

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ____ ” _____ 20 ____ р.
Зав. кафедри д.т.н., професор
(науковий ступінь, вчене звання)
Володимир ДІДУР
(підпис) (ініціали, прізвище)

ДИПЛОМНА РОБОТА

магістр

(освітній рівень)

тема роботи «ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РОБОТИ
ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ СОШНИКА ДЛЯ ПРОСАПНИХ
СІВАЛОК»

Виконав: студент 2 курсу, групи 21 м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності Н7

«Агроінженерія»
Ярослав МУСАТЕНКО
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент Іван ЛІСОВИЙ.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ магістр _____

Спеціальність _____ Н7 «Агроінженерія» _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Володимир ДІДУР

“ ” _____ 20 __ р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

студенту _____ Мусатенку Ярославу Васильовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Обґрунтування технологічного процесу роботи та конструктивних параметрів сошника для просапних сівалок» _____

керівник роботи _____ Іван ЛІСОВИЙ, к.т.н., доцент _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: навчальна, наукова та періодична література за темою роботи; _____

4. Перелік питань, які потрібно розробити: _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як
додаток до доповіді за темою дипломної роботи: _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Едуард Прокопенко, доцент		
Техніко-економічне обґрунтування	Іван ЛІСОВИЙ, доцент		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка

Студент_____
(підпис)Ярослав МУСАТЕНКО
(прізвище та ініціали)**Керівник роботи**_____
(підпис)Іван ЛІСОВИЙ
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПРОСАПНИХ СІВАЛОК	8
1.1. Класифікація та історичний розвиток конструкцій сошників для точного висіву	8
1.2. Оцінка впливу параметрів сошника на якість формування насінневого ложа	13
1.3 Глобальні тенденції та інноваційні напрямки модернізації робочих органів сівалок	18
1.4 Формулювання невирішених проблем досліджень та подальших завдань	22
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕРНІЗОВАНОГО СОШНИКА ПРОСАПНОЇ СІВАЛКИ	24
2.1. Стійкість та геометрія сошника: Обґрунтування забезпечення постійної глибини загортання	24
2.2. Динаміка насіння у каналі доставки сошника: Проблема відскоку та високошвидкісна сівба	27
2.3. Взаємодія загортальних елементів сошника з ґрунтом: Оптимізація посівного ложа	29
Висновки до розділу	32
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОГО НАРАЛЬНИКОВОГО СОШНИКА	34
3.1 Методика експериментальних досліджень: оцінка якості пошарового загортання та динамічної стабілізації сошника	34

3.2 Результати експериментальних досліджень: вплив конструкції сошника на критерії якості	36
3.3. Обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень: встановлення раціональних параметрів	38
Висновки до розділу	40
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО ПОСІВНОГО АГРЕГАТУ	42
4.1 Характеристика та аналіз небезпечних і шкідливих факторів, які можуть виникнути під час експлуатації сошника просапної сівалки	42
4.2 Розробка організаційно-технічних заходів щодо забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці при експлуатації агрегату	43
4.3 Моделювання небезпечних ситуацій при експлуатації модернізованого посівного агрегату	45
Висновки до розділу	47
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПОСІВНОГО АГРЕГАТУ	48
5.1. Критерії оцінки економічної ефективності та вихідні дані	48
5.2 Розрахунок продуктивності та зміни експлуатаційних витрат	48
5.3. Визначення економічного ефекту від підвищення якості сівби	49
Висновки до розділу	50
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52
ДОДАТКИ	57

РЕФЕРАТ

Для досягнення поставленої мети проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень. Теоретично обґрунтовано необхідність пошарового зміщення ґрунту для запобігання покриттю насіння сухим шаром, що є типовою проблемою серійних сошників на швидкості [10, 27]. Розроблена конструкція сошника включає сповільнювач насіння [10], утримуючу п'ятку та відвальники щоки [25, 22].

Експериментально підтверджено, що модернізований агрегат здатний працювати на швидкості 10-12 км/год, забезпечуючи високі агротехнічні показники: Стабільність глибини: Середньоквадратичне відхилення (СКОглибини) становить 0.8-1.1 см [21]. Рівномірність розміщення: Коефіцієнт варіації інтервалів (CV) знижено до 18-20% [1, 13].

Встановлено, що підвищення якості сівби досягнуто при незначному зростанні тягового опору сошника (до 12%) [26]. Проведений аналіз безпеки праці [19, 16] та моделювання виробничих небезпек [23] підтвердили можливість безпечної експлуатації агрегату при високій швидкості.

Техніко-економічне обґрунтування довело високу економічну доцільність модернізації. Зростання продуктивності (на 25-35%) та поліпшення якості сівби забезпечують зниження собівартості робіт та додатковий прибуток від зростання врожайності (на 3-6%) [21]. Термін окупності додаткових капіталовкладень не перевищує одного посівного сезону.

Робота має наукове та практичне значення, оскільки пропоновані рішення дозволяють вирішити проблему високоякісної сівби просапних культур на підвищених швидкостях, що відповідає сучасним вимогам інтенсивного землеробства [4, 6].

Ключові слова: СОШНИК, ВИСОКОШВИДКІСНА СІВБА, РІВНОМІРНІСТЬ, УТРИМУЮЧА П'ЯТКА, ВІДВАЛЬНИКИ ЩОКИ, СПОВІЛЬНЮВАЧ, ТЯГОВИЙ ОПІР, КОЕФІЦІЄНТ ВАРІАЦІЇ (CV).

ВСТУП

Актуальність теми дослідження зумовлена потребою підвищення продуктивності посівних агрегатів при збереженні високої якості сівби (стабільності глибини та рівномірності інтервалів) просапних культур [21, 25, 1, 13].

Збільшення робочої швидкості (понад 10 км/год) [10] критично підвищує Коефіцієнт варіації інтервалів (CV) [1, 3]. Основні проблеми високошвидкісної сівби:

Порушення загортання: Сошники ущільнюють стінки борозни, що призводить до покриття насіння сухим ґрунтом [10, 2, 27].

Нестабільність глибини: Зростання динамічних навантажень вимагає розробки додаткових механізмів стабілізації [14, 11].

Актуальною є розробка нових високошвидкісних конструкцій сошників зі сповільнювачами насіння [10, 18] та стабілізуючими елементами (утримуюча п'ятка, відвальники щоки) [25, 22]. Зростання швидкості також вимагає аналізу безпеки праці [16, 19], моделювання небезпек [23] та техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) на основі порівняльних показників [21, 26]. Таким чином, наукове обґрунтування конструктивних параметрів для високоякісної сівби є актуальним науково-технічним завданням [4, 7, 9, 15, 20].

Мета дослідження: Наукове обґрунтування технологічного процесу роботи та встановлення раціональних конструктивних параметрів модернізованого сошника, що забезпечують високу якість сівби при підвищених робочих швидкостях.

Об'єкт дослідження: Процес посіву просапних культур (взаємодія робочих органів секції з ґрунтом та насінням) в умовах високошвидкісного режиму роботи.

Предмет дослідження: Конструктивні та кінематичні параметри модернізованого наральникового сошника (сповільнювач, утримуюча п'ятка, відвальники щоки), їх вплив на тяговий опір, стабільність глибини закладення, рівномірність розміщення насіння та загальну енергоефективність агрегату.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПРОСАПНИХ СІВАЛОК

1.1. Класифікація та історичний розвиток конструкцій сошників для точного висіву

1.1.1. Загальні агротехнічні вимоги до якості сівби просапних культур (глибина, рівномірність, інтервал) та фактори, що їх порушують

Високі агротехнічні вимоги (АТВ) до процесу сівби просапних культур є критично важливими для забезпечення максимального потенціалу врожайності. Якість посіву оцінюється за кількома ключовими параметрами, які безпосередньо впливають на рівномірність сходів і формування оптимальної густоти стояння рослин:

Стабільність глибини загортання: Вимога: Насіння має бути розміщене на заданій глибині в шарі ґрунту, де забезпечується стабільний запас вологи. Стандартні допуски для просапних культур зазвичай становлять ± 1 см.

Значення: Точне дотримання глибини гарантує одночасне проростання насіння. Якщо глибина коливається, сходи з'являються нерівномірно, що створює міжростову конкуренцію та знижує кінцевий урожай. Дослідження підтверджують, що сошники, обладнані утримуючою п'яткою та гострим кутом входження, краще забезпечують цю стабільність порівняно з традиційними дводисковими сошниками, що є предметом порівняльних випробувань [21].

Рівномірність розміщення насіння у рядку (інтервал): Висів має бути точковим, з мінімальними відхиленнями фактичної відстані між насінинами від заданої (відсутність пропусків та двійників/трійників). Це ключовий показник для технологій точного землеробства [7].

Оптимальний контакт насіння з ґрунтом: Насіння повинно бути притиснуте до дна посівного ложа, а потім якісно покрито пухким ґрунтом. Це забезпечує капілярне надходження вологи, необхідної для проростання. Ефективність цього процесу залежить від конструкції загортальних елементів та їх параметрів [25].

Фактори, що порушують агротехнічні вимоги. Головною причиною, що ускладнює дотримання АТВ, є зростання робочої швидкості посівних агрегатів, а також конструктивні недоліки самих сівалок:

Вплив швидкості руху: При збільшенні швидкості руху (наприклад, до $2.2 \text{ м\c}^{-1}$ і вище) значно погіршується рівномірність розміщення насіння [1]. Як показують експериментальні дослідження, зростання швидкості призводить до збільшення кількості пропусків і двійників.

Кінематичні порушення в насіннєпроводі: На високих швидкостях насіння, що виходить із висівного апарату, набуває горизонтальної швидкості. Збільшення висоти падіння насіння у насіннєпроводі призводить до його відскоку та некоректного розміщення у борозні. Це безпосередньо погіршує середній час появи сходів та індекс швидкості проростання [13].

Нестабільність роботи сошника: Конструктивні особливості серійних дводискових сошників, особливо на сівалках типу УПС-8 або їх аналогах, призводять до нестійкого ходу та коливань глибини загортання при роботі на неоднорідних ґрунтових фонах або при наявності пожнивних решток [9]. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневматичних сівалок точного висіву має бути спрямоване на мінімізацію цих ефектів [6].

Низька ефективність загортання: Неякісна робота загортальних та прикочуючих елементів, яка є предметом модернізації в магістерських роботах, призводить до нерівномірного покриття насіння ґрунтом або його надмірного ущільнення, порушуючи необхідний контакт із вологою [18, 25].

Вимоги до тиску на ґрунт: Для забезпечення постійної глибини на різних ґрунтових умовах та при підвищених швидкостях сівалка потребує інтелектуальних систем регулювання притискного зусилля (downforce regulating device), що є окремим напрямом досліджень у точному землеробстві [11, 14].

1.1.2. Огляд та порівняння принципів дії сучасних посівних систем: від механічних до гідропневматичних

Сучасні посівні системи для просапних культур еволюціонували від простих механічних пристроїв до високоточних комплексів, керованих

електронікою. Це зумовлено жорсткими агротехнічними вимогами до рівномірності розміщення насіння та стабільності глибини загортання [8]. Основні принципи дії висівних систем можна класифікувати так:

Механічні висівні системи

Принцип дії: Насіння подається до сошника за допомогою механічних елементів — дисків із комірками або щіткових апаратів, що обертаються.

Особливості: Це найпростіші та найдавніші системи, які використовуються як для суцільної сівби, так і для відносно точного висіву просапних культур (дисківі апарати з примусовим скиданням).

Обмеження: Насіння подається механічно, що призводить до значної залежності якості висіву від швидкості руху агрегату. При збільшенні швидкості виникають кінематичні порушення, які погіршують рівномірність інтервалів, збільшуючи кількість двійників і пропусків.

Пневматичні висівні системи (Точний висів) Принцип дії: Для захоплення, транспортування та скидання насіння використовується різниця тиску (вакуум або надлишковий тиск).

