок головного користування: а – харвестер; б – форвардер

За моторно-ручної технології валку, обрізку гілок і розкряжування виконують бензомоторними пилками безпосередньо на лісосіці; стовбури у вигляді хлистів або сортиментів трелюють(до верхнього складу, де проводять

остаточне сортування і навантаження [1].

Крона при такій організації робіт, як правило, залишається розосередженою по площі лісосіки у вигляді окремих куп гілок і верхівок [1].

Це принципово погіршує керованість хвойної маси: збір у вторинний потік вимагає додаткового переміщення матеріалу. Внаслідок цього хвоя швидко забруднюється ґрунтом і мінеральними домішками та частково пошкоджується колісною та гусеничною технікою – тобто втрачає кондиційність для більш вибагливих напрямів переробки (волокно, екстракти) [1].

У механізованих схемах валку, обрізку та розкряжування виконує харвестер, який формує сортименти уздовж волоків, а форвардер забезпечує підбір і вивезення [1].

При цьому крона і дрібні гілки концентруються більш локалізовано — уздовж волоків або на спеціально відведених майданчиках, що робить потік хвойної маси керованішим у просторі та часі [1].

Саме ця концентрованість крони є ключовою передумовою для переходу від утилізаційного поводження з лісосічними рештками до інтегрованої схеми, у якій хвоя від початку планується як цільова сировина [1].

У роботі [1] підкреслюється, що додаткові обмеження для будь-якої схеми задають санітарні вимоги: необхідність не допускати надмірного захаращення лісосік, своєчасно впорядковувати лісосічні рештки з урахуванням протипожежних і санітарних вимог [1].

Для нашої теми важливо трактувати ці вимоги не як передумову, а як організаційну передумову: якщо рештки все одно потрібно впорядковувати, то інтегрована заготівля хвої може перетворити частину цих робіт із витратної операції на ресурсну.

Практично це означає, що ще на етапі відводу й підготовки лісосіки, окрім трасування волоків і верхнього складу, необхідно передбачити місця тимчасового складування крон (лапки) та зону відділення хвої (табл. 1.2) [1].

Таблиця 1.2 – Порівняння моторно-ручних та механізованих схем рубок головного користування щодо можливості заготівлі хвої

Ознака	Моторно-ручні схеми	Механізовані (харвестер-форвардерні) схеми
Основні операції на лісосіці	Валка, обрізка, розкряжування – бензопилами; трелювання хлистів/сортиментів до верхнього складу [1]	Валка, обрізка, розкряжування – харвестером; підбір і вивезення – форвардером [1]
Просторове розміщення крони	Розосереджена по площі лісосіки; купи гілок/верхівок "розкидані" [1]	Крона більш концентрована уздовж волоків/на майданчиках [1]
Ризик забруднення та пошкодження хвої	Високий: контакт із ґрунтом, домішки, пошкодження технікою [1]	Нижчий за умови організації майданчиків і мінімізації волочіння крон [1]
Керованість "потоку хвої"	Низька: хвоя "втрачається" у просторі та часі [1]	Вища: хвойна маса локалізована, легше організувати відокремлення [1]
Що треба додати для інтегрованої заготівлі	Значні додаткові операції зі збору/переміщення крони	На етапі проектування – майданчики для крон і зона відділення хвої (планування "потоку хвої") [1]

1.3. Напрями використання хвойної сировини та вимоги до її якості

Хвойна сировина у контексті комплексного використання лісових ресурсів розглядається як частина деревної зелені (хвоя, бруньки, пагони, дрібні гілки та частково кора), яка може бути перетворена на продукти з різною доданою вартістю – від екстрактів і ефірних олій до енергетичних продуктів та матеріалів. Важливо, що навіть у межах деревної зелені якість сировини нормується за складом компонентів: частка хвої у «високосортній» деревній зелені повинна бути максимальною, а мінеральні домішки — мінімальними (орієнтовно ≤0,2%) (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Склад деревної зелені

Компонент %	Норма для сорту		
	1-го	2-го	3-го
Хвоя, бруньки та пагони, які не одеревіли	80	70	60
Кора та деревина	15	25	35
Інші органічні домішки	5	5	5
Неорганічні домішки	0,2	0,2	0,2

Ключовий практичний висновок для теми оптимізації: напрям використання безпосередньо визначає допустимі втрати, забруднення та часові проміжки між зрізуванням дерева і переробкою хвої. Саме тому інтегрована схема рубок

головного користування (з заготівлею хвої) має плануватися вже на етапі проєктування лісосіки – із виділенням місць тимчасового складування крон та деревної зелені та операцій швидкого відокремлення кондиційної хвої (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Основні вимоги до інтегрованої (з заготівлею хвої) схеми проведення рубок головного користування [1]

Операція технологічного процесу	Традиційна схема рубки головного користування	Інтегрована схема з заготівлею хвойної сировини	Впливу на використання хвої
Відвід і підготовка лісосіки	Плануються волоки, верхній склад, місця складування лісоматеріалів	Додатково плануються майданчики для тимчасового складування крон і відокремлення хвої	Уже на етапі проектування враховується потік хвойної сировини
Валка дерев	Моторно-ручна або харвестерна валка без спеціальних вимог до збереження хвої	Валка з мінімальним осипанням хвої, обмеження волочіння крон по грунту	Зменшуються втрати та забруднення хвої мінеральними домішками
Обрізка гілок і формування хлистів	Обрізка «на місці» з розкиданням крон по площі	Обрізка з укладанням крон у валки/купи вздовж волоків або безпосередньо на верхньому складі	Крони концентруються та стають доступними для механізованої обробки
Трелювання/форвардування	Переміщуються лише стовбури (хлисти, сортименти)	Можливе комбіноване трелювання стовбурів разом із кронами	Скорочується кількість місць скупчення крон, спрощується логістика хвої
Очищення лісосіки від решток	Згрібання, подрібнення або часткове залишення решток на місці	Згрібання решток після відокремлення хвої, їх подальше використання як паливної щепи	Частина біомаси (хвоя) переводиться з категорії відходів у корисну сировину
Додаткова операція «Переробка хвойної сировини»	Відсутня	Відокремлення хвої, формування партій для вивезення	Формується окремий товарний потік хвойної сировини для перероблення

Сучасні підходи розглядають хвою як багатокомпонентну сировину, з якої технологічно доцільно послідовно вилучати фракції з найбільшою доданою вартістю (екстрактивні речовини/ефірні олії), а залишок спрямовувати у матеріали або енергетику.

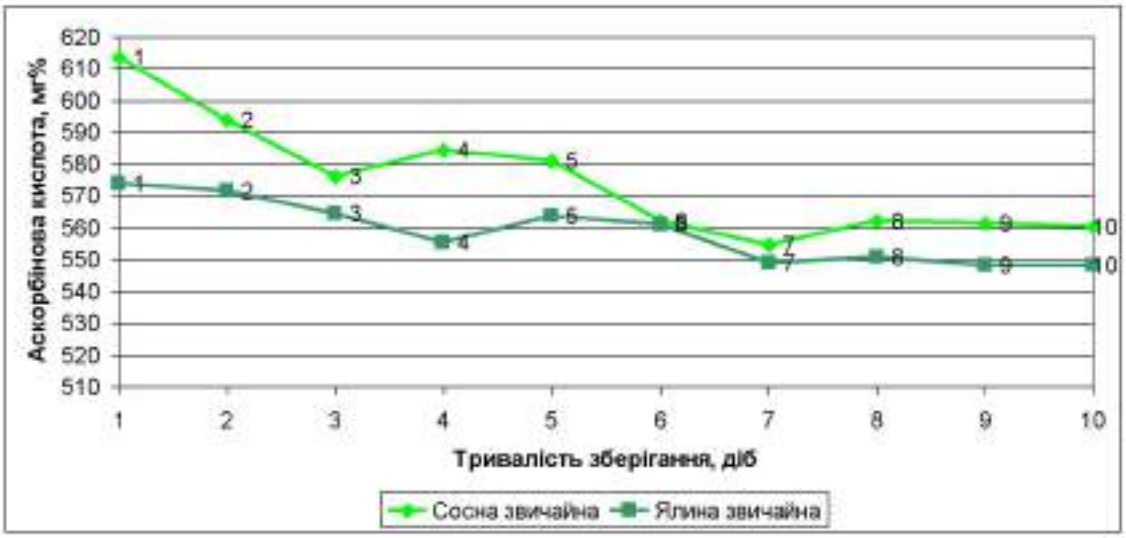
Це означає, що під час рубок головного користування доцільно виділяти щонайменше три якісні потоки хвойної сировини (рис. 1.4):

1. високоякісна свіжа хвоя (мінімально осипана, мінімально забруднена грунтом) – для екстрактів/ефірних олій та біологічно активних продуктів;

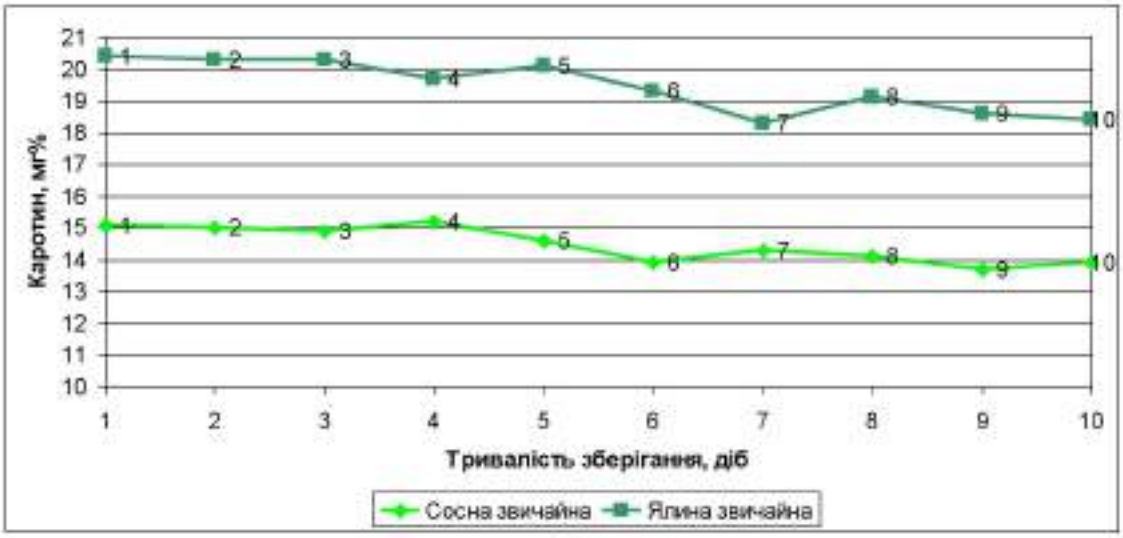
2. умовно кондиційна хвоя та деревна зелень (частково підсушена, з допустимими органічними домішками) – для кормових/агрохімічних напрямів, компостування, біостимуляторів;
3. низькосортна або забруднена деревна зелень (підвищені домішки, значна частка гілочок/кори) – для енергетичного використання (паливо, біовугілля), сорбентів тощо.

Рисунок 1.4 – Напрями використання хвойної сировини в залежності від її якості

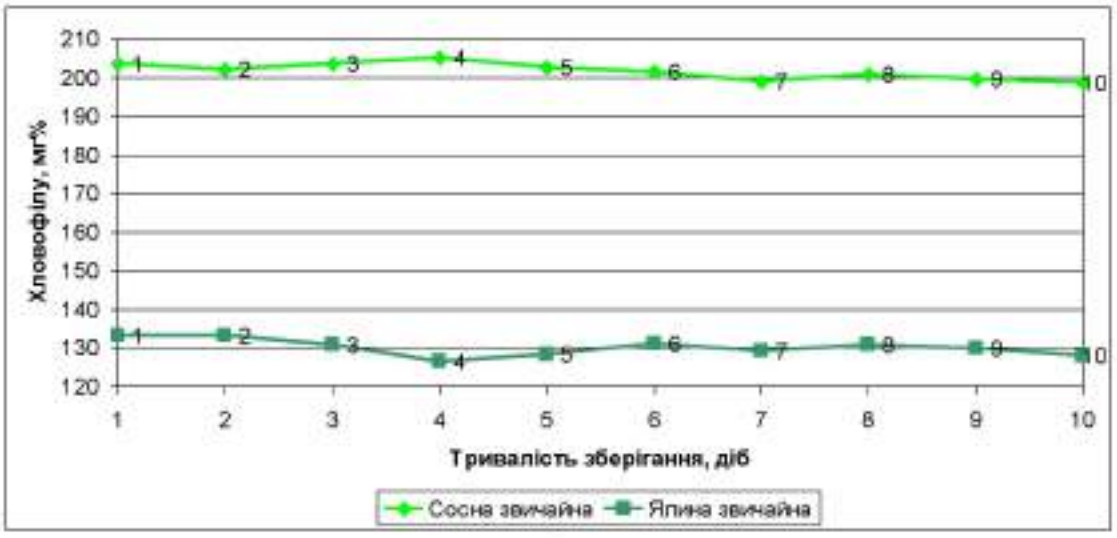
Якісні вимоги для «біоактивних» напрямів (ефірні олії, екстракти, вітамінна сировина) найбільш чутливі до зберігання. Під час сушіння та зберігання хвоя втрачає біологічно активні речовини, причому зі зростанням температури сушіння втрати інтенсифікуються; зокрема відбувається зменшення вмісту аскорбінової кислоти, каротину та хлорофілу за 10 діб зберігання за нормальних умов (рис. 1.5).



а



б



в

Рисунок 1.5 – Графіки залежності вмісту аскорбінової кислоти (а) каротину (б) хлорофілу (в) від тривалості зберігання хвої [3]

Цей факт обумовлює організаційно-технологічні рішення в інтегрованій схемі рубок: якщо кінцевий продукт – екстракт або ефірна олія, то критично

мінімізувати час між відокремленням хвої від гілки і переробкою (або стабілізацією – контрольованим сушінням/охолодженням). Якщо ж кінцевий продукт – енергетичний, то часові обмеження значно м'якші, а пріоритетом стає логістика і зниження витрат.

Узагальнення вимог до якості хвойної сировини залежно від напряму використання наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Вимоги до якості хвойної сировини залежно від напряму використання (для інтеграції в рубки головного користування)

Напрям використання	Цільова фракція	Критичні вимоги до якості	Організаційні наслідки для рубок головного користування
Ефірні олії, екстракти, біоактивні добавки	Хвоя (мінімальні домішки)	Мінімум мінеральних домішок; мінімізація осипання; мінімізація часу зберігання через втрати біологічно активних речовин	Забороняти волочіння крон по грунту; швидке відокремлення; окремий потік логістики
Кормові, агрохімічні продукти (борошно, компости, біостимулятори)	Деревна зелень (хвоя та пагони)	Допустимі органічні домішки; стабільність вологості	Можливе короткочасне складування; пріоритет – обсяги відбору
Матеріали (волокно/целюлозні продукти)	Хвоя та деревна зелень після підготовки	Контроль домішок, але допускається технологічне очищення	Важливі майданчики для попередньої підготовки, подрібнення, сепарації; узгодження з переробником
Енергетичне використання (паливо, біочар)	Низькосортна зелень та хвоя	Вимоги до «біоактивності» не критичні; головне — логістична ефективність	Можливе накопичення партій; інтеграція з тріскою або відходами; орієнтація на мінімізацію витрат
Екологічні продукти (сорбенти, рекультивація)	Біочар та вуглецеві матеріали	Вимоги залежать від технології; вихідний матеріал може бути низькосортним	Можна залучати те, що інакше залишається або спалюється

1.4. Технології відділення хвої від гілок і підготовки до переробки

Завершальною операцією заготівлі хвойної сировини є відділення хвої від гілок та її транспортування до збірника; ці функції виконують установки різних типів, спеціально розроблені для відділення хвої.

Вибір технології відділення визначається тим, який продукт планується

отримати з хвої (екстракти чи олії, текстильні матеріали, енергетика тощо) і яку якість необхідно забезпечити: мінімальні мінеральні домішки, мінімальне пошкодження поверхні хвої, контроль вологості та обмеження часу між заготівлею і переробкою.

За узагальненням [3] ланцюг заготівлі хвої включає послідовні операції: звалювання дерев, трелювання та транспортування, розкряжування, сушіння гілок з хвоєю у сушильній камері, відділення хвої потоком повітря та пневмотранспортування хвої до збірника.

Цей ланцюг принципово важливий, бо забезпечує стабілізацію сировини перед сепарацією: підсушування зменшує злипання та масу, полегшує відрив хвої від гілок і підвищує ефективність пневмовідділення.

Відділення та транспортування хвої можуть здійснюватися пневматичними пристроями нагнітального, вакуумного або комбінованого типу.

У вакуумних схемах (які є найбільш зручними для мобільного виконання) повітряний потік «висмоктує» хвою з робочої камери/сушильної камери та переносить її трубопроводом у сепараційні апарати.

