

HYDRO-JET METHOD FOR SCOTS PINE NEEDLE SEPARATION FOR INTEGRATED PROCESSING

A. Herasymchuk, O. Tkachuk, V. Volianskyi, V. Bondar

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



ABSTRACT

*The article presents a novel approach to the separation of Scots pine (*Pinus sylvestris*) needles from branches using a hydraulic jet, which ensures the preservation of needle structure for further integrated processing. The relevance of the study is driven by the need to utilize forestry by-products, particularly pine needles, as a source of biologically active compounds, essential oils, extracts, and cellulose-containing raw materials for the production of natural textile fibers.*

A conceptual design of the unit has been developed, combining the processes of jet formation, branch feeding, needle separation, and collection. The proposed unit can be implemented in both mobile and stationary configurations, making it adaptable to various logging conditions.

Based on hydrodynamic analysis, the relationship between the key parameters – pressure before the nozzle, fluid flow rate, nozzle diameter, and the distance to the target – has been established. A theoretical model was constructed to calculate the minimum pressure required for effective needle detachment, taking into account gravitational acceleration and turbulent jet expansion. It was shown that the most efficient action zone is located within the compact part of the jet.

The hydro-jet method offers several advantages, including high process speed, simultaneous cleaning of the needles, energy efficiency, and structural simplicity. The technology aligns well with the principles of sustainable natural resource management and can become an effective component in the zero-waste processing chain of coniferous biomass.

Key words:

hydro-jet method,
hydraulic jet,
Scots pine needles,
needle separation,
theoretical justification

Article history:

Received 28.07.2025

Accepted 10.10.2025

***Corresponding author:**

alexgop2017@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi51.1886

To cite this article:

Herasymchuk, A., Tkachuk, O., Volianskyi, V., & Bondar V. (2025). Hydro-jet method for scots pine needle separation for integrated processing. *Agricultural Machines*, 51, 64-72.
<https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1886>

УДК 630*1

ГІДРОСТРУМИННИЙ СПОСІБ ВІДДІЛЕННЯ ХВОЇ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ

О.П. Герасимчук, О.Л.Ткачук, В.О. Волянський, В.Н. Бондар

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна



АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто новий підхід до відділення хвої сосни звичайної від гілок на основі гідравлічного струменя, що дозволяє забезпечити збереження структури хвої для подальшої комплексної переробки. Актуальність роботи зумовлена потребою у використанні побічної продукції лісового господарства, зокрема хвої, як джерела біологічно активних речовин, ефірних олій, екстрактів і целюлозовмісної сировини для виробництва текстильного волокна.

Розроблено принципову схему установки, в якій поєднано процеси формування гідравлічного струменя, подачі гілок, відділення хвої та її збору. Установка може бути реалізована як у мобільному, так і в стаціонарному виконанні, що дозволяє адаптувати її до різних умов заготівлі.

На основі гідродинамічного аналізу встановлено зв'язок між основними параметрами: тиском перед соплом, витратою рідини, діаметром отвору сопла та відстанню до об'єкта впливу. Побудовано теоретичну модель, яка дозволяє розрахувати мінімальний тиск для ефективного відривання хвої, враховуючи гравітаційне прискорення та турбулентне розширення струменя. Показано, що зона найбільш ефективної дії розташована в межах компактної частини струменя. Гідроструминний спосіб має низку переваг: високу швидкість процесу, можливість одночасного очищення хвої, енергоефективність та конструктивну простоту. Технологія добре вписується в концепцію раціонального природокористування та може стати ефективним елементом ланцюга безвідходної переробки хвойної біомаси.

Ключові слова:

гідроструминний спосіб,
гідравлічний струмінь,
хвоя сосни звичайної,
відділення хвої,
теоретичне обґрунтування

Історія публікації:

Отримано 28.07.2025

Затверджено 10.10.2025

*Автор для листування:

alexgor2017@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi51.1886

Цитувати цю статтю:

Герасимчук, О.П., Ткачук, О.Л., Волянський, В.О., Бондар, В.Н. (2025). Гідроструминний спосіб відділення хвої сосни звичайної для комплексної переробки. Сільськогосподарські машини, 51, 64-72. <https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1886>