Вакуумні: Найпоширеніші. Насіння присмоктується до отворів обертового диска за рахунок вакууму, утримується до моменту скидання в зоні атмосферного тиску (або механічного скидача) і далі падає у насіннепровід [1].

Надлишкового тиску (або комбіновані): Насіння подається під тиском повітря до висівного диска та транспортується у насіннепровід, де часто використовується принцип уповільнення для зменшення відскоку.

Переваги: Забезпечують високу точність (одиничний висів) незалежно від розміру насіння та відносну стабільність висіву на помірних швидкостях. Це є основою для реалізації вимог точного землеробства. Саме ці системи є об'єктом модернізації для покращення якісних показників, зокрема шляхом обґрунтування їх конструктивно-технологічних параметрів [6, 24].

Недоліки, що вимагають вдосконалення: Збільшення швидкості вище критичної межі (понад 2.0 м с^{-1}) все ще погіршує рівномірність через висоту падіння насіння та його відскок у насіннепроводі [13]. Це призводить до

необхідності розробки систем інтелектуального регулювання тиску та глибини [14].

Гідропневматичні та Інтелектуальні системи

Принцип дії: Це найсучасніші системи, які поєднують точність пневматичного висіву з використанням гідравлічних або складних пневматичних механізмів для керування ключовими робочими параметрами посівної секції та оптимізації доставки насіння.

Гідропневматичні сівалки: Об'єднують пневматичний висів із гідравлічними елементами (наприклад, для приводу висівних апаратів, або, як у дослідницьких проектах, для активного керування притискним зусиллям секції). Розробка таких сівалок та їх сошників є актуальною темою для удосконалення технологічних процесів [7].

Інтелектуальні системи регулювання: Сучасні агрегати використовують сенсори та системи машинного зору (наприклад, на основі Flex sensor та нечіткої моделі Мамдані), щоб автоматично коригувати притискне зусилля (downforce) сошника. Це забезпечує постійну глибину загортання незалежно від зміни ґрунтових умов (наприклад, у no-till технологіях) та швидкості руху, що є життєво необхідним для максимальної рівномірності сходів [11, 14].

Таким чином, сучасний розвиток посівної техніки спрямований на перехід від пасивних (механічних) до активних (пневматичних та гідропневматичних) систем, здатних динамічно адаптуватися до умов поля, мінімізуючи вплив швидкості на якість розміщення насіння.

1.1.3. Конструктивний аналіз сучасних сошників просапних сівалок

Конструкція сошника є ключовим елементом посівної секції, який безпосередньо взаємодіє з ґрунтом і визначає, наскільки будуть виконані жорсткі агротехнічні вимоги (АТВ) до сівби просапних культур [8, 12]. Сучасний конструктивний аналіз сошників сфокусований на підвищенні стабільності глибини та здатності працювати на підвищених швидкостях і в умовах великої кількості пожнивних решток (технології No-Till).

Сучасні конструкції можна умовно поділити на кілька категорій:

Традиційні Дводискові Сошники (Серійні) Це найбільш поширений тип, який використовується на багатьох серійних сівалках (таких як УПС-8, Vesta 8 чи VEGA 8 PROFI) і є об'єктом частих модернізацій [4, 9, 20].

Принцип дії: Пара дводискових ножів встановлена під невеликим кутом, формуючи клиноподібну борозну. Насіння доставляється через насіннєпровід і укладається на дно борозни, після чого ґрунт загортається та ущільнюється прикочуючими колесами [24].

Конструктивні обмеження, що потребують вирішення: Головний недолік серійних дводискових сошників — нестабільність глибини загортання та схильність до нестабільного ходу при збільшенні робочої швидкості [21]. Це вимагає розробки нових сошників, що є актуальною темою дипломних та магістерських робіт, націлених на удосконалення технологічного процесу сівби [9, 15].

Модифіковані Сошники для Стійкості та Точності. Ця категорія включає конструкції, які були розроблені або модернізовані з метою поліпшення основних показників якості сівби, зокрема стабільності формування ложа.

Сошники з гострим кутом входження та утримуючою п'яткою: Експериментальні та вдосконалені конструкції відходять від чисто дводискової схеми на користь механізмів, які краще розрізають ґрунт і пожнивні рештки. Дослідження показують ефективність сошників з гострим кутом входження в ґрунт, які обладнані утримуючою п'яткою (або "лижею") [10, 21]. Ця п'ятка формує плоске дно посівного ложа і слугує для стабілізації глибини ходу, що є критично важливим для точного розміщення насіння [22]. Порівняльні випробування підтверджують, що такі конструкції мають кращі показники щодо забезпечення заданої глибини порівняно з деякими серійними аналогами [21].

Оптимізовані загортальні елементи: Якість загортання насіння та створення сприятливих умов для проростання також є предметом конструктивного аналізу. Проекти модернізації зосереджені на обґрунтуванні параметрів загортальних елементів сошника, щоб забезпечити оптимальний контакт насіння з вологою без надмірного ущільнення ґрунту [18, 25].

Сошники з Активним/Інтелектуальним Управлінням. Найсучасніші конструкції поєднують механічну частину сошника з високоточними системами керування.

Гідропневматичні системи: Хоча базовий висів залишається пневматичним, для активного керування сошником та притискним зусиллям інтегруються гідравлічні елементи. Це дозволяє сівалці динамічно адаптуватися до мінливих умов поля [7].

Системи регулювання притискного зусилля (Downforce Regulating Device): У конструкцію секції додаються сенсори (наприклад, Flex sensor) та виконавчі механізми (пневматичні або гідравлічні), які автоматично коригують притискне зусилля (downforce) сошника [11, 14]. Це забезпечує постійну глибину закладення навіть на полях зі змінною щільністю ґрунту, що є необхідним у сучасних технологіях нульового обробітку (no-till) [6, 14].

Таким чином, конструктивний розвиток сошників просапних сівалок рухається в напрямку максимальної автоматизації та геометричної оптимізації, щоб гарантувати якісний посів незалежно від робочої швидкості та складності ґрунтового фону.

1.2. Оцінка впливу параметрів сошника на якість формування насіннєвого ложа

1.2.1. Порівняльний аналіз показників роботи сошників різних типів. Роль утримуючої п'ятки у забезпеченні стабільності глибини загортання на різних ґрунтах.

Оцінка ефективності роботи сошників просапних сівалок базується на двох ключових показниках якості сівби: стабільності глибини загортання та рівномірності розміщення насіння у рядку (інтервалі). Порівняльний аналіз, що проводиться у наукових джерелах, чітко розмежовує традиційні та модернізовані конструкції.

Порівняльний аналіз типів сошників. Серійні дводискові сошники: Традиційні дводискові сошники (які є об'єктом модернізації для сівалок типу УПС-8 чи VEGA 8 PROFI [4, 9]) широко поширені, але мають значні недоліки, особливо при роботі на підвищених швидкостях. Вони схильні до нестабільності глибини, чутливі до неоднорідності ґрунту та мають труднощі з ефективним розрізанням пожнивних решток, що погіршує кінцеві показники рівномірності [21].

Модифіковані сошники з гострим кутом входження: Ці конструкції (зокрема, так звані Combined Coulter Point [3]) розробляються з метою підвищення стійкості робочого органу та покращення його здатності працювати в складних умовах. Вони демонструють кращі порівняльні показники щодо забезпечення заданої глибини, оскільки їхня геометрична конфігурація сприяє стабільнішому ходу.

Роль утримуючої п'ятки у забезпеченні стабільності

Ключовим елементом, який дозволяє вдосконаленим сошникам досягати високої стабільності глибини, є утримуюча п'ятка (також відома як "лижа" або "обмежувач глибини"), яка інтегрована у конструкцію посівної секції [22]. Її роль є багатофункціональною і критичною для якості сівби:

Гарантія глибини на різних ґрунтах: Утримуюча п'ятка контактує з дном борозни, виступаючи в ролі жорсткого механічного обмежувача заглиблення. Вона ефективно запобігає надмірному просіданню сошника у легких ґрунтах і, навпаки, забезпечує стабільний тиск, утримуючи секцію від підйому на щільних ділянках поля. Таким чином, вона знижує вплив мікрорельєфу та змінної щільності ґрунту на глибину закладення насіння [21].

Створення плоского посівного ложа: П'ятка формує рівне, ущільнене дно борозни. Це необхідно для мінімізації висоти падіння насіння [13], що є вирішальним для рівномірності інтервалів при точковому висіві. Плоске ложе запобігає відскоку насіння і забезпечує його гарантоване розміщення у зоні дії капілярної вологи.

Порівняльні випробування підтверджують, що сошник, обладнаний утримуючою п'яткою, демонструє вищі показники стабільності глибини

закладення насіння порівняно з традиційним серійним дводисковим сошником [21]. Це робить утримуючу п'ятку важливою конструктивною альтернативою складним та дорогим інтелектуальним системам регулювання притискного зусилля (Downforce Regulating Device) [14].

1.2.2. Критична оцінка впливу швидкості руху та висоти падіння насіння на показники сходів

Критична оцінка якості сівби просапних культур нерозривно пов'язана з динамічними факторами, які виникають під час роботи сівалки. Два ключові параметри — швидкість руху агрегату та висота падіння насіння у насіннєпроводі — є основними джерелами порушення агротехнічних вимог (АТВ) і прямо впливають на показники сходів.

Вплив швидкості руху на якість посіву. Прагнення до підвищення продуктивності через збільшення робочої швидкості є головним викликом для сучасних посівних систем [1].

Погіршення рівномірності інтервалів: Зростання швидкості, особливо понад 2.0 м с-1 (близько 7.2 км/год), призводить до кінематичних порушень: збільшується горизонтальна складова швидкості насіння та посилюються його відскоки при зіткненні зі стінками борозни. Це прямо веде до зростання кількості пропусків (прогалин) і двійників у рядку, що знижує якість посіву [1].

Зниження стабільності глибини: На високих швидкостях традиційні сошники демонструють тенденцію до збільшення коливань глибини загортання [21]. Це викликає різночасність появи сходів, яка є неприпустимою, оскільки рослини, що з'явилися пізніше, не можуть конкурувати з більш розвиненими, що знижує загальну ефективність урожаю [2].

Критичний вплив висоти падіння насіння. Висота, з якої насіння скидається з висівного апарату до дна посівного ложа, є критичним параметром для пневматичних сівалок [6].

Вплив на час та швидкість проростання: Дослідження чітко доводять, що збільшення висоти падіння насіння (наприклад, від 120 мм до 240 мм) має негативний кореляційний зв'язок із якістю сходів. Це проявляється у погіршенні

таких показників, як середній час появи сходів та індекс швидкості проростання [13].

Механізм порушення: При великій висоті падіння насіння набуває значної вертикальної швидкості. Коли насіння вдаряється об дно борозни або об дно насіннєпроводу, воно може відскочити, або ж його траєкторія стає неконтрольованою, що призводить до неточного розміщення. Оптимізація цього процесу є головною метою при обґрунтуванні конструктивно-технологічних параметрів пневматичних сівалок точного висіву [6].

Кореляція зі швидкістю: На високих робочих швидкостях проблема висоти падіння посилюється, оскільки час, відведений на стабілізацію насіння перед загортанням, скорочується, а його кінетична енергія зростає. Саме тому вдосконалення сошників (наприклад, через інтеграцію утримуючої п'ятки) спрямоване на мінімізацію висоти падіння та формування плоского, стабільного ложа [21].

Таким чином, якісний посів просапних культур вимагає не лише точного висівного апарату, але й конструкції сошника та насіннєпроводу, здатних нівелювати негативний вплив кінематичних факторів, спричинених зростанням швидкості руху та неконтрольованою траєкторією падіння насіння [1, 7].

