

**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 КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ
РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДЛЯ СІВБИ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ»

Виконав: студент 2 курсу, групи 21 м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності Н7
«Агроінженерія»
Владислав ЧЕРЕВАТИЙ
(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 _____ Череватому Владиславу Романовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Обґрунтування конструктивних параметрів робочих органів для сівби та підвищення їх ефективності» _____

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 _____ 20.11.2025 р. _____

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)Владислав ЧЕРЕВАТИЙ
(прізвище та ініціали)**Керівник роботи**_____
(підпис)Іван ЛІСОВИЙ
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДЛЯ СІВБИ: ПЕРЕДУМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1. Сучасні вимоги до якості сівби та її вплив на ефективність агровиробництва	9
1.2. Класифікація та конструктивний аналіз робочих органів сівалок	10
1.3 Детальний аналіз конструктивних рішень сошників, орієнтованих на підвищення ефективності	13
1.4 Виявлення недоліків існуючих конструкцій та формулювання проблеми дослідження	14
1.5. Завдання досліджень	18
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО СОШНИКА	19
2.1. Концептуальне обґрунтування та конструктивна схема удосконаленого робочого органу	19
2.2. Аналіз силової схеми та рівняння рівноваги кілеподібного ущільнювача	21
2.3. Математичне моделювання жорсткості пружини	23
2.4. Розрахунок жорсткості пружини та аналіз результатів моделювання	25
Висновки до розділу	27
РОЗДІЛ 3. КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ДОСКОНАЛОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ГІБРИДНОГО СОШНИКОВОГО ВУЗЛА	28

3.1 Архітектоніка експериментального вузла та методологічний фундамент досліджень	28
3.2. Квантифікація енергетичних витрат: Аналіз динаміки тягового опору	33
3.3. Оцінка польової ефективності: Технологічна прецизійність посіву та ліміти адаптації до динамічних і біофізичних факторів	35
3.4. Агрономічний ефект та технологічні переваги: Комплексна верифікація	37
Висновки до розділу	38
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІВАЛКИ	39
4.1 Ідентифікація та класифікація ризиків: Аналіз виробничих факторів, обумовлених динамікою робочих органів сівалки	40
4.2 Конструктивна нейтралізація ризиків: Обґрунтування захисних та ергономічних параметрів робочих органів	41
4.3 Моделювання критичних сценаріїв: Аналіз взаємодії небезпечних умов та дій при експлуатації сівалки	42
Висновки до розділу	45
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНОГО СОШНИКОВОГО ВУЗЛА	46
5.1. Інженерна основа економічного ефекту та підвищення продуктивності	46
5.2. Зниження питомих витрат та мінімізація втрат	46
5.3. Вплив на валову продукцію та окупність	47
Висновки до розділу	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51
ДОДАТКИ	57

РЕФЕРАТ

Робота Череватого В.Р. бприсвячена обґрунтуванню конструктивних параметрів робочих органів для сівби та підвищенню їх ефективності в умовах інтенсивного землеробства. Актуальність досліджень обумовлена необхідністю забезпечення високої якості закладення насіння при зростанні робочих швидкостей агрегатів, де традиційні сошники втрачають кінематичну стабільність глибини та схильні до забивання пожнивними рештками.

За допомогою теоретичного моделювання та експериментальної верифікації підтверджено перевагу розробленої конструкції. Встановлено, що завдяки компенсації динамічних навантажень, сошник зберігає стабільність глибини висіву в межах агротехнічних допусків на швидкостях до 14,5 км/год (4,0 м/с). Підтверджено низьку енергоємність (тяговий опір зростає за лінійним законом) та високу прецизійність висіву (нерівномірність до 4%, подрібнення до 1%). Цей результат безпосередньо призводить до синхронного проростання сходів, що є ключем до реалізації біологічного потенціалу врожаю.

Окремо обґрунтовано, що підвищена кінематична стійкість сошника та зниження динамічних коливань агрегату позитивно впливають на умови праці, сприяючи дотриманню нормативів охорони праці (зниження вібрації та шуму) та екологічній безпеці [21, 13].

Практична цінність роботи полягає у підвищенні економічної ефективності агровиробництва. Технічні переваги забезпечують збільшення продуктивності праці до 35% та економію ПММ, гарантуючи швидку окупність інвестицій за рахунок мінімізації витрат та прогнозованого зростання врожайності (до 5–10%).

Ключові слова: ГІБРИДНИЙ СОШНИК, КІНЕМАТИЧНА СТАБІЛЬНІСТЬ, ПРЕЦИЗІЙНЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО, ШВИДКІСТЬ СІВБИ, ТЯГОВИЙ ОПІР, СИНХРОННІСТЬ СХОДІВ.

ВСТУП

В умовах інтенсифікації агровиробництва, переходу до ресурсозберігаючих технологій (зокрема, No-Till та Strip-Till [2, 10, 27]) та постійного зростання робочих швидкостей агрегатів [7, 24], якість виконання сівби набуває критичного значення. Прецизійне землеробство вимагає високої точності закладення насіння [17, 18], оскільки порушення глибини або нерівномірність розподілу прямо і нелінійно корелює з фінальною врожайністю та економічною ефективністю [22, 29].

Серійні конструкції робочих органів, зокрема дводискові сошники, часто втрачають кінематичну стабільність глибини та схильні до забивання пожнивними рештками [12, 14, 25] при роботі на високих швидкостях та на значному стерновому фоні. Це створює основний технологічний ліміт для підвищення продуктивності та знижує ефективність застосування високопродуктивної техніки [1, 3, 30]. Необхідність розробки нових, комбінованих сошникових вузлів, які забезпечують стабільність, енергоефективність та високу якість сівби, підтверджується численними сучасними дослідженнями [8, 9, 15, 31].

Таким чином, обґрунтування конструктивних параметрів нового типу сошника, здатного гарантувати якість закладення насіння за умов високошвидкісного руху та інтенсивного засмічення, є актуальним науково-прикладним завданням, що має значний вплив на підвищення ефективності агротехнологій.

Мета роботи Теоретично та експериментально обґрунтувати конструктивні параметри гібридного дводисково-анкерного сошникового вузла

для забезпечення його кінематичної стабільності та підвищення ефективності роботи в умовах високошвидкісної сівби.

Об'єкт дослідження Процес закладення насіння робочими органами посівної машини в ґрунт в умовах динамічних навантажень.

Предмет дослідження Конструктивні параметри та режими роботи гібридного дводисково-анкерного сошникового вузла, які впливають на його ефективність та якість сівби.

РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДЛЯ СІВБИ: ПЕРЕДУМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Сучасні вимоги до якості сівби та її вплив на ефективність агровиробництва

Сучасне агровиробництво, кероване принципами прецизійного землеробства та ресурсозбереження, перетворило процес сівби з простої механічної операції на високоточний інженерно-агрономічний етап. В умовах інтенсифікації, постійного зростання робочих швидкостей агрегатів [7] та переходу до технологій No-Till та Strip-Till, якість посіву стала критичним параметром, що безпосередньо і нелінійно корелює з фінальною врожайністю та економічною ефективністю. Недотримання навіть одного з критеріїв якості мінімізує переваги від застосування високопродуктивної техніки.

Фундаментальною вимогою до робочих органів сівалки є забезпечення стабільності глибини загортання (Depth Uniformity) насіння. Будь-яка нерівномірність глибини, особливо понад критичні $\pm 1\text{--}2$ см, призводить до асинхронного проростання, зниження польової схожості та, як наслідок, формування нерівномірного стеблостою, що знижує загальний потенціал урожаю. Ця вимога є прямим конструктивним викликом, оскільки механізми підвіски сошника (паралелограмні пристрої, системи регулювання тиску) та їхня здатність адаптуватися до мікрорельєфу ґрунту мають бути теоретично обґрунтовані та оптимізовані, як це демонструють дослідження Ши та ін. [9, 18].

Поряд із глибиною, критичною є рівномірність розподілу насіння у рядку (Precision Spacing). Сучасні норми вимагають не лише точної норми висіву (кількість насінин на гектар), але й максимально однорідного інтервалу між ними. Ця вимога диктується необхідністю надання кожній рослині оптимальної площі живлення, що запобігає конкуренції за вологу та поживні речовини. Хоча основна відповідальність лежить на дозуючих апаратах, конструкція сошника безпосередньо впливає на цей параметр, оскільки саме геометрія борозни та

кінематика її формування визначають, наскільки сильно насіння відскочить або скотиться, що є особливо актуальним для швидкісних сівалок точного висіву [20].