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Повне використання побічних продуктів лісозаготівлі є актуальною екологічною та економічною проблемою. Під час рубок головного користування і рубок формування та оздоровлення лісів у насадженнях сосни звичайної значна частина біомаси припадає на гілки та хвою (до 30% маси крони) (Герасимчук та ін., 2025). Традиційно хвоя після лісозаготівлі або спалюється що є екологічно небезпечним, або залишається перегнивати на лісосіці, що призводить до втрати цінних ресурсів (Герасимчук та ін., 2024, Герасимчук та ін., 2025). Така практика не лише підвищує пожежну небезпеку, але й є причиною втрати потенційної сировини для багатьох галузей господарства. Хвоя сосни багата на біологічно активні речовини та целюлозу, завдяки чому її широко застосовують у медицині та косметології, для отримання екстрактів і ефірних олій, виробництва добрив, палива, целюлози та наноцелюлози (Mahapatra, 2022, Herasymchuk & Tkachuk, 2023). Окрім того, хвоя розглядається як перспективний ресурс для виробництва натуральних текстильних волокон, відомих як «лісова вовна» (Forest Wool, d.n., Tkachuk & Gerasymchuk, 2023). Концепція отримання текстильного волокна з хвої сосни була відзначена на міжнародному рівні. Зокрема, проект переробки хвої «Forest Wool» отримав премію Green Product Award за інноваційність та далекоглядність (Forest Wool, d.n.).

Незважаючи на значний потенціал, на сьогодні відсутні промислово ефективні технології масового отримання текстильного волокна з хвої. Ранні спроби реалізації такого виробництва не набули розвитку – наприклад, запатентована у США технологія отримання хвойного волокна не була впроваджена в промисловість (John, 1890). Основна перешкода – складність та енергоємність процесів збирання і переробки хвої. Хвою необхідно відокремити від гілок та очистити від домішок деревини й кори, які негативно впливають на якість кінцевого продукту. Відділення хвої ускладнене міцним кріпленням хвоїнок до гілок і їхньою гнучкістю. Для ефективного відділення потрібні спеціальні методи та обладнання (Герасимчук та ін., 2025, Ткачук та ін., 2025).

Нині відомо кілька підходів до відокремлення хвої від гілок крони. Запропоновані механічні способи (наприклад, оббивання хвойної лапки), пневмомеханічні (комбіноване струшування із продувом повітрям), електрогідравлічні (ударні хвилі від розряду у воді), методи на основі високочастотного поля та кріогенні (заморожування з наступним струшуванням). Кожен із цих способів має обмеження. Механічні способи можуть пошкоджувати хвою, подрібнюючи голки, а також змішувати їх з трісками деревини. Пневматичні та пневмомеханічні методи потребують значної енергії на створення повітряного потоку і також спричиняють втрати хвої. Електрогідравлічний метод потребує складної апаратури і генераторів напруги. Високочастотні методи можуть послабити кріплення хвої, проте їх застосування в умовах реального виробництва обмежене. Кріогенний спосіб надто дорогий і енерговитратний (Герасимчук та ін., 2022, Herasymchuk & Tkachuk, 2023, Герасимчук та ін., 2025).

Одним з перспективних підходів є пневмотермічний спосіб, запропонований в останні роки. Він полягає у тому, що гілки з хвоєю підсушують за підвищеної температури, після чого хвоя відділяється вакуумним пневмотранспортом і збирається у контейнер. Дослідження продемонстрували принципову можливість реалізації пневмотермічного методу та його енергоефективність порівняно з механічним. Зокрема, сушіння за температури 80°C протягом 90 хв. з наступним вакуумним відсмоктуванням дозволяє суттєво знизити силу, необхідну для відривання хвої. Було обґрунтовано режими роботи мобільної установки для пневмотермічного відокремлення хвої: експериментально встановлено, що за вищевказаних параметрів сушіння зусилля відривання знижується настільки, що вакуумне відсмоктування ефективно відділяє хвою (Ткачук та ін., 2022, Герасимчук & Ткачук, 2023, Герасимчук та ін., 2024).

Попри успішність цієї технології, її впровадження потребує витрат енергії на сушіння, крім того під час сушіння відбувається інтенсивна втрата біологічно активних речовин, що не дає змогу застосовувати цей спосіб в комплексній технології переробки хвої (Герасимчук та ін., 2025, Ткачук та ін., 2025). Таким чином, пошук альтернативних методів відділення хвої залишається актуальним завданням.