1.2.3. Аналіз трибологічних процесів та проблем зношування робочих поверхонь сошників

Довговічність та ефективність роботи сошників просапних сівалок визначається трибологічними процесами — сукупністю явищ тертя, зношування та мащення, які відбуваються на поверхні контакту робочого органу з ґрунтом. У системі "сошник–ґрунт" ці процеси мають критичне значення, оскільки призводять до інтенсивного абразивного зношування робочих поверхонь.

Основні трибологічні проблеми

Абразивне зношування: Це домінуючий тип зношування сільськогосподарських робочих органів. Він виникає внаслідок постійного тертя між металевою поверхнею сошника та твердими абразивними частинками ґрунту, переважно кварцом. Інтенсивність цього зношування залежить від:

Швидкості руху: Зростання робочої швидкості збільшує енергію удару частинок ґрунту об метал і, відповідно, прискорює процес зношування [1].

Вологості ґрунту: Надмірна сухість ґрунту підвищує його абразивність.

Щільності ґрунту: Робота на щільних або кам'янистих ґрунтах також прискорює знос.

Проблеми зношування дискових поверхонь: Інтенсивному зношуванню піддаються ріжучі країки дискових сошників та бічні поверхні елементів, що формують борозну.

Критичний аналіз підтверджує, що необхідність забезпечення надійності та ресурсозбереження дискових сошників є актуальною проблемою і вимагає постійного вдосконалення їх конструкції та матеріалів [26].

Наслідки зношування для якості сівби. Зношування робочих поверхонь сошника призводить до незворотного погіршення його технологічних показників:

Зміна геометрії: Сточування ріжучих крайок дводискового сошника або гострих елементів у сошниках з гострим кутом входження [3] призводить до збільшення опору робочого органу та погіршення якості розрізання пожнивних решток.

Порушення стабільності глибини: Будь-яка зміна геометричних параметрів, спричинена зносом, порушує розрахункову кінематику секції та знижує здатність сошника підтримувати стабільну глибину загортання насіння. Це є однією з причин, чому наукові роботи спрямовані на модернізацію та обґрунтування параметрів робочих органів секції сівалки [18, 25].

Для підвищення ресурсу сошників та продовження терміну їхньої служби в інженерії застосовують наплавлення зносостійких матеріалів, а також використовують конструкції, де зносостійкі деталі можуть бути швидко замінені. Це є частиною загальної роботи із забезпечення безпеки праці та зменшення шкідливого впливу виробничих небезпек, пов'язаних із технічним станом агрегатів [16, 23].

1.3. Глобальні тенденції та інноваційні напрямки модернізації робочих органів сівалок

1.3.1. Концепція підвищення робочих швидкостей: необхідність мінімізації відскоку насіння та вдосконалення каналу доставки

Сучасна агротехніка висуває вимогу до підвищення робочих швидкостей посівних агрегатів як основного чинника зростання продуктивності та зменшення термінів сівби. Однак ця концепція вступає в конфлікт із жорсткими агротехнічними вимогами до якості посіву, особливо щодо рівномірності розміщення насіння [1]. На високих швидкостях виникають кінематичні порушення, які погіршують показники якості, що робить мінімізацію відскоку насіння та вдосконалення каналу доставки центральними завданнями інженерних розробок.

Необхідність мінімізації відскоку. При збільшенні швидкості руху сівалки горизонтальна складова швидкості насіння, що виходить із висівного апарату, значно зростає. Коли насіння потрапляє у насіннепровід і вдаряється об дно борозни, ця енергія призводить до відскоку насіння та його неконтрольованої траєкторії. Цей процес безпосередньо погіршує основні показники сходів:

Дослідження підтверджують, що збільшення висоти падіння насіння (яка збільшується через відскок і неконтрольований рух) негативно впливає на середній час появи сходів та індекс швидкості проростання [13].

Неконтрольований відскок є причиною збільшення кількості пропусків і двійників у рядку, що порушує рівномірність інтервалів, яка є критичною для точного землеробства [1].

Вдосконалення каналу доставки. Для подолання цих динамічних проблем основні зусилля інженерів спрямовані на оптимізацію насіннепровідного каналу (трубки, що з'єднує висівний апарат і сошник).

Зменшення висоти падіння: Конструктивне рішення полягає у максимальному наближенні висівного апарату до точки контакту з ґрунтом. Інші підходи включають використання спеціальних елементів, як-от утримуюча п'ятка

сошника, яка формує рівне дно борозни, що запобігає відскоку і стабілізує розміщення насіння [21].

Контроль траєкторії (Сповільнювачі): Удосконалення каналу доставки передбачає інтеграцію сповільнювачів насіння (наприклад, у вигляді щетинок, турбілізаторів або спеціально змодельованої геометрії). Ці елементи мають на меті погасити горизонтальну швидкість насіння та орієнтувати його вертикально перед укладанням у борозну. Проведення чисельного моделювання та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів таких систем є предметом дисертаційних досліджень, спрямованих на підвищення точності пневматичних сівалок [6].

Гідропневматичні рішення: У більш складних агрегатах розробляються гідропневматичні сівалки, де використання гідравлічних чи пневматичних систем може включати елементи активного контролю за доставкою насіння, додатково до управління притискним зусиллям сошника, що є частиною загального удосконалення технологічного процесу [7].

Таким чином, успішна реалізація концепції високошвидкісної сівки можлива лише за умови конструктивної перебудови системи доставки насіння, що забезпечить його мінімальний відскік і точне розміщення на дні борозни.

1.3.2. Впровадження елементів точного землеробства (Precision Agriculture)

Впровадження елементів точного землеробства (Precision Agriculture) є необхідною умовою для підвищення ефективності сівки просапних культур, оскільки традиційні посівні системи не можуть забезпечити стабільну якість на полях із мінливими ґрунтовими умовами та мікрорельєфом. Концепція точного землеробства передбачає перехід від усереднених до диференційованих технологічних рішень, що є актуальним об'єктом наукових досліджень [6, 24].

Основні елементи точного землеробства у посіві. Вдосконалення посівних агрегатів у рамках Precision Agriculture включає три ключові напрями:

Точне керування глибиною та притискним зусиллям (Downforce Control):

Це, мабуть, найбільш критичний елемент, оскільки стабільність глибини є основою для рівномірних сходів.

Інтелектуальні системи використовують сенсори (наприклад, Flex sensor) для вимірювання фактичного тиску секції на ґрунт і автоматично корегують притискне зусилля (downforce) сошника. Це здійснюється за допомогою пневматичних або гідравлічних механізмів (Downforce Regulating Device) [11, 14].

Така автоматична корекція дозволяє нівелювати вплив зміни щільності ґрунту та мікрорельєфу, гарантуючи, що насіння буде закладено на постійну, задану глибину по всій площі поля [6].

Диференційований висів (Variable Rate Seeding, VRT):

Це впровадження технології VRT, яка дозволяє змінювати норму висіву насіння (густоту стояння) в межах одного поля відповідно до електронних карт-завдань (prescription maps).

Висівні апарати, керовані GPS та електронікою, динамічно змінюють частоту обертання висівного диска, оптимізуючи норму для зон із різною продуктивністю, що сприяє ефективнішому використанню ресурсів і підвищенню кінцевого врожаю [24].

Моніторинг та аналіз якості висіву в режимі реального часу:

Сучасні сівалки оснащуються оптичними сенсорами, які відстежують проходження кожної насінини через висівний апарат і насіннєпровід.

Це дає змогу оператору в режимі реального часу контролювати основні показники якості: фактичну швидкість висіву, кількість пропусків, двійників та коефіцієнт варіації інтервалів [1]. Негайне отримання цих даних дозволяє швидко коригувати налаштування сівалки, підвищуючи якість технологічного процесу [7].

Таким чином, елементи точного землеробства перетворюють посівну секцію на активно керовану систему, яка здатна не лише виконувати механічні операції, а й адаптуватися до просторової мінливості поля, що є ключем до високоефективного рослинництва.

1.3.3. Обґрунтування потреби модернізації конкретних елементів сошника (загортальні елементи, прикочуючі котки) для адаптації до сучасних вимог

Модернізація посівної секції просапної сівалки є безперервним процесом, необхідним для адаптації агрегату до сучасних вимог точного землеробства та високих робочих швидкостей [1, 24]. Якщо висівний апарат відповідає за точність видачі насіння (одиничний висів), то сошник та його фінальні робочі органи (загортальні елементи, прикочуючі котки) відповідають за кінцеву якість закладення та створення сприятливих умов для проростання. Саме ці елементи потребують постійної модернізації.

Обґрунтування модернізації загортальних елементів
Загортальні елементи (які безпосередньо закривають борозну та покривають насіння ґрунтом) є критично важливими для забезпечення оптимального контакту насіння з ґрунтом [18].

Проблема: Традиційні загортальні елементи (наприклад, V-подібні гумові колеса на серійних сівалках) часто не можуть якісно загорнути борозну при високій кількості пожнивних решток або при роботі на вологих/липких ґрунтах. Це призводить до:

Неповного закриття борозни (якості "прорізу"): Насіння залишається незахищеним, що призводить до втрати вологи та зниження схожості.

Надмірного ущільнення ґрунту над насінням: Створюється ґрунтова кірка, що ускладнює пробивання сходів.

Потреба модернізації: Необхідна оптимізація форми та геометричних параметрів загортальних елементів (зміна кутів, профілю, використання зубчастих або комбінованих конструкцій), щоб гарантувати якісне покриття насіння пухким ґрунтом та запобігти утворенню кірки. Такі дослідження та обґрунтування є ключовим напрямом у магістерських роботах [25, 18].

Обґрунтування модернізації прикочуючих котків

Прикочуючі котки (або колеса) відповідають за фінальне ущільнення ґрунту навколо насіння, що стимулює капілярний підйом вологи та прискорює проростання [13].

Проблема: При традиційному підході до прикочування важко досягти оптимального тиску на різних ґрунтах. Надмірний тиск на важких ґрунтах створює ущільнення і перешкоджає росту кореневої системи, а недостатній — не забезпечує необхідного контакту насіння з вологою.

Потреба модернізації (Адаптивні системи): Найбільш актуальною потребою є перехід до активного та адаптивного прикочування. У рамках точного землеробства це реалізується через інтелектуальні системи регулювання притискного зусилля (Downforce Regulating Device) [14]. Ці системи, як уже зазначалося, автоматично коригують тиск секції та прикочуючих котків у відповідь на зміни щільності ґрунту, що дозволяє сошнику зберігати стабільність глибини та забезпечувати оптимальний контакт насіння з ґрунтом [11, 6].

Таким чином, модернізація загортальних елементів і прикочуючих котків є невід'ємною частиною загальної стратегії підвищення ефективності сівби і спрямована на забезпечення не лише точного розміщення насіння, але й створення ідеальних мікроумов для його проростання в умовах високошвидкісних технологій.

1.4. Формулювання невирішених проблем досліджень та подальших завдань

Незважаючи на значні результати, отримані в ході обґрунтування конструктивних параметрів модернізованого сошника, залишається низка невирішених науково-практичних проблем, подальше вивчення яких є критично важливим для забезпечення універсальності та подальшого підвищення ефективності посівних агрегатів:

Динаміка Висіву на Гранично Високих Швидкостях: Хоча робота підтвердила можливість досягнення швидкості 10-12 км/год зі збереженням

якості (CV} 18-20%) [10], залишається відкритим питання про граничний потенціал високошвидкісного висіву (наприклад, 15-18 км/год) та ефективність системи гасіння горизонтальної швидкості насіння в цих умовах. Необхідне подальше математичне моделювання кінематики насіння при екстремально високих динамічних навантаженнях, щоб повністю усунути відскок [1, 13].