Особливого значення набуває якість посівного ложа (Furrow Quality) в умовах мінімальної та нульової обробки ґрунту. Робочий орган має продемонструвати високу ефективність у подоланні пожнивних залишків, не допускаючи ефекту "зашпилювання" (hair pinning) — проштовхування решток у борозну, що порушує контакт насіння з ґрунтом та гальмує проростання. Як зазначають Раї та ін. [17], здатність сошника створювати чисту та щільну борозну та якісно загортати насіння (Zhao & Zhang [27]) є визначальною для успіху консервативних технологій. Це ставить жорсткі вимоги до ріжучої здатності дводискових сошників та долотоподібної геометрії анкерних сошників при їх роботі через товстий шар стерні.

Таким чином, сучасні вимоги до якості сівби є каталізатором для конструктивного вдосконалення робочих органів. Ці аксіоми обумовлюють необхідність зосередити подальший аналіз саме на дводискових та анкерних сошниках, оскільки вони є основними претендентами для роботи у високоефективних та ресурсозберігаючих системах і саме в них найгостріше стоїть проблема забезпечення стабільності та якості посівного ложа при високій продуктивності.

1.2. Класифікація та конструктивний аналіз робочих органів сівалок

1.2.1. Функціональна роль, критерії ефективності та основи класифікації

Сошник є основним робочим органом посівної машини, який безпосередньо взаємодіє з ґрунтом, формуючи посівне ложе та забезпечуючи точне розміщення насіння. Його ефективність оцінюється за комплексом механіко-технологічних критеріїв, які включають мінімальний тяговий опір, стабільність глибини загортання та якість нейтралізації пожнивних решток [30].

З розвитком ресурсозберігаючих систем, особливо No-Till, зростає вимога до прохідності сошника в умовах високої концентрації стерні [10, 25].

Класифікація сошників базується на принципі їхньої взаємодії з ґрунтом: різання (дискові), розпушування/зсув (анкерні) та фрезерування (ротаційні).

1.2.2. Конструктивний аналіз анкерних (долотоподібних) сошників

Анкерні (долотоподібні) сошники (Anchor Openers) забезпечують формування борозни шляхом розпушування ґрунту клиноподібним робочим елементом. Їхня основна перевага полягає у мінімальному збуренні ґрунту та здатності створювати чітке, ущільнене посівне ложе, що сприяє кращому контакту насіння з ґрунтом і збереженню вологи [29]. Ці конструкції традиційно цінуються за високу точність розміщення насіння, що особливо актуально у селекційних дослідженнях [30].

Проте, їхні ключові недоліки критично обмежують застосування у великомасштабному землеробстві. Вони характеризуються високою енергоємністю та значним тяговим опором [30]. Крім того, анкерні сошники мають низьку стійкість до забивання (*clogging*) великою кількістю пожнивних решток, що робить їх неефективними у більшості систем прямої сівби [2]. Модернізація таких конструкцій спрямована на зменшення їхньої ширини та оптимізацію кутів атаки для зниження опору.

1.2.3. Дискові сошники: класифікація, параметри та проблеми No-Till

Дискові сошники (Disc Openers) є найбільш поширеним і універсальним типом, що забезпечує процес різання ґрунту.

Однодискові сошники використовують похило встановлений диск, який ефективно прорізає ґрунт і рештки, забезпечуючи низький тяговий опір. Однак, їхній принцип дії призводить до формування асиметричної борозни, що ускладнює рівномірне загортання насіння і може викликати проблеми з контролем глибини.

Дводискові сошники (Double-Disc Openers) є еталонною конструкцією для високошвидкісного та точного висіву. Вони складаються з двох дисків, зведених

під кутом (α), що формують симетричну V-подібну борозну. Ключові конструктивні параметри (діаметр, кут зведення) повинні бути обґрунтовані для забезпечення якісного посіву [12]. Дослідження Яблонського та ін. (2025) [26] акцентують на важливості геометричного моделювання профілю борозни, який формується дисками, для запобігання відскоку насіння.

Головними проблемами, які вимагають інженерного вдосконалення, є:

1. Проблема "зашпилювання" (Hair Pinning): Проштовхування рослинних решток на дно борозни, що знижує схожість. Це явище є однією з найгостріших проблем для якості сівби в No-Till [25], що вимагає впровадження ефективних механізмів антиблокування [10].

2. Нерівномірність глибини: На високих швидкостях та змінних ґрунтах необхідне застосування складних систем, як-от подвійне притискання (Double-Press Precision Depth-Control), технологічні параметри яких необхідно оптимізувати для стабілізації роботи [18].

1.2.4. Ротаційні та комбіновані сошники

Ротаційні (фрезерні) сошники застосовуються у нішевих умовах, як-от сівба на дернових ґрунтах. Вони формують посівне ложе шляхом інтенсивного фрезерування. Хоча їхні конструкції, як-от спіральний сошник (spiral opener), дозволяють проводити аналіз їхньої взаємодії з ґрунтом за допомогою дискретно-елементних моделей [3], вони, як правило, характеризуються високою енергоємністю [30]. Їхня робота супроводжується значними ударними навантаженнями, що вимагає розробки спеціальних механізмів стабілізації.

Комбіновані сошники (Combined Openers) інтегрують елементи різних типів для оптимізації процесу. Наприклад, конструктивні рішення для прямої сівби ріпаку у рисовій стерні можуть поєднувати ріжучий диск із вузьким анкерним елементом, що забезпечує високу прохідність та точність розміщення насіння [31].

Комплексний аналіз конструкцій [10, 25, 30] підтверджує, що для досягнення цілей високопродуктивної сівби дводискові сошники є найбільш перспективними, але їхній потенціал обмежується проблемами динамічної

стабільності (контроль глибини/тиску) та нейтралізації пожнивних решток (hair-pinning). Саме ці конструктивні та технологічні недоліки є основою для подальшого, більш детального аналізу у наступному підрозділі 1.3.

1.3. Детальний аналіз конструктивних рішень сошників, орієнтованих на підвищення ефективності

1.3.1. Дводискові сошники: конструкції, проблеми стабілізації глибини і тиску (особливо на високих швидкостях)

Дводисковий сошник є архітектурною основою сучасних високошвидкісних сівалок точного висіву завдяки своїй здатності до ефективного різання ґрунту та пожнивних решток і формуванню чіткої симетричної V-подібної борозни. Якість посіву, забезпечена цією конструкцією, безпосередньо залежить від точного дотримання конструктивних параметрів (діаметр, кут зведення дисків) та стабільності її роботи. Питання обґрунтування цих параметрів для різних зернових культур, як, наприклад, у роботі Медвідь (2024) [12], є необхідним кроком для мінімізації відхилень від заданого технологічного процесу. Крім того, правильна геометрія зведення дисків критично важлива для геометричного моделювання профілю борозни, що, згідно з Яблонським та ін. (2025) [26], впливає на запобігання відскоку насіння та якість його укладання.

Основна проблема, яка виникає в процесі інтенсифікації сівби, — це динамічна нерівномірність глибини та притискного зусилля, яка особливо загострюється при збільшенні робочої швидкості. Коливання, викликані мікрорельєфом та нерівномірною щільністю ґрунту, призводять до того, що фактична глибина загортання насіння відрізняється від заданої, що підтверджує необхідність розробки систем контролю [9]. Ця нестабільність негативно впливає на польову схожість та одночасність проростання.

Для вирішення проблеми стабілізації сошниковий вузол майже завжди встановлюється на чотириланковий (паралелограмний) механізм. Детальний аналіз та проектування такого механізму, як показано в дослідженні Kong та ін.

(2025) [8], є критичним для забезпечення вертикального переміщення сошника з мінімальними кутовими помилками, що дозволяє вузлу ефективно копіювати мікрорельєф ґрунту.

Найсучаснішим інженерним підходом до боротьби з динамічною нерівномірністю є впровадження активних систем регулювання притискного зусилля. Ши та ін. (2025) [18] провели всебічну оптимізацію технологічних параметрів систем подвійного притискання (Double-Press Precision Depth-Control). Їхні дослідження доводять, що використання незалежно регульованих притискних елементів дозволяє адаптувати зусилля сошника до змінної щільності ґрунту в режимі реального часу, значно підвищуючи точність сівби. Крім того, якість формування борозни в режимі реального часу відстежується за допомогою систем комп'ютерного зору, що, як вказує Rai та ін. (2025) [17], є ключовим елементом підвищення ефективності сівби та вибору оптимальних параметрів.