Виходячи з аналізу сучасного стану питання, можна означити потребу в новому способі відділення хвої, який би забезпечив відокремлення хвої від гілок без її пошкодження для подальшої комплексної переробки з метою виробництва хвойного екстракту, ефірної олії та отримання

текстильного волокна (*Герасимчук та ін., 2025*). Такий спосіб має бути придатним до використання безпосередньо на лісосіці або на проміжному пункті переробки, щоб максимально скоротити втрати хвої під час транспортування і зберегти її якість для подальшої переробки.

Мета дослідження – розробка принципової схеми та теоретичне обґрунтування нового способу відокремлення хвої від гілок сосни звичайної за допомогою гідравлічного струменя, що дозволить зберегти цілісність та якість хвої для подальшої комплексної переробки (отримання екстракту, ефірної олії та текстильного волокна).

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Дослідження має теоретичний характер і базується на аналізі силових та гідродинамічних факторів, що впливають на процес відділення хвої водним струменем.

Для моделювання впливу гідравлічного струменя на вузол кріплення хвої застосовано теоретичні основи гідродинаміки. Зокрема, для визначення швидкості витікання води з сопла використовували спрощену формулу Торрічеллі, що отримана на основі рівняння Бернуллі:

$$v_0 = \varphi \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad (1)$$

де φ – коефіцієнт швидкості витікання рідини з отвору. p – тиск перед струменеформуючим соплом, Па, ρ – питома маса рідини, кг/м³.

Для силових параметрів дії струменя на хвою використано закони механіки.

Силу, яку струмінь може прикласти до хвоїнки, визначали на основі залежності, що отримана із закону збереження імпульсу:

$$F = M \cdot v, \quad (2)$$

де M – масова витрата води через сопло, кг/с, v – швидкість струменя, м/с.

Також при розробці принципової схеми установки використано метод синтезу, а для оцінки її переваг та недоліків у порівнянні з установками інших принципів дії – метод аналізу

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Для реалізації гідроструминного способу відділення хвої нами запропоновано установку, принципова схема якої наведена на **рис. 1**. У верхній частині установки розташована планка із соплами 1, що формують вертикальні струмені води для відділення хвої з хвойної лапки 2. Під зоною дії струменів проходить транспортер з перфорованою стрічкою 3, що має отвори діаметром та виконує функції транспортування лапки й одночасно пропускання хвої з водою. Безпосередньо під транспортером встановлено збірник хвої 4, в який потрапляє вода разом із відокремленою хвоєю. Очищені від хвої гілки, транспортуються в збірник 5 і далі використовуються для виробництва тріски іншої переробки.

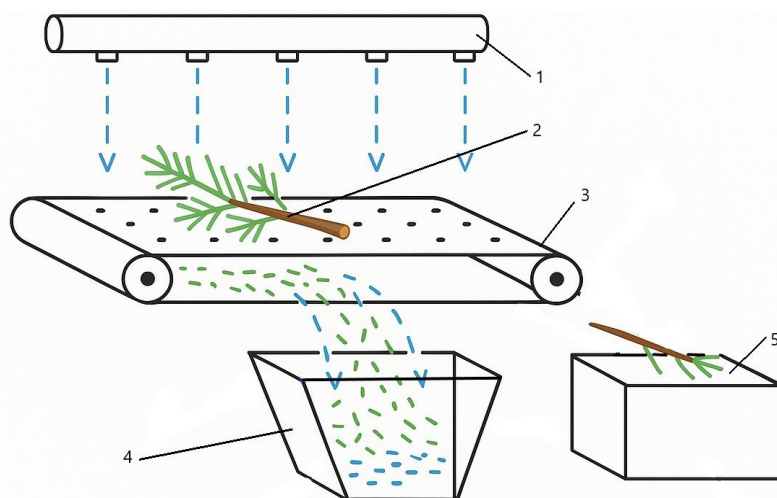


Рис. 1 – Принципова схема установки для відділення хвої гідравлічним струменем: 1 – планка із соплами; 2 – хвойна лапка; 3 – транспортер з перфорованою стрічкою; 4 – збірник хвої; 5 – збірник очищених гілок

Така компоновка дає змогу реалізувати всі основні операції – гідроструминне відділення, транспортування та накопичення хвої та очищених гілок, що спрощує обслуговування, зменшує габарити установки та забезпечує безперервне відділення хвої. Для забезпечення відділення хвої від гілок і уникнення її руйнування важливо правильно підібрати відстань від сопел до транспортера, тиск і витрату води через струменеформуючі сопла.