В [3] наводиться принципова схема мобільної установки з всмоктувальною системою пневмотранспортування (рис. 1.6): сушильна камера → всмоктувальний трубопровід → циклон-відділювач хвої → шлюзовий затвор → збірник хвої, а для дрібних домішок передбачено окремий циклон-відділювач відходів і збірник відходів

У цій схемі підкреслено ключову технологічну деталь: гілки через більшу масу не захоплюються повітряним потоком і залишаються у сушильній камері, тоді як хвоя та дрібні частинки транспортуються далі. Для працездатності пневмотранспорту важливими є параметри повітряного потоку. У наведеному прикладі робочий вакуум у повітропроводі становить 0,2–0,5 атм, а швидкість повітря — 20–23 м/с [3].

Окрему групу становлять пневмомеханічні пристрої, де попередньо формується суміш «зеленої тріски», а потім відбувається розділення на фракції у сепаруючому бункері. Запатентована установка, що складається з барабанної

рубальної машини та вузла пневмосепарації (рис. 1.7). Рубальна машина включає подаючий транспортер 1, притискний вал 2, барабанний ножовий ротор 3 і корпус із вихідним патрубком 4, а далі матеріал переміщується тріскопроводом 5у бункер 6.

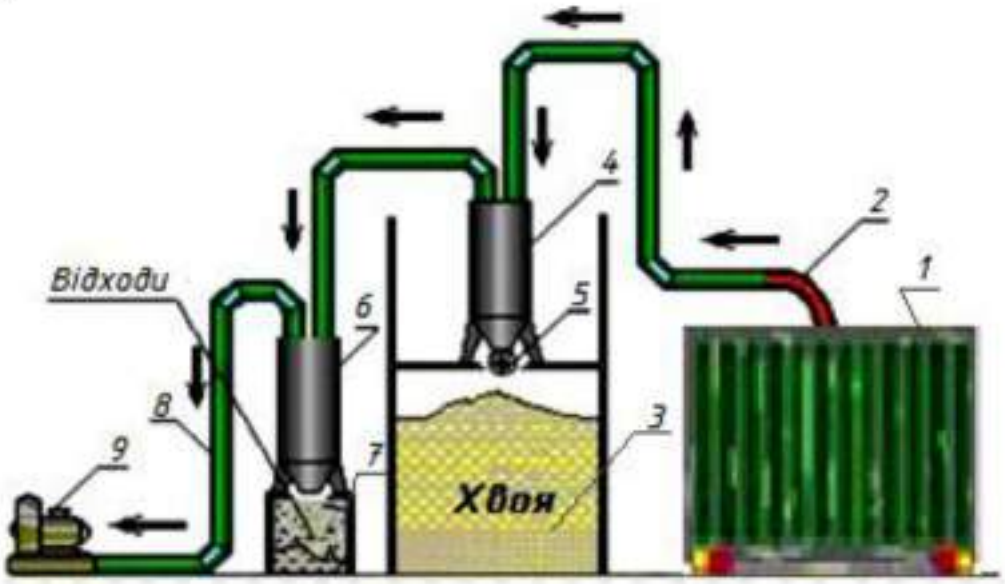


Рисунок 1.6 –Пневматична мобільної установки для відділення хвої: *1* – камера сушильна; *2* – трубопровід всмоктуючий; *3* – збірник хвої; *4* – циклон-відділювач хвої; *5* – затвор шлюзовий; *6* – циклон-відділювач відходів; *7* – збірник відходів; *8* – повітропровід [3]

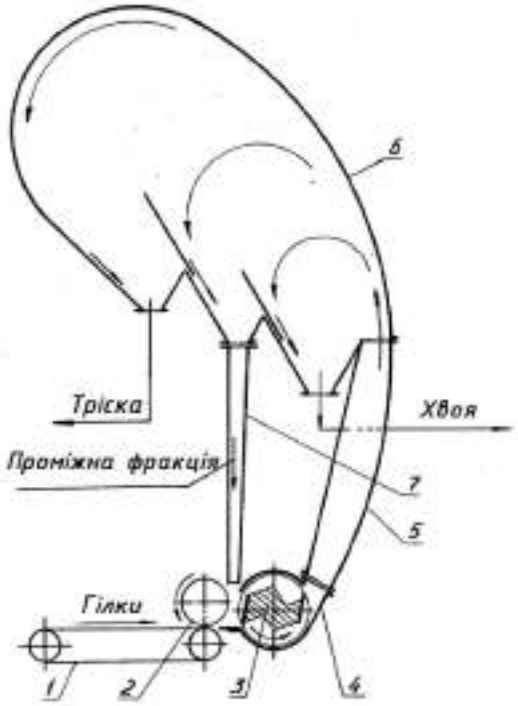


Рисунок 1.7 – Пневмомеханічний пристрій для відділення хвої: 1 – транспортер; 2 – вал; 3 – ножовий ротор барабанний; 4 – корпус; 5 – трісокпровід; 6 – бункер; 7 – лоток

У сепаруючому бункері передбачено три зони: для тріски, для проміжної фракції та для хвої (рис. 1.7) Принцип роботи полягає в тому, що після подачі

гілок в рубальну машину ротор формує зелену мас у, яка через патрубок і тріскопровід надходить у бункер; під час руху частинок уздовж криволінійних поверхонь бункера і тріскопроводу хвоя відділяється й потрапляє в нижню кишеню, тоді як тріска — у верхню кишеню. Проміжна фракція (хвоя з деревиною) потрапляє у середню кишеню і частково повертається через лоток на повторний цикл сепарації

Для цієї роботи це важливо як приклад технології, що дозволяє отримати хвою, але збільшує подрібнення та домішки, тобто отримана хвоя є менш придатною для високовартісних продуктів.

Механічні конструкції відокремлювачів (типові переносні або стаціонарні пристрої) технологічно прості, однак мають якісне обмеження: у процесі відокремлення хвоя контактує з робочими органами і пошкоджується її поверхневий шар, а після механічного відокремлення потрібно проводити додаткове сортування. Механічний пристрій для відділення хвої наведено на рис. 1.8.

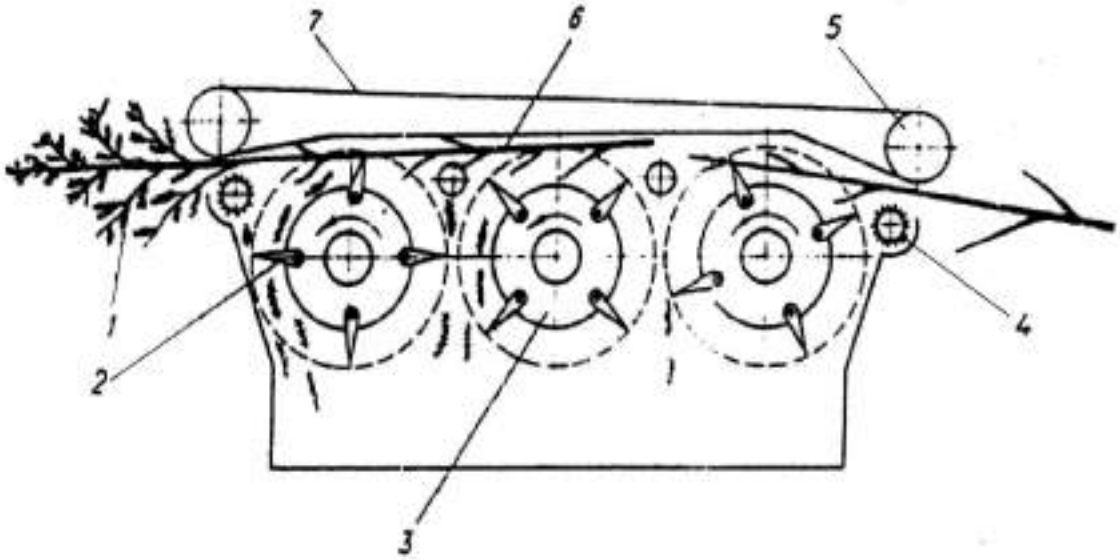


Рисунок 1.8 – Механічний пристрій для відділення хвої ОДЗ-3,0: 1 - гілка; 2 – ножі; 3 – барабан; 4, 5 – притискні вальці; 6 – опорні вальці; 7 – транспортер [3]

У літературі та оглядових матеріалах зустрічаються нетипові для лісосічних умов методи – наприклад, кріогенне відділення або відділення у надвисокочастотному полі. Приклад кріогенної установки з формуванням технологічних пакетів 2, кріогенною камерою 3 та ситовою/сепараційною

частиною 7 наведено на рис. 1.9.

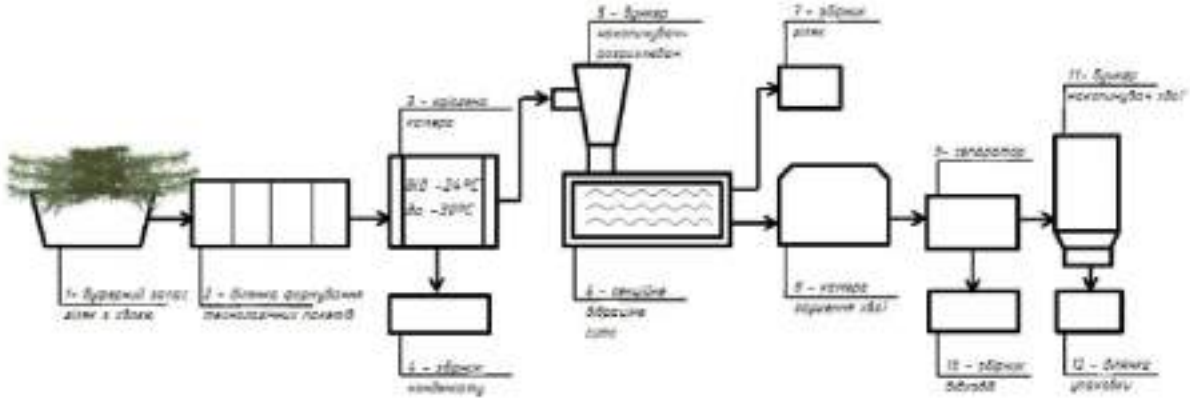


Рисунок 1.9 –Кріогенний спосіб відділення хвої

Авторами [4] запропоновано принципову компоновку установки, у якій хвойні лапки/гілки переміщуються по транспортеру з перфорованою стрічкою, а відділення хвої здійснюється струменями води, сформованими планкою із соплами; відокремлена хвоя потрапляє у збірник, а очищені гілки — в окремий збірник (рис. 1.10).

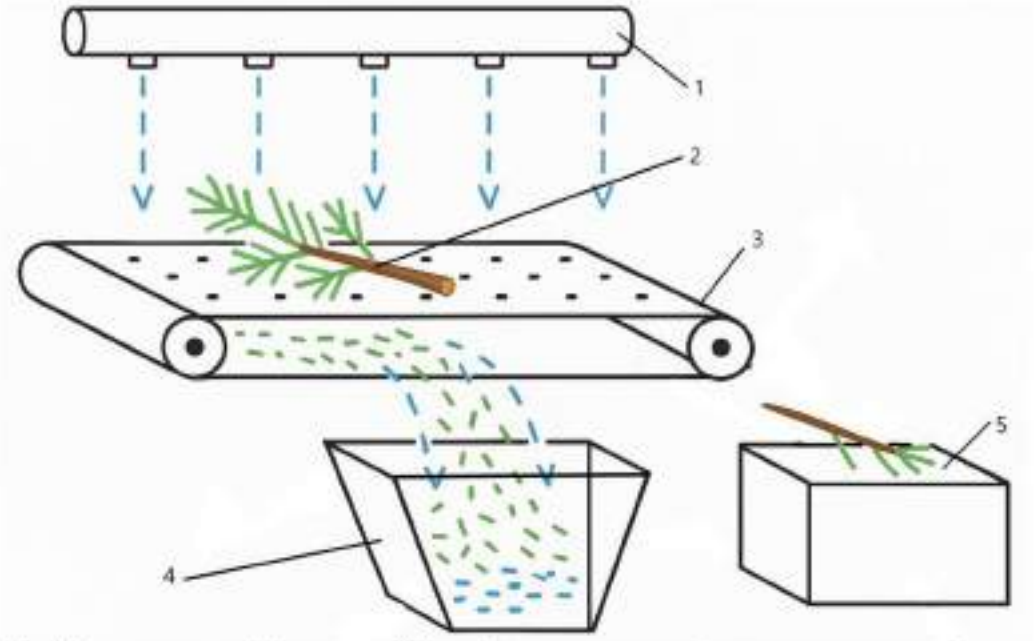


Рисунок. 1.10 –Установки для відділення хвої гідравлічним струменем: 1 – планка з соплами; 2 – лапка хвойна; 3 – транспортер із перфорованою стрічкою; 4 – збірник хвої; 5 – збірник очищених гілок [4]

Така компоновка забезпечує безперервність процесу (відділення–транспортування–накопичення), спрощує обслуговування і зменшує габарити установки. При цьому для уникнення руйнування хвої принциповими є правильний добір відстані від сопел до зони контакту, а також тиску й витрати води через струменеформуючі сопла.

Порівняльні характеристики технологій наведено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Порівняльна характеристика технологій відділення хвої (у прив'язці до інтеграції в рубки головного користування)

Технологія	Суть процесу	Типове обладнання (приклад)	Якісні ризики / переваги	Де логічно застосовувати в інтегрованій схемі
Пневмотермічний (сушіння+ пневмовідділення +вакуумна подача)	Відрив і перенесення хвої потоком повітря до збірника	Мобільна установка: сушильна камера → трубопровід → циклон(и) → збірники	Менше механічного пошкодження, гілки переважно не захоплюються потоком; критичні режими швидкості/втрат тиску в трубопроводі	Перспективний для відділення хвої в умовах мобільної точки переробки
Гідроструменеве відділення	Збивання хвої з гілок струменями води з подальшим роздільним накопиченням хвої та очищених гілок	Планка із соплами → транспортер з перфорованою стрічкою → збірник хвої / збірник гілок	Дуже висока швидкість; одночасне очищення від пилу/грунту; потенційно висока енергоефективність; обмеження: волога хвоя (потрібна переробка/сушіння), ризики взимку через замерзання	Оптимально, коли пріоритет – екстракція/олії та потрібне промивання від домішок
Пневмомеханічне (подрібнення + пневмосепарація)	Спершу рубання на "зелену тріску", далі розділення на фракції в сепаруючому бункері	Рубальна машина + сепаруючий бункер із зонами/кишенями	Висока продуктивність; ризик домішок/ подрібнення та проміжної фракції	Коли пріоритет – обсяги, а вимоги до цілісності хвої помірні
Механічні відокремлювачі	Відділення через механічну дію на хвою робочих органів	Переносний механічний пристрій	Пошкодження поверхні хвої; потреба додаткового сортування	Для низьких вимог до якості або як допоміжний спосіб
Кріогенне/ спеціальні методи	Відділення після спеціальної підготовки (заморожування тощо)	Кріогенна установка	Потенційно висока якість, але висока складність і вартість	Оглядово; практичність способу обґрунтування

Гідроструминний спосіб має низку практичних переваг над механічним і пневмомеханічним: висока швидкість процесу (очищення гілки може відбуватися за секунди), а також очищувальний ефект – вода змиває пил, грунт та інші забруднення, що особливо важливо для подальшої екстракції, де чистота сировини напряму впливає на якість екстракту, потенційно висока

енергоефективність за рахунок високого ККД насосних установок (понад 80%) та можливості роботи води у замкненому циклі за умови фільтрації.

Водночас метод має і обмеження, критичні для організації інтегрованої заготівлі: відокремлена хвоя виходить вологою, тому її потрібно або негайно переробляти (наприклад, на екстракти чи ефірні олії), або сушити перед зберіганням чи використанням у матеріалах, зокрема волокні.

Окремою проблемою для польових умов є робота при від'ємних температурах через ризик замерзання води в системі, що ускладнює застосування мобільної установки взимку.

Узагальнюючи, для інтеграції в рубки головного користування найбільш перспективними з позицій керування якістю й втратами виступають: пневмотермічні вакуумні способи як технологія отримання кондиційної хвої з контролем домішок; гідроструминний спосіб як швидкий спосіб відділення з одночасним очищенням сировини (особливо під екстракцію); пневмомеханічні та механічні варіанти як рішення з акцентом на продуктивність за помірних вимог до цілісності хвої.

РОЗДІЛ 2
ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження приймаємо лісосічний фонд рубок головного користування у рівнинних соснових культурах Українського Полісся, де переважають суцільні рубки стиглих і перестійних деревостанів з обов'язковим забезпеченням лісовідновлення.

Предметом дослідження в межах цього об'єкта є технічні та організаційно-технологічні рішення, що забезпечують формування окремого потоку хвойної сировини належної якості під час виконання рубок головного користування з мінімізацією втрат і забруднення. Соснові культури Полісся формуються переважно у піщаних та супіщаних едатопах, у практиці створення та реконструкції культур застосовують змішування сосни з листяними породами (береза у типах В2–3; у судіброваx С2–3 можливе введення дуба та супутніх порід тощо) [5].

У типових умовах лісогосподарських підприємств Полісся поширена сортиментна заготівля з виконанням основних операцій бензопилами та трелюванням колісними тракторами (класу МТЗ-80/82).