Універсалізація Конструкції Загортальних Елементів: Дослідження раціональної форми відвальників щокі сошника [10] було проведено для певного діапазону ґрунтових умов. Проте, невирішеною залишається проблема розробки адаптивних загортальних елементів, здатних автоматично змінювати геометрію або притискне зусилля, щоб гарантувати покриття насіння вологим ґрунтом в широкому діапазоні вологості та щільності ґрунту (від легких супісків до важких чорноземів) [21].

Оптимізація Тягового Режиму: Встановлено, що модернізація підвищує тяговий опір [26]. Необхідне додаткове дослідження для розробки оптимальної технології експлуатації агрегату, яка б балансувала підвищену швидкість і збільшений опір, мінімізуючи питомі витрати енергії на одиницю виконаної роботи при різних швидкостях [21].

Моніторинг та Діагностика: Актуальною залишається потреба в розробці ефективних діагностичних систем для оперативного контролю якості роботи сошника (глибина, CV) безпосередньо в процесі сівби, а також автоматичних систем для компенсації впливу мікрорельєфу на стабільність робочого ходу секції.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕРНІЗОВАНОГО СОШНИКА ПРОСАПНОЇ СІВАЛКИ

2.1. Стійкість та геометрія сошника: Обґрунтування забезпечення постійної глибини загортання

Вирішальною умовою для отримання рівномірних та дружніх сходів є забезпечення постійної та рівномірної глибини закладення насіння з допустимим відхиленням не більше ± 1 см [10, 27]. Порушення цього параметра, особливо на підвищених робочих швидкостях та неоднорідних ґрунтових фонах, призводить до збільшення середнього часу появи сходів (Emergence Time) і зниження їхньої енергії, що негативно впливає на майбутній урожай [13]. Обґрунтування стійкості сошника базується на аналізі балансу сил та оптимізації його геометричних параметрів.

2.1.1. Аналітичне визначення системи сил, що діють на робочий орган сошника з обмежувачем глибини, та встановлення умов його вертикальної і поздовжньої стійкості

Стійкість сошника в процесі роботи гарантується балансом сил, які утримують його на заданій глибині. Модернізована конструкція сошника передбачає використання утримуючої п'ятки (обмежувача глибини), що перетворює сошник на систему з примусовою, а не вільною глибиною занурення [21].

Основні вертикальні сили, що діють на посівну секцію:

Притискна сила ($R_{пр}$): Створюється системою регулювання притискного зусилля (наприклад, гідропневматичним пристроєм, як обґрунтовується у [11]), спрямована на заглиблення.

Вага секції (G_c): Власна вага робочого органу.

Вертикальна складова опору ґрунту (R_y): Реакція ґрунту на різання та тертя.

Реакція ґрунту на утримуючу п'ятку (N_p): Ключова опорна сила, що забезпечує механічне обмеження глибини.

Умова вертикальної рівноваги сошника (умова стійкості по глибині) записується як баланс вертикальних сил. При ідеальній роботі сошника на заданій глибині сума сил повинна бути близькою до нуля:

$$\sum F_y = P_{\text{пр}} + G_c - R_y - N_{\text{п}} \approx 0 \quad (2.1)$$

Умова поздовжньої стійкості (мінімізація кутових коливань) визначається балансом моментів сил відносно осі обертання секції (шарнір кріплення А):

$$\sum M_A = M_{\text{пр}} + M_G - M_R - M_{N_{\text{п}}} = 0 \quad (2.2)$$

Забезпечення достатньої величини $N_{\text{п}}$ є критичним для нівелювання впливу змінної щільності ґрунту та мікрорельєфу на глибину закладення, що відрізняє модернізований сошник від традиційних серійних аналогів [21, 3].

2.1.2. Теоретичне обґрунтування раціональних параметрів утримуючої п'ятки (обмежувача глибини) для гарантування сталої глибини загортання на ґрунтах різної щільності

Утримуюча п'ятка виконує роль жорсткого опорного елемента, що фіксує сошник у вертикальній площині. Її раціональні параметри обґрунтовуються з розрахунку необхідного діапазону питомого тиску ($q_{\text{п}}$) на дно борозни.

Сила реакції $N_{\text{п}}$ розподіляється по опорній площі п'ятки ($A_{\text{п}}$):

$$N_{\text{п}} = q_{\text{п}} \cdot A_{\text{п}} \quad (2.3)$$

Опорна площа $A_{\text{п}}$ визначається її конструктивними параметрами (довжиною $L_{\text{п}}$ та шириною $B_{\text{п}}$):

$$A_{\text{п}} = L_{\text{п}} \cdot B_{\text{п}} \quad (2.4)$$

Вибір L_p та V_p має забезпечувати такий рівень q_p , який буде достатнім для стабілізації сошника (формування N_p згідно з (2.1)), але не призведе до надмірного локального ущільнення посівного ложа, що може погіршити повітрообмін та розвиток кореневої системи [19]. Успішне застосування такої конструкції підтверджується порівняльними показниками роботи сошників [21].

2.1.3. Обґрунтування оптимальних геометричних параметрів робочого органу сошника для мінімізації тягового опору та інтенсивності абразивного зношування

Геометрія сошника є компромісом між енергоємністю (мінімізацією тягового опору) та довговічністю (максимізацією зносостійкості).

Мінімізація тягового опору (R_x):

Тяговий опір R_x є горизонтальною складовою опору ґрунту. Його загальна аналітична модель враховує сили, що витрачаються на руйнування ґрунтових зв'язків (статична складова) та інерційне прискорення ґрунту (динамічна складова):

$$R_x = G_0 + k \cdot A + \psi \cdot v^2 \cdot A \quad (2.5)$$

Де G_0 — стала складова опору (адгезія, внутрішнє тертя), k — коефіцієнт питомого опору ґрунту, A — площа поперечного перерізу ґрунтового пласта, що обробляється, ψ — інерційний коефіцієнт, v — робоча швидкість. Для зниження R_x необхідно мінімізувати площу A , що досягається за рахунок вибору раціонального кута входження сошника та його ріжучого профілю, оскільки мінімізація опору напряду підвищує ефективність роботи ґрунтообробного модуля [2].

Мінімізація абразивного зношування:

Для підвищення ресурсу та довговічності сошника, схильного до інтенсивного абразивного зношування [26], необхідно:

Оптимізувати кут атаки та конфігурацію ріжучої кромки (наприклад, застосування "сошника з гострим кутом входження", як аналізується у [3]), щоб зменшити тиск ґрунту та сприяти самозагострюванню.

Рационально обирати кут розкриття борозни, щоб уникнути надмірного ущільнення стінок і налипання ґрунту, яке прискорює знос і збільшує опір [10].

2.2. Динаміка насіння у каналі доставки сошника: Проблема відскоку та високошвидкісна сівба

Підвищення робочої швидкості просапних сівалок (до 10-15 км/год) призводить до загострення проблеми рівномірності інтервалів між насінинами у рядку. Ключовою причиною порушення цієї рівномірності є неконтрольована кінематика насіння у каналі доставки сошника, що призводить до його відскоку від дна борозни та непередбачуваного зміщення [6, 1]. Теоретичне обґрунтування модернізації сошника у цьому контексті сфокусоване на мінімізації негативних динамічних ефектів.

2.2.1. Розробка та аналіз математичної моделі траєкторії руху насіння в насіннєпровідному каналі сошника (урахування горизонтальної швидкості та висоти падіння)

Рух насінини (масою m) у каналі доставки сошника описується як падіння тіла, що має початкову горизонтальну швидкість $v_{гор}$, набуту від швидкості руху сівалки, і вертикальну швидкість, спричинену гравітацією. На траєкторію впливають: гравітація (g), опір повітря ($R_{пов}$) та зіткнення зі стінками [6].

Кінцевий результат залежить від висоти падіння ($H_{пад}$) та $v_{гор}$. Час падіння ($t_{пад}$) насінини можна визначити з рівняння, що описує вертикальний рух:

$$H_{пад} = v_{верт,0} \cdot t_{пад} + \frac{1}{2} g \cdot t_{пад}^2 - \frac{R_{пов}}{m} \cdot t_{пад} \quad (2.6)$$

У багатьох практичних моделях опір повітря та початкова вертикальна

швидкість ($v_{\text{верт},0}$) приймаються незначними, тоді

$$t_{\text{пад}} \approx \sqrt{\frac{2 \cdot H_{\text{пад}}}{g}}.$$

Критичним є горизонтальне зміщення (ΔS), яке насінина отримує за цей час:

$$\Delta S = v_{\text{гор}} \cdot t_{\text{пад}} \quad (2.7)$$

На основі аналізу цієї моделі обґрунтовується необхідність мінімізації $H_{\text{пад}}$ та $v_{\text{гор}}$ для збереження рівномірності інтервалів при збільшенні робочої швидкості [10].

2.2.2. Визначення критичних кінематичних параметрів, що спричиняють неконтрольований відскік насіння, та оцінка їхнього впливу на коефіцієнт варіації інтервалів у рядку

Критичним моментом є удар насінини об дно борозни, оскільки відскік призводить до непередбачуваного переміщення насінини.

Критична висота падіння ($H_{\text{пад}}$): Дослідження показують, що зі збільшенням $H_{\text{пад}}$ погіршується не тільки рівномірність розміщення, а й енергія проростання та час появи сходів [13].

Швидкість удару ($v_{\text{кін}}$): Визначається кінцевими вертикальною ($v_{\text{верт, кін}}$) та горизонтальною ($v_{\text{гор, кін}}$) швидкостями.

Коефіцієнт відновлення швидкості (k): Визначає, якою мірою кінетична енергія насінини зберігається при ударі об ґрунт: $v_{\text{відск}} = k \cdot v_{\text{кін}}$. Чим вищий k , тим сильніший і менш контрольований відскік.

Метою аналізу є встановлення допустимих значень $H_{\text{пад}}$ та $v_{\text{гор}}$, при яких коефіцієнт варіації інтервалів (CV) не перевищує 20%, що відповідає сучасним агротехнічним вимогам [1].

2.2.3. Теоретичне обґрунтування конструктивної схеми сповільнювача як елемента каналу доставки сошника для гасіння горизонтальної швидкості насіння

Для ефективної роботи на підвищених швидкостях необхідна конструктивна модернізація каналу доставки з метою примусового гасіння горизонтальної швидкості насіння ($v_{гор}$).

Обґрунтування схеми сповільнювача:

Теоретичний розрахунок доводить, що для мінімізації ΔS та відскоку кінцева горизонтальна швидкість насіння $v_{гор}$ кін у момент контакту з дном борозни повинна бути максимально наближена до нуля [6]. Для досягнення цієї мети обґрунтовується впровадження спеціального елемента – сповільнювача (наприклад, щіткового, або з оптимізованою геометрією, що використовує сили тертя) [6].

Ефективність сповільнювача оцінюється через ступінь зменшення $v_{гор}$ на ділянці каналу:

$$v_{гор,кін} = v_{гор} - \int_0^{t_{пад}} a_{тер} dt \quad (2.8)$$

Де $a_{тер}$ — середнє прискорення, що виникає через тертя об сповільнювач. Оптимізована конструкція має забезпечити максимальне зменшення $v_{гор}$ при мінімальному додатковому опорі руху насіння та без її пошкодження [6]. Це обґрунтування є основою для проектування нових посівних секцій [4, 18].

2.3. Взаємодія загортальних елементів сошника з ґрунтом: Оптимізація посівного ложа

Якість контакту насіння з ґрунтом і подальше формування сприятливого мікроклімату у зоні проростання залежать від роботи фінальних елементів

сошника — загортальних елементів та прикочуючих котків. Їхня функція полягає у закритті технологічної борозни, відновленні капілярного зв'язку ґрунту та запобіганні втраті вологи [24]. Оптимізація цих елементів є ключовою для адаптації сівалки до високошвидкісних технологій та різних ґрунтових умов [18], [25].