Потік води, що виходить із сопла установки для відділення хвої, є гідравлічним струменем у класичному розумінні – не обмеженим твердими стінками та структурно подібним до інших гідравлічних струменів (пожежних, фонтанних тощо). Струмінь має компактну зону L_K , в межах якої розподіл швидкостей є рівномірним, що забезпечує максимальну концентрацію енергії на малій площі дії (**рис. 2**). Після компактної зони відбувається змикання турбулентних шарів на осі струменя починається зона розширення L_B .

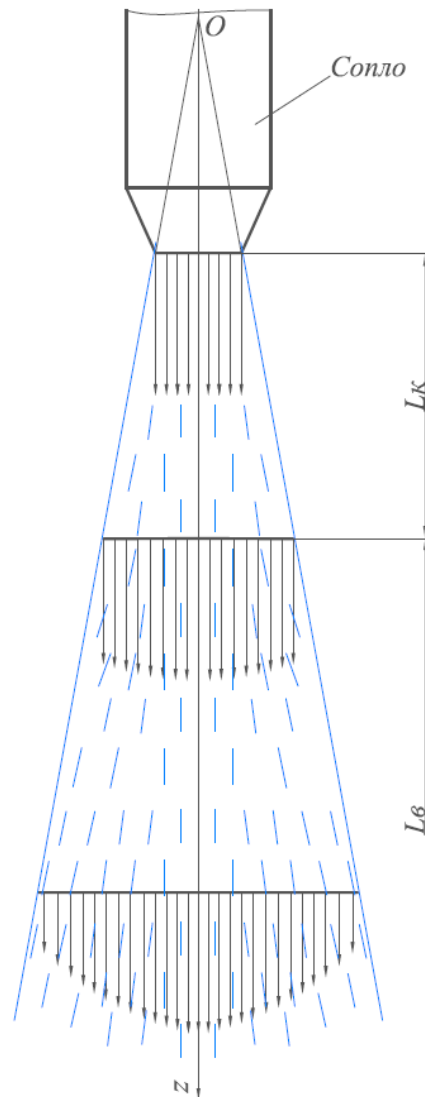


Рис. 2 – Гідравлічний струмінь, що формується соплом установки

Компактна частина гідравлічного струменя формується доти, доки зсувні турбулентні шари, що розростаються симетрично від периферії, не змикаються на осі. Без дії гравітації ця точка настає на відстані (Pore, 2000):

$$L_{K_0} = C \cdot d_o, \quad (3)$$

де $C = 6 \pm 1$ – емпірична стала, отримана з класичних вимірювань потенційного ядра.

Підвищена інерція ядра гідравлічного струменя сповільнює його руйнування, ефективний коефіцієнт розширення зменшується, і компактна зона продовжується ще на відстань ΔH :

$$L_K = L_{K_0} + \Delta H. \quad (4)$$

Щоб оцінити ΔH виходимо з рівняння руху центру ядра. Початкова швидкість у перерізі сопла дорівнює v_0 і визначається за формулою (1). Далі центр прискорюється за законом $v(t) = v_0 + gt$, де g – прискорення вільного падіння м/с², t – час руху струменя, с.

Час, необхідний зсувному турбулентному шару, щоб пройти половину діаметра (Pope, 2000)

$$t_c = \frac{L_{K_0}}{v_0}.$$

За наявності прискорення за цей же зсувний турбулентний шар проходить відстань:

$$L_K = v_0 t_c + \frac{gt_c^2}{2} = L_{K_0} + \frac{g}{2} \left(\frac{L_{K_0}}{v_0} \right)^2. \quad (5)$$

Отже, з врахуванням (4) отримаємо:

$$\Delta H = \frac{g}{2} \left(\frac{L_{K_0}}{v_0} \right)^2. \quad (6)$$

Розкриємо вираз через безрозмірний критерій Фруда $F_r = \frac{v_0}{\sqrt{gd_0}}$. Підставивши (3) в (6)

отримаємо:

$$\Delta H = \frac{C^2}{2} \frac{d_0}{F_r^2}, \quad \frac{\Delta H}{L_K} = \frac{C}{2F_r^2} / \quad (7)$$

Таким чином, подовження компактної зони гідравлічного струменя обернено пропорційне квадрату критерію Фруда. За великих вихідних швидкостях гідравлічного струменя ($F_r > 10$) ним можна нехтувати, тоді як за невеликих швидкостей або великих діаметрів компактна зона гідравлічного струменя може значно подовжуватися.