Узагальнені параметри об'єкта подано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристика об'єкта дослідження (типові умови Полісся)

Показник	Прийнята характеристика для дослідження
Регіон	Українське Полісся
Котротка характеристика насаджень	Соснові культури (Pinus sylvestris L.), можливі домішки листяних у В2–3, С2–3
Вид рубки головного користування	Переважно суцільні у стиглих/перестійних деревостанах
Вимоги до відновлення	Обов'язкове забезпечення лісовідновлення (культури/природне) після рубки
Цільова сировина	Хвоя як окремий потік побічної продукції
Базова технологічна схема	Бензопили, трелювання колісними тракторами типу МТЗ-80/82; складування на верхньому складі
Критичні для якості точки процесу	Контакт крони з ґрунтом, переміщення та волочіння, складування, час до переробки

2.2. Вихідні матеріали та джерела даних

Вихідні матеріали дослідження сформовано так, щоб забезпечити: опис об'єкта й умов проведення рубок; оцінку потенційних обсягів хвойної сировини; аналіз технологічного процесу та втрат; техніко-економічне порівняння традиційної та інтегрованої схем (див. табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Вихідні матеріали та джерела даних дослідження

Група даних	Конкретний документ/джерело	Які показники беремо
Лісовпорядкування, планово-облікові матеріали	Матеріали лісовпорядкування; книги рубок	Склад, вік, повнота, запас; площі лісосік; план/факт рубок
Відвід лісосік і технологічне проектування	Лісорубні квитки; схеми лісосіки; технологічна карта	Межі, волоки, під'їзди; спосіб валки/трелювання/вивезення; місця складування
Організаційні документи й планування потоку хвої	Вимоги інтегрованої схеми: планування майданчиків для складування крон і відокремлення хвої	Місця тимчасового складування крон; організація відокремлення хвої
Виробничо-технологічні дані	Опис технологічних схем (моторно-ручні / харвестерно-форвардерні)	Машинний склад; маршрут і послідовність операцій; місця втрат
Дані про можливості заготівлі/переробки та ресурси підприємства	План ведення лісового господарства/інформація про технології та потужності	Наявні рішення з заготівлі хвої, потужності, логістичні обмеження
Польові спостереження/вимірювання	Хронометраж, облік втрат, проби хвої	Втрати/забруднення; час «валка→склад»; показники якості

2.3. Методика оцінювання потенційних обсягів хвойної сировини на лісосіках

Оцінювання потенційних обсягів хвойної сировини (деревної зелені/хвої) виконується у двох взаємопов'язаних рівнях: розрахунково-нормативному (швидка оцінка за даними лісосіки/обсягу заготівлі деревини) та контрольно-вибірковому (уточнення коефіцієнтів за польовими вимірюваннями на конкретних лісосіках). (табл. 2.3).

Як базову величину приймаємо об'єм стовбурової деревини, що заготовлюється на лісосіках рубок головного користування, $V_{дер}$, м^3. У першому наближенні потенціал хвойної сировини оцінюємо через частку побічної продукції від загального обсягу заготівлі деревини. Для соснових: хвойна лапка

становить близько 3,5–4%, а хвоя (як частина хвойної лапки) — близько 1,5–2% від загального об'єму заготівлі деревини [2].

Тоді потенційний об'єм хвойної лапки:

$$V_{лап} = V_{дер} \cdot k_{лап}, \quad k_{лап} = 0,035...0,040. \tag{2.1}$$

Потенційний об'єм хвої:

$$V_{хв} = V_{дер} \cdot k_{хв}, \quad k_{хв} = 0,015...0,020. \tag{2.2}$$

Для переходу до маси (т), що є більш зручною одиницею для логістики та переробки, застосовуємо густину хвойної лапки $\rho_{лап}$ та частку хвої у масі лапки $k_{хв/лапк}$. З [2] $\rho_{лап}$=400…500 кг/м3 (для обчислень приймають 450 кг/м³), а частка хвої у хвойній лапці становить 60–80% залежно від сорту (для розрахунків приймаємо 70%)

Отже, потенційна маса хвої:

$$M_{хв} = V_{лап} \cdot \rho_{лап} \cdot k_{хв/лап}. \tag{2.3}$$

Формули (2.1)–(2.3) дають швидку порівняльну оцінку для різних лісосік/ділянок і дозволяють сформувати верхню межу потенціалу, яку далі необхідно скоригувати на втрати та кондиційність.

Оскільки технологічні операції рубки суттєво впливають на осипання, пошкодження та забруднення хвої, у роботі вводимо поняття кондиційного виходу $M_{хв}^{конд}$ – маси хвої, що відповідає вимогам до складу деревної зелені (частка хвої, кори та деревини, органічних і неорганічних домішок). Для деревної зелені хвойних порід наведено поділ на три сорти, де масова частка хвої становить не менше 80, 70, 60%, а масова частка неорганічних домішок – не більше 0,2% для всіх сортів

Це використовується як орієнтир під встановлення частки кондиційної хвої. Кондиційний вихід оцінюємо як:

$$M_{хв}^{конд} = M_{хв} \cdot (1 - \omega_{втр}) \cdot \eta_{як}, \quad (2.4)$$

де $\omega_{втр}$ – сумарна частка втрат хвої (осипання, втрати при переміщенні/контакті з грунтом, втрати при складуванні), $\eta_{як}$ – частка хвої, що проходить за якістю (відповідає встановленим порогам домішок і складу партії).

При цьому технологія прямо задає очікуваний рівень втрат: у [3] підкреслено, що застосування харвестера з укладанням у пачки зменшує механічне ушкодження крони та скорочує відпад хвої на лісосіці, а використання форвардера мінімізує контакт крон із грунтом; натомість трелювання дерев із кроною волоком розглядається як неприйнятне через надмірні втрати. Тому в розрахунках втрати визначаємо окремо для традиційної та інтегрованої схем

Щоб забезпечити прив'язку розрахунків до умов об'єкта (тип лісорослинних умов, повнота, вік, сезон рубки, склад машинного комплексу) потрібне польове уточнення коефіцієнтів у формулах (2.1) -2.4)

Польова частина будується навколо двох контрольних точок технології: на лісосіці (після валки/обрізки, до переміщення) та на верхньому складі/майданчику (перед відділенням хвої). Така постановка узгоджується з тим, що саме операції відокремлення хвої і формування партій у інтегрованій схемі розглядаються як найскладніші з погляду витрат праці та енергії і потребують кількісного обґрунтування

Для кожної контрольної точки відбираються проби хвойної лапки (або фрагментів крони) з подальшим: відділенням хвої від гілок, зважуванням компонентів (хвоя; кора/деревина; органічні домішки; неорганічні домішки), визначенням сортності/придатності за граничними показниками складу (табл. 2.3). Вимоги до домішок і частки хвої в деревній зелені для сортування: масова частка неорганічних домішок менше 0,2%; частка хвої більше 60…80%)

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти та нормативні інтервали для оцінки потенціалу хвойної сировини

Показник	Зміст показника	Прийняте значення
$k_{лап}$	Частка хвойної лапки від обсягу заготівлі деревини	0,035–0,040
$k_{хв}$	Частка хвої від обсягу заготівлі деревини	0,015–0,020
$\rho_{лап}$	Густина хвойної лапки, кг/м³	400–500 (для розрахунків 450)
$k_{хв/лап}$	Масова частка хвої в хвойній лапці	0,60–0,80 (для середніх 0,70)
$\eta_{як}$	Критерії кондиційності за складом деревної зелені	частка хвої ≥80, 70, 60%; неорганічні домішки ≤0,2%
$\omega_{втр}$	Втрати хвої на операціях	Залежить від обладнання

2.4. Методика аналізу технологічного процесу та втрат хвої

Метою підрозділу є формалізація технологічного процесу рубок головного користування у соснових культурах як послідовності операцій, на яких виникають втрати та погіршення якості хвої, а також визначення порядку їх кількісного обліку для подальшого порівняння технологій. В основу підходу покладено: пооперaційне порівняння схем та технологічний ланцюг заготівлі деревної хвої.

Для аналізу приймаємо дві технологічні схеми:

А) Традиційна схема рубок (деревина – основний потік; крона та деревна зелень – лісосічні рештки): валка → обрізка гілок та розкряжування → трелювання або форвардування стовбурів → складування деревини → очищення лісосіки (без планового відбору хвої).

Б) Інтегрована схема (деревина – основний потік + деревна зелень та хвоя – окремий потік): валка з мінімізацією осипання → концентрація крон → переміщення крон без волочіння по грунту → тимчасове складування на верхньому складі → сушіння гілок з хвоєю → відділення хвої → формування партії хвої (кондиційна фракція).

Для порівнянності результатів аналіз втрат потрібно проводити в однакових контрольних точках процесу:

- КТ-1 (після валки і первинної обрізки, до переміщення крони) — характеризує осипання й первинні втрати хвої в зоні поваленого дерева;
- КТ-2 (після переміщення та укладання крони у валок/купу або після

проходу техніки) – характеризує додаткові втрати від механічних впливів та контактів із грунтом;

- КТ-3 (на майданчику складування перед відділенням хвої) – характеризує втрати при складуванні та зміни якості (зволоження або підсушування, забруднення);
- КТ-4 (після відділення хвої) – характеризує технологічні втрати у відділювачі, частку кондиційної фракції та домішки.

У роботі вводиться система показників, яка дозволяє описати втрати і погіршення якості хвої на кожній операції.

1) Втрати хвої за масою (осипання та втрата фракції):

$$\omega_i = \frac{M_{хв,i}^{втр}}{M_{хв}^{вот}} \cdot 100\%, \qquad (2.5)$$

де $M_{хв,i}^{втр}$ – потенційна маса хвої, $M_{хв}^{вот}$ – маса хвої, втрачена на і-тій операції.

Сумарні втрати:

$$\omega_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \omega_i . \qquad (2.6)$$

2) Забруднення мінеральними домішками (індикатор контакту з грунтом). Визначається масова частка неорганічних домішок W_{min} у пробі хвої і порівнюється з нормативним порогом, де для деревної зелені хвойних порід неорганічні домішки не повинні перевищувати 0,2% (табл. 2.4)..

3) Склад партії деревної зелені (частка хвої). Для визначення кондиційності застосовується показник масової частки хвої $W_{хв}$ у деревній зелені. У класифікації деревної зелені хвойних порід частка хвої має бути не менше 80, 70, 60% відповідно до I, II, III сорту (табл. 2.4) .

4) Часові показники (логістична придатність).Фіксується час t від валки до відділення хвої (або до надходження на переробку). Цей показник напряму

визначає втрати біологічно активних речовин при зберіганні

Таблиця 2.4 – Показники кондиційності та якості деревної зелені (для класифікації проб)

Показник	Позначення	Граничні значення
Масова частка хвої у деревній зелені, %	$W_{хв}$	≥80 / ≥70 / ≥60 (I/II/III сорт)
Масова частка неорганічних домішок, %	W_{min}	≤0,2 (для всіх сортів)
Масова частка кори і деревини, %	$W_{кд}$	≤10 / ≤20 / ≤30 (I/II/III сорт)

Відбір проб організовується у відповідності до контрольних точок КТ-1…КТ-4 (розд. 2.4). Для кожної контрольної точки формують серію проб із різних місць лісосіки, щоб охопити неоднорідність умов (підстилка, грунт, ухил, відстань до волока, інтенсивність руху техніки).

Оцінка забруднення та складу виконується для кожної проби шляхом розділення на компоненти (хвоя; кора та деревина; органічні домішки; неорганічні домішки), зважування та розрахунку масових часток $W_{хв}$, $W_{кд}$, W_{min} з подальшою класифікацією за табл. 2.4.

Щоб забезпечити коректне порівняння, «точки втрат» задаються не абстрактно, а через конкретні операційні рішення: мінімізація осипання при валці; заборона волочіння крон по грунту; укладання крон у валки/купи вздовж волоків або на верхньому складі; комбіноване трелювання/перевезення з мінімальним контактом із грунтом .

Саме тому в традиційній схемі найбільші втрати очікуються на етапах КТ-2 (контакт із грунтом, проходи техніки, переміщення крон) і КТ-3 (складування без контрольованих умов), а в інтегрованій — основний вплив зосереджується на організації укладання/майданчиків та на параметрах відділення (КТ-4). Перевірка цього припущення і є одним з результатів розділу 3.3–3.4.

2.5. Методика техніко-економічного порівняння традиційної та інтегрованої технологій

Техніко-економічне порівняння виконують для двох альтернативних сценаріїв організації робіт на лісосіці:

Сценарій А (традиційний) – технологічний процес орієнтований на заготівлю деревини; крона та деревна зелень розглядається як лісосічні рештки

без формування керованого потоку хвої.

Сценарій В (інтегрований) – додатково організовується окремий потік хвойної сировини (крони → тимчасове складування → відділення кондиційної хвої мобільним обладнанням → транспортування до місця переробки), без істотного зниження продуктивності базових лісозаготівельних операцій.

Щоб порівняння було коректним, усі показники приводять до однакової одиниці: на 1 га лісосіки (зручно для лісівничих висновків і планування); на 1 м³ заготовленої деревини (зручно для зіставлення з виробничими показниками); на 1 т кондиційної хвої (зручно для оцінки вартості окремого потоку сировини).

У роботі доцільно використовувати дві одиниці одночасно: «на 1 га» та «на 1 т кондиційної хвої», щоб показати і масштаб ресурсу, і економіку його вилучення.

Порівняння проводять за групами: продуктивність/час, витрати, якість сировини (як фактор витрат/втрат), економічний ефект.

У табл. 2.5 наведено склад витрат для обох сценаріїв (із виділенням додаткових позицій інтегрованої схеми), а в табл. 2.6 — показники, які обчислюються та зіставляються.

Таблиця 2.5 – Структура витрат для техніко-економічного порівняння сценаріїв

Група витрат	Зміст витрат	Сценарій А	Сценарій В
1. Машинний час базових операцій	Валка/пакетування, трелювання/вивезення, розкряжування	✓	✓
2. Додаткові операції по хвої	Формування окремих куп крон/лапки, навантаження/перевезення лапки, розвантаження	–	✓
3. Відділення хвої	Робота мобільної установки)	–	✓
4. Паливо/енергія	Дизпаливо техніки, електро/паливні витрати установки	✓	✓
5. Оплата праці	Оператори машин, персонал установки, підсобні	✓	✓
6. Амортизація/ремонт	Техніка лісозаготівлі, транспорт, мобільна установка	✓	✓
7. Логістика і відстань	Плечі транспортування деревини і лапки/хвої	✓	✓
8. Втрати/забруднення хвої	Недобір через осипання, домішки грунту, відсів при кондиціюванні	–	✓

У сценарії В логістичний блок особливо чутливий до відстані транспортування деревної зелені. В роботі [3] для лапки рекомендується транспортування на відстані до 50 км з підбором відповідного транспорту.

Таблиця 2.6 – Основні розрахункові показники для порівняння

Позначення	Показник	Одиниці
Q_w	Обсяг заготовленої деревини	м³ (або т)
Q_n	Маса кондиційної хвої, отриманої в сценарії В	т
T	Сумарний час виконання операцій	маш·год, люд·год
$P_w=Q_w/T$	Продуктивність по деревині	м³/год
$P_n=Q_n/T$	Продуктивність «хвойного» блоку	т/год
C	Сумарні приведені витрати	грн
$c_w=C/Q_w$	Собівартість на 1 м³ деревини	грн/м³
$c_n=C_{add}/Q_n$	Собівартість 1 т хвої (додаткові витрати)	грн/т
$R_n=Q_n\cdot p_n$	Дохід від реалізації хвої/продукту	грн
$E=R_n-C_{add}$	Чистий ефект	грн

Алгоритм розрахунку (за хронометражем і нормативами)

1. Фіксація обсягів: Q_w приймають за матеріалами відводу або фактичними даними підприємства.

2. Фіксація часу: базові операції – за хронометражем, додаткові операції інтегрованої схеми – окремо (формування куп, навантаження лапки, підвезення, робота установки).

3. Розрахунок витрат на машинний час (для кожної машини):

$$C_m = \sum_i t_i \cdot k_i , \tag{2.7}$$

де t_i – тривалість роботи ш-тої машини, маш·год; k_i – вартість 1 маш·год (паливо, оплата праці оператора, амортизація, ремонт, мастила).

4. Розрахунок додаткових витрат інтегрованої технології:

$$C_{add} = C_{collect} + C_{transc} + C_{sep} + C_{loss} , \tag{2.8}$$

де $C_{collect}$ – витрати на організацію/збирання крон/лапки, C_{transc} – витрати на перевезення лапки/хвої (залежні від відстані), C_{sep} – витрати на відділення, C_{loss} – вартість втрат кондиційної хвої (недобір через осипання/забруднення/відсів).

5. Економічний ефект:

$$E = Q_n \cdot C_n - C_{add} , \tag{2.9}$$

де $C_п$ – ціна одиниці кондиційної хвої.

Якщо E>0, інтегрована технологія економічно доцільна за заданих умов.

2.6. Критерії оптимізації та система показників ефективності

Оптимізація використання хвойної сировини під час рубок головного користування у соснових культурах у цій роботі трактується як вибір раціональної організаційно-технологічної схеми (традиційної або інтегрованої) і її параметрів (розміщення майданчиків, спосіб складування, логістика, режим відділення хвої), які забезпечують найкраще поєднання: мінімальних втрат, прийнятної якості сировини, економічної доцільності та відповідності екологічним і нормативним обмеженням [1; 6; 7; 8].