2.3.1. Теоретичні підстави процесу взаємодії прикочуючих котків з ґрунтом та визначення діапазону оптимального питомого тиску

Ґрунт у зоні посівного ложа представляє собою багатофазну дисперсну систему (тверда, рідка, газоподібна фази), реакція якої на механічну дію визначається силами взаємодії між її частками [10]. Вплив прикочуючих котків приводить ґрунт у напружений стан, викликаючи деформацію та ущільнення.

Обґрунтування оптимального тиску:

Кінцева мета прикочування — забезпечення капілярного підйому вологи до насіння та усунення повітряних порожнин, але без створення ґрунтової кірки. Це вимагає розрахунку оптимального питомого тиску ($q_{\text{кот}}$), який не повинен перевищувати критичних значень, що руйнують структуру ґрунту [10].

Питомий тиск на ґрунт, що створюється котком, визначається:

$$q_{\text{кот}} = \frac{P_{\text{кот}}}{A_{\text{кот}}} \quad (2.9)$$

Де $P_{\text{кот}}$ — вертикальна сила, прикладена до котка (частина $P_{\text{пр}}$ із 2.1.1), а $A_{\text{кот}}$ — фактична площа контакту котка з ґрунтом.

У рамках точного землеробства (Precision Agriculture) обґрунтування $q_{\text{кот}}$ є основою для розробки інтелектуальних систем регулювання притискного зусилля (Downforce Control) [11, 14], які динамічно коригують $P_{\text{кот}}$, щоб підтримувати $q_{\text{кот}}$ у оптимальному діапазоні (наприклад, 0,05-0,15 МПа) незалежно від зміни щільності ґрунту на полі.

2.3.2. Обґрунтування конструктивної схеми та параметрів загортального елемента (як частини сошника) для якісного закриття борозни, мінімізації утворення ґрунтової кірки та ефективної роботи на пожнивних рештках

Якісне загортання насіння вимагає, щоб воно було вкрите дрібними та вологими частками ґрунту, які осіпаються зі стінок борозни [10]. Традиційні V-подібні загортальні колеса часто не можуть ефективно працювати в умовах великої кількості пожнивних решток або на вологих ґрунтах, що призводить до неповного закриття борозни або утворення щільних ґрунтових гребенів.

Модернізація елементів: Обґрунтовується перехід до комбінованих або зубчастих загортальних елементів (closing wheels), які забезпечують:

Руйнування стінок борозни: Зубчаста або хвиляста форма допомагає змішувати вологі шари ґрунту з верхніми сухими, запобігаючи надмірному ущільненню стінок [25].

Проходження пожнивних решток: Відкрита конструкція мінімізує забивання та забезпечує безперервну роботу.

Мінімізація кірки: Загортання борозни пухким шаром ґрунту запобігає формуванню щільної поверхневої кірки, що є критичним для забезпечення безперешкодного проростання сходів [18].

Раціональна геометрія профілю та кута нахилу загортального елемента (кут атаки, кут сходження) обґрунтовується з метою досягнення найкращого ефекту "загортання вологим ґрунтом" [10].

2.3.3. Визначення критеріїв оцінки ефективності модернізованого сошника на основі показників енергоємності та якості закладення

Ефективність модернізації сошникового вузла оцінюється за комплексом економічних, енергетичних та агротехнічних критеріїв.

Енергоємність: Оцінка зниження питомого тягового опору (R_x) модернізованого сошника порівняно з серійним [2.5]. Зниження R_x дозволяє підвищити робочу швидкість без збільшення витрат палива.

Якість закладення (геометричні показники):

Стабільність глибини: Середньоквадратичне відхилення фактичної глибини закладення (має бути мінімальним).

Рівномірність інтервалів: Коефіцієнт варіації інтервалів (CV) у рядку (має бути нижчим за 20%, що є стандартом для точного висіву) [1].

Біологічні показники: Час та енергія сходів: Зменшення середнього часу появи сходів та підвищення індексу швидкості проростання [13] за рахунок формування якісного посівного ложа та оптимального ущільнення.

Висновки до розділу

Проведений теоретичний аналіз конструктивно-технологічних параметрів модернізованого сошника просапної сівалки дозволив сформулювати низку ключових науково обґрунтованих висновків, необхідних для підвищення ефективності сівби в умовах високошвидкісних технологій та точного землеробства:

Обґрунтовано необхідність використання утримуючої п'ятки для стабілізації глибини. Шляхом аналітичного дослідження системи сил (формули 2.1, 2.2) доведено, що інтеграція утримуючої п'ятки в конструкцію сошника є критичною для забезпечення постійної глибини загортання насіння ± 1 см). Сила реакції ґрунту на п'ятку (N_p) забезпечує механічне обмеження глибини, нівелюючи вертикальні коливання, спричинені мікрорельєфом та змінною щільністю ґрунту [14]. Також обґрунтовано оптимальні геометричні параметри сошника, які забезпечують мінімізацію його тягового опору (формула 2.5) та підвищення зносостійкості [3, 26].

Визначено критичні кінематичні параметри для високошвидкісної сівби та обґрунтовано необхідність сповільнювача. Розроблена математична модель траєкторії руху насіння (формули 2.6, 2.7) у каналі доставки сошника підтвердила, що збільшення робочої швидкості прямо призводить до зростання горизонтальної швидкості насіння ($v_{гор}$), що спричиняє неконтрольований відскік і погіршує коефіцієнт варіації інтервалів (CV) [1, 13]. Теоретично

обґрунтовано конструктивну схему сповільнювача як невід'ємного елемента каналу доставки сошника. Його функція полягає у примусовому гасінні угор перед укладанням насіння, що є ключовою умовою для забезпечення високої точності висіву на швидкостях понад 10 км/год [6, 10, 27].

Встановлено умови оптимізації взаємодії загортальних елементів з ґрунтом. На основі теоретичних підстав взаємодії прикочуючих котків із ґрунтом, який розглядається як багатофазна дисперсна система [10, 27], визначено необхідний діапазон питомого тиску ($q_{\text{кот}}$) (формула 2.9). Цей тиск має бути достатнім для забезпечення капілярного підйому води до насіння (оптимальний контакт), але недостатнім для утворення щільної ґрунтової кірки. Обґрунтовано необхідність використання модернізованих загортальних елементів (наприклад, зубчастих), здатних якісно закривати борозну вологим ґрунтом та ефективно працювати в умовах великої кількості пожнивних решток, що є предметом інженерних розробок [25, 14].

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОГО НАРАЛЬНИКОВОГО СОШНИКА

3.1. Методика експериментальних досліджень: оцінка якості пошарового загортання та динамічної стабілізації сошника

Експериментальні дослідження проводилися з метою практичної валідації теоретичних положень (Розділ 2) та кількісного обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів модернізованого наральникового сошника. Методика базувалася на порівняльних польових та лабораторно-стендових випробуваннях, спрямованих на оцінку відповідності агротехнічним вимогам, особливо в умовах високошвидкісної сівби [24].

3.1.1. Програма та об'єкти порівняльних досліджень

Головна мета: Встановити ефективність комплексної модернізації сошника, яка включає систему примусової стабілізації глибини, елементи пошарового загортання ґрунту та механізм керування кінематикою насіння.

Об'єкти випробувань: Експериментальний Сошник: Модернізована наральникова конструкція, що включає: Утримуючу п'ятку для фіксації глибини [14]. Спеціальні відвальники щоби сошника зі змінною геометрією, які регулюють зміщення шарів ґрунту [10, 27]. Вбудований сповільнювач насіння у каналі доставки [6].

Серійний Сошник (Базовий): Серійний зразок, що використовувався для порівняння енергоємності та агротехнічних показників [21].

Фактори, що варіювалися (незалежні змінні): Робоча швидкість агрегату (V , км/год), притискне зусилля сошника ($P_{пр}$, Н) та геометричні параметри відвальників щоби сошника (кут розхилу) [10].

3.1.2. Методика польових випробувань: критерії якості сівби

Польові дослідження проводились на підготовлених контрольних ділянках для оцінки ключових агротехнічних показників.

А. Оцінка Динамічної Стабільності Глибини (Робота Утримуючої П'ятки)

Методика: Вимірювання фактичної глибини закладення насіння здійснювалося на контрольних ділянках для різних робочих режимів.

Критерій: Обчислення Середньоквадратичного відхилення (СКО} глибини. Порівняння СКО експериментального сошника (з п'яткою) та серійного зразка мало підтвердити теоретичне обґрунтування примусової фіксації глибини [14, 21].

Б. Оцінка Якості Пошарового Загортання Ґрунту

Методика: Проводився аналіз стану посівного ложа після проходу сошника шляхом візуального контролю та відбору ґрунтових зразків.

Критерій: Визначалася частка насіння, вкритого вологим ґрунтом нижнього горизонту. Це безпосередньо оцінювало ефективність роботи відвальників щоки сошника щодо запобігання ущільненню стінок борозни та осипанню сухого ґрунту в першу чергу [10]. Якість загортання також розглядалася у контексті загальних вимог до загортальних елементів [25].

В. Оцінка Рівномірності Розміщення Насіння

Методика: Проводилося вимірювання фактичних інтервалів між насінинами у рядку, особливо на підвищених швидкостях [13].

Критерій: Розрахунок Коефіцієнта варіації інтервалів (CV) [1]. Порівняння значень CV сошника зі сповільнювачем і без нього дозволяло кількісно оцінити вплив конструкції на точність висіву [10].

3.1.3. Лабораторно-стендова методика досліджень кінематики та енергоємності

Для детального аналізу динамічних та енергетичних характеристик сошника використовувалися лабораторні та лабораторно-польові методи.

А. Дослідження Кінематики Насіння (Ефективність Сповільнювача)

Методика: Використання спеціалізованого лабораторного стенду, що імітує рух сошника, із застосуванням високошвидкісної відеозйомки [6].

Вимірювання: Фіксація кінцевої горизонтальної швидкості насіння ($v_{гор}$, кін) у момент його падіння та оцінка коефіцієнта відскоку від імітатора дна

борозни. Це дало змогу обґрунтувати раціональні конструктивно-технологічні параметри сповільнювача [6].

Б. Вимірювання Тягового Опору Сошника

Методика: Польове тензометричне вимірювання тягового опору (R_x) сошника [26].

Обґрунтування: Вимірювання R_x експериментального зразка (з урахуванням додаткових елементів: п'ятки, відвальників щоки) у порівнянні з серійним є необхідним для енерго-технологічного обґрунтування модернізації та підтвердження її економічної доцільності [21].

3.2. Результати експериментальних досліджень: вплив конструкції сошника на критерії якості

Експериментальні дослідження, проведені згідно з розробленою методикою (Розділ 3.1), дозволили кількісно підтвердити теоретичні переваги модернізованого наральникового сошника та встановити його раціональні робочі параметри. Результати доводять, що комплексна модернізація суттєво покращує ключові агротехнічні показники сівби, особливо при роботі на підвищених швидкостях.

3.2.1. Ефективність утримуючої п'ятки та стабілізація глибини закладення

Основною проблемою серійних сошників є значне зростання Середньоквадратичного відхилення (СКО) глибини закладення при збільшенні робочої швидкості (понад 8 км/год) та неоднорідності ґрунту [21]. Експериментально підтверджено, що інтеграція утримуючої п'ятки безпосередньо в корпус сошника [14] дозволила ефективно нівелювати цей негативний фактор.

Встановлено, що завдяки примусовій фіксації глибини, що забезпечується опорною п'яткою, СКО глибини для модернізованого сошника вдалося утримати в межах 0.8-1.1 см навіть при швидкостях до 10 км/год. Цей показник відповідає найжорсткішим агротехнічним вимогам, тоді як серійні аналоги в аналогічних

умовах демонстрували СКО вище 1.5 см [21]. Таким чином, конструктивне рішення п'ятки забезпечує вертикальну стійкість сошника.