Саме в межах компактної зони гідравлічного струменя відбувається найбільш ефективна його дія на хвойну лапку та відділення хвої від гілок. В цій зоні доцільно розмішувати зону контакту струменя з гілкою для досягнення максимального ефекту відокремлення хвої. Тобто, відстань від планки з соплами до перфорованої стрічки транспортера (див. **рис. 1**) не повинна перевищувати величини компактної зони дії гідравлічного струменя.

Витрату через сопло можна визначити (Придатко, Ковальчук, 2023):

$$Q_0 = v_0 S_c = \varepsilon v_0 S, \quad (8)$$

де S_c , S – площа стиснутого перерізу струменя та отвору сопла відповідно, м², ε – коефіцієнт стиску.

Коли сопло повернене вниз, сила тяжіння прискорює частини рідини, що рухаються в струмені, і осьова швидкість зростає за законом:

$$v(z) = \sqrt{v_0^2 + 2gz}. \quad (9)$$

де z – вертикальна координата, направлена вниз, м.

Після проходження компактної зони S_K , турбулентні вихори захоплюють навколишнє повітря, що впливає на осьову швидкість у сторону зменшення та оцінюється фактором (Wright, White & Alexander, 2013):

$$\chi(z) = \frac{1}{1 + 2\alpha z/d_0}, \quad (10)$$

де $\alpha \approx 0,07$ – емпіричний коефіцієнт для круглого струменя.

Ефективна швидкість на осі гідравлічного струменя безпосередньо перед ударом по хвої:

$$v_{ef}(z) = v(z)\chi(z), \quad (11)$$

Відповідний гідродинамічний тиск:

$$p(z) = \frac{\rho v_{ef}^2(z)}{2}. \quad (12)$$

Проекцію однієї хвойної голки на площину, перпендикулярну до струменя, позначену S_x Сила, що розвивається струменем, становить:

$$F(z) = C_I p(z) S_x. \quad (13)$$

де C_I – безрозмірний коефіцієнт передавання імпульсу (*Wright, White & Alexander, 2013*).

Підставивши (1), (9)-(12) у (13), отримаємо:

$$F(z) = \frac{\rho C_I S_x}{2} \frac{v_0 + 2gz}{(1 + 2\alpha z/d_0)^2}. \quad (14)$$

Правило відділення хвої від гілок сформулюється як нерівність

$$F(z) \geq F_x, \quad (15)$$

де F_x – експериментально визначене мінімальне зусилля, потрібне для відділення хвої.

Прирівнюючи (14) з 15) і врахувавши (1) отримуємо рівняння мінімального робочого тиску як функцію відстані від сопла до шару хвої (перфорованої стрічки транспортера):

$$p_{\min}(z) = \frac{F_x (1 + 2\alpha z/d_0)^2 - \rho C_I S_x g z}{C_I S_x \varphi^2}. \quad (16)$$

Сила (14) містить два протилежні тренди: доданок $2gz$ у чисельнику щораз збільшує кінетичну енергію частинок, тоді як знаменник $1 + 2\alpha z/d_0$ зменшує швидкість через захоплення турбулентними вихорами навколишнього повітря. Шукаючи максимум функції (14) за z (диференціюванням за безрозмірною змінною $\lambda = z/d_0$, одержуємо оптимальну відстань від планки з соплами до перфорованої стрічки транспортера:

$$L^* = d_0 \frac{gd_0 - 2\alpha v_0^2}{2\alpha g} \quad (17)$$

Якщо початкова швидкість велика настільки, що $gd < 2\alpha v_0^2$, чисельник формули (17) від'ємний і максимум зміщується в межу $L \rightarrow 0$; тобто сопла потрібно встановлювати якомога ближче до голок.

Знаючи L^* , підставляють його у (16) та можна отримати мінімальний тиск $p_{\min}$. Далі за формулою формулами (1) та (8) визначити необхідну швидкість витікання рідини з сопла v_0 та витрату Q_0 . Так як планка із соплами містить N однакових сопел з однаковими параметрами, то сумарна подача насоса повинна забезпечити NQ_0 за тиску не нижче ніж $p_{\min}$.