З огляду на те, що кращий варіант не може визначатися одним показником (наприклад, лише собівартістю), застосовується багатокритеріальний підхід із системою показників, згрупованих за чотирма блоками: технологічний, якісний, економічний, еколого-нормативний. Вхідні дані для показників беруться з джерел (табл. 2.2), а ключові змінні (потенціал/кондиційний вихід та втрати) формалізовані – розраховуються за формулами (2.3)–(2.6) з допомогою табл. 2.3–2.4.

Технологічні критерії – відображають керованість потоку хвойної сировини та вписування додаткових операцій у ритм основної лісозаготівлі. Основна вимога: не допустити істотного зменшення продуктивності рубки через інтеграцію операцій по хвої [1; 2; 3]. Технологічні критерії напряму пов'язані з поопераційною логікою інтегрованої схеми (планування майданчиків, концентрація крон, мінімізація контакту з ґрунтом) [1].

Якісні критерії – визначають придатність хвої як сировини для переробки. У роботі якість фіксується через склад партії деревної зелені та допустимий рівень мінеральних домішок (табл. 2.4), а також через втрати кондиційної частини, спричинені осипанням/забрудненням/відсівом [3; 4; 1].

3. Економічні критерії – оцінюють співвідношення додаткових витрат

інтегрованої схеми та додаткового ефекту/доходу від отриманої кондиційної хвої. Ключовими є: собівартість 1 т кондиційної хвої та чистий ефект інтеграції E [2; 8].

4) Еколого-нормативні критерії – забезпечують відповідність вимогам лісового законодавства і правил ведення рубок, санітарним та протипожежним вимогам. Для оптимізації важливо, щоб інтегрована схема не погіршувала умови лісовідновлення та не створювала додаткових ризиків захаращення/пожежної небезпеки; навпаки – сприяла керованому поводженню з кроною і рештками [6; 7; 8; 5].

Система показників ефективності наведена в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Система критеріїв та показників ефективності оптимізації використання хвойної сировини

Блок критеріїв	Показник	Позначення	Одиниці	Напрям	Як/де визначається
Технологічний	Додаткова трудомісткість	T_{add}	люд·год/га або люд·год/т	min	Хронометраж; розрахунки 2.5
	Додатковий машинний час	$t_{m,add}$	маш·год/га	min	Хронометраж; технологічні карти
Якісний	Сумарні втрати хвої на операціях	ω_{Σ}	%	min	Контрольні точки КТ-1…КТ-4
	Частка кондиційної хвої у виході	$\eta_{як}$	частка або %	max	Аналіз проб за табл. 2.4
	Мінеральні домішки у хвої	W_{min}	%	min (обмеження)	Аналіз проб; порівняння з табл. 2.4
Економічний	Собівартість 1 т кондиційної хвої	$c_{ис}$	грн/т	min	Формули та структура витрат (табл. 2.5-2.6)
	Чистий ефект інтеграції	E	грн/га або грн/т	max	За п.п. 2.5, з урахуванням логістики
Еколого-нормативний	Рівень захаращення/обсяг решток, що залишаються без утилізації	Z	т/га або бальна оцінка	min	Огляд лісосіки, облікові дані; відповідність вимогам [6; 7; 8]
	Ризик погіршення умов відновлення (ущільнення ґрунту, пошкодження підросту)	R_{reg}	бальна оцінка	min	Польові спостереження, технологічні обмеження [6; 7; 8]

Оскільки показники мають різні одиниці виміру, для підсумкового порівняння застосовується нормування (переведення в безрозмірну шкалу) і розрахунок інтегрального індексу ефективності:

Для показника, який потрібно мінімізувати:

$$x^*_{j,s} = \frac{x_{j,s} - x_{j,min}}{x_{j,max} - x_{j,min}}, \qquad (2.10)$$

Для показника, який потрібно максимізувати:

$$x^*_{j,s} = \frac{x_{j,max} - x_{j,s}}{x_{j,max} - x_{j,min}}. \qquad (2.11)$$

Тоді інтегральний індекс:

$$I_s = \sum_{j=1}^{m} \omega_j \cdot x^*_{j,s}, \quad \sum \omega_j = 1. \qquad (2.12)$$

де ω_j – ваги показників (визначаються експертно для умов об'єкта дослідження або приймаються рівними в базовому варіанті).

Хим менше I_s, тим кращий варіант за сукупністю критеріїв.

Щоб інтегральна оцінка не маскувала критичні порушення якості/нормативів, вводяться жорсткі обмеження-фільтри (варіант відкидається, якщо):

- W_{min}>0,2% (перевищення мінеральних домішок, табл. 2.4);
- $\eta_{ик}<\eta_{мін}$ (нижче мінімально прийнятної частки кондиційної хвої, встановленої для об'єкта);
- порушуються вимоги чинних правил рубок/санітарних правил (юридичні обмеження) [6; 7; 8].

РОЗДІЛ 3
РЕСУРСНИЙ ПОТЕНЦІАЛ, ВТРАТИ ТА ЯКІСТЬ ХВОЇ У ПРОЦЕСІ РУБОК ГОЛОВНОГО КОРИСТУВАННЯ

3.1. Аналіз практики рубок головного користування у соснових культурах

Соснові культури Полісся є одним із головних об'єктів рубок головного користування в регіоні. У межах чинного нормативного поля («Правила рубок головного користування») застосовують чотири системи рубок: вибіркову, поступову, комбіновану та суцільну. Для суцільної системи характерне повне вирубування деревостану (за винятком насінників, життєздатного підросту, молодняку й об'єктів, що підлягають збереженню), а у виробничих умовах сосняків Полісся найчастіше реалізуються саме суцільнолісосічні рубки.

Для обраної ключовою є практична обставина: домінування суцільнолісосічних рубок, технологія яких у базовому (традиційному) виконанні орієнтована на заготівлю стовбурової деревини, тоді як крона (хвоя з дрібними гілками) у більшості випадків трактується як лісосічні рештки. Саме це визначає логіку втрат хвої на лісосіці та пояснює, чому без спеціальної організації потоку хвойної сировини її ресурсний потенціал використовується частково.

Практика технологічної підготовки рубок головного користування на рівнинних лісосіках зазвичай включає відвід і таксацію лісосік, трасування волоків і під'їзних доріг, складання технологічної карти, де фіксуються способи валки, трелювання та вивезення деревини. Усі ці рішення в традиційній логіці проєктуються під стовбурову деревину; потік крон або не планується взагалі, або розглядається як другорядний.

З погляду техніко-технологічного виконання у соснових культурах України фактично домінують дві групи технологічних схем: моторно-ручні та механізовані (харвестерно-форвардерні). Це важливо для нашого дослідження, оскільки рівень механізації прямо визначає точки можливого формування керованого потоку хвойної сировини (місця акумулювання крон, мінімізація

волочіння, організація майданчиків тимчасового складування тощо).

Механізована схема (харвестер + форвардер) є базою, яку доцільно приймати як основну технологічну платформу для оптимізаційного блоку роботи, оскільки вона дозволяє транспортувати деревину без тривалого контакту з ґрунтом і, відповідно, потенційно зменшує втрати та забруднення хвої. Типовий склад машин механізованої схеми показано на рис . 1.3.

Окремо слід підкреслити, що історично в сосняках Полісся апробовувалися й альтернативні (менш поширені) варіанти поступових рубок, зокрема смугово-поступові із застосуванням звалювально-пакетуючих машин; однак у сучасній практиці вони застосовуються обмежено і часто у спрощених виконаннях. Це важливе уточнення: хоча нормативно та методично арсенал систем рубок ширший (табл 3.1), у реальному виробництві домінує суцільнолісосічна логіка, під яку й підлаштована організація робіт.

Таблиця 3.1 – Узагальнена характеристика систем рубок і наслідків для використання крони/хвої

Система рубки	Типовий результат для деревостану	Статус крони в традиційній технології	Наслідок для хвої (ключовий для розділів 3–4)
Суцільна	Повне вирубування (з винятками для збереження підросту, насінників тощо)	Переважно лісосічні рештки	Високі втрати/забруднення без спеціальної організації потоку; потрібне планування майданчиків і мінімізація волочіння
Поступова	Вирубування за 2–4 прийоми з формуванням підросту	Технологічно складніше організувати збір	Потенційно кращі умови для поновлення, але ускладнена логістика збору хвої
Вибіркова	Періодичне вибирання дерев/груп, полог зберігається	Крона часто розосереджена	Невеликі обсяги хвої з високою розсіяністю – збір менш ефективний
Комбінована	Поєднання підходів	Залежить від комбінації	Потребує окремого аналізу доцільності збору хвої за критеріями обсяг/якість/витрати

3.2. Ресурсний потенціал хвойної сировини під час рубок головного користування

Ресурсний потенціал хвойної сировини в межах рубок головного користування доцільно розглядати на трьох рівнях:

1. Потенційний ресурс $M_{хв}^{пот}$ – маса хвої, яка утворюється разом із кроною

на лісосіці при заданому обсязі заготівлі деревини (розрахунок за п. 2.3).

2. Технічно доступний ресурс $М_{хв}^{дост}$ – частина потенційного ресурсу, яку можна зібрати та сконцентрувати без порушення технології рубки та без надмірних витрат (враховує обрану схему робіт і організацію майданчиків).

3. Кондиційний ресурс $М_{хв}^{конд}$ – частина технічно доступного ресурсу, що відповідає вимогам до якості (частка хвої, домішки ґрунту тощо) та виходить після відділення (враховує втрати й відсів за п. 2.4).

Для кожної лісосіки потенційний ресурс оцінюють через обсяг заготівлі стовбурової деревини $V_{дер}$ (м³) та частки побічної продукції. У роботі [2] наведено орієнтири для соснових рубок: хвойна лапка приблизно 3,5–4%, а хвоя приблизно 1,5–2% від обсягу заготівлі деревини.

Розглянемо оцінку потенційних обсягів хвойної сировини на двох лісосіках, де закладенні дві пробні площі однакової площі (табл. 3.1).

Таблиця 3.2 – Вихідні дані для оцінки потенційних обсягів хвойної сировини

Показник	Од.	ПП-1	ПП-2
Тип насадження (умовно)	-	Сосна звичайна, В2	Сосна звичайна, В3
Вік	років	85	75
Повнота	-	0,8	0,7
Площа пробної площі	га	0,10	0,10
Запас стовбурової деревини на 1 га, $V_{дер.га}$	м³/га	320	260
Запас стовбурової деревини на пробі, $V_{дер}$	м³	32,0	26,0

Приймаємо для частка хвойної лапки $k_{лап}$=0,04 (4%), середня густина лапки $\rho_{лап}$=450 кг/м³, частка хвої в масі лапки kхв=0,70 (середнє з 60–80%). Оцінка потенційних обсягів хвойної лапки та маси хвої наведена в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Оцінка потенційних обсягів хвойної лапки та маси хвої (за частками)

Показник	Од.	ПП-1	ПП-2
$V_{дер}$	м³	32,0	26,0
$V_{лап}$	м³	1,28	1,04
$М_{лап}$	т	0,576	0,468
Потенційна маса хвої $М_{хв}$	т	0,403	0,328

Практично однаковий обсяг заготівлі деревини може давати різний вихід хвої через природну мінливість крони й сезонну динаміку. Для соснових насаджень відомі суттєві сезонні коливання маси хвої, де сезонні максимуми можуть перевищувати мінімуми у 1,2–2,0 рази. Крім того, показники, пов'язані

з хвоєю (накопичення, опад, оборот), змінюються зі віком деревостану. Для задач оптимізації це означає, що ресурс треба оцінювати не лише «скільки утворюється», а й «скільки реально зберігається до відділення».

Втрати на пробних площах: ПП-1 (кращі умови): валка/ обробка крони: 10% → коефіцієнт 0,90, форвардування/контакт із грунтом: 12% → коеф. 0,88, складування/очікування: 5% → коефіцієнт 0,95; ПП-2 (гірші умови) – 15% → 0,85; 15% → 0,85; 10% → 0,90. Маса хвої, що виходить на переробку розраховвана в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 –Втрати хвої в технологічному ланцюгу та вихід «на переробку»

Показник	Од.	ПП-1	ПП-2
Потенційна маса хвої $M_{хв}$	т	0,403	0,328
Інтегральний коефіцієнт збереження $k_{зб}$	-	0,752	0,650
Маса хвої "на переробку" $M_{пер}=M_{хв}\cdot k_{зб}$	т	0,303	0,213

Вихід придатності хвої після заготівлі показано в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 –Розподіл придатності хвої після заготівлі

Категорія	Од.	ПП-1	ПП-2
Високоякісна хвоя	т	0,091	0,043
Умовно кондиційна	т	0,152	0,096
Низькосортна/забруднена	т	0,061	0,075
Разом $M_{пер}$	т	0,303	0,213

Основні фактори рубок головного користування, які впливають на ресурсний потенціал і кондиційний вихід хвої показано в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Фактори, що впливають на ресурсний потенціал і кондиційний вихід хвої під час рубок головного користування

Фактор	Потенційний ресурс $M_{хв}^{пот}$	Кондиційний ресурс $M_{хв}^{конд}$
Вік, повнота, середній діаметр/висота	Визначає розвиток крони, а отже масу хвої	Опосередковано: впливає на крихкість, осипання, масу дрібних гілок
Сезон рубки	Потенціал відносно стабільний, але маса хвої змінюється протягом року	Впливає через осипання, вологість, час до відділення
Технологічна схема	Потенціал не змінює	Визначає втрати та забруднення (контакт із грунтом)
Організація концентрації крон	Не змінює	Підвищує технічну доступність

3.3. Втрати хвої під час традиційної технологічної схеми рубок

У традиційній організації рубок головного користування в соснових

культурах базовим є потік стовбурової деревини, тоді як крона (деревна зелень, хвоя з дрібними гілками) зазвичай не формує окремого керованого матеріального потоку та виступає лісосічними рештками. Саме така постановка «деревина – продукт / крона – рештки» визначає, що хвоя: інтенсивно втрачається через осипання на ранніх операціях; забруднюється внаслідок контакту з ґрунтом та проходів техніки; частково втрачає кондиційність при складуванні та затримці до переробки (табл. 3.7).

У підсумку потенційний ресурс переходить у значно менший кондиційний вихід через втрати та відсів за якістю. Для збереження якості хвої необхідно мінімізувати осипання.

Класичний ланцюг робіт включає валку, переміщення (трелювання/форвардування) та концентрацію деревини на верхньому складі, де відбувається сортування і подальше навантаження.

Матеріально потоки у традиційній схемі розділяються вже на етапі обрізки гілок та розкряжовування стовбура: стовбури транспортуються, а крони залишаються на лісосіці (розсіюються, частково перетинаються волоками, деформуються та забруднюються).

Для аналізу втрат у традиційній схемі використовується система контрольних точок КТ-1…КТ-4, введена в п. 2.4. Схема «точок втрат» для традиційної технології наведена на рис. 3.1, а очікуванні в трати в табл. 3.7

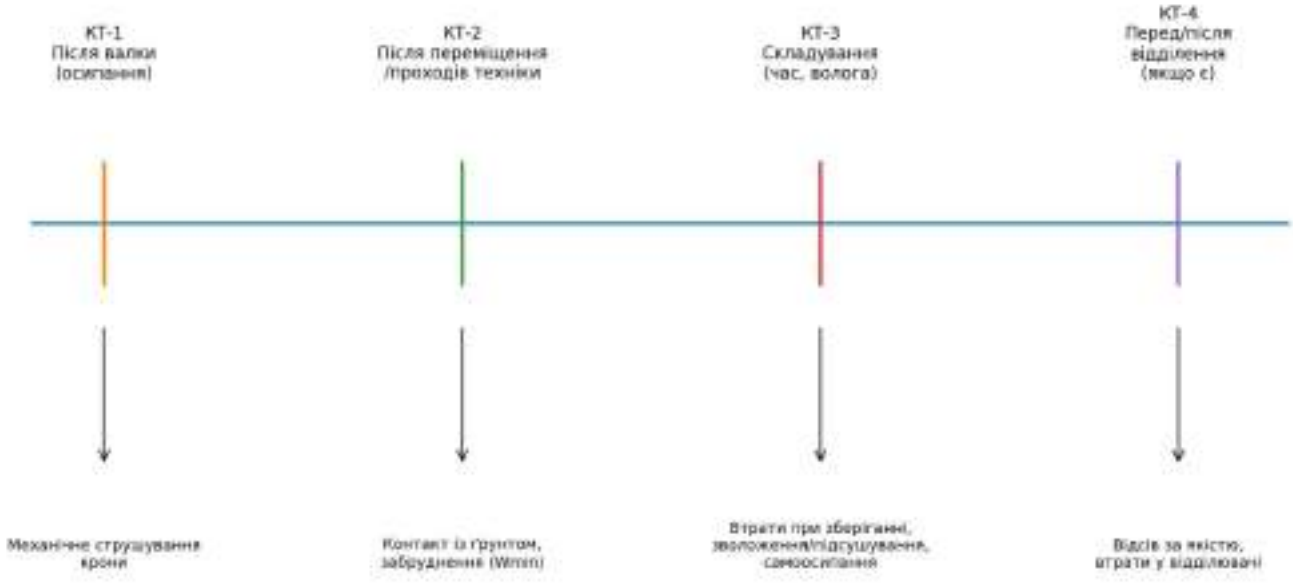


Рисунок 3.1 –Втрати хвої у традиційній технології

Таблиця 3.7 – Операції традиційної технологій та очікувані втрати і ризики погіршення якості хвої

Операція	Контрольна точка	Основний механізм втрат	Показник	Спосіб фіксації
Звалювання	КТ-1	осипання при падінні дерева, деформація крони	ω_1	Зважування втрат на пробних площах
Переміщення, проходи техніки	КТ-2	Контакт із ґрунтом, додаткове осипання	ω_2	Проби «до/після» та аналіз домішок; порівняння з 0,2%
Складування крон і лапки	КТ-3	Зволоження/підсушування, біохімічні зміни	ω_3	Тривалість часу до переробки
Відділення хвої (за наявності)	КТ-4	Втрати у відділювачі, відсів некондиційної фракції	ω_4	Вихід кондиційної хвої за табл. 2.4

Втрати хвої по операціях обчислюються за формулами п. 2.4. Додатково для традиційної схеми обов'язково фіксується якість у ключових контрольних точках, оскільки саме забруднення і зміна складу перетворюють потенційний ресурс на некондиційний.