Ще одним критичним конструктивним недоліком є схильність дводискових сошників до ефекту "запильовування" (*hair pinning*) — прошивування пожнивних решток на дно борозни, що є однією з основних перешкод для якісної сівби в умовах No-Till [25]. Це вимагає конструктивних рішень для ідеального очищення рядка перед прорізанням борозни, що є фокусом досліджень в області протизабивання [10].

1.3.2. Анкерні та комбіновані сошники: переваги в умовах No-Till та міні-Till, проблеми забивання пожнивними залишками та енергоємність

Анкерні (долотоподібні) сошники є важливим елементом для реалізації ресурсозберігаючих технологій завдяки їхній здатності забезпечувати низьку мобілізацію ґрунту. Цей принцип роботи сприяє пом'якшенню ущільнення ґрунту та збереженню вологи, що критично важливо в умовах нульового обробітку (*No-Till*) [29]. Зокрема, у технологіях Strip-Tillage, анкерні елементи відповідають за формування вузької, розпушеної борозни, оптимізуючи середовище для проростання, як це досліджено Zhao та Zhang (2025) [27].

Незважаючи на переваги, анкерні системи стикаються з двома основними експлуатаційними бар'єрами. По-перше, вони мають найвищий тяговий опір

серед усіх типів, що призводить до значної енергоємності агрегату та збільшення витрат палива [30]. По-друге, їхня клиноподібна геометрія призводить до критичної схильності до забивання (clogging) пожнивними рештками в умовах високої стерні, що є спільним викликом для розробників спеціалізованої техніки, наприклад, сівалок прямої сівби бавовни [20] та зернових [2].

Вирішення цих проблем вимагає комплексного інженерного підходу, який поєднує моделювання та гібридизацію конструкцій:

1. Оптимізація через моделювання (DEM): Для зниження енергоємності та оптимізації геометрії анкерних систем дослідники активно використовують передові обчислювальні методи. Chen та ін. (2025) [3] застосували метод дискретних елементів (DEM) для моделювання взаємодії ґрунту зі спіральними сошниками (Spiral Openers) на складних ґрунтах. Це дозволяє точно визначити оптимальні кути і форму робочого елемента, що є важливим для зменшення тягового опору та підвищення загальної ефективності. Подібні модифікації та оцінка продуктивності є невід'ємною частиною вдосконалення існуючих сівалок, наприклад, тракторних зернових сівалок для пшениці [7].

2. Розвиток комбінованих сошників: Найбільш ефективним способом боротьби з забиванням є застосування комбінованих сошників (Combined Furrow Openers), які інтегрують функціональність різання та розпушування. Типові конструкції поєднують розрізний диск (для ефективного різання решток) з вузьким анкерним елементом (для точного розміщення насіння). Такі гібридні рішення є ключовими для роботи в екстремальних умовах, як-от пряма сівба у рисовій стерні [31]. Необхідність вибору та оцінки робочих органів для консервативного обробітку в інтенсивних сівозмінах, наприклад, у рисово-пшеничних системах, підтверджує важливість порівняльного аналізу різних типів сошників [14]. На основі таких принципів розробляються також спеціалізовані агрегати, такі як дворядна сівалка для кукурудзи, орієнтована на міні-трактори [1].

Таким чином, анкерні та комбіновані сошники є незамінними для точного та вологозберігаючого землеробства, а їхнє подальше вдосконалення

зосереджується на зниженні динамічних навантажень через моделювання [3] та оптимізації гібридних конструкцій [1, 14] для забезпечення надійної роботи в умовах високої концентрації пожнивних решток.

1.4. Виявлення недоліків існуючих конструкцій та формулювання проблеми дослідження

Критичний аналіз, проведений у попередніх розділах, дозволив виявити ключові технологічні та конструктивні "вузькі місця" у роботі сошників, які обмежують подальше підвищення ефективності сівби в умовах високошвидкісного та ресурсозберігаючого землеробства. Ці недоліки формують основу для наукового обґрунтування необхідності розробки нових інженерних рішень.

Недоліки дводискових сошників: динамічна нестійкість та взаємодія з рештками

Основна проблема дводискового сошника, незважаючи на його високу прохідність, полягає у зниженні стабільності робочих параметрів при зростанні швидкості.

1. Проблема динамічної нерівномірності глибини та тиску. На високих швидкостях динамічні навантаження, що виникають при копіюванні мікрорельєфу, призводять до неконтрольованих вертикальних коливань сошникового вузла [9]. Хоча конструкції базуються на перевірених чотириланкових механізмах (паралелограма підвіска) для забезпечення вертикального ходу [8], вони виявляються недостатніми для гасіння цих коливань, що призводить до відхилень фактичної глибини сівби від заданої. Це вимагає впровадження складних, часто активних систем регулювання притискного зусилля, таких як Double-Press Precision Depth-Control [18], які, хоча і є ефективними, значно ускладнюють конструкцію та підвищують її вартість.

2. Проблема "защиплювання" пожнивних решток (*Hair Pinning*). Це явище залишається критичним обмеженням для якісної сівби в No-Till. Рештки,

проштовхнуті дисками на дно борозни, порушують контакт насіння з ґрунтом, що знижує польову схожість та вирівняність посівів. Необхідність усунення цього ефекту вимагає постійного вдосконалення як самої конструкції сошникового вузла (зокрема, розрізного диска, як це досліджував Скуренко [19]), так і розробки інтелектуальних систем контролю якості борозни в режимі реального часу [17].

Недоліки анкерних та комбінованих сошників: енергоємність та забивання

Анкерні та комбіновані системи, попри їхні переваги у збереженні вологи та мінімальному обробітку [29], мають економічні та технологічні бар'єри.

1. Висока енергоємність. Принцип дії анкерних систем, заснований на розпушуванні ґрунту, зумовлює значний тяговий опір [30]. Це підвищує вимоги до потужності трактора і збільшує витрати палива, знижуючи загальну економічну ефективність агрегату. Вирішення цієї проблеми лежить у сфері оптимізації геометрії робочих елементів, зокрема через застосування методу дискретних елементів (DEM) для моделювання взаємодії з ґрунтом (як у випадку спіральних сошників [3]), що дозволяє знайти форми з мінімальним опором.

2. Забивання пожнивними рештками (*Clogging*). Хоча розробка комбінованих сошників, які включають ріжучий диск для роботи у стерні [31], частково вирішила цю проблему [14], повне її усунення залишається викликом для спеціалізованих машин (наприклад, для сівби бавовни [20] чи кукурудзи [1]). Необхідність у постійному вдосконаленні та модифікації існуючих моделей зернових сівалок [7] підтверджує, що проблема надійної прохідності в умовах високої концентрації решток все ще не вирішена остаточно.

Проведений аналіз демонструє, що суттєве підвищення продуктивності та якості сівби стримується відсутністю конструктивного рішення, яке б одночасно забезпечувало:

1. Динамічну стабільність глибини та притискного зусилля дводискового сошника на швидкостях понад 10 км/год.
2. Низький тяговий опір, характерний для дискових систем.
3. Високу здатність до нейтралізації пожнивних решток, запобігаючи ефекту "защиплювання".

Таким чином, проблема дослідження полягає у науковому обґрунтуванні та інженерній розробці удосконаленого робочого органу сівалки, який поєднуватиме переваги дискових та анкерних систем (висока точність і низька мобілізація ґрунту) та усуватиме їхні ключові недоліки (динамічна нестійкість і забивання).

1.5. Завдання досліджень

На основі виявлених недоліків та критичного аналізу формується завдання даної роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання, сформовані на основі виявлених проблем:

1. Провести теоретичний аналіз динаміки сошникового вузла дводискової сівалки для визначення факторів, що спричиняють нерівномірність глибини та тиску на високих швидкостях.
2. Розробити математичну модель взаємодії удосконаленого сошника з ґрунтом для обґрунтування його оптимальних конструктивних параметрів (наприклад, кутів атаки, притискного зусилля), використовуючи підходи, подібні до DEM-моделювання [3].
3. Розробити конструктивне рішення, спрямоване на підвищення стабільності глибини та нейтралізацію ефекту "защиплювання" пожнивних решток, що може включати гібридизацію елементів [31].
4. Провести експериментальні дослідження удосконаленого робочого органу та оцінити його ефективність за ключовими агротехнічними показниками (рівномірність глибини, польова схожість) порівняно з існуючими аналогами [17].