Таким чином зв'язок «тиск – витрата – відстань» визначається рівняннями (14)–(17): тиск і діаметр сопла задають вихідну швидкість; швидкість разом із гравітаційним приростом і турбулентними втратами формує динамічний тиск, що діє на хвою. Відстань, за якої цей тиск, з урахуванням площі проєкції та коефіцієнта імпульсу, дорівнює зусиллю відривання, є оптимальною, а відповідний тиск – мінімально допустимим для забезпечення відділення хвої.

Запропонований спосіб відділення хвої може бути реалізована в наступним чином. У вигляді мобільної установки на лісосіці, що працює безпосередньо під час заготівлі. Наприклад, це може бути навісне обладнання на харвестер або форвардер: спеціальна камера, куди подаються зрізані гілки, де вони обробляються, а хвоя збирається у бак. Другий спосіб – стаціонарна лінія, встановлена на деревообробному підприємстві або проміжному складі. Туди привозять хвойну лапку, яку пропускають через установку з гідравлічними струменями. Обидва способи мають свої переваги. Мобільний спосіб дозволяє одразу в лісі виділяти хвою, запобігаючи її втратам і зменшуючи витрати на транспортування. Стаціонарний – може забезпечити вищу продуктивність і кращий контроль параметрів, проте вимагає транспортування хвойної лапки до установки. Вибір способу залежить від умов: за великих обсягів лісозаготівлі (наприклад під час рубок головного користування) доцільно мати пересувний комплекс, а за централізованому зборі – стаціонарний.

Гідроструменевий спосіб має переваги над механічним і пневмомеханічним впливом. Однією з головних переваг цього способу є висока швидкість процесу: струмінь може практично миттєво збивати хвою, тому очистити гілку можна за секунди. Для порівняння, у пневмотермічному методі лише сушка займає десятки хвилин. Ще одна перевага – охолоджувальний і очищувальний ефект: вода змочує хвою, змиває пил, ґрунт і інші забруднення. Це важливо, якщо хвоя піде на екстракцію –

чиста сировина дасть якісніший екстракт з меншим вмістом небажаних домішок. Механічний спосіб не забезпечують такого очищення.

Енергоефективність гідроструминного відділення потенційно висока. Сучасні насосні установки мають коефіцієнт корисної дії більше 80%. При багаторазовому використанні води втрати на її мінімальні. Тому витрати енергії на один кілограм відокремленої хвої є нижчими, ніж при механічному або пневмотермічному способах. До того ж, установка відносно проста за конструкцією. Це дешевше у виробництві, ніж вакуумно-сушильна установка чи криогенна система. Вода як робоче середовище безпечна, нетоксична, недорога і легкодоступна. За умови фільтрації система потребує відносно невеликої її кількості в замкненому циклі.

Водночас, є і можливі обмеження методу. Робота з водою означає, що отримана хвоя буде вологою – її потрібно або негайно переробляти (наприклад, на екстракт чи ефірну олію), або сушити перед зберіганням чи для виробництва волокна. Це додає стадію сушіння, але на відміну від пневмотермічного методу, сушити доведеться вже відокремлену хвою, яку легше і рівномірніше висушити в сушарці, ніж на гілках. Ще один особливістю є робота за від'ємних температур, коли вода в системі може замерзати. Це ускладнює використання мобільних установок в зимових умовах на лісосіці.

ВИСНОВКИ

У статті запропоновано новий спосіб відділення хвої сосни звичайної від гілок за допомогою гідралічного струменя, що забезпечує збереження цілісності та якості сировини для подальшої комплексної переробки. Розроблено принципову схему установки, що поєднує процеси формування струменя, транспортування гілок, відділення хвої та її збору. Конструкція є придатною як для стаціонарного, так і для мобільного використання, що дозволяє адаптувати технологію до різних умов лісозаготівлі.

У ході дослідження теоретично встановлено зв'язок між ключовими параметрами процесу – тиском, витратою води, швидкістю струменя, діаметром сопел та відстанню до зони контакту з гілками. Отримані аналітичні залежності дозволяють визначати мінімально необхідні гідродинамічні характеристики для забезпечення ефективного відділення хвої без її механічного пошкодження. Це дає змогу гнучко налаштовувати роботу установки відповідно до конкретних умов експлуатації.