3.4. Порівняльний аналіз варіантів складування деревної зелені

Після виділення хвойної сировини (п. 3.3) та оцінки показників якості (п. 3.4) ключовим стає вибір місця складування та КТ-3 (контрольної точки після складування), оскільки саме це визначає одночасно: якість ($W_{шіл}$, $W_{кд}$, $W_{орг}$, W і час t), втрати (осипання та механічні пошкодження), логістику і витрати (додаткові операції, перевезення, техніка).

У практиці лісозаготівель верхній склад є спеціально організованою ділянкою, куди доставляють деревину для подальшого оброблення, сортування і відвантаження, тому саме він природно розглядається як точка концентрації потоків у варіантах інтегрованої заготівлі.

У межах роботи доцільно порівнювати три базові сценарії, які покривають реальні організаційні рішення (табл. 3.8):

Варіант 1. Доставка крон/лапки на верхній склад з подальшим складуванням і підготовкою (підсушування, накриття, мінімізація повторного зволоження). З практичної точки зору це найкерованіший варіант, бо верхній склад за призначенням є місцем сортування і відвантаження.

Таблиця 3.8 – Порівняльна характеристика варіантів транспортування/складування деревної зелені (передумови для оптимізації у розділі 4)

Критерій	Варіант 1: на верхній склад	Варіант 2: проміжні майданчики	Варіант 3: до мобільної установки
Ризик W_{min} (мінеральні домішки)	Низький–середній за умови облаштування верхнього складу і підстилки/піддонів	Середній–високий (часто грунтовий майданчик, складно контролювати)	Низький за умови швидкого відділення і мінімального контакту з грунтом
Контроль W і повторного зволоження	Високий (можливе накриття, краща інсоляція/вітровий режим)	Низький–середній	Середній (залежить від організації «вікна» переробки)
Час до переробки t	Середній (концентрація + партії)	Середній–високий (накопичення до вивезення)	Низький (можна мінімізувати t)
Техніка і організація	Стандартна логістика лісозаготівель, як вузол системи	Додаються точки контролю/переміщення, ризик "розриву" потоку	Найбільші вимоги: мобільне відділення, енергозабезпечення, узгодження графіків
Очікувана якість хвої для екстрактів/олій/волокон	Висока за умови контролю W_{min} і t	Нестабільна (сильний вплив умов)	Найвища (потенційно)

Варіант 2. Проміжні майданчики (біля волоків та лісовозних доріг) з короткочасним складуванням і вивезенням на переробку партіями. Це зменшує пробіги всередині лісосіки, але погіршує контроль якості й підвищує ризик забруднення.

Варіант 3. Доставка крон або лапки безпосередньо до мобільної установки (відділення хвої на місці або біля лісосіки), після чого отримують два потоки: «хвоя» і «рештки крон». Цей варіант потенційно найкращий для збереження якості, але найвибагливіший до організації робіт і технічного забезпечення.

3.5. Аналіз якості хвої після заготівельних операцій та складування

Якість хвої (деревної зелені) в умовах рубок головного користування визначається тим, наскільки збережено її чистоту, фракційний склад (частка хвої) та технологічну придатність після контакту з грунтом, переміщення, складування і підсушування. Практично це означає: чим більше в масі хвої мінеральних домішок (пісок/грунт), кори та деревини, тим нижча придатність сировини для більшості високовартісних напрямів (ефірні олії, екстракти,

волокна), і тим більше операцій очищення/сортування потрібно на вході.

Оцінювання якості деревної зелені доцільно виконувати в двох контрольних точках потоку:

- КТ-2 –хвойна лапка після переміщення і потенційного контакту з ґрунтом (найвищий ризик мінерального забруднення);
- КТ-3 –хвоя після складування (додаються чинники «час-волога-самозігрівання», а також повторне забруднення на майданчику).

Як базову шкалу для інтерпретації якості деревної зелені доцільно використовувати сортність за складом компонентів: частка хвої має бути не нижче 60–80% залежно від сорту, а частка неорганічних домішок – не більше 0,2% для всіх сортів (див. табл. 1.3)

Сортність є індикатором можливості спрямувати хвою для виготовлення високовартісних продуктів (екстрактів/волокна) без надмірних втрат на очищення та сушіння.

Найкритичніший дефект хвойної маси після лісосічних операцій – домішки ґрунту, що зростають при контакті з ґрунтом, а також під час складування на необлаштованих майданчиках (КТ-2 → КТ-3). Практичні наслідки добре описані для біопалива, зокрема щепи: ґрунтова домішка погіршує паливну якість, підвищує проблеми зі шлакуванням, корозією та викидами, тому в ресурсних схемах лісозаготівлі забруднення мінеральною часткою вважають ключовим ризиком. Мінеральні домішки ускладнюють подрібнення та відділення хвої, підвищує зношення обладнання, а для наступної екстракції або виготовлення волокон вимагає додаткового очищення, що прямо впливає на економіку інтегрованої схеми.

Частка кори та деревини і сторонніх органічних домішок є основною технологічною проблемою комплексної переробки: деревина та кора – небажані домішки у хвої, а хвоя – небажані домішки для деревини як товарного сортименту.

Вологість та час від заготівлі до переробки визначають технологічність відділення, стійкість при складуванні та збереження біологічно активних

речовин. Температура сушіння здатна помітно впливати на вміст біоактивних сполук і компонентний склад та вихід ефірних олій.

Узагальнену логіку придатності наведено на рис. 3.2: для екстрактів/олій найчутливіші вологість неорганічні домішки та час зберігання, для волокон – вологість і частка кори/деревини, для енергетики –мінеральне забруднення.

Показник якості	Ефірні олії / екстракти	Текстильне волокно	Енергетичне використання
Неорганічні домішки (Wmin)	дуже критично	критично	помірно критично
Кора/деревина, %	критично	дуже критично	помірно критично
Вологість (W) та час t	критично (вплив на БАР)	критично (сушіння/відділення)	критично (логістика)
Механічні пошкодження	помірно критично	критично	некритично

Рисунок 3.2 – Матриця прийнятності хвої для ключових напрямів використання

Щоб формалізувати часовий фактор у роботі, використовуємо умовний індекс якості, який знижується з тривалістю зберігання, причому найшвидше – при складуванні на грунті (через W_{min} і повторне зволоження). Це показано на рис. 3.3.

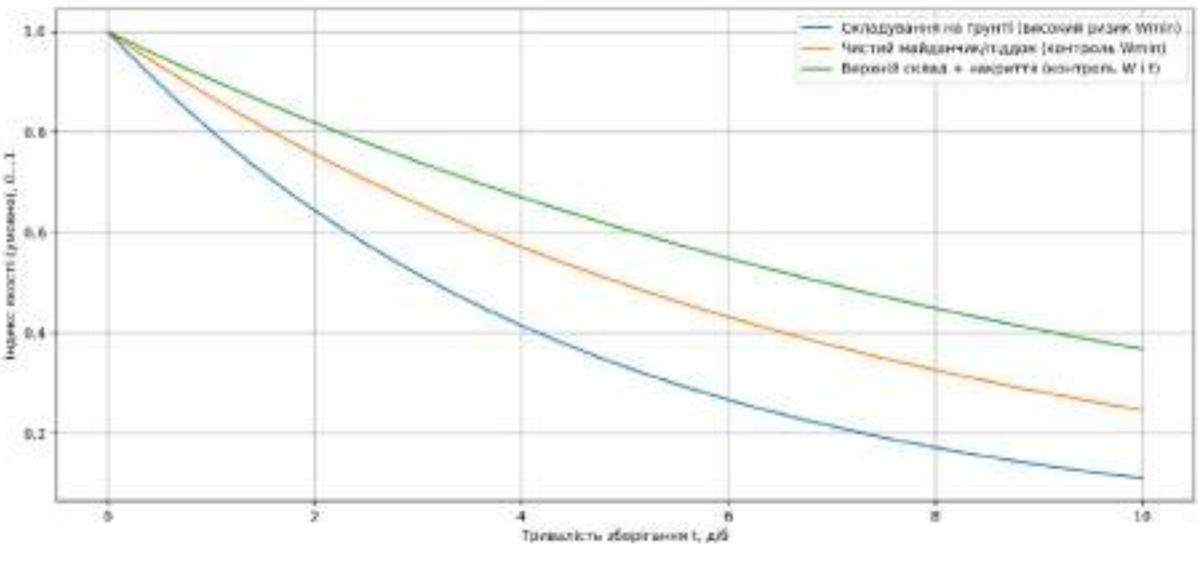


Рисунок 3.3 – Вплив тривалості зберігання на якість хвої

Отже, під час заготівлі хвої важливо мінімізувати тривалість її зберігання.

РОЗДІЛ 4
ОПТИМІЗАЦІЙНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ІНТЕГРОВАНОЇ ЗАГОТІВЛІ ХВОЙНОЇ СИРОВИНИ ПІД ЧАС РУБОК ГОЛОВНОГО КОРИСТУВАННЯ

4.1. Інтегрована технологія заготівлі хвої під час рубок головного користування

Оптимізація використання хвойної сировини під час рубок головного користування розглядається як перебудова традиційної технологічної схеми у інтегровану схему, де крона та деревна зелень одразу планується як окремий матеріальний потік і проходить заготівлю, транспортування та відділення кондиційної хвої з мінімальними втратами й трудомісткістю.

Важливість такого підходу підкреслюється тим, що в літературі з рубок головного користування домінує аналіз лісівничих наслідків (вплив на поновлення, структуру, екологічні функції), тоді як організаційно-технологічні рішення з окремої заготівлі хвої здебільшого не виділяються як самостійний об'єкт дослідження.

Найбільш прикладним інструментом для побудови інтегрованої схеми є порівняння традиційних і інтегрованих рішень пооперaційно. У статті [1] це подано у вигляді вимог до інтегрованої схеми, які фактично є картою оптимізаційних рішень: уже при відводі та підготовці лісосіки, окрім волоків і верхнього складу, додатково плануються майданчики тимчасового складування крон і відокремлення хвої, тобто потік хвойної сировини закладається на стадії проєктування.

Далі оптимізаційні рішення деталізуються за операціями:

– під час валки передбачаються прийоми з мінімальним осипанням хвої та вводиться обмеження волочіння крон по грунту, що зменшує втрати й забруднення мінеральними домішками;

– під час обрізки гілок (і формування хлистів/сортиментів) крони не розкидаються по площі, а укладаються у валки або купи вздовж волоків або

безпосередньо на верхньому складі, завдяки чому вони концентруються і стають доступними для механізованої обробки;

– у частині трелювання та форвардування, окрім переміщення стовбурів, розглядається можливість комбінованого трелювання стовбурів разом із кронами, що скорочує кількість місць скупчення крон і спрощує логістику хвої;

– на етапі очищення лісосіки рештки згрібаються після відокремлення хвої і можуть бути спрямовані на паливну щепу, тобто частина біомаси переводиться з категорії відходи у корисну сировину.

Таким чином, оптимізація в межах інтегрованої технології є перерозподілом операцій і потоків у тій самій технологічній рамці рубок головного користування

Інтегрована технологія базується на використанні харвестера, форвардера, процесора та мобільного обладнання для відділення хвої (рис. 4.1).

Рисунок 4.1 – Інтегрована технологія заготівлі хвої під час рубок головного користування

Подібну логіку містить і робота [2]: удосконалення технології спрямовується на зменшення втрат і підвищення якості через застосування сучасних машин (звалювально-пакетувальні машини, форвардери, процесори), а також через раціональне транспортування хвойної лапки (зокрема на відстані до

50 км автотранспортом/напівпричепами) для збереження якості та зниження витрат.

В роботі [3] додатково формалізується цей підхід через склад операцій технологічного процесу заготівлі деревної хвої (звалювання → трелювання → розкряжування → сушіння гілок з хвоєю → відділення потоком повітря → транспортування до збірника) і підкреслює, що механізована заготівля деревини та деревної хвої може забезпечуватися комплексом машин із мобільною установкою, яка включає сушильну камеру, пневмотранспорт та збірник хвої.

Таблиця 4.1 – Критерії оптимізації та показники оцінювання ефективності використання хвойної сировини

Група критеріїв	Сутність критерію в контексті рубок	Типові показники	Які операції/рішення впливають найбільше
Технологічні	Керованість потоку хвої, сумісність із базовою технологією рубки, ритмічність операцій	Продуктивність відділення/логістики; частка крон, що сконцентрована в валках/купах; тривалість циклу "валка → відділення"	Планування майданчиків; укладання крон; комбіноване трелювання/форвардування; мобільність обладнання
Якісні	Отримання кондиційної хвої з мінімальними втратами і забрудненням	Частка мінеральних домішок; частка осипання; втрати хвої на операціях; час до переробки	Мінімізація волочіння крон по грунту; швидке відокремлення; умови тимчасового складування
Економічні	Співвідношення додаткових витрат і додаткового ефекту від хвої	Додаткові витрати на операції (збір/транспорт/відділення); вартість 1 т кондиційної хвої; економічний ефект/дохід від продуктів	Вибір машинного складу; логістична схема; дальність транспортування; рівень механізації
Екологічні	Зниження пожежної небезпеки та екологічного навантаження, відповідність санітарним вимогам	Частка крон, що залишена/спалена; ступінь захаращення; потенційний вплив на грунт; відповідність санітарним вимогам	Очищення лісосіки після відокремлення хвої; перенесення решток у щепу; організація робіт без захаращення

Додаткові обмеження на технологію накладають санітарні та протипожежні вимоги (недопущення захаращення лісосік, своєчасне впорядкування). У статті [1] ці вимоги трактуються як передумова для того, щоб організувати цілеспрямовану заготівлю хвойної сировини. У практичному вимірі це означає, що оптимізація повинна одночасно зменшувати пожежну небезпеку та обсяги спалювання крон, що автор [2] також виділяє як одну з ключових проблем

існуючої практики.

У підсумку, підходи до оптимізації зводяться до принципу: потік хвої має бути запроєктований (майданчики, укладання, логістика), технологічно забезпечений (механізовані комплекси та мобільне відділення) і оцінений за системою показників (табл. 4.1)

Вимоги до інтегрованої технології рубок із заготівлею хвої узагальненні в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Матриця вимог до інтегрованої схеми

Операція або вузол схеми	Критична вимога	Показник контролю (KPI)
Відвід і підготовка лісосіки	Додатково спланувати майданчики для крон та відділення хвої, закласти потік сировини в проект лісосіки	Наявність майданчика; відстань трелювання та підвозу крон; час до відділення
Валка/первинне формування крони	Мінімізувати осипання; обмежити волочіння крон по грунту	Частка втрат хвої; рівень мінеральних домішок (W_{min}) на КТ-1
Концентрація крон уздовж волоків та на майданчику	Потік хвойної маси має бути керованим у просторі та часі	Компактність складування; змішування партій
Переміщення техніки (волоки та коридори)	Не погіршити грунтові умови та поновлення; доцільне використання порубкових залишків у коридорах для прохідності й збереження грунту	Візуальна оцінка та фотофіксація колій; локалізація руху
Складування та очікування переробки	Не допустити «старіння» сировини (у теплий період більше 7 діб — критично)	Час t від валки до відділення; зміна вологості W, якості
Впорядкування решток та санітарні обмеження	Не допускати надмірного захаращення; впорядкувати решгки з урахуванням протипожежних і санітарних вимог	Частка площі з упорядкованими решгками;

4.2. Обгрунтування операцій та обладнання інтегрованої технології

Інтегрована технологія будується як надбудова над базовим процесом лісозаготівлі: деревина рухається традиційним потоком, а крона та деревна зелень організовується як керований паралельний потік.

Початкова операція – валка дерев механізованим способом із формуванням пачок. На відміну від валки бензопилою використання харвестерів (див. рис. 1.3, а) дає змогу контролювати захоплення, напрям падіння та укладання дерев у пачку. Це важливо також для хвої, оскільки мінімізує осипання. Отже,

застосування харвестера сприяє збереженню хвої у складі крони на ранньому етапі.

Наступна операція - транспортування. Якщо ціль – використати хвою, транспортування дерев із кроною волоком є неприйнятним через осипання хвої та забруднення її ґрунтом. Тому в інтегрованій технології деревину (разом із кроною) переміщують на верхній склад форвардером (рис. 1.3, б), тобто у вантажному відсіку, без контакту з ґрунтом під час руху. Це одночасно знижує втрати хвої та підвищує керованість процесу: верхній склад стає вузлом, де відбувається розділення потоків деревини та деревної зелені і контроль якості.