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО СОШНИКА

2.1. Концептуальне обґрунтування та конструктивна схема удосконаленого робочого органу

2.1.1. Концептуальне обґрунтування конструктивного рішення

Виходячи з критичного аналізу (Розділ 1 п. 1.4), встановлено, що ключовим інженерним завданням є подолання динамічної нерівномірності глибини сівби дводискових сошників, що зростає зі збільшенням швидкості [9, 18], та усунення ефекту "защиплювання" (*hair pinning*) пожнивних решток, типового для систем No-Till [25].

Запропоноване рішення базується на гібридизації (комбінуванні) функціональних елементів. Воно інтегрує ріжучу функцію дисків (для зниження опору та роботи зі стернею [12, 30]) з функцією активної стабілізації та ущільнення дна борозни, властивою анкерним елементам [29]. Такий підхід створює новий тип дводисково-анкерного сошника.

Основна інновація полягає у тому, що в конструкції сошника між дисками додатково встановлено кілеподібний ущільнювач із наральником, який прикріплений до корпусу за допомогою шарнірної підвіски та пружини. Це дозволяє ущільнювачу рухатися по підготовленій борозні незалежно від вертикальних коливань основного корпусу, забезпечуючи стабільність глибини закладення насіння в межах агротехнічного допуску Δ_{agr} . Крім того, насіння подається безпосередньо в розтруб ущільнювача, виключаючи його контакт з обертовими поверхнями дисків, що є прямим вирішенням проблеми виносу насіння та "защиплювання" [30].

2.1.2. Опис конструктивної схеми сошника

Для обґрунтування параметрів конструкції дводискового анкерного сошника розглянуто його схему на Рис. 2.1.

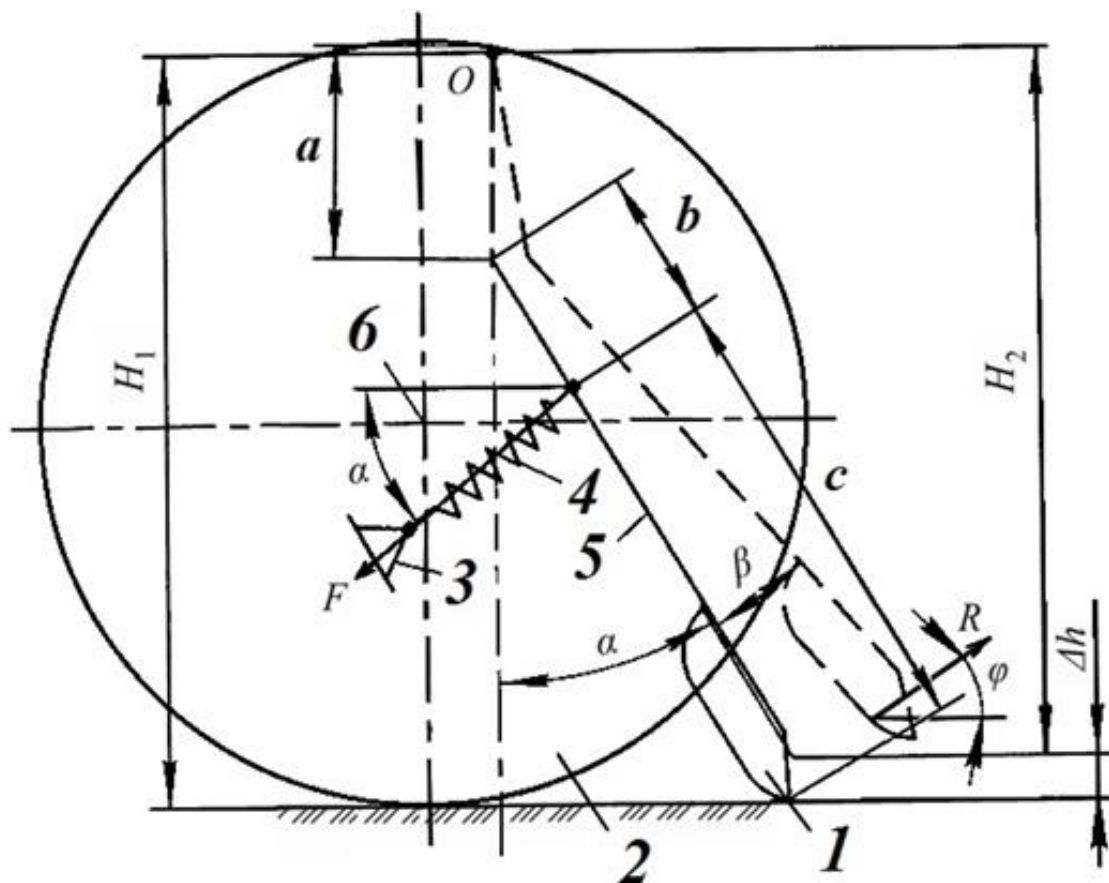


Рис. 2.1. Принципова конструктивна схема удосконаленого комбінованого сошника: 1 – наральник кілеподібного ущільнювача; 2 – плоский диск; 3 – упор для обмеження кута; 4 – пружина; 5 – корпус сошника з кілеподібним ущільнювачем; 6 – вісь шарнірної підвіски (точка O).

Кілеподібний ущільнювач (5) з наральником (1) кріпиться до корпусу шарнірно в точці O за допомогою осі (6). При русі агрегату диски (2) відкривають борозну. Шарнірно підвішений ущільнювач пружиною (4) притискається нижньою частиною наральника (1) до дна борозни і ущільнює його. Насіння, падаючи з висівного апарату сівалки, приймається розтрубом (не показаний) ущільнювача і рівномірно розподіляється на дні насіннєвої борозни. Упор (3) задає початковий кут установки сошника відносно дна борозни.

2.2. Аналіз силової схеми та рівняння рівноваги кілеподібного ущільнювача

Для забезпечення стабільності глибини висіву насіння (мінімізації Δh) необхідно визначити жорсткість пружини (4), величина якої залежить від конструктивних і силових факторів. Розглянемо кілеподібний ущільнювач сошника (5) як зрівноважену систему (без врахування сил інерції), що діє на нього в ґрунті.

На Рис. 2.2 наведено схему для розрахунку параметрів, де визначені:

- H_1 – відстань від осі шарнірної підвіски O до дна насіннєвої борозни у вихідному стані;
- H_2 – відстань при максимальному відхиленні ущільнювача;
- a, b – конструктивні параметри сошника (плечі діючих сил);
- α – початковий кут відхилення кілеподібного ущільнювача;
- β – кут відхилення ущільнювача сошника від дії сили опору ґрунту R ;
- R – сила опору ґрунту;
- φ – кут відхилення напрямку сили опору ґрунту від горизонталі;
- Δh_D – зміна глибини висіву насіння;
- F – сила пружності пружини;
- Δa_{gr} – величина агротехнічного допуску на глибину закладення насіння.