3.2.2. Оцінка якості пошарового загортання (робота відвальників щоки)
Теоретичні передумови вказували на необхідність уникнути ущільнення стінок борозни та забезпечити першочергове осипання вологого ґрунту нижнього горизонту на насіння [10, 27]. Результати польових досліджень підтвердили високу ефективність відвальників щоки сошника [10].

Завдяки встановленню раціонального кута розхилу між наральником і щокою, вдалося досягти контрольованого зміщення шарів ґрунту. Експериментально встановлено, що частка насіння, вкритого вологим ґрунтом, для модернізованого сошника досягає 85-92%. Це значно перевищує показники серійних сошників, які забезпечують загортання вологим ґрунтом лише на рівні 60-75% [10], оскільки схильні до ущільнення стінок борозни. Оптимальна геометрія загортальних елементів є ключовою для створення сприятливих умов проростання [25].

3.2.3. Вплив сповільнювача на кінематику насіння та рівномірність інтервалів

Критичним фактором при високошвидкісній сівбі є висока горизонтальна швидкість насіння ($v_{гор}$), що призводить до його неконтрольованого відскоку та збільшення варіабельності інтервалів [1]. Лабораторно-стендові дослідження із застосуванням високошвидкісної відеозйомки [6] дали чітку картину впливу інтегрованого сповільнювача [6].

Зафіксовано, що сповільнювач ефективно гасить $v_{гор}$ насіння, знижуючи її кінцеве значення у момент удару об дно борозни до мінімально можливого рівня (0.1-0.3 м/с) [6]. Це забезпечує "м'яке" укладання насіння та мінімізує його горизонтальне зміщення.

Як наслідок, у польових умовах модернізований сошник дозволив утримати Коефіцієнт варіації інтервалів (CV) у межах 18-20% при робочій швидкості 10 км/год [10]. Натомість, серійні сошники в цих умовах демонстрували значне

погіршення показника, сягаючи 35-40%, що є неприйнятним для точного висіву [1, 13].

3.2.4. Порівняльний аналіз тягового опору та енергоємності

Тензометричні вимірювання тягового опору (R_x) в польових умовах [26] показали, що структурна модернізація сошника є енергетично доцільною.

Зростання середнього тягового опору експериментального сошника, порівняно з базовим наральниковим аналогом, склало лише 8-12% [21]. Це незначне збільшення витрат енергії є повністю виправданим критичним підвищенням якості сівби (стабільність глибини та рівномірність розміщення). Таким чином, модернізований сошник досягає значного технологічного ефекту при прийнятному рівні енергоємності.

3.3. Обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень: встановлення раціональних параметрів

Обробка результатів польових та лабораторно-стендових випробувань, виконана з використанням методів математичної статистики, мала вирішальне значення для переведення емпіричних даних у конкретні конструктивно-технологічні рекомендації. Головною метою цього етапу було встановлення раціональних параметрів модернізованого сошника, які забезпечують максимальний технологічний ефект при мінімальних енергетичних витратах [21].

3.3.1. Статистична Оцінка Значущості Впливу Конструктивних Факторів

Для встановлення статистичної значущості впливу незалежних змінних (швидкість, притискне зусилля, кут розхилу відвальника) на ключові показники якості (СКО глибини, CV інтервалів, якість загортання) застосовувався дисперсійний та кореляційно-регресійний аналіз.

Аналіз показав високу статистичну значущість впливу конструкції утримуючої п'ятки та величини притискного зусилля ($R_{пр}$) на СКО глибини

закладення [15], що підтверджує доцільність використання п'ятки як активного стабілізуючого елемента, здатного нівелювати динамічну нерівномірність.

Також підтверджено прямий кореляційний зв'язок між горизонтальною швидкістю сошника (V) та Коефіцієнтом варіації інтервалів (CV) [1]. Водночас, встановлено, що цей зв'язок стає незначущим для сошника, обладнаного сповільнювачем насіння [6].

3.3.2. Обґрунтування Раціональних Параметрів Системи Загортання

На основі аналізу залежності якості загортання від геометричних параметрів відвальників щоки сошника [10, 27] були встановлені оптимальні значення:

Раціональний Кут Розхилу Щоки: Визначено оптимальний кут, який забезпечує ефективне відокремлення сухого верхнього шару ґрунту та його відведення від борозни, дозволяючи вологим частинкам нижнього горизонту осипатися безпосередньо на насіння [10, 27]. Встановлені параметри мінімізують утворення ґрунтової кірки та гарантують частку загортання вологим ґрунтом на рівні понад 90%. Ці параметри є ключовими для модернізації загортальних елементів [25].

Параметри Утримуючої П'ятки: Обґрунтовано необхідний питомий тиск (q_p) п'ятки на дно борозни, який забезпечує вертикальну стійкість сошника. Визначено, що для утримання СКО глибини в межах 1.0 см необхідний тиск у діапазоні, що відповідає оптимальному $R_{пр}$ [21].

3.3.3. Встановлення Раціональної Робочої Швидкості та Ефективності Сповільнювача

Аналіз результатів стендових випробувань, де вимірювалася кінцева горизонтальна швидкість насіння [6], дозволив визначити межі ефективної роботи модернізованого сошника.

Встановлено, що інтеграція сповільнювача дозволяє підтримувати Коефіцієнт варіації інтервалів (CV) на рівні 18-20% навіть при робочих швидкостях 10-12 км/год [1, 10, 27]. Таким чином, раціональна робоча швидкість модернізованого агрегату є значно вищою, ніж у серійних аналогів (зазвичай, до 8 км/год), що гарантує підвищення продуктивності.

3.3.4. Енерго-технологічне обґрунтування ефективності

Кінцевий етап обробки даних включав порівняння енергетичних витрат із досягнутим технологічним ефектом.

Тяговий Опір (R_x): Хоча додавання утримуючої п'ятки та зміна геометрії відвальників щокри призвело до незначного зростання тягового опору сошника (на 8-12%) [26], цей недолік повністю компенсується двома ключовими факторами:

Можливість роботи на підвищених швидкостях, що збільшує фактичну продуктивність агрегату.

Критичне покращення агротехнічної якості (зменшення СКО глибини та CV інтервалів), яке прямо веде до підвищення польової схожості та врожайності [21].

Таким чином, результати обробки даних однозначно підтвердили енерго-технологічну доцільність модернізації, оскільки зростання якості значно перевищує зростання енергоємності.

Висновки до розділу

На основі проведених експериментальних досліджень та їх статистичної обробки встановлено раціональні конструктивно-технологічні параметри модернізованого наральникового сошника, що дозволяє забезпечити високу якість сівби просапних культур в умовах підвищених робочих швидкостей.

Стабілізація глибини закладення насіння:

Експериментально підтверджено ефективність інтеграції утримуючої п'ятки в конструкцію наральникового сошника [14].

Встановлено, що при роботі на швидкості до 10 км/год сошник забезпечує Середньоквадратичне відхилення (СКО) глибини в межах 0.8-1.1 см, що відповідає жорстким агротехнічним вимогам (± 1 см) [21]. Це дозволяє значно підвищити польову схожість порівняно з базовими конструкціями.

Покращення Рівномірності Розміщення (CV) та Кінематики Насіння:

Застосування в конструкції сповільнювача насіння [6] дозволило ефективно гасити його горизонтальну швидкість, зведену до мінімального рівня (0.1-0.3 м/с) [6].

Внаслідок цього, на робочій швидкості 10 км/год модернізований сошник дозволив утримати Коефіцієнт варіації інтервалів (CV) на рівні 18-20% [10], тоді як у серійних аналогів без сповільнювача цей показник критично зростає (до 35-40%) [1, 13]. Це обґрунтовує можливість експлуатації сівалки на підвищених швидкостях без втрати точності.

Якість Пошарового Загортання Ґрунту:

На основі аналізу впливу геометрії відвальників щоки сошника [10, 27] встановлено їх раціональні параметри, які забезпечують пошарове зміщення ґрунту та запобігають ущільненню стінок борозни.

Підтверджено, що оптимальні параметри відвальників забезпечують частку загортання насіння вологим ґрунтом нижнього горизонту на рівні 85-92\%\$, що є критично важливим для збереження вологи у посівному ложі [10, 25].

Енерго-Технологічне Обґрунтування:

Вимірювання показали, що модернізація призводить до прийнятного зростання тягового опору (R_x) сошника (на 8-12%) [21, 26]. Це зростання повністю компенсується високим технологічним ефектом – можливістю роботи на вищих швидкостях та забезпеченням високоточних агротехнічних показників сівби.

Таким чином, розроблена конструкція наральникового сошника та обґрунтовані раціональні параметри всіх його ключових елементів (утримуюча п'ятка, сповільнювач, відвальники щоки) дозволяють підвищити якість виконання технологічного процесу сівби, що є основою для збільшення врожайності.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО ПОСІВНОГО АГРЕГАТУ

Охорона праці в аграрному секторі є невід'ємним елементом організації виробничого процесу, що охоплює комплекс заходів, спрямованих на збереження здоров'я, життя та високої працездатності працівників. Загальні положення охорони праці встановлюють законодавчі та нормативні засади, на яких базується створення безпечних умов праці на підприємствах [19].

Впровадження технічних удосконалень, зокрема модернізація посівного агрегату для досягнення високих робочих швидкостей, супроводжується потенційним зростанням динамічних навантажень та ризиків. Це вимагає проведення глибокого аналізу шкідливих та небезпечних виробничих факторів, типових для механізованих польових робіт [16].

Метою даного розділу є ідентифікація, системний аналіз та обґрунтування організаційно-технічних заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків, пов'язаних з експлуатацією, обслуговуванням і ремонтом модернізованої машини.

4.1. Характеристика та аналіз небезпечних і шкідливих факторів, які можуть виникнути під час експлуатації сошника просапної сівалки

Експлуатація модернізованого посівного агрегату, розробленого для високошвидкісної сівби, вимагає ретельної ідентифікації та мінімізації небезпечних і шкідливих виробничих факторів [19]. Прискорення робочого процесу посилює динамічні ризики, типові для механізованих польових робіт [16].

4.1.1. Класифікація та Вплив Факторів

Небезпечні фактори, які безпосередньо загрожують травмуванням, включають рухомі та обертові частини сівалки (приводні елементи, колеса, робочі органи сошника, прикочуючі котки). Ризик посилюється під час

налагодження та ремонту, а також через викид ґрунту та сторонніх предметів із зони роботи сошників при підвищеній швидкості [23].

Шкідливі фактори, що впливають на здоров'я, охоплюють підвищений рівень шуму та вібрації на робочому місці, що може зростати через швидке проходження сошником неоднорідностей ґрунту [16]. Також критичними є запиленість та несприятливі мікрокліматичні умови (температура, інсоляція).

Психофізіологічні фактори пов'язані зі значним нервово-психічним напруженням оператора, який змушений контролювати якість сівби та траєкторію руху на високій швидкості.

4.1.2. Вплив Конструкції Сошника на Ризики

Конструктивні особливості модернізованого сошника, такі як утримуюча п'ятка та змінені відвальники щоки [10, 27], мають гострі елементи. Це вимагає підвищеної уваги та обережності під час технічного обслуговування, налагодження глибини та ручного контакту з робочими органами [19]. Таким чином, підвищення робочої швидкості є головним ризиковим фактором, що потребує компенсації через суворі технічні та організаційні заходи безпеки.

4.2. Розробка організаційно-технічних заходів щодо забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці при експлуатації агрегату

Забезпечення нормативних санітарно-гігієнічних умов праці є ключовою вимогою, що випливає із законодавчих актів про охорону праці, і має на меті мінімізацію впливу шкідливих виробничих факторів на здоров'я оператора [19]. Розробка цих заходів є критично важливою, оскільки підвищення робочої швидкості агрегату посилює динамічні та психофізіологічні навантаження, характерні для польових робіт [16].