На верхньому складі виконується розкряжування та відокремлення гілля з хвоєю за допомогою процесора (рис. 4.2). Процесор послідовно обробляє хлист: обрізує гілки й розкряжовує на сортименти, внаслідок чого деревина складається у штабелі, а гілки з хвоєю – у технологічні пакети. Важливо, що саме тут (у контрольованих умовах верхнього складу) реально забезпечити: роздільне складування, обмеження забруднення, формування партій за часом і якістю, а також швидку подачу деревної зелені на відділення хвої.

Рисунок 4.2 – Процесор

Окремо враховується часовий фактор збереження біологічно активних речовин. За позитивних температур хвоя, що тривалий час лежить після рубки,

втрачає частину цінних властивостей, тому для отримання високоякісної продукції потрібно мінімізувати проміжок «заготівля → переробка». Водночас для зимового періоду описується суттєво краща збереженість пігментів і вітамінних компонентів у деревній зелені, особливо якщо вона зберігається без попереднього відділення хвої. Практичний висновок для інтегрованої технології такий: у теплий період відділення потрібно організовувати максимально оперативно, а взимку з'являється більше логістичного запасу часу.

Завершальною операцією інтегрованої технології у запропонованому варіанті є гідроструминне відділення хвої, яке одночасно виконує відділення та первинне очищення сировини. Для реалізації способу пвикористовується установка (рис. 1.10): у верхній частині розміщена планка якої знаходиться із соплами, що формують вертикальні струмені води; під струменями рухається транспортер з перфорованою стрічкою, який транспортує хвойну лапку і пропускає крізь отвори суміш води з відокремленою хвоєю; нижче встановлено збірник, куди потрапляє вода з хвоєю, а очищені гілки транспортуються в окремий збірник для подальшого використання (наприклад, на тріску або іншу переробку). Компоновка принципово вигідна тим, що в одному агрегаті поєднані три функції – відділення, транспортування та накопичення, – тому процес може бути безперервним, із простішим обслуговуванням і меншими габаритами в мобільному виконанні.

Ключова умова працездатності гідроструминного обладнання – правильний вибір режимів. Відстань від сопел до транспортера, тиск і витрата води мають забезпечити відрив хвої від гілок, але не призводити до її руйнування. Це пов'язано з фізикою вільного гідравлічного струменя: він має компактну зону (потенційне ядро) з найбільшою концентрацією енергії та відносно рівномірним полем швидкостей, а далі переходить у зону розширення, де зростає турбулентність і відбувається інтенсивне змішування з навколишнім середовищем. У практичному сенсі це означає, що робочу зону потрібно організувати так, щоб взаємодія струменя з хвойною лапкою відбувалась

переважно в межах компактної ділянки, забезпечуючи ефективне відділення при мінімальному пошкодженні.

Отже, інтегрована технологія в цілому виглядає як послідовність взаємопов'язаних рішень: механізована валка з мінімізацією осипання; транспортування дерев із кроною на верхній склад без контакту з грунтом; процесорна обробка з формуванням окремого потоку деревної зелені; відділення кондиційної хвої гідроструминним способом із накопиченням та роздільним використанням очищених гілок. Саме така логіка дозволяє зменшити трудомісткість і втрати на операціях і створює передумови для масштабування виробництва продукції з хвої без конфлікту з базовим процесом лісозаготівлі.

4.3. Контроль якості на етапах інтегрованої технології

Проект інтегрованої схеми будується як "надбудова" над традиційним процесом рубок головного користування: потік деревини зберігається без змін як основний, але паралельно формується окремий потік деревної зелені (крони та лапки) у хвою як цільовий продукт. Критично, щоб ця надбудова не руйнувала лісівничі вимоги й не створювала надмірних додаткових операцій, а також забезпечувала контроль якості (W_{min}, $W_{кд}$, $W_{орг}$, W та час t) у контрольних точках КТ-1…КТ-3, які були визначені у розділі 3.

Щоб інтегрована схема забезпечувала отримання кондиційної хвої вводимо мінімальний регламент контролю:

- КТ-1 (після звалювання): фіксуються первинні втрати та осипання (за методикою п. 2.4).
- КТ-2 (після транспортування на верхній склад): відбір проб для W_{min} і складу домішок.
- КТ-3 (після складування): контроль часу зберігання t та повторне визначення якості (W, W_{min}, $W_{кд}$, $W_{орг}$), оскільки за теплих умов тривале зберігання понад сім діб є небажаним для збереження цінних властивостей хвої.

4.4. Рекомендації для лісогосподарських підприємств

Впровадження інтегрованої заготівлі хвойної сировини під час рубок головного користування доцільно розглядати як організаційно-технологічне доповнення до стандартного виробничого процесу, а не як паралельний, відокремлений вид робіт. Ключовою умовою є попереднє планування потоку деревної зелені так само обов'язково, як планується потік стовбурової деревини. Це означає, що ще на етапі підготовки лісосіки та складання технологічної карти потрібно визначити місця концентрації крон/лапки, схему переміщень техніки з мінімізацією контакту крони з грунтом, вікна часу до відділення хвої та порядок роздільного складування потоків. У межах інтегрованої схеми, прийнятої в роботі (харвестер → форвардер → верхній склад/процесор → мобільне відділення хвої), саме верхній склад або спеціально підготовлений проміжний майданчик виступає вузлом керування якістю і логістикою, оскільки там технологічно реально організувати контроль домішок, обмежити повторне зволоження й забезпечити стабільний підвід сировини до мобільної установки.

Першою групою рекомендацій є вимоги до планування й організації майданчиків. Для впровадження інтегрованої заготівлі підприємству доцільно передбачати на лісосіці або на верхньому складі окрему зону для деревної зелені, яка не перетинається з волоками руху техніки та місцями складування сортиментів. Майданчик під деревну зелень має бути максимально чистим: бажано із підстиланням (хмиз, щити, піддони або геотекстиль) для зменшення мінерального забруднення. Розміщення зони деревної зелені потрібно прив'язувати до логістики подачі на мобільну установку так, щоб уникати повторних перекладань і зайвих переміщень, які підвищують осипання. Якщо відділення хвої планується безпосередньо біля верхнього складу, зона подачі лапки має бути організована на відстані, що забезпечує роботу маніпулятора або навантажувача. У разі використання мобільної установки на краю лісосіки рекомендовано виділяти окремий під'їзд і місце розвороту для транспорту або енергетичного модуля, щоб потоки не конфліктували з основним вивезенням деревини.

Другою групою є рекомендації щодо вибору технологічної схеми та мінімізації втрат на контрольних точках. У господарських умовах Полісся найкращі передумови для збереження кондиційності хвої створює механізована схема з транспортуванням деревини без волочіння крон. Тому, якщо підприємство планує отримувати кондиційну хвою для високовартісних напрямів, доцільно віддавати перевагу схемам, де дерево переміщується у вантажному відсіку (форвардером або аналогом) і мінімізується контакт із грунтом. Окремо необхідно встановити внутрішні регламенти, що забороняють волочіння крон по грунту у кварталах, де планується заготівля хвої, а також обмежують рух техніки через зони складування деревної зелені. Для операцій звалювання бажано застосовувати прийоми, які зменшують удар крони об грунт (керований напрям падіння, укладання в пачки, зменшення кількості повторних маніпуляцій), оскільки саме на цій стадії фіксуються первинні втрати через осипання.

Третьою групою рекомендацій є логістика часу та режим вікон переробки. Підприємству слід запровадити технологічне правило: деревна зелень, призначена для кондиційної хвої, не повинна випадати з потоку більше, ніж це дозволяє цільовий продукт. Для екстрактів, ефірних олій та волокон критичним є скорочення часу від заготівлі до їх отримання, тому в теплий період доцільно організовувати відділення хвої максимально оперативно: або шляхом роботи мобільної установки синхронно з заготівельним комплексом, або через партійну подачу з верхнього складу з чітким добовим графіком. У холодний період можливе короткочасне складування партій деревної зелені, однак і тоді рекомендовано уникати повторного зволоження та самозігрівання: купи не повинні лежати у пониженнях рельєфу й у місцях накопичення талої води; за можливості – накривати матеріал та забезпечувати провітрювання.

Четверта група рекомендацій стосується організації контролю якості та сортування потоків. На підприємстві доцільно запровадити систему поділу на категорії деревної зелені (партій) за якістю ще до відділення хвої: кондиційна (мінімальні домішки, короткий час, відсутність контакту із грунтом), умовно

кондиційна (допустимі органічні домішки, можливе підсушування), низькосортна/забруднена (ризик грунтових домішок, механічно пошкоджена). Такий поділ дозволяє одразу спрямовувати потоки на відповідні напрями використання й не змішувати партії, оскільки змішування знижує цінність навіть якісної фракції. Для оперативного контролю мінерального забруднення рекомендовано застосовувати відбір проб на контрольних точках після переміщення та після складування (аналогічно КТ-2 і КТ-3 у методиці): для кожної партії фіксувати наявність видимих домішок грунту, фракційний склад і вологість (хоча б експрес-методом), а також час від заготівлі до відділення

П'ята група рекомендацій – впровадження мобільного відділення та узгодження його з виробничим потоком. Якщо підприємство реалізує інтегровану схему через мобільну установку (як у п. 4.2), потрібно забезпечити її стабільне енергоживлення, безпечне розміщення та безперервну подачу сировини. Практично це означає: організувати під'їзд для енергетичного модуля (генератора/насосної станції), зону безпеки навколо установки, місце відведення води та фільтрації (для гідроструминного варіанту) або місця для циклонів і збірників (для пневмотермічного варіанту), а також два окремі потоки виходу – «хвоя» і «очищені гілки». Очищені гілки необхідно одразу спрямовувати в узгоджену з виробництвом лінію використання (тріска, паливо, технологічна сировина), щоб вони не накопичувалися і не створювали вторинних логістичних проблем на верхньому складі.

Шоста група рекомендацій охоплює охорону праці та екологічні обмеження, які є обов'язковими умовами інтеграції потоку хвої у рубки головного користування. Під час робіт на верхньому складі та біля мобільної установки необхідно забезпечити розмежування зон руху техніки і зон перебування персоналу, регламентувати операції завантаження та розвантаження, передбачити засоби індивідуального захисту (з урахуванням пилу, аерозолів, вологи). Для гідроструминного відділення принципово важливим є контроль поводження з водою: недопущення забруднення водних об'єктів, організація замкненого або напівзамкненого контуру, відстоювання і

фільтрація та утилізація дрібних домішок. У частині лісівничих обмежень інтегрована заготівля не повинна погіршувати умови лісовідновлення: зони складування деревної зелені і траси руху техніки мають плануватися так, щоб мінімізувати пошкодження підросту й ущільнення ґрунту, а вилучення крони має виконуватися в обсягах, які не суперечать екологічним вимогам і потребі залишення частини органічної маси на лісосіці (цей аспект доцільно відображати в технологічній карті).

Узагальнюючи, для лісогосподарського підприємства практичний алгоритм впровадження інтегрованої заготівлі хвойної сировини виглядає так: на етапі підготовки лісосіки передбачити окремий потік деревної зелені в технологічній карті; організувати чисті зони концентрації та мінімізувати контакт крони з ґрунтом; синхронізувати графік заготівлі з роботою мобільного відділення, обмеживши час до переробки; запровадити простий контроль якості партій за ключовими показниками й роздільне спрямування потоків за категоріями; забезпечити безпеку робіт і екологічну коректність операцій. Реалізація цих рекомендацій створює умови для переходу від потенційного ресурсу хвої до стабільного кондиційного виходу.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Для соснових культур Полісся у виробничій практиці рубок головного користування найчастіше реалізується суцільнолісосічний спосіб, у якому стовбурова деревина є цільовим продуктом, а крона та деревна зелень – лісосічні рештки. Це є первинною причиною високих втрат і забруднення хвої без спеціальної організації потоку її заготівлі.

2. Найкращі передумови для керування потоком деревної зелені створюють механізовані технологічні схеми (харвестерно-форвардерні), оскільки вони дозволяють зменшувати контакт крони з ґрунтом, концентрувати крони у визначених місцях та прив'язувати логістику деревної зелені до вузлів верхнього складу.

3. Хвоя та деревна зелень є ресурсом із різними напрямами використання (екстракти/олії, біостимулятори, матеріали/волокна, енергетика), тому ключовим стає забезпечення якості: мінімізація мінеральних домішок, обмеження механічного пошкодження та контроль часу між заготівлею і переробкою.

4. Огляд технологій відділення хвої показує, що найбільш перспективними для отримання кондиційної хвої в умовах інтеграції з рубками є схеми пневмовідділення та гідроструминні рішення, які можуть поєднувати відділення й первинне очищення. Вибір технології визначається цільовим продуктом та допустимими ризиками пошкодження і домішок.

5. Запропонований підхід до розрахунку обсягів хвойної сировини базується на обсязі заготівлі стовбурової деревини та частках побічної продукції для рубок (хвойна лапка 3,5–4%, хвоя 1,5–2%), що є практично зручним для застосування за матеріалами відводу лісосік та технологічними картами.

6. Методика аналізу втрат і якості через контрольні точки (КТ-1…КТ-4) забезпечує можливість: розкласти втрати пооперaційно, відокремити втрати маси від втрат кондиційності, коректно порівнювати традиційні та інтегровану технології.

7. Критерії оптимізації (технологічні, якісні, економічні, екологічні) задані так, що підсумкове рішення може формуватися не за одним показником, а як компроміс між керованістю процесу, якістю хвої, витратами та дотриманням санітарно-протипожежних вимог.

8. Перевірка методики на двох пробних площах площею по 0,1 га дала можливість оцінити потенціал заготівлі хвої, що становить для пробної площі 1 – 0,403 т, для пробної площі 2 – 0,328 т. Врахування пооперацій них втрат у ланцюгу суттєво зменшує масу, що реально доходить на переробку для пробної площі 1 – 0,303 т, для пробної площі 2 – 0,213 т. Це підтверджує важливість організація операцій в технологічному процесі заготівлі хвої.

9. Порівняння сценаріїв складування показує, що підвищення якості досягається або вузлом верхнього складу з кращим контролем чистоти та зволоження хвої, або максимальним скороченням часу шляхом подачі до мобільної установки. Проміжні майданчики підвищують ризики забруднення і втрат сировини.

10. Найкритичнішим дефектом для більшості високовартісних напрямів переробки є мінеральне забруднення, оскільки воно одночасно погіршує придатність сировини і збільшує зношування та витрати на очищення. У роботі це узгоджено з прийнятим порогом неорганічних домішок 0,2% як орієнтиром якості.

11. Оптимізація використання хвойної сировини реалізуються шляхом перебудови традиційної схеми в інтегровану, де деревна зелень планується як окремий матеріальний потік уже на стадії підготовки лісосіки (майданчики, логістика, часові вікна, контроль якості).

12. Раціональний техніко-технологічний каркас інтегрованої схеми сформовано як: харвестер → форвардер → верхній склад/процесор → мобільне відділення хвої, що дозволяє мінімізувати контакт крони з грунтом, концентрувати партії деревної зелені та керувати якістю.

13. Вибір гідроструминного способу відділення як завершальної операції логічно вписаний у концепцію кондиційної хвої: спосіб забезпечує

безперервність процесу (відділення–транспортування–накопичення в одному агрегаті) і ефект первинного очищення

14. Запропонований регламент контролю якості через контрольні точки (КТ-1…КТ-3) є практично достатнім мінімумом для виробництва: він дозволяє відслідковувати втрати, домішки і часовий фактор та не перевантажує виробництво складними процедурами лабораторних досліджень.

Рекомендації

1. На етапі підготовки лісосіки у технологічній карті обов'язково закладати потік деревної зелені.

2. Для звалювання та первинного формування застосовувати прийоми, що зменшують осипання і удар крони об грунт.

3. Транспортування організовувати так, щоб крона переміщувалась без контакту з грунтом.

4. На верхньому складі забезпечити роздільне складування: окрема зона деревної зелені, не перехрещена з потоками сортиментів і рухом техніки, використовувати підстилання (піддони, геотекстиль) для зменшення мінерального забруднення.

5. Регламент якості вести по партіях: фіксувати час від заготівлі до відділення, проводити швидкий контроль домішок та вологості у ключових контрольних точках (за вашою схемою КТ-1…КТ-3), не змішувати партії різної якості.

6. Відділення хвої виконувати мобільним обладнанням. Для гідроструминного способу передбачити безпечне розміщення та організацію водовідведення.

7. Потік очищених гілок одразу спрямовувати у лінію використання (тріска, паливо, інша переробка), щоб не створювати накопичення та вторинних логістичних проблем на верхньому складі.

8. Екологічні та лісівничі обмеження враховувати як обов'язкові: не погіршувати умови відновлення (підріст, грунт), не допускати захаращення, забезпечувати своєчасне впорядкування лісосіки згідно чинних вимог.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пасевич Я. В. Оптимізація використання хвойної сировини під час рубок головного користування у соснових культурах : стаття (рукопис, подано до друку у студентський збірник). Луцьк, 2025.