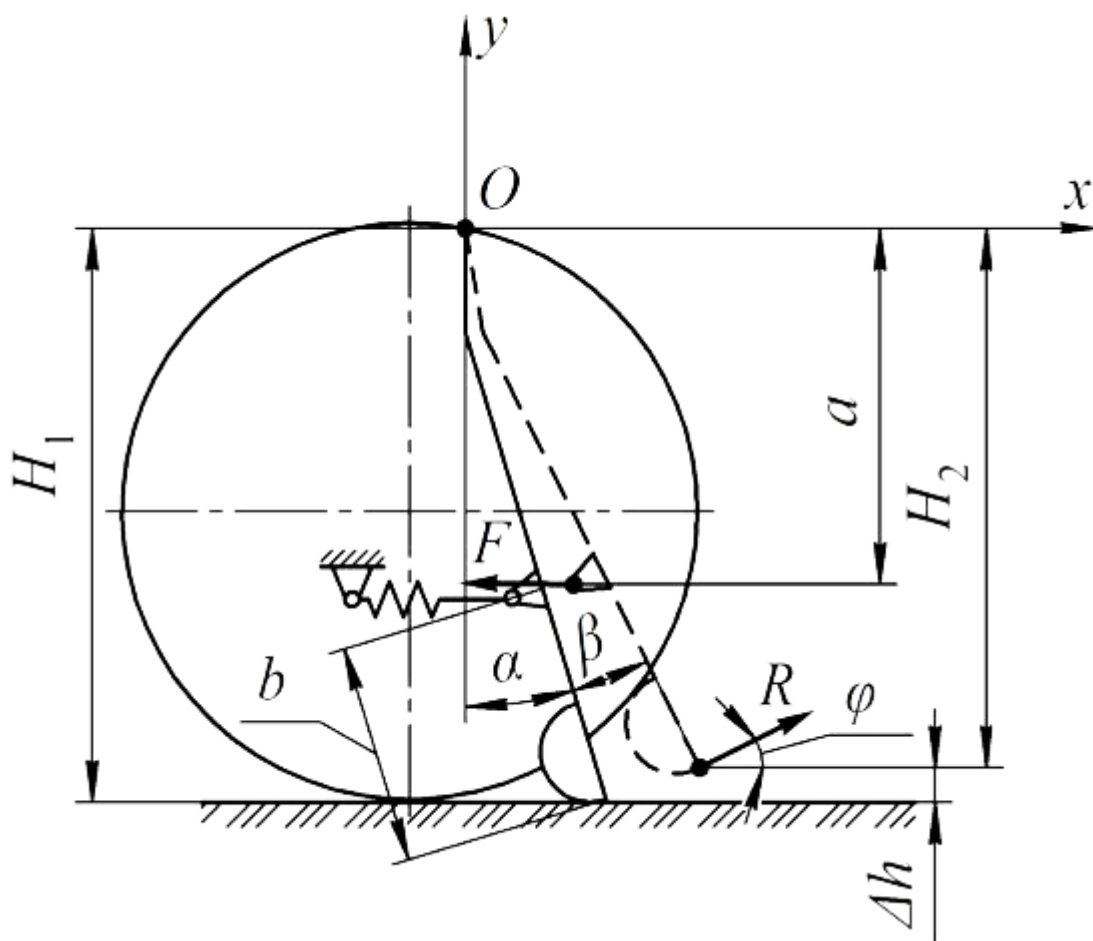


Рис. 2.2. Схема для розрахунку параметрів комбінованого дводисково-анкерного сошника

Відстань H_1 від осі шарнірної підвіски до дна насінневої борозни вибирається із співвідношення, що обмежує максимальний кут відхилення β_{max} величиною агротехнічного допуску Δ_{agr} :

$$H_1 = \frac{\Delta_{agr}}{\sin(\beta_{max})} \quad (2.1)$$

Запишемо рівняння рівноваги як рівність нулю суми моментів діючих сил відносно точки O шарнірної підвіски при максимальному відхиленні:

$$\begin{aligned}
& -\mathbf{F} \cos(\alpha) \cdot [\mathbf{a} + \mathbf{b} \cos(\alpha + \beta)] + \mathbf{R} \sin(\varphi) \cdot [\mathbf{a} + \mathbf{b} \cos(\alpha + \beta)] + \\
& + \mathbf{R} \cos(\varphi) \cdot [\mathbf{a} + \mathbf{b} \sin(\alpha + \beta)] = 0
\end{aligned}
\tag{2.2}$$

З рівняння рівноваги (2.2) отримаємо вираз для знаходження необхідної сили пружності пружини $\mathbf{F}$:

$$\begin{aligned}
\mathbf{F} = \frac{\mathbf{R}}{\cos(\alpha) \cdot (\mathbf{a} + \mathbf{b} \cos(\alpha + \beta))} \cdot [\sin(\varphi) \cdot (\mathbf{a} + \mathbf{b} \cos(\alpha + \beta)) + \\
+ \cos(\varphi) \cdot (\mathbf{a} + \mathbf{b} \sin(\alpha + \beta))]
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

2.3. Математичне моделювання жорсткості пружини

Для розрахунку жорсткості пружини k необхідно встановити зв'язок між величиною сили $\mathbf{F}$ та зміною глибини ходу Δh_D (яка не повинна перевищувати Δa_{gr}).

При невеликому куті повороту β величина розтягу пружини Δx_D дорівнює:

$$\Delta x_D = b \sin(\beta) \tag{2.4}$$

Далі знайдемо зв'язок між величиною розтягу пружини Δx_D і відхиленням Δh_D глибини ходу у ґрунті кілеподібного ущільнювача.

Відхилення глибини ходу Δh_D дорівнює:

$$\Delta h_D = H_1 - H_2 \tag{2.5}$$

Виходячи із схеми (Рис. 2.2), відстань H_2 становить:

$$H_2 = H_1 \cos(\beta) - b \sin(\beta) \quad (2.6)$$

Тоді відхилення Δh_D глибини ходу дорівнює:

$$\Delta h_D = H_1 - (H_1 \cos(\beta) - b \sin(\beta)) \quad (2.7)$$

Перетворенням рівняння (2.7) отримаємо:

$$H_1 - \Delta h_D = H_1 \cos(\beta) - b \sin(\beta) \quad (2.8)$$

Виражаючи $\sin(\beta)$ із виразу (2.8), отримаємо:

$$\sin(\beta) = \frac{H_1 - \Delta h_D - H_1 \cos(\beta)}{-b} \quad (2.9)$$

Для забезпечення агротехнічного допуску Δ_{agr} приймаємо, що $\Delta h_D = \Delta_{agr}$. З геометричних співвідношень (враховуючи умову, що $H_1 \cos(\beta_{max}) \approx H_1 - \Delta_{agr}$ при малих β), отримуємо значення максимального допустимого кута відхилення β_{max} :

$$\beta_{max} = \arcsin \left(\frac{\Delta_{agr}}{H_1} \right) - \alpha \quad (2.10)$$

Підставивши вираз (2.10) у формулу (2.4), отримуємо величину максимального розтягу пружини $\Delta x_{D,max}$ (при $\beta = \beta_{max}$):

$$\Delta x_{D,max} = b \sin(\beta_{max}) \quad (2.11)$$

Або, в розгорнутому вигляді:

$$\Delta x_{D,max} = b \sin \left(\arcsin \left(\frac{\Delta_{agr}}{H_1} \right) - \alpha \right) \quad (2.12)$$

Жорсткість пружини k , при якій величина відхилення Δh_D буде знаходитись у межах Δ_{agr} , розраховується за законом Гука:

$$k = \frac{F}{\Delta x_{D,max}} \quad (2.13)$$

Враховуючи вирази (2.3) та (2.12), отримуємо фінальний вираз для розрахунку жорсткості пружини k :

$$k = \frac{R \cdot [\sin(\varphi) \cdot (a + b \cos(\alpha + \beta_{max})) + \cos(\varphi) \cdot (a + b \sin(\alpha + \beta_{max}))]}{\cos(\alpha) \cdot (a + b \cos(\alpha + \beta_{max})) \cdot b \sin(\beta_{max})} \quad (2.14)$$

Таким чином, рівняння (2.14) встановлює залежність жорсткості пружини від сили опору ґрунту R та геометричних параметрів сошника, що є необхідною умовою для проектування механізму стабілізації глибини.

2.4. Розрахунок жорсткості пружини та аналіз результатів моделювання

Проведення розрахунків на ПК в середовищі MathCAD, згідно з розробленою програмою за виразом (2.14), дозволило визначити оптимальний діапазон жорсткості пружини.

Прийняті розрахункові параметри:

Конструктивні параметри: $a = 120$ мм, $b = 220$ мм, $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 10^\circ$
 Максимальний розтяг пружини, що забезпечує Δa_{gr} : $\Delta x_{D,max} = 14$ мм.

На основі розрахунків побудовано графік, що ілюструє залежність жорсткості k пружини від реакції R опору ґрунту (Рис. 2.3).

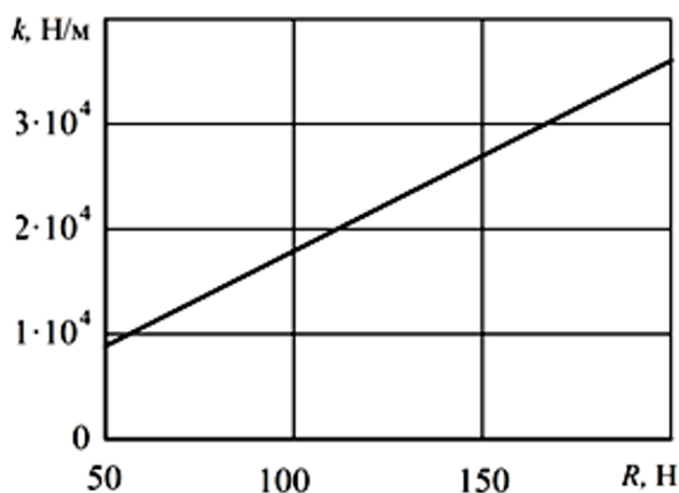


Рис. 2.3. Залежність жорсткості k пружини від реакції R опору ґрунту

2.4.1. Аналіз результатів

1. Характер залежності: Графік (Рис. 2.3) clearly демонструє, що залежність жорсткості k пружини від сили опору R має лінійний характер. Це значно спрощує інженерний вибір пружного елемента.