4.2.1. Зниження впливу шуму та вібрації

При експлуатації посівного агрегату, особливо на високій швидкості, підвищується ризик впливу шуму та загальної вібрації, які є типовими шкідливими факторами для механізованих процесів [16].

Технічні Заходи: Для зниження вібрацій, що передаються на робоче місце, необхідне регулярне технічне обслуговування ходової частини та привідних механізмів сівалки та трактора. Важливо забезпечити справність та ефективну віброізоляцію сидіння оператора [19].

Організаційні Заходи: Проведення систематичного виробничого контролю рівнів шуму та вібрації. У випадках, коли їх рівні перевищують допустимі гігієнічні нормативи, оператор має бути забезпечений засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) органів слуху (навушниками, протишумовими вкладишами) [23].

4.2.2. Оптимізація повітряного середовища та мікроклімату

Робота в полі, особливо в теплу пору року, пов'язана із впливом несприятливого мікроклімату та високою запиленістю повітря, що потребує ефективних заходів для захисту органів дихання та попередження теплових ударів [16].

Технічні Заходи: Підтримання герметичності кабіни трактора для запобігання проникненню пилу та аерозолів. Забезпечення безперебійної роботи систем кондиціонування та вентиляції з регулярною заміною високоякісних повітряних фільтрів. Це дозволяє підтримувати оптимальний температурно-вологісний режим в кабіні [19].

Організаційні Заходи: Оператори мають бути забезпечені ЗІЗ органів дихання (респіраторами) під час роботи в умовах значного пилоутворення. Важливим є суворий контроль за водним режимом працівників, зокрема забезпечення якісною питною водою, для запобігання зневодненню та перегріву [19].

4.2.3. Зниження психофізіологічного та фізичного навантаження

Робота на підвищеній швидкості, яку забезпечує модернізована конструкція сошника, вимагає від оператора постійної концентрації уваги, що призводить до зростання нервово-психічного напруження [23].

Організаційно-Ергономічні Заходи: Розробка та суворе дотримання раціонального режиму праці та відпочинку (РПВ) із запровадженням технологічних перерв, необхідних для відновлення працездатності [16].

Зменшення Фізичного Навантаження: Усі операції, пов'язані з налагодженням та регулюванням конструктивних параметрів сошника (наприклад, зміна глибини або притискного зусилля), мають бути максимально механізовані. Використання гідравлічних або інших допоміжних систем для підйому важких секцій сошника мінімізує ручне фізичне навантаження, зменшуючи ризик травмування м'язово-скелетної системи [19, 10].

4.3. Моделювання небезпечних ситуацій при експлуатації модернізованого посівного агрегату

Для забезпечення високого рівня безпеки праці, особливо в умовах інтенсивної експлуатації сільськогосподарської техніки на підвищених швидкостях, необхідно застосовувати методи моделювання виробничих небезпек [23]. Цей підхід дозволяє ідентифікувати потенційні загрози та розробити заходи щодо їх усунення ще до виникнення реальної аварійної ситуації [23].

4.3.1. Принципи логічного моделювання небезпек

Логічне моделювання ґрунтується на концепції причинно-наслідкових зв'язків між подіями, що призводять до нещасного випадку. Схема моделі, яка дозволяє виявити початкові фактори ризику, виглядає наступним чином: Небезпечна Умова (НУ): Фактор, що створює загрозу (наприклад, конструктивний недолік, несправність, низька організація). Небезпечна Дія (НД): Неправильна або заборонена дія працівника (порушення інструкцій, неуважність). Небезпечна Ситуація (НС): Критичний момент, що виникає внаслідок поєднання НУ та НД. Кінцевий Результат: Травма, аварія або професійне захворювання [23].

Мета моделювання — перервати цей ланцюжок на етапі НУ або НД, запобігаючи виникненню НС [23].

4.3.2. Моделювання специфічних небезпек сошникового агрегату

На основі аналізу конструктивних особливостей модернізованого сошника та підвищеної робочої швидкості [16], моделюються типові небезпечні ситуації:

Таблиця 4.1

Моделювання небезпек

Небезпечна Умова (НУ)	Небезпечна Дія (НД)	Небезпечна Ситуація (НС)	Кінцевий Результат
НУ (Конструкція): Наявність гострих елементів на утримуючій п'ятці та відвальниках щоби сошника [19]	НД (Порушення): Оператор проводить ручне налагодження сошника без вимкнення двигуна трактора	НС (Контакт): Травмування кінцівок рухомими або гострими елементами сошника [23]	Травма (Т)
НУ (Технологічний): Робота на підвищеній швидкості ($V > 10$ км/год), що збільшує інерцію агрегату [16]	НД (Неуважність): Оператор не знизив швидкість при проходженні ділянки з перешкодами або на схилі	НС (Втрата контролю): Неконтрольоване зміщення сівалки або перекидання агрегату [23]	Аварія (А)
НУ (Організаційний): Незадовільний технічний стан захисних кожухів приводних механізмів сівалки	НД (Недотримання): Працівник одягнений у вільний робочий одяг, що не відповідає вимогам безпеки [19]	НС (Затягування): Захоплення елементів одягу обертовими вузлами сівалки (ланцюговими передачами)	Травма (Т)
НУ (Виробничий): Робота з протруєним насінням без ефективної аспірації та герметизації бункерів	НД (Халатність): Працівник не використовує респіратор і рукавички під час завантаження насіння [19]	НС (Вплив): Потрапляння токсичних агрохімікатів в організм через дихальні шляхи або шкіру	Отруєння (О)

4.3.3. Висновки для зменшення шкідливого впливу

Проведене моделювання, засноване на методології [23], дозволяє розробити цільові заходи для зменшення шкідливого впливу:

Конструктивні Заходи: Встановлення надійних, легкознімних захисних кожухів на всі обертові частини. Мінімізація гострих кромек у зоні доступу під час регламентного обслуговування сошника.

Організаційні Заходи: Суворе впровадження інструкцій, що забороняють будь-яке обслуговування агрегату при працюючому двигуні. Чітке обмеження максимальної робочої швидкості на небезпечних ділянках поля [16].

Технічні Заходи: Регулярний контроль технічного стану, що попереджує виникнення небезпечних умов.

Висновки до розділу

Проведений комплексний аналіз потенційних ризиків, пов'язаних з експлуатацією модернізованого посівного агрегату, дозволив обґрунтувати необхідні організаційно-технічні заходи для забезпечення безпеки праці.

Ідентифікація та Аналіз Факторів Ризику: Встановлено, що підвищення робочої швидкості агрегату, яке забезпечується модернізованим сошником, посилює вплив низки небезпечних і шкідливих виробничих факторів. До небезпечних факторів віднесено ризик травмування рухомими та гострими частинами сошника і приводних механізмів, а також транспортні ризики при високошвидкісному маневруванні [16, 19]. Шкідливі фактори включають підвищений шум, вібрацію та психофізіологічне напруження оператора [16].

Забезпечення Санітарно-Гігієнічних Умов: Для нейтралізації шкідливих факторів розроблено низку організаційно-технічних заходів [19]: Шум і Вібрація: Обґрунтовано необхідність технічного обслуговування віброактивних вузлів та обов'язкового застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) органів слуху при перевищенні допустимих норм [23]. Мікроклімат і Запиленість: Впровадження контролю за герметичністю кабіни трактора, ефективною роботою систем вентиляції та забезпечення працівників ЗІЗ органів дихання (респіраторами) для захисту від пилу та протруйників [19]. Психофізіологічне Навантаження: Критично важливим є розробка та суворе дотримання раціонального режиму праці та відпочинку (РПВ) для запобігання перевтомі при роботі на високій швидкості [16]. Моделювання та Запобігання Аваріям: Застосування методу логічного моделювання небезпечних ситуацій дозволило виявити причинно-наслідкові зв'язки, що призводять до травмування (наприклад, поєднання гострих елементів сошника та порушення інструкцій при налагодженні) [23]. На основі моделювання розроблено профілактичні заходи, спрямовані на усунення небезпечних умов та запобігання небезпечним діям персоналу. Таким чином, впровадження розроблених у Розділі 4 заходів гарантує, що експлуатація модернізованого посівного агрегату, незважаючи на підвищення його продуктивності та швидкості роботи, буде відповідати всім чинним вимогам охорони праці та забезпечить безпечні умови для обслуговуючого персоналу.

РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПОСІВНОГО АГРЕГАТУ

5.1. Критерії оцінки економічної ефективності та вихідні дані

Техніко-економічне обґрунтування модернізації має підтвердити фінансову доцільність впровадження нових конструктивних рішень сошника. Критерії ефективності базуються на двох ключових показниках: підвищенні продуктивності та зростанні врожайності за рахунок поліпшення якості сівби [21].

Критерії Оцінки: Технологічна Ефективність: Збільшення продуктивності (П) за рахунок зростання швидкості [10, 27]. Економічна ефективність: Зниження собівартості робіт (С) та отримання додаткового прибутку від підвищення якості (Еяк) [1, 13].

Основні вихідні факти (Розділ 3): Швидкість: Модернізований агрегат працює на швидкості 10-12 км/год ($V_{\text{мод}}$) проти 7-8 км/год ($V_{\text{баз}}$) [10]. Опір: Зростання тягового опору сошника (R_x) становить лише 8-12 [26, 21].

Якість: Покращення якості сівби ($СКО_{\text{глибини}} \approx 1.0$ см, $CV_{\text{інтервалів}} \approx 18-20\%$) [1, 13].

5.2. Розрахунок продуктивності та зміни експлуатаційних витрат

А. Зростання Продуктивності Збільшення швидкості прямо впливає на змінну продуктивність ($\Pi_{\text{зм}}$), що є критичним для скорочення агротехнічних термінів сівби:

$$\Pi_{\text{зм}} = 0.1 \cdot B \cdot V \cdot \tau_{\text{зм}} \cdot \eta_{\text{зм}} \quad (5.1)$$

Встановлено, що завдяки зростанню робочої швидкості, годинна продуктивність агрегату збільшується на 25-35% порівняно з базовою моделлю [10].

Б. Зниження Собівартості Незважаючи на незначне зростання тягового опору [26], збільшення продуктивності призводить до зменшення питомих витрат.

Витрати Пального та Оплати Праці: Зростання Пзм\$ на 25-35% забезпечує зниження питомих витрат на 1 га (включаючи пальне, амортизацію та оплату праці) в середньому на 5-10% [21].

5.3. Визначення економічного ефекту від підвищення якості сівби

Найбільш вагомий економічний ефект досягається через підвищення врожайності (Еяк), що є прямим наслідком кращої роботи сошника [25].

А. Ефект від якості закладення насіння стабільність. Глибини та Волога: Забезпечення стабільної глибини закладення ($СКО \approx 1.0$ см) за допомогою утримуючої п'ятки [22] та покриття насіння вологим ґрунтом (понад 85%) завдяки відвальникам щоки [10] збільшує польову схожість [21].

Рівномірність Розміщення: Зниження Коефіцієнта варіації інтервалів (CV) до 18-20% за рахунок сповільнювача насіння [10] зменшує конкуренцію рослин. Цей фактор забезпечує підвищення врожайності просапних культур на {3-6\%}\$ [1, 3].

Б. Інтегральний економічний ефект та окупність. Річний економічний ефект (Ерічн) розраховується як сума ефекту від зниження собівартості (Етехн) та ефекту від якості:

$$E_{\text{річн}} = E_{\text{техн}} + E_{\text{як}} \quad (5.2)$$

Обчислення підтверджують, що основний прибуток формується за рахунок Еяк. Термін окупності додаткових капіталовкладень у модернізацію агрегату становить менше одного посівного сезону [21].

Висновки до розділу

Проведене техніко-економічне обґрунтування підтвердило високу економічну доцільність впровадження модернізованої конструкції сошника та технології високошвидкісної сівби. Економічний ефект досягається як за рахунок підвищення продуктивності, так і критичного поліпшення якості технологічного процесу.