2. Голуб В. Я. Оптимізація заготівлі та перероблення хвої сосни звичайної в умовах філії «Маневицьке лісове господарство» : кваліфікаційна робота магістра. Луцьк : ЛНТУ, 2024.

3. Пивовар С. П. Дослідження обладнання для отримання високоякісної деревної хвої : кваліфікаційна робота бакалавра. Луцьк : ЛНТУ, 2021.

4. Герасимчук О. П., Ткачук О. Л., Волянський В. О., Бондар В.Н. Гідроструминний спосіб відділення хвої сосни звичайної для комплексної переробки. Сільськогосподарські машини, 2025, Вип. 51, С. 91–98. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1886/

5. Практичне лісівництво : навчальний посібник / В. Новак, В. Мазепа. Луцьк : ЛНТУ, 2025. (електронний документ).

6. Лісовий кодекс України : Закон України від 21.01.1994 № 3852-XII (зі зм.). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12 (дата звернення: 14.11.2025).

7. Про затвердження Правил рубок головного користування в гірських лісах Карпат : постанова Кабінету Міністрів України від 22.11.1995 № 929. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/929-95-%D0%BF (дата звернення: 14.11.2025).

8. Про затвердження Правил рубок головного користування : постанова Кабінету Міністрів України від 27.07.1995 № 559. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/559-95-%D0%BF (дата звернення: 14.11.2025).

9. Про затвердження Санітарних правил в лісах України : постанова Кабінету Міністрів України від 27.07.1995 № 555. URL:

https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-95-%D0%BF (дата звернення: 14.11.2025).

10. План лісоуправління філії «Маневицьке лісове господарство» ДП «Ліси України» (або чинний план лісоуправління відповідної філії для об'єкта дослідження). URL: https://www.e-forest.gov.ua/plan-lisoupravlinnya/ (дата звернення: 14.11.2025).

11. Обласна програма розвитку лісового господарства у Волинській області на 2023–2027 роки : наказ від 21.09.2023 № 342 (PDF). URL: https://nw.forest.gov.ua/wp-content/uploads/2023/10/%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%B0-%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B0_%D0%B2%D1%96%D0%B4_21.09.2023_%E2%84%96342.pdf (дата звернення: 14.11.2025).

12. Miklush S. I., Debryniuk Yu. M., Savchyn M. V., Ivanюk I. D. Basics of Forestry. A Manual. 2nd edition. Lviv : Ukrainian National Forestry University, 2022. 167 p. URL: https://m.lismanual.com/uk/article/13/ (дата звернення: 14.11.2025).

13. Tokarieva O. V., Konseba S. O. Geographical conditions and monitoring of zonal distribution of pine plantations in Ukrainian Polissia. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science. 2024. Vol. 15, No. 3. P. 109–120. DOI: 10.31548/forest.2024.03.009.

14. Kolos A., Gadaila A., Goychuk A., et al. Soil carbon content and microbial activity in pine stands exposed to bark beetle attacks. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 77–91. DOI: 10.31548/forest.2024.01.006.

15. Rybak V., Savchyn M., Matusiak M., et al. Growth assessment of pine-spruce forests and evaluation of phytomass in dark coniferous stands. Forest Science and Practice. 2024. Vol. 1. P. 58–67. DOI: 10.36930/405102.

16. Koutsaviti A., Antonopoulou V., Vlassi A., et al. Chemical Composition and Antimicrobial Activity of Essential Oils from the Aromatic Plants Satureja

thymbra, Thymbra capitata and Pinus halepensis Growing in Greece. Foods. 2021. Vol. 10(1). 142. DOI: 10.3390/foods10010142.

17. Rana R., Langenfeld-Heyser R., Finkeldey R., Polle A. Pine needle biomass: a carbon-rich resource for sustainable bioenergy production. Bioresource Technology. 2023. Vol. 368. 128255. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128255.

18. Klavins M., Klavina I., Zicmanis A. Pine needles: A renewable resource for production of bioactive compounds and materials. Molecules. 2023. Vol. 28(20). 7085. DOI: 10.3390/molecules28207085.

19. Salzano de Luna M., Ascione C., Santillo C., et al. Bio-based extracts from conifer needles as functional additives for sustainable materials. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2023. Vol. 11(4). P. 1745–1756. DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c06698.

20. Sharma P., Kumar A., Thakur R., et al. A critical review on biochar production from pine wastes: Properties, applications, and environmental impacts. Bioresource Technology. 2023. Vol. 377. 129456. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.129456.

21. Bhattacharya S., Mondal M. K., Mukherjee P., et al. Pine needle valorization for energy and materials: A pathway towards circular bioeconomy. Renewable Energy. 2022. Vol. 189. P. 928–942. DOI: 10.1016/j.renene.2022.06.067.

22. Kumar A., Anugwom I., Pokhrel P. R., et al. Pine needles based lignocellulosic active paper containing nano zinc oxide for food packaging. Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 170. 113752. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113752.

23. Mandal T., Chandel A. K., Ghosh S., et al. Biochar production from pine needles: process optimization and product characterization. Chemical Papers. 2022. Vol. 76. P. 2639–2651. DOI: 10.1007/s11696-021-01893-4.

24. Zheliezna T., Bashtovyi A., Miroshnychenko I., et al. Analysis of directions to optimize logistics of harvesting and delivering biomass to energy facilities. Economy of Industry. 2024. No. 3(99). P. 29–45. DOI: 10.15407/econindustry2024.03.029.

25. Ahmadvand S., Sowlati T. Bi-objective optimization of forest-based biomass supply chains: tactical planning trade-off between economic and environmental objectives. Environmental Challenges. 2021. Vol. 4. 100101. DOI: 10.1016/j.ecmx.2021.100101.

26. Mobini M., Sowlati T., Sokhansanj S. Forest biomass supply logistics for a power plant using the discrete-event simulation approach. Applied Energy. 2011. Vol. 88(4). P. 1241–1250. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.12.008.

27. Cambero C., Sowlati T. Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 36. P. 62–73. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.041.

28. Akhtari S., Sowlati T., Day K. Effects of variations in supply accessibility and amount on the performance of a forest biomass supply chain. Energy. 2014. Vol. 67. P. 631–641. DOI: 10.1016/j.energy.2014.01.092.

29. Spinelli R., Magagnotti N. Harvesting forest residues: an alternative to conventional thinning? Scandinavian Journal of Forest Research. 2009. Vol. 24(3). P. 232–240. DOI: 10.1080/02827580902806593.

30. Thiffault E., Béchard A., Paré D., Allen D. Slash bundling reduces costs of forest residue supply chains: a case study. Biomass and Bioenergy. 2012. Vol. 46. P. 39–47. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.07.029.

31. Stanula A., Klavina I., Zicmanis A., et al. Pine needles as a feedstock for sustainable energy and materials: assessment of properties and utilization pathways. Energies. 2023. Vol. 16(24). 7997. DOI: 10.3390/en16247997.

32. Герасимчук О. П., Ткачук О. Л. Машина для м'яття хвої сосни звичайної з гідравлічним притисканням. Наукові нотатки. 2024. Вип. 77. С. 156–160. DOI: 10.36910/775.24153966.2024.77.19.

33. Ткачук О. Л., Герасимчук О. П., Резнікова В. В. Пневмотермічний спосіб отримання хвої для виготовлення текстильних волокон. Сільськогосподарські машини. 2022. Вип. 48. С. 67–73. DOI: 10.36910/acm.vi48.842.

34. Ткачук О. Л., Герасимчук О. П., Ковальчук Н. В., Резнікова В. В. Обґрунтування режиму роботи пневмотермічної мобільної установки для відділення хвої сосни звичайної. Сільськогосподарські машини. 2023. Вип. 49. С. 81–89. DOI: 10.36910/acm.vi49.1025.

35. Ткачук О. Л., Ковальчук Н. В., Герасимчук О. П., Резнікова В. В. Методика визначення якісних показників хвої сосни звичайної для виробництва прядильного волокна. Сільськогосподарські машини. 2024. Вип. 50. С. 87–94. DOI: 10.36910/acm.vi50.1413.

36. Охремов В. П., Герасимчук О. П., Ткачук О. Л., Пуць В. О. Спосіб відділення хвої від гілок сосни звичайної : патент України. 2023. (за наявності публікації у реєстрі — додамо номер і URL реєстру).

37. Holub V. Prospective directions for comprehensive processing of Scots pine needles in Manevytsia forestry enterprise branch. Сучасні технології у агровиробництві та природокористуванні : тези IV студентської науково-технічної конференції. Луцьк : ЛНТУ, 2024. С. 175–177.

38. Herasymchuk O., Holub V. Promising directions for the comprehensive processing of Scots pine needles. Інноваційні технології в агрономії, землеустрої, електроенергетиці, лісовому та садово-парковому господарстві : матеріали міжнародної науково-практичної конференції (03.10.2024). Біла Церква : БНАУ, 2024. С. 54–55.

39. Pivovar S., Herasymchuk O. Review of equipment for obtaining high-quality wood greenery. Сучасні технології у агровиробництві та природокористуванні : тези I студентської науково-технічної конференції. Луцьк : ЛНТУ, 2021. С. 97–101.

40. Мазепа В.Г., Турко В.М. Регіональне лісівництво: підручник. Житомир: Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Лісове господарство» галузі знань 20 Аграрні науки та продовольство спеціальності 205 Лісове господарство денної та заочної

форм навчання. Уклад.: В.Г. Мазепа, В.О. Волянський, О.П. Герасимчук. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 24 с.

41. Лісотаксаційний довідник. Уклад.: А.М. Білоус, С.М. Кашпор, В.В. Миронюк, В.А. Свінчук, О.М. Леснік. Київ: Видавничий дім «Вініченко», 2021. 424 с.

42. Основи лісогосподарювання: навчальний посібник. Уклад.: С.І. Миклуш, Ю.М. Дебринюк, М.В.Я. Заячук та ін. Львів: Галицька видавнича спілка, 2022. 830 с.

43. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти всіх освітніх програм денної та заочної форм навчання. Уклад.: Н.В. Ковальчук, Ю.Г. Фесіна, І.Л. Заблоцька. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 46 с.

44. Кваліфікаційна робота. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Лісове господарство» галузі знань 20 Аграрні науки та продовольство спеціальності 205 Лісове господарство денної та заочної форм навчання / уклад. В.Г. Мазепа, В.О. Волянський, О.П. Герасимчук. – Луцьк: ЛНТУ, 2023. – 24 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

УДК 630221:63024(477)
Пасевич Я.В., ст. гр. ЛГм-21
Науковий керівник: к.т.н., доц. Герасимчук О.П.

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАГОТІВЛІ ХВОЙНОЇ СИРОВИНИ ПРИ РУБКАХ ГОЛОВНОГО КОРИСТУВАННЯ В СОСНОВИХ КУЛЬТУРАХ

У статті розглянуто організаційно-технологічні особливості заготівлі хвойної сировини під час рубок головного користування. На основі аналізу чинних «Правил рубок головного користування» та навчально-методичних матеріалів з'ясовано, що домінують суцільнолісосічні та суцільні вузьколісосічні рубки, технологія яких орієнтована насамперед на заготівлю стовбурової деревини, тоді як крона розглядається як лісосічні рештки. Узагальнення результатів сучасних досліджень із переробки хвойної сировини показало високий потенціал хвої сосни звичайної як сировини для виробництва текстильних волокон, екстрактів, ефірних олій та інших продуктів біорефінерії, що потребує формування окремого потоку хвої на стадії лісозаготівлі. Запропоновано організаційно-технологічну схему інтегрованої заготівлі хвойної сировини, яка базується на використанні харвестера, форвардера, процесора та мобільного обладнання для відділення хвої. Порівняння традиційної та інтегрованої схем показало, що цілеспрямоване планування потоків крон і розміщення техніки дає змогу сформувати керований потік хвойної сировини без суттєвого зниження продуктивності основних лісозаготівельних операцій і перевести хвойну масу з категорії відходів у категорію цінної технологічної сировини.

Ключові слова: соснові культури; рубки головного користування; хвойна сировина; крона; харвестер; форвардер; біорефінерія; циркулярна біоекономіка.

Pasevych Ya

ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF NEEDLE BIOMASS HARVESTING DURING FINAL FELLINGS IN SCOTS PINE STANDS

The article examines the organizational and technological features of needle biomass harvesting during final fellings in Scots pine stands. An analysis of the current "Rules of final fellings" and teaching materials on forest management shows that clear-cut and narrow clear-cut systems prevail, while existing technologies are mainly focused on stemwood harvesting and treat the crown as logging residues. A review of recent studies on coniferous biomass processing demonstrates the high potential of Scots pine needles as raw material for textile fibres, extracts, essential oils and other biorefinery products, which requires the formation of a separate needle flow already at the logging stage. An integrated organizational and technological scheme for needle biomass harvesting is proposed, based on the combined use of a harvester, forwarder, processor and mobile needle separation equipment. Comparison of traditional and integrated schemes proves that targeted planning of crown flows and appropriate allocation of machines makes it possible to create a controllable stream of needle biomass without a significant decrease in the productivity of main logging operations and to shift needles from the category of waste to valuable technological raw material.

Keywords: Scots pine stands; final fellings; needle biomass; crown; harvester; forwarder; biorefinery; circular bioeconomy.

Постановка проблеми. Соснові насадження відіграють ключову роль у структурі лісового фонду України, зокрема в зоні Полісся, де вони формують основну частку експлуатаційних лісів і є головним об'єктом рубок головного користування. У чинних «Правилах рубок головного користування» акцентується необхідність безперервного, невиснажливого і раціонального використання лісових ресурсів, поєднаного із забезпеченням відтворення високопродуктивних деревостанів та збереженням їх екологічних функцій [1]. Водночас навчальні й наукові праці з лісівництва підкреслюють, що традиційні технології головного користування зосереджені переважно на заготівлі стовбурової деревини, тоді як потенціал комплексного використання крони, зокрема хвойної сировини, залишається реалізованим лише частково [2; 3].

Крона соснових дерев, яка при рубках головного користування переважно залишається на лісосіці, містить значну частку біомаси та цінних хімічних компонентів, придатних для одержання екстрактів, ефірних олій, біопалива та целюлозовмісної сировини для текстильних волокон. Сучасні дослідження в галузі переробки хвойної сировини демонструють перспективність використання хвої сосни звичайної як сировини для виробництва натуральних текстильних волокон, що підтверджується розробленням способів відокремлення хвої та відповідного обладнання [4–6]. Огляд публікацій показує, що хвоя та інші побічні продукти лісової біомаси розглядаються як важливий компонент біорефінерійних технологій і циркулярної біоекономіки, з широким спектром потенційних продуктів – від хімічних речовин до композиційних матеріалів та енергоносіїв [7; 8].

Попри наявність результатів, що стосуються технологій відокремлення та переробки хвої, організаційно-технологічні аспекти її заготівлі саме на стадії рубок головного користування в соснових культурах в Україні залишаються недостатньо опрацьованими. У практиці лісозаготівель основні технологічні схеми орієнтовані на максимізацію виходу стовбурової деревини та продуктивності машин, без спеціального урахування збереження хвойної маси й формування окремого потоку хвойної сировини. Це призводить до значних втрат потенційно цінної сировини, підвищення пожежної небезпеки на місцях рубок та невикористання можливостей поглибленої переробки деревної біомаси відповідно до сучасних вимог сталого лісокористування та біоекономіки [1–3; 7; 8].

Отже, науково-практичною проблемою є обґрунтування організаційно-технологічних рішень заготівлі хвойної сировини при рубках головного користування в соснових культурах. Такі рішення мають забезпечувати мінімізацію втрат хвої на всіх етапах технологічного процесу (звалювання, трелювання, розкряжування, сортування), відповідати чинним нормативним вимогам, не знижувати ефективність заготівлі стовбурової деревини та формувати стабільні потоки якісної хвойної сировини для подальшої переробки в продукцію з високою доданою вартістю. Формування організаційно-технологічних моделей, які інтегрують заготівлю хвої у діючі схеми рубок головного користування, є важливим завданням для підвищення комплексності

використання лісових ресурсів і реалізації принципів циркулярної біоекономіки у лісовому секторі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нормативні засади проведення рубок головного користування в Україні визначені чинними «Правилами рубок головного користування в лісах України» [1], де регламентовано допустимі способи рубок, вікові межі стиглості насаджень, вимоги до збереження підросту, організації лісовідновлення та протипожежних заходів. Разом із тим у цих правилах питання поводження з кронами, гілками та іншими побічними продуктами рубок розглянуто переважно з позицій протипожежної безпеки та санітарного стану, без акценту на їх цілеспрямоване залучення до переробки як окремого виду сировини.

У навчально-методичних працях з лісівництва й практичного ведення рубок головного користування основна увага зосереджена на лісівничому обґрунтуванні систем рубок, організації лісосічних робіт, виборі схем розміщення лісосік і технологічних коридорів [2; 3]. В.Г. Мазепа у методичних вказівках для проектування рубок головного користування підкреслює необхідність поєднання вимог безперервності лісокористування, збереження ґрунтового покриву та оптимізації технологічних процесів, але використання крони й хвої згадується лише як додатковий резерв підвищення комплексності переробки деревини [2]. У працях Новак А.А та Мазепи В.Г. детально описують лісівничі наслідки застосування різних способів рубок у соснових насадженнях, однак організаційно-технологічні рішення щодо окремої заготівлі хвойної сировини не виділяються в самостійний об'єкт дослідження [3].