Гідроструминна технологія має ряд важливих переваг порівняно з відомими методами: високу швидкість процесу, можливість очищення хвої під час відокремлення, енергоефективність та технологічну простоту. Разом з тим, вона може бути обмеженою в застосуванні за низьких температур.

Запропонований спосіб відокремлення хвої може бути ефективним елементом у структурі безвідходної переробки хвойної біомаси, забезпечуючи підвищення ресурсної ефективності лісозаготівель та відповідність сучасним екологічним підходам у лісовому господарстві.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Forest Wool/Pine needle fiber (d.n.). Retrieved May 12, 2024, from. <https://www.gp-award.com/en/produkte/Forest-Wool>
- John B. N. Berry. (1890). Process of making pine needle fiber. *Specification forming part of Letters Patent No. 437,555*. <https://patents.google.com/patent/US437555A/e>
- Herasymchuk, O., & Tkachuk, O. (2023). Regarding the question of obtaining natural textile fibers from pine needles. In *The V-th International Symposium Creativity. Technology. Marketing*. 31 March, Chişinău, Republic of Moldova, from- Chişinău: Tehnica-UTM, 2023. 203-209. <https://fd.utm.md/wp-content/uploads/sites/37/2023/11/Simpozion-CTM-2023.pdf>
- Mahapatra, N. N. (2022). Processing of pine needles (perul) fibers in textile industries. *Dyes & Chemicals, Fibres and Yarns*. <https://textilevaluechain.in/news-insights/fibres-yarns-news/processing-of-pine-needles-perul-fibers-in-textile-industries/>
- Pope, S. B. (2000). Turbulent flows. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511840531>.
- Wright, D., White, R., & Alexander, T. (2013). Impact force of high-pressure waterjets. I *Proceedings of the WJTA Conference* (pp. 11-18).
- Герасимчук, О.П., Ткачук, О.Л. (2023). Обґрунтування режиму роботи пневмотермічної мобільної установки для відокремлення хвої сосни звичайної. *Сільськогосподарські машини*, 49, 75-80. / URL: <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1025>.

- Герасимчук, О. П., Ткачук, О. Л., Пуць, В. С., & Охремов, А. І. (2024). Отримання текстильного волокна з хвої за допомогою машини для м'яття з гідравлічним притисканням. *Наукові нотатки*, 77, 120–124. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.77.19>.
- Герасимчук, О. П., Ткачук, О. Л., & Волянський, В. О. (2025). Впровадження комплексних машинно-технологічних систем для заготівлі та переробки хвої сосни звичайної. *Наукові нотатки*, 81, 133–140. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2025.81.20>.
- Придатко, В., & Ковальчук, О. (2023). Основи гідравліки та водопостачання [навчальний посібник]. СПОЛОМ. <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/12222/1/гідравліка%20посібник.pdf/>
- Tkachuk O.L., Gerasymchuk O.P. (2023). Perspective technologies of obtaining natural textile fibers from pine needles. *Якість та безпечність товарів: [матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції, Луцьк, 28 квітня 2023. Луцьк, Україна (с. 183-185).* https://drive.google.com/file/d/1rADR7tuZmsrwRRmngYIV_ynN9AXXu6kr/view.
- Ткачук О., Герасимчук О. (2021). Стан та перспективи застосування деревної целюлози для виробництва хімічних волокон. *IX Ukrainian-Polish Scientific Dialogues: Conference Proceedings. International Scientific Conference, 20-23 October 2021, Khmelnytskyi, Ukraine*, (pp. 204-205).
- Ткачук, О. Л., Герасимчук, О. П., & Резнікова, В. В. (2022). Пневмотермічний спосіб отримання хвої для виготовлення текстильних волокон. *Сільськогосподарські машини*, 48, 67-73. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.842>
- Ткачук, О. Л., Герасимчук, О. П., & Бичук, В. В. (2025). Отримання волокна з відходів виробництва хвойного екстракту і ефірної олії. *Якість та безпечність товарів: [матеріали IX міжнародної науково-практичної конференції, Луцьк, 16 квітня 2025. Луцьк, Україна (с. 180-181).* <https://ndekc.lviv.ua/pdf/250625.pdf#page=180>