Зростання Продуктивності та Зниження Собівартості: Експериментально обґрунтоване зростання робочої швидкості агрегату до 10-12 км/год [10] забезпечує збільшення годинної продуктивності на {25-35% порівняно з базовою моделлю. Незважаючи на незначне зростання тягового опору сошника (на 8-12%) [26], збільшення продуктивності дозволяє знизити собівартість посівних робіт на 1 га в середньому на 5-10% [21], що доводить технічну та економічну доцільність модернізації.

Максимізація Врожайності через Якість Сівби: Основний річний економічний ефект (Ерічн) формується за рахунок підвищення якості сівби (Еяк\$) [25]. Стабільність глибини (СКОглибини ≈ 1.0 см), забезпечена утримуючою п'яткою [22], та рівномірність розміщення насіння ($CV \approx 18-20\%$) завдяки сповільнювачу [1, 13] зменшують конкуренцію рослин та сприяють підвищенню польової схожості. В результаті, підвищення якості сівби призводить до зростання врожайності просапних культур в середньому на 3-6% [1, 13].

Фінансова Окупність: Інтегральний розрахунок підтверджує, що додаткові капіталовкладення, необхідні для модернізації посівного агрегату, мають термін окупності, що не перевищує одного посівного сезону [21].

Таким чином, розроблена конструкція сошника та технологія високошвидкісної сівби є не лише технічно досконалою, але й високо економічно ефективною, забезпечуючи як економію експлуатаційних витрат, так і прямий прибуток від зростання врожайності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі виконаної роботи, спрямованої на обґрунтування технологічного процесу роботи та конструктивних параметрів сошника для просапних сівалок, було отримано такі основні результати та висновки:

Теоретично обґрунтовано, що серійні сошники порушують послідовність загортання через ущільнення стінок борозни, дозволяючи сухому ґрунту покривати насіння першим [10, 27]. Для вирішення цієї проблеми розроблено конструкцію з інтегрованою утримуючою п'яткою для стабілізації глибини та відвальниками щоки, які гарантують пошарове зміщення ґрунту, забезпечуючи покриття насіння вологим шаром [10].

Експерименти підтвердили ефективність модернізації: сошник забезпечує Середньоквадратичне відхилення глибини в межах 0.8-1.1 см при швидкості до 10 км/год [21]. Завдяки сповільнювачу насіння [10], вдалося знизити Коефіцієнт варіації інтервалів (CV) до 18-20% [1, 13]. Це досягнуто при незначному зростанні тягового опору сошника (на 8-12%) [26], що є прийнятним з огляду на зростання якості та швидкості роботи.

Проведено аналіз шкідливих і небезпечних факторів (шум, вібрація, ризик травмування гострими елементами сошника), посилені високошвидкісною роботою [16, 19]. Розроблені організаційно-технічні заходи, включаючи використання ЗІЗ та встановлення раціонального режиму праці та відпочинку, а також моделювання небезпечних ситуацій [23], гарантують безпечну експлуатацію агрегату.

Обґрунтовано, що робота на швидкості 10-12 км/год забезпечує зростання годинної продуктивності агрегату на 25-35% [10, 27] та зниження собівартості робіт на 5-10% [21]. Найбільший економічний ефект досягається через підвищення врожайності на 3-6% [1, 13] внаслідок покращення якості сівби. Термін окупності капіталовкладень не перевищує одного посівного сезону [21].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ahmad F, Adeel M, Qiu B J, Ma J, Shoaib M, Aamir S, et al. Sowing uniformity of bed-type pneumatic maize planter at various seedbed preparation levels and machine travel speeds. *Int J Agric & Biol Eng*, 2021; 14(1): 165–171. <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/5054> (дата звернення: 19.11.2025).
2. Aliiev E., Tesliuk H., Puhach A., Kobets O., Zolotovska O., Boiko V. (2023). Improving the work process efficiency of a tillage module for pre-sowing tillage. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (124)), 60–71. DOI: 10.15587/1729 4061.2023.284597 (дата звернення: 19.11.2025).
3. Artemenko, D., S. Leshchenko, V. Onopa, V. Majara, and V. Deikun. Analysis of the combined coulter point of the precision seed drill. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 24(4), 2022: 57-71. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7435/3947> (дата звернення: 19.11.2025).
4. Астрейко, Д. Д. Удосконалення конструкції сошникової групи просапної сівалки VEGA 8 PROFİ : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. Д. В. Богатирьов ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 86 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/15999> (дата звернення: 19.11.2025).
5. Батіг, Д. В. Механізація вирощування проса з удосконаленням посівної секції зернової сівалки : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 208 «Агроінженерія» / наук. кер. В. М. Сало ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 67 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/16007> (дата звернення: 19.11.2025).
6. Безверхній П. Є. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневматичної сівалки точного висіву : дис. на здобуття освітньо-наукового ступеня д-ра філософії (PhD) : 133 «Галузеве машинобудування» (13 «Механічна інженерія») / Безверхній Петро Євгенович ; Дніпровський

- державний аграрно-економічний університет. – Дніпро, 2024. – 248 с. – Режим доступу : <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10942> (дата звернення: 19.11.2025).
7. Бугайов М. А. Удосконалення технологічного процесу сівби насіння гідропневматичною сівалкою з розробкою сошника : дипломний проект ступеня вищ. освіти «Бакалавр» : 208, Агроінженерія / Микита Акмальович Бугайов ; наук. кер. Владислав Борисович Бойко ; Дніпровський державний аграрно-економічний ун-т. – Дніпро, 2023. – 73 с. – Режим доступу : URI <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7987> (дата звернення: 19.11.2025).
 7. Бурлака, С. А., & Кириченко, Р. В. (2023). Шляхи удосконалення робочих органів сівалок для точного землеробства. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 4 (111). С. 37-46. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-6 (дата звернення: 19.11.2025).
 8. Веселовська Н. Р., Шаргородський С. А., Руткевич В. С., Моторна О. О. «Технологічні основи сільськогосподарського машинобудування»: навч. посіб. Вінниця: Твори, 2020. 355 с.
 9. Гулий Д. О. Удосконалення процесу механізації сівби з розробкою сошника сівалки УПС-8 : дипломний проект ступеня вищ. освіти «Бакалавр» : 208, Агроінженерія / Дмитро Олександрович Гулий ; наук. кер. Олександр Миколайович Кобець ; Дніпровський державний аграрно-економічний ун-т. – Дніпро, 2023. – 64 с. – Режим доступу : URI <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7998> (дата звернення: 19.11.2025).
 10. Дмитро Артеменко. Дослідження конструкційних параметрів елементів сошника для посіву просапних культур. *Науково-технічні дослідження у галузі механічної інженерії та транспорту: колективна монографія* / заг. ред. А.А. Кашканова. – Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г.М. – 2023. – С. 72-110. https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2023/05/mech_transport.pdf (дата звернення: 19.11.2025).
 11. Cao X, Wang Q, Xu D, Huang S, Wang X, Wang L. Design and Analysis of Pneumatic Downforce Regulating Device for No-Till Corn Planter. *Agriculture*.

- 2022; 12(10):1513. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101513> (дата звернення: 19.11.2025).
12. Криштопа, Є. М. Механізація вирощування сорго з дослідженням параметрів сошника просапної сівалки : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 208 «Агроінженерія» / наук. кер. Д. Ю. Артеменко ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 62 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/15206> (дата звернення: 19.11.2025).
 13. Kuş, E., & Yildirim, Y. (2020). Effects of Seed Drop Height and Tillage System on the Emergence Time and Rate in the Single Seed Planters. *Alinteri Journal of Agriculture Science*, 35(1), 69-76. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.739387> (дата звернення: 19.11.2025).
 14. Li M W, Xia X M, Zhu L T, Zhou R Y, Huang D Y. Intelligent sowing depth regulation system based on Flex sensor and Mamdani fuzzy model for a no-till planter. *Int J Agric & Biol Eng*, 2021; 14(6): 145–152. <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/5939/pdf> (дата звернення: 19.11.2025).
 15. Літнарівч, В. О. Механізація вирощування кормових бобів з модернізацією просапної сівалки : кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 208 «Агроінженерія» / наук. кер. Д. Ю. Артеменко ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 59 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/15870> (дата звернення: 19.11.2025).
 16. Ляшенко, С. В., & Наріжна, Є. В. АНАЛІЗ РІВНІВ НЕБЕЗПЕК І ШКІДЛИВОСТЕЙ ЯКІ ПРИТАМАННІ ВИКОНАННЮ МЕХАНІЗОВАНИХ ПРОЦЕСІВ У РОСЛИННИЦТВІ. *ІННОВАЦІЙНІ АСПЕКТИ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ, ЗАХИСТУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ*, 176. <https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/6160/1/%D0%9F%D0%BE%D0%B%D1%82%D0%B0%D0%B2%D0%B0%202019.pdf#page=176> (дата звернення: 19.11.2025).
 17. Мазур В.А., Ткачук О.П., Дідур І.М., Панцирева Г.В. Особливості технології вирощування малопоширених зернобобових культур: монографія. Вінниця:

- ТВОРИ, 2021. 172 с. <http://repository.vsau.org/getfile.php/29427.pdf> (дата звернення: 19.11.2025).
18. Муленко, К. А. Модернізація та обґрунтування параметрів робочих органів секції просапної сівалки : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. Д. Ю. Артеменко ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – 67 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17498> (дата звернення: 19.11.2025).
 19. Охорона праці в галузі та цивільний захист [Електронний ресурс] : навчальний посібник / В. М. Курепін, К. М. Горбунова, В. М. Курепін [та ін.]. Миколаїв : МНАУ, 2020. 266 с. <http://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/8596> (дата звернення: 19.11.2025).
 20. Пилипенко, В. С. Механізація вирощування цибулі з модернізацією просапної сівалки : кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 208 «Агроінженерія» / наук. кер. Д. Ю. Артеменко ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – 67с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17316> (дата звернення: 19.11.2025).
 21. Порівняльні показники роботи сошників двох типів / В. М. Сало, С. М. Лещенко, Б. Г. Вовнянко, С. М. Мороз // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин* : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 160-167. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/16357> (дата звернення: 19.11.2025).
 22. Посівна секція : пат. 156272 Україна: МПК А01 С7/00, А01 С7/20 / Вовнянко Б.Г., Лещенко С.М., Сало В.М., Сало Л.В. Власник: Центральноукраїнський національний технічний університет. № u2023 06147, заявл. 18.12.2023; опубл. 29.05.2024, бюл. № 22/2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1801165/> (дата звернення: 19.11.2025).
 23. Прокопенко, Е. В., Лісовий, І. О., & Лісова, Т. С. (2015). Моделювання виробничих небезпек та зменшення їх шкідливого впливу під час проведення механізованих робіт. *Збірник наукових праць Уманського національного*

- університету садівництва, (87 (1)), 79-86.
<http://lib.udau.edu.ua/handle/123456789/1693> (дата звернення: 19.11.2025).
24. Семенюк, М. В. Механізація вирощування кукурудзи з модернізацією посівної секції просапної сівалки : кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 208 «Агроінженерія» / наук. кер. В. М. Сало ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – 64 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17037> (дата звернення: 19.11.2025).
25. Смірнов, Д. Р. Модернізація та обґрунтування параметрів загортальних елементів сошника секції просапної сівалки : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. Д. Ю. Артеменко ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – 70 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17454> (дата звернення: 19.11.2025).
26. Trukhanska O., Hadaichuk M. Ensuring reliability and resource conservation coulters discs of grain seeders. *Vibrations in engineering and technology*. 2023. № 3 (110). P. 61-69. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-7 (дата звернення: 19.11.2025).
27. Верховний В.В. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми висівного апарату просапної сівалки [Електронний ресурс]. <https://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/26504.pdf> (дата звернення: 19.11.2025).

ДОДАТКИ