У наукових публікаціях, присвячених системам рубок головного користування, переважає аналіз лісівничих ефектів суцільних, поступових та вибіркових рубок, їхнього впливу на природне поновлення, структуру деревостанів і екологічні функції лісу [4]. Хоча вказується на необхідність більш повного використання лісосічних відходів, основний акцент робиться на енергетичному використанні деревних решток, тоді як хвоя розглядається лише як складова загального потоку біомаси, без виділення специфічних технологічних вимог до її заготівлі [4; 5]. Оглядові роботи щодо сосни звичайної підкреслюють її важливу роль у лісовому фонді та високу потенційну продуктивність деревостану, але не деталізують організаційні підходи до використання крони та хвої в процесі головного користування [5].

Паралельно активно розвивається напрям досліджень, пов'язаний із переробкою хвойної сировини як окремого виду лісового ресурсу. У роботі Ткачук О.Л., Герасимчука О.П. та Резнікової В.В. обґрунтовано пневмотермічний спосіб отримання хвої для виготовлення текстильних волокон, наведено структуру та принцип дії відповідної мобільної установки, визначено оптимальні параметри температурно-повітряного режиму [6]. Праці Ткачук О.Л. та Герасимчука О.П. також присвячені стану та перспективам застосування деревної целюлози й похідних продуктів для виробництва хімічних волокон [7], а також проблематиці отримання натуральних текстильних волокон із хвої сосни звичайної [8]. У цих дослідженнях хвоя позиціонується як цінна сировина для текстильної промисловості, однак етап її заготівлі в лісі розглядається лише

загально, переважно через опис вимог до якості вхідної сировини (чистота, вологість, відсутність домішок кори та гілок) [6–8].

Статті інших дослідників демонструють широкий спектр можливостей комплексної переробки хвойної сировини. Куцавіті А. та співавтори систематизували дані щодо хімічного складу та антиоксидантного потенціалу ефірних олій та екстрактів хвої різних видів, підкресливши значення хвої як джерела біологічно активних сполук для харчової й фармацевтичної промисловості [9]. Клавін Л. та співавтори розробили концепцію біорефінерії на основі хвойної сировини, у якій голки розглядаються як важлива сировинна база для одержання низки цінних продуктів у рамках циркулярної біоекономіки [10]. Рана А. та співавтори акцентують увагу на можливостях створення целюлозної біорефінерії на основі хвої сосни, де голки слугують вихідним матеріалом для отримання целюлози, наноцелюлози та композитних матеріалів [11]. Праця Єола Р. узагальнює підходи до використання відходів хвої як джерела енергії та сировини, демонструючи зростаючий інтерес до цього ресурсу [12].

Таким чином, у сучасних дослідженнях чітко окреслено потенціал хвої як багатофункціональної сировини для біорефінерії, екстракційних процесів, виробництва текстильних волокон та енергетичних продуктів [6–12]. Водночас більшість робіт виходить із того, що хвоя вже відокремлена від деревини та гілок і надходить на переробку у вигляді відносно однорідної фракції. Питання ж організаційно-технологічного забезпечення формування такого потоку сировини безпосередньо в процесі рубок головного користування в соснових культурах – вибір місця в технологічній схемі для мобільних установок, логістика крон, вимоги до розміщення лісосічної техніки – залишаються висвітленими фрагментарно. Саме ця прогалина визначає необхідність цілеспрямованого дослідження організаційно-технологічних особливостей заготівлі хвойної сировини при рубках головного користування в соснових насадженнях, з опорою на напрацювання як лісівничої, так і суміжних наук.

Цілі статті. Метою дослідження є обґрунтування організаційно-технологічних рішень щодо заготівлі хвойної сировини при рубках головного користування в соснових культурах, які забезпечують формування цільового потоку хвої належної якості для подальшої переробки.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Відповідно до чинних «Правил рубок головного користування» залежно від категорії лісів, лісорослинних умов, складу й структури деревостанів застосовують чотири системи рубок: вибіркову, поступову, комбіновану та суцільну [1]. Вибіркова система передбачає періодичне вирубування окремих дерев або їх груп у стиглих і перестійних деревостанах без порушення суцільності намету, при цьому ділянка постійно залишається вкрита лісовою рослинністю. Поступові рубки (рівномірно-поступові, групово-поступові, смугово-поступові) характеризуються поетапною вирубкою деревостану за два–чотири прийоми з одночасним формуванням підросту головних порід. Суцільні рубки (у тому числі суцільні вузьколісосічні) – це спосіб, за якого весь деревостан вирубується повністю, за винятком насінників, життєздатного

підросту та молодняку, а також цінних і рідкісних видів дерев і чагарників, що підлягають збереженню.

У рівнинних соснових насадженнях Правобережного Полісся й Лісостепу, як правило, проводять суцільні рубки головного користування у деревостанах стиглого й перестійного віку у формі суцільнолісосічних або суцільних вузьколісосічних лісосік. Їх параметри (максимальна площа, ширина лісосіки, строки примикання тощо) регламентовані Правилами та залежать від групи лісів, типів лісорослинних умов і наявності підросту [3]. У виробничих соснових культурах переважає варіант, коли лісосіки закладаються вузькими смугами або компактними ділянками в межах кварталу з обов'язковим забезпеченням відновлення лісу через створення культур або використання природного поновлення, що формує просторово-часову «сітку» рубок головного користування на території лісництва [3].

Традиційно технологічна підготовка до рубок головного користування включає відвід і таксацію лісосік, трасування волоків і під'їзних доріг, складання технологічної карти, де визначаються способи валки, трелювання та вивезення деревини. Усі ці операції орієнтовані насамперед на ефективну заготівлю стовбурової деревини. Крона (хвоя з дрібними гілками) розглядається як лісосічні рештки, які згідно з діючими нормативами можуть або залишатися на лісосіці з урахуванням протипожежних і санітарних вимог, або частково залучатися до перероблення (наприклад, на паливо чи екстракти) як другорядні лісові матеріали.

У соснових культурах України домінують дві групи технологічних схем рубок головного користування: моторно-ручні та механізовані (харвестерно-форвардерні).

За моторно-ручної технології валка, обрізка гілок і розкряжування виконуються бензомоторними пилками безпосередньо в лісі. Стовбури у вигляді хлистів або сортиментів трелюються тракторними чи тросовими установками до верхнього складу, де здійснюється остаточне сортування та навантаження на транспорт. Крона при цьому залишається розосередженою по площі лісосіки у вигляді окремих куп гілок і верхівок. Така схема мінімізує додаткові операції, але практично унеможливлює цілеспрямовану заготівлю хвої: сировина швидко забруднюється грунтом, мінеральними домішками, частково пошкоджується колісною технікою.

У механізованих схемах валку, обрізку та розкряжування виконує харвестер (рис. 1, а), який формує сортименти уздовж волоків, а форвардер (рис. 1, б) здійснює їх підбір і вивезення. Крона і дрібні гілки концентруються в більш-менш локалізованих купах уздовж волоків або на спеціально відведених майданчиках. Це створює кращі передумови для відокремлення хвої та її окремої заготівлі, оскільки потік хвойної маси стає більш керованим у просторі та часі.

У будь-якій із цих схем додаткові обмеження накладають «Санітарні правила в лісах України», які зобов'язують лісокористувача не допускати надмірного захаращення лісосік, своєчасно ліквідовувати або упорядковувати лісосічні рештки з урахуванням протипожежних і санітарних вимог [2]. Це

створює передумови для організації цілеспрямованої заготівлі хвойної сировини замість її суто утилізаційного прибирання.

а

б

Рисунок 1 – Машини, що використовуються в механізованій технологічній схемі рубок головного користування: а – харвестер: б – форвардер

Розглянемо основні вимоги до інтегрованої (з заготівлею хвої) схеми проведення рубок головного користування (табл.).

Завершальною ланкою організаційно-технологічного забезпечення заготівлі хвойної сировини є побудова такої схеми виконання рубок головного користування, за якої операції заготівлі, транспортування деревної зелені з лісу та відділення кондиційної хвої виконуються з мінімальними втратами й трудомісткістю.

Таблиця – Основні вимоги до інтегрованої (з заготівлею хвої) схеми проведення рубок головного користування

Операція технологічного процесу	Традиційна схема рубки головного користування	Інтегрована схема з заготівлею хвойної сировини	Впливу на використання хвої
Відвід і підготовка лісосіки	Плануються волоки, верхній склад, місця складування лісоматеріалів	Додатково плануються майданчики для тимчасового складування крон і відокремлення хвої	Уже на етапі проектування враховується потік хвойної сировини
Валка дерев	Моторно-ручна або харвестерна валка без спеціальних вимог до збереження хвої	Валка з мінімальним осипанням хвої, обмеження волочіння крон по грунту	Зменшуються втрати та забруднення хвої мінеральними домішками
Обрізка гілок і формування хлистів	Обрізка «на місці» з розкиданням крон по площі	Обрізка з укладанням крон у валки/купи вздовж волоків або безпосередньо на верхньому складі	Крони концентруються та стають доступними для механізованої обробки
Трелювання/форвардування	Переміщуються лише стовбури (хлисти, сортименти)	Можливе комбіноване трелювання стовбурів разом із кронами	Скорочується кількість місць скупчення крон, спрощується логістика хвої
Очищення лісосіки від решток	Згрібання, подрібнення або часткове залишення решток на місці	Згрібання решток після відокремлення хвої, їх подальше використання як паливної щепи	Частина біомаси (хвоя) переводиться з категорії відходів у корисну сировину
Додаткова операція «Переробка хвойної сировини»	Відсутня	Відокремлення хвої, формування партій для вивезення	Формується окремий товарний потік хвойної сировини для перероблення

Саме ці операції є найскладнішими з погляду витрат праці та енергії, тому підвищення їх ефективності розглядається як ключова передумова розширення виробництва продукції з хвої.

Запропонований технологічний процес заготівлі хвої сосни звичайної органічно базується на типовому процесі заготівлі деревини при рубках головного користування і включає послідовність операцій, наведену на рис. 2.

На першому етапі здійснюється звалювання дерев із формуванням пачок за допомогою харвестера, що обумовлене необхідністю мінімізувати втрати хвої під час валки дерев. Застосування харвестера, оснащеної маніпулятором із захватом і циркулярною пилкою, дає змогу одночасно виконувати захоплення та спилювання дерева, укладаючи його в упорядковані пачки. Це зменшує механічне ушкодження крони, обмежує падіння деревини з висоти та, відповідно, скорочує відпад хвої ще на лісосіці.

Наступна операція – переміщення звалених дерев на верхній склад. Використання деревної хвої виключає можливість трелювання дерев із кроною «волоком», оскільки такий спосіб призводить до надмірних втрат хвої через тертя крон об грунт і пошкодження гілок.

Тому для транспортування пропонується застосовувати форвардер – багатофункціональну самохідну машину, яка поєднує кабіну керування і вантажну платформу з краном-маніпулятором. Форвардер завантажує дерева з пачок на платформу за допомогою маніпулятора, транспортує їх до верхнього складу й розвантажує. Така схема забезпечує мінімальний контакт крон із грунтом і зменшує механічні втрати хвойної маси в процесі транспортування.

Рисунок 2 – Технологічний процес заготівлі хвої сосни звичайної

На верхньому складі звалені дерева піддаються механізованій обробці процесором (рис. 3). При захопленні дерева за комель процесор спочатку протягує його крізь робочий орган, одночасно обрізуючи гілки, а потім здійснює розкряжовування хлиста на сортименти. Якщо дерево захоплено за вершину,

відбувається послідовне обрізання гілок із подальшим розворотом агрегата на 180° і розкряжовуванням від комля. У результаті гілки з хвоєю складаються в окремі купи, а готові сортименти – у штабелі. Така просторово впорядкована схема розміщення крон створює зручні умови для їх подальшого завантаження в мобільну установку для відділення хвої.

Рисунок 3 – Процесор

Завершальною операцією є відділення хвої від гілок та її транспортування до збірника. Ці функції можуть виконувати установки різних типів, спеціально розроблені для відділення хвої.

Таким чином, розроблений технологічний процес заготівлі деревної хвої, який базується на ланцюгу заготівлі деревини при рубках головного користування, включає послідовні операції звалювання, трелювання, розкряжовування, відділення хвої з її подальшим транспортуванням до збірника. Механізована заготівля як деревини, так і хвойної сировини забезпечується комплексним застосуванням харвестера, форвардера, процесора та мобільного обладнання для відділення хвої. Така організаційно-технологічна схема дозволяє інтегрувати заготівлю хвойної сировини в процес рубок головного користування без істотного зниження продуктивності основних лісозаготівельних операцій та з максимальним наближенням місця переробки хвої до місця її утримання.

Висновки. Під час рубок головного користування домінують суцільнолісосічні та суцільні вузьколісосічні рубки, формується значний, але недостатньо використаний потенціал хвойної сировини. Запропонована у роботі організаційно-технологічна схема, що поєднує застосування харвестера, форвардера, процесора та мобільного обладнання для відділення хвої, дозволяє сформувати керований потік хвойної сировини без істотного зниження продуктивності основних лісозаготівельних операцій і наблизити місце її переробки до місця утворення. Перехід до інтегрованих схем рубок головного користування з цілеспрямованою заготівлею хвої узгоджується з принципами комплексного використання деревної біомаси та циркулярної біоекономіки, переводячи хвойну масу з категорії відходів у категорію цінної технологічної

сировини. Разом із тим запропоновані рішення потребують подальшого опрацювання щодо кількісної оцінки виходу хвої за різних технологічних схем, оптимізації логістики потоків крон і хвойної маси на рівні лісництва, обґрунтування режимів роботи мобільних установок та аналізу екологічних наслідків вилучення частини хвойної біомаси з лісосік. Це визначає перспективні напрями подальших досліджень, спрямованих на практичне впровадження організаційно-технологічних рішень, здатних підвищити комплексність використання лісових ресурсів у соснових культурах.

Перелік джерел посилання

1. Правила рубок головного користування в лісах України: постанова Кабінету Міністрів України від 27.07.1995 р. № 559 (зі змінами). *Відомості Верховної Ради України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/559-95-%D0%BF (дата звернення: 15.11.2025).

2. Санітарні правила в лісах України : затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 27 липня 1995 р. № 555 (зі змінами). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-95-%D0%BF (дата звернення: 15.11.2025).

3. Основи лісогосподарювання: навчальний посібник / С. І. Миклуш, Ю. М. Дебринюк, М. В. Я. Заячук, В. О. Крамарець, Г. Т. Криницький, В. Г. Мазепа, О. Б. Михайлів, Л. С. Осадчук, М. І. Сорока, О. Г. Часковський [за ред. проф. Ю. М. Дебринюка]. Львів : Галицька Видавнича Спілка, 2022. 830 с. URL: https://manusbook.com/9097_Basics_Forestry/index.html (дата звернення: 15.11.2025).

4. Мазепа В. Г., Новак А. А. Регіональне лісівництво: підручник. Львів: Сполом, 2023. 182 с. URL: https://drive.google.com/file/d/1EhGV8XhYYZoycsQNqUcpph_amv9qNPKX/view?usp=sharing (дата звернення: 15.11.2025).

5. Токарєва О. В. Особливості застосування систем рубок головного користування в лісах України. Український журнал лісівництва та деревинознавства. 2021. Т. 12, № 1. С. 42–51. DOI: https://doi.org/10.31548/forest2021.01.004.

6. Маніліч М., Конечна Р. Сосна звичайна (Pinus sylvestris L.): аналітичний огляд літератури. Сучасна медицина, фармація та психологічне здоров'я. 2023. № 2(11). С. 96–108. DOI: https://doi.org/10.32689/2663-0672-2023-2-14.

7. Ткачук О. Л., Герасимчук О. П., Резнікова В. В. Пневмотермічний спосіб отримання хвої для виготовлення текстильних волокон. Сільськогосподарські машини. 2022. Вип. 48. С. 67–73. DOI: https://doi.org/10.36910/acm.vi48.842.

8. Герасимчук О. П., Ткачук О. Л. Обґрунтування режиму роботи пневмотермічної мобільної установки для відокремлення хвої сосни звичайної. Сільськогосподарські машини. 2023. Вип. 49. С. 58–66. DOI: https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1025.

9. Herasymchuk O., Tkachuk O. Regarding the question of obtaining natural textile fibers from pine needles. V International Symposium «Creativity. Technology. Marketing», Chişinău, 2023. Chişinău : Tehnica UTM, 2023. P. 203–209.

10. Koutsaviti A. Antioxidant potential of pine needles: A systematic study on the essential oils and extracts of 46 species of the genus Pinus. Foods. 2021. Vol. 10, No. 1. P. 142. DOI: https://doi.org/10.3390/foods10010142.

11. Klavins L., et al. Strategy of coniferous needle biorefinery into value-added products to implement circular bioeconomy concepts in forestry side stream utilization. Molecules. 2023. Vol. 28, No. 20. P. 7085. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules28207085.

12. Rana A. K., Guleria S., Gupta V. K., Thakur V. K. Cellulosic pine needles-based biorefinery for a circular bioeconomy. Bioresource Technology. 2023. Vol. 367. P. 128255. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128255.