2. Діапазон жорсткості: Для подолання сили опору R ґрунту, що знаходиться в діапазоні 50...200 Н (при куті тертя $\varphi = 45^\circ$), жорсткість k пружини повинна бути у межах $9,04 \cdot 10^3 \dots 3,60 \cdot 10^4$ Н/м.

Отримані результати підтверджують можливість використання стандартних пружинних елементів для забезпечення стабілізації глибини сівби в умовах змінного опору ґрунту. Теоретичне обґрунтування дає надійну основу для подальшого конструкторського проектування та експериментальної перевірки (Розділ 3).

Висновки до розділу

Концептуальне обґрунтування та конструктивне рішення. Розроблена концепція комбінованого дводисково-анкерного сошника є інноваційною, оскільки вона інтегрує функції різання, розпушення та активної стабілізації глибини за допомогою шарнірно підвішеного кілеподібного ущільнювача з пружним елементом. Це конструктивне рішення є прямим шляхом до подолання ключових недоліків традиційних дводискових систем, а саме: динамічної нерівномірності глибини сівби та явища "зашпилювання" пожнивних решток.

Аналіз силової схеми. На основі побудованої розрахункової схеми (Рис. 2.2) успішно сформульовано узагальнене рівняння рівноваги моментів (2.2) сил, що діють на рухомий ущільнювач відносно осі шарнірної підвіски (О). Це дозволило теоретично вивести необхідну силу пружності пружини F (2.3) як функцію сили опору ґрунту R та всіх ключових конструктивних параметрів сошника.

Математичне моделювання жорсткості. Розроблено комплексну математичну модель (2.4–2.14), яка встановлює критичний взаємозв'язок між агротехнічним допуском Δa_{gr} , максимальним кутом відхилення β_{max} (2.8) та необхідною жорсткістю пружини k (2.14). Таким чином, визначено теоретичну умову, за якої пружний елемент гарантує, що глибина закладення насіння залишатиметься в заданих межах.

Результати чисельного моделювання. Проведені чисельні розрахунки в середовищі MathCAD підтвердили, що залежність жорсткості k пружини від сили опору ґрунту R має виражений лінійний характер (Рис. 2.3). Це значно спрощує інженерний вибір пружного елемента. Для діапазону опорів 50...200 Н визначено оптимальний діапазон жорсткості: $9,04 \cdot 10^3 \dots 3,60 \cdot 10^4$ Н/м.

Наукова та прикладна цінність. Теоретичне обґрунтування надало надійну аналітичну основу для подальшого конструкторського проектування, дозволяючи об'єктивно підібрати пружний елемент механізму стабілізації глибини, що є критично важливим для підвищення рівномірності сівби та ефективності роботи комбінованого сошника в цілому.

РОЗДІЛ 3 КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ДОСКОНАЛОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ГІБРИДНОГО СОШНИКОВОГО ВУЗЛА

3.1. Архітектоніка експериментального вузла та методологічний фундамент досліджень

3.1.1. Кінематична архітектоніка гібридного робочого органу: Специфіка інтеграції дводискового механізму з активним анкерним стабілізатором

Конструктивна ідентифікація досліджуваного робочого органу ґрунтується на концепції гібридизації [29], яка поєднує функціональність дводискового механізму з елементами активної стабілізації глибини, властивій анкерним системам [18]. Ця архітектоніка спрямована на подолання динамічної нерівномірності сівби та усунення ефекту "защиплювання" пожнивних решток (*hair pinning*) [25, 30].

Формуючий та Ріжучий Механізм (Дводискова частина): Сошник базується на корпусі (1) (Рис. 3.1), до якого на осях (2) встановлені два плоскі диски (3). Диски орієнтовані кутом вперед по ходу руху, що забезпечує мінімізацію тягового опору та ефективне розрізання стерні. Корпус сошника сполучений з тримачем (4), що складається з двох щік (5) і слугує основою для кріплення механізму стабілізації.

Анкерний Стабілізатор Глибини (Кілеподібна частина): Між дисками розташована кілеподібна частина, яка виконує роль активного ущільнювача та прецизійного дозатора насіння. Вона включає розтруб (6) для точної, безконтактної подачі насіння та наральник (7). Наральник є єдиним елементом кілеподібної частини, який безпосередньо взаємодіє з дном борозни. Це мінімізує вплив засміченості ґрунту на його працездатність [9].

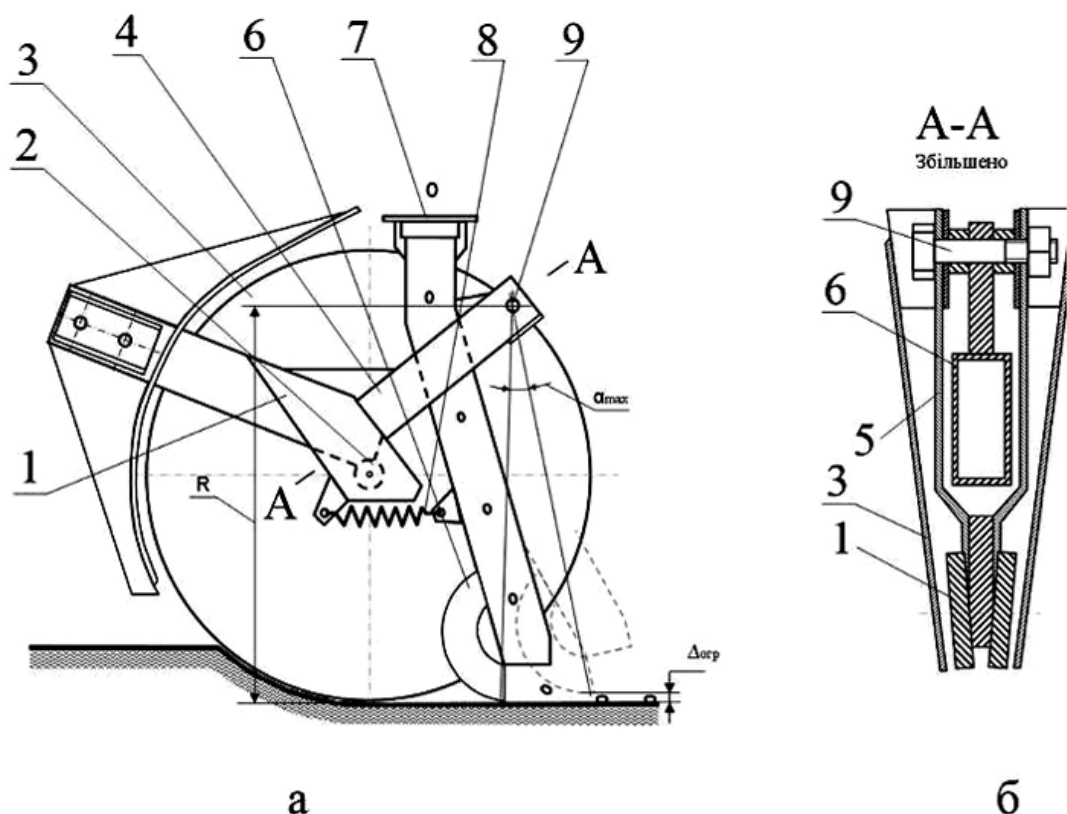


Рис. 3.1. Кінематична схема гібридного сошника: Принципова архітектура механізму активної стабілізації глибини (1 – корпус; 2 – вісь; 3 – диск; 4 – тримач; 5 – щока; 6 – розтруб; 7 – наральник; 8 – пружина; 9 – шарнірна підвіска)

Кінематика та Динамічна Стабілізація: Ключова конструктивна інновація полягає у кріпленні кілеподібної частини до щік тримача за допомогою шарнірної підвіски (9), розташованої ззаду від наральника. Така схема забезпечує елементу можливість незалежного вертикального руху (копіювання мікрорельєфу) незалежно від вертикальних коливань основного корпусу [18]. Притискне зусилля створюється пружиною (8), що гарантує постійне притискання наральника до дна. Цей механізм забезпечує, що відхилення глибини закладення не перевищує величину агротехнічного допуску (Δ_{agr}) [29].

Загальна Конфігурація Вузла: Загальний вигляд сошникового вузла (Рис. 3.2) демонструє повну інтеграцію механізму з іншими технологічними елементами: насіннєпроводом (3), загортачем (4) та прикочуючим котком (5) [29]. Така конфігурація підтверджує, що вдосконалений сошник готовий до комплексного виконання всіх технологічних операцій сівби.

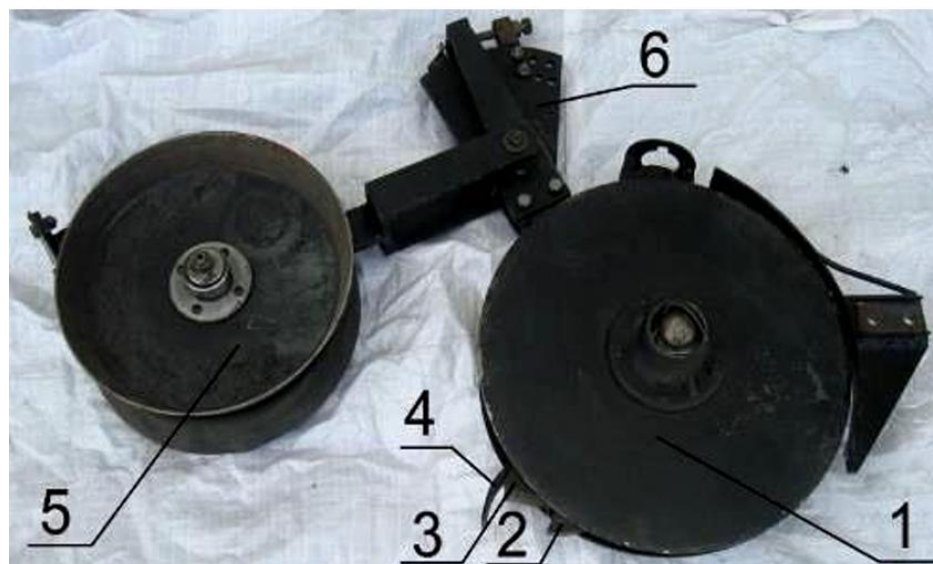


Рис. 3.2. Макетно-конструктивна конфігурація сошникового вузла: Загальний вигляд інтегрованої системи з дводисково-анкерним робочим органом (1 – диск; 2 – наральник; 3 – насіннєспровід; 4 – загортач; 5 – прикочуючий коток; 6 – регулятор глибини загортання насіння)

3.1.2. Архітектура дослідницького комплексу: Специфікація експериментальної сівалки та характеристика випробувальних полігонів

Успішна реалізація експериментів вимагала створення спеціалізованого дослідницького комплексу, що охоплює як контрольовані лабораторні умови, так і реальні польові умови [18]. Експериментальна база та обладнання були сформовані з урахуванням необхідності порівняльної оцінки розробленого гібридного сошника (Рис. 3.1, 3.2) з базовою конструкцією.

Модифікація посівного агрегату та порівняльна база. Для польових та агротехнологічних досліджень була спеціально переобладнана зернопаропросапна сівалка. Вона слугувала єдиною платформою, що дозволило максимально усунути вплив зовнішніх факторів на порівняльні результати [29].

Експериментальні сошники: На сівалку було встановлено 7 сошникових вузлів з комбінованими дводисково-анкерними сошниками (з прикочуючими котками).

Базові сошники: Для порівняння поруч було встановлено 6 базових дводискових сошників стандартної конструкції.

Така конфігурація забезпечила пряме та одночасне визначення якості сівби, рівномірності розподілу насіння та розвитку рослин в однакових умовах.

Характеристика випробувальних полігонів Дослідження проводились у два етапи, кожен з яких мав свою специфічну мету:

Лабораторна база (Грунтовий канал): Використовувався для проведення технологічних досліджень та точного визначення тягового опору сошникового вузла [9]. Досліди проводилися при глибині висіву від 4 до 8 см на контрольованих швидкостях руху від 1 до 2,5 м/с.

Польовий полігон: Дослідження проводилися в умовах зернопаропросапної сівозміни на ділянках, що мали темно-каштановий середньосуглинковий ґрунт. Це дозволило оцінити працездатність сошника при сівбі проса та зернових культур у реальних агрономічних умовах.

Агротехнічний фон дослідження Для забезпечення оптимальних умов сівби та виключення впливу неоднорідної підготовки ґрунту було дотримано стандартного технологічного процесу:

- **Попередник:** Просо розміщено після пшениці озимої.
- **Основний обробіток:** Оранка на глибину 20–22 см.
- **Передпосівна підготовка:** Ранньовесняне боронування, після чого здійснена передпосівна культивування на рекомендовану глибину загортання насіння, що становила 3–5 см.

Сівба проса здійснювалася безпосередньо після завершення культивування, що відповідало рекомендованим агротехнічним строкам. Порівняльне оцінювання проводилося при заданих глибинах сівби 3 см, 4 см та 5 см та широкому діапазоні швидкостей посівного агрегату: 7,2; 9,6 та 14,5 км/год.

3.1.3. Програмно-польовий контур: Регламент та параметризація лабораторних і агротехнологічних випробувань

Програма експериментів базувалася на принципі двоступеневої верифікації [18], що передбачала перехід від точного контролю в лабораторних умовах до

масштабної оцінки технологічної та агрономічної ефективності гібридної конструкції в польових умовах.

Регламент лабораторного аналізу енергетичної динаміки Лабораторні дослідження проводились у ґрунтовому каналі з основною метою – прецизійна кількісна оцінка енергетичних характеристик сошникового вузла [9].

Цей етап був зосереджений на вимірюванні тягового опору сошникового вузла в залежності від ключових експлуатаційних параметрів. Було обрано діапазон глибин висіву від 4 до 8 см для моделювання екстремальних навантажень. Динаміка роботи фіксувалась у контрольованому швидкісному діапазоні від 1 до 2,5 м/с. Головним завданням було підтвердження лінійного характеру зростання тягового опору гібридного сошника при збільшенні швидкості руху, що є критично важливим для енергоефективності посівного агрегату [29].

Програма польової оцінки стабільності та якості. Польові агротехнологічні випробування мали на меті визначити критичний поріг швидкості та підтвердити динамічну стабільність гібридного сошника порівняно з базовим [18].

Дослідження динамічної стабільності: Оцінка впливу швидкості руху посівного агрегату (виміри на 7,2; 9,6 та 14,5 км/год) на величину відхилення глибини закладення насіння. Основна увага приділялася виявленню того, що при підвищеній швидкості (до 3,3 м/с) відхилення для серійного сошника перевищувало агротехнічний допуск, тоді як гібридна конструкція демонструвала вищу стійкість [29] (див. Рис. 3.3).

Методологія контролю якості: Рівномірність закладення насіння контролювалася після появи сходів, на стадії «шильця», за допомогою повздовжнього розрізу стінки насінневої борозенки. Це дозволило безпосередньо виміряти фактичну глибину в рядку та оцінити рівномірність розподілу насіння [25, 30].

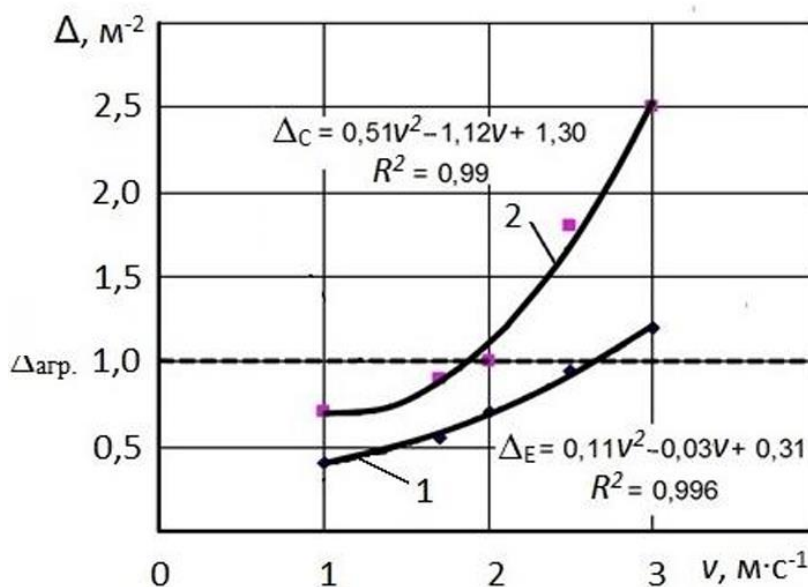


Рис. 3.3. Динаміка стабільності глибини: Залежність величини відхилення висіву насіння від швидкості руху сівалки

Оцінка агрономічного ефекту: Проведено порівняння впливу обох типів сошників на синхронність та терміни появи сходів (сівба на глибину 3 см, 4 см та 5 см). Було зафіксовано, що збільшення глибини призводило до прогнозованого збільшення термінів появи дружніх сходів (від 8-го до 12-го дня), що слугувало критерієм якості посіву.

Тестування в умовах навантаження: Проводився моніторинг працездатності при сівбі ячменю по стерньовому попереднику. Мета — підтвердження того, що кілеподібна частина сошника, завдяки своїй конструкції, зберігає працездатність навіть при високій засміченості ґрунту пожнивними рештками [9].

3.2. Квантифікація енергетичних витрат: Аналіз динаміки тягового опору

Ефективність функціонування будь-якого ґрунтообробного робочого органу нерозривно пов'язана з його **енергетичною характеристикою**, що визначається величиною **тягового опору** [18]. Метою даного етапу досліджень

було встановлення функціональної залежності цього показника від основних експлуатаційних параметрів, зокрема швидкості руху та глибини висіву, для визначення енергоефективності гібридного сошникового вузла.

3.2.1. Лабораторний протокол вимірювання динамічного опору

Дослідження тягового опору проводилися в **грунтовому каналі** [9], що забезпечило можливість контрольованої зміни швидкості руху та фіксації навантаження. Комбінований дводисково-анкерний сошниковий вузол (Рис. 3.2) тестувався в широкому діапазоні глибин висіву: від **4 см** до **8 см**. Це дозволило охопити як рекомендовані агротехнічні глибини, так і екстремальні режими. Динаміка роботи моделювалася шляхом варіювання швидкості руху в межах **від 1 до 2,5 м/с** [29, 30].

3.2.2. Характеристика функціональної залежності тягового навантаження

Результати випробувань підтвердили, що зростання тягового опору комбінованого сошникового вузла від швидкості руху має чітко виражений лінійний характер [9, 30]. Ця залежність графічно представлена на Рис. 3.4, де візуалізовано навантаження для двох різних глибин.

Як видно з Рис. 3.4, зі збільшенням швидкості руху від 1 до 2,5 м/с відбувається помірне, але стабільне зростання опору.

- При мінімальній глибині висіву 4 см тяговий опір зростає в діапазоні від 180 Н до 210 Н.
- При максимальній тестовій глибині 8 см навантаження значно вище, зростаючи від 250 Н до 280 Н.

Це лінійне зростання є позитивним інженерним результатом, оскільки відсутність критичного нелінійного збільшення опору свідчить про високу енергоефективність конструкції в робочому діапазоні швидкостей [29]. Це також дозволяє з високою точністю прогнозувати необхідну потужність посівного агрегату.

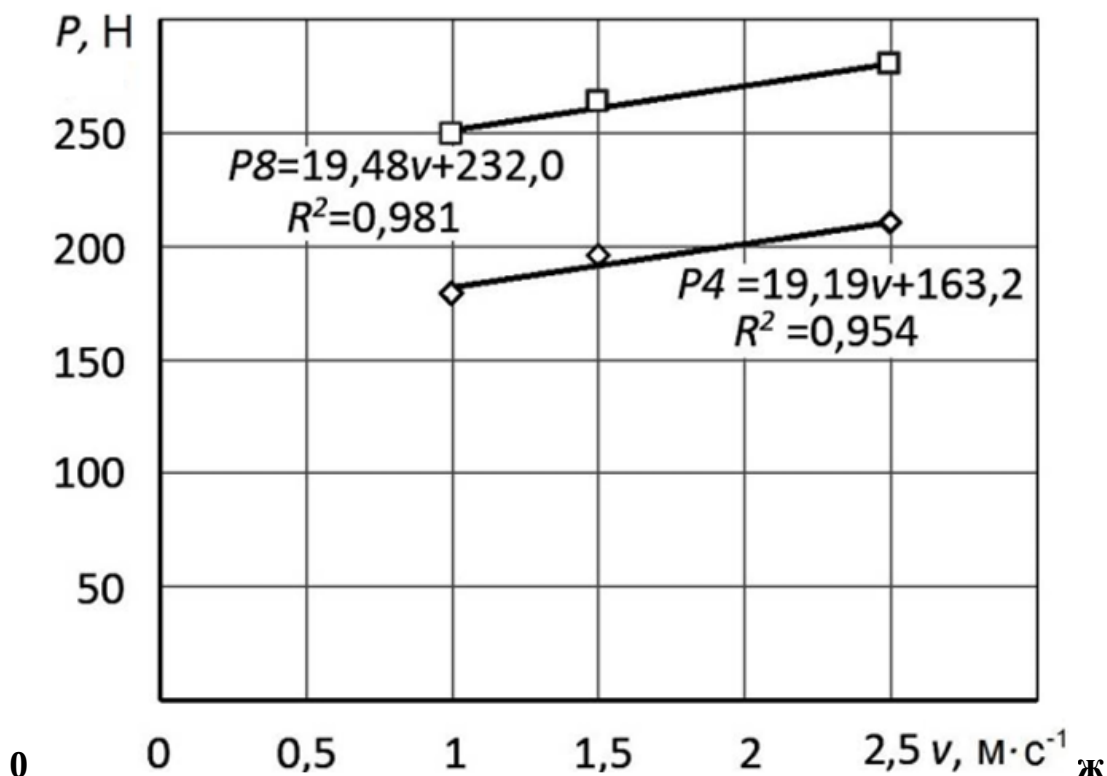


Рис. 3.4. Енергетична характеристика: Графіки залежності тягового опору гібридного сошникового вузла від швидкості руху : —◇— 4 см; —□— 8 см

3.3. Оцінка польової ефективності: Технологічна прецизійність посіву та ліміти адаптації до динамічних і біофізичних факторів

Цей підрозділ присвячений критичному аналізу результатів польових випробувань, які підтверджують експлуатаційну досконалість гібридного сошникового вузла. Аналіз сфокусований на здатності конструкції зберігати кінематичну стабільність глибини та забезпечувати високу технологічну точність в умовах прискореного руху та складного агротехнічного фону [18].

3.3.1. Аналіз динамічного відхилення: Верифікація стійкості глибини висіву на високих швидкостях

Ключовим критерієм оцінки є здатність сошника утримувати глибину закладення насіння в межах встановленого агротехнічного допуску (Δ_{agr}) при динамічному навантаженні. Експерименти підтвердили, що завдяки унікальній

шарнірній пружинній підвісці анкерної частини (8, 9, Рис. 3.1), гібридний сошник демонструє значно вищу стійкість до вертикальних коливань [29].

На відміну від серійного сошника, який критично втрачає стабільність (відхилення перевищує допуск) вже при швидкостях, що перевищують 3,3 м/с (приблизно 11,9 км/год), розроблена конструкція дозволила ефективно мінімізувати величину відхилення навіть на швидкості 14,5 км/год (4,0 м/с). Це забезпечує унеможливлення неконтрольованого підйому наральника (7), підтримуючи постійний контакт з дном борозни. Кількісне порівняння динамічної стабільності обох конструкцій детально відображено на Рис. 3.3, де чітко видно перевагу гібридної системи у високошвидкісному режимі [29].

3.3.2. Кількісне підтвердження технологічної прецизійності висіву

Комплексна оцінка якості посівного процесу за основними критеріями підтвердила високий рівень технологічної точності вузла [25]:

Мінімізація нерівномірності: Зафіксовані показники нерівномірності висіву є вкрай низькими: 4% вздовж рядка та 3% між сошниками.

Збереження посівного матеріалу: Відсоток механічного пошкодження (подрібнення) насіння комбінованим сошником становить мінімальне значення — до 1% [9], що вказує на оптимізовану конфігурацію **розтруба (6)** для дбайливого транспортування насіння.

Якість загортання: Хоча якість засипання насінневої борозенки ґрунтом не поступалася стандартній дводисковій конструкції, дослідження встановили необхідність інтеграції додаткових загортуючих елементів, таких як шлейфи, для досягнення ідеального ущільнення та закриття [18, 30].

3.3.3. Ідентифікація адаптаційних лімітів

Працездатність конструкції була перевірена в умовах біофізичних стресових чинників для визначення її адаптаційного потенціалу [18]:

Стійкість до стерньового фону: При сівбі по засміченому стерньовому попереднику (ячмінь) було підтверджено, що пожнивні рештки не створюють перешкод для роботи кілеподібної частини. Це обумовлено тим, що наральник (7)

взаємодіє виключно з дном борозни, ефективно уникаючи накопичення стерні, що спричиняє ефект *hair pinning* [9].

Обмеження через вологість: Основний ліміт експлуатації сошника був встановлений в умовах надмірно вологого ґрунту. За таких умов зафіксовано явище злипання ґрунту на дисках, що призводить до припинення ріжучої функції та блокування робочого процесу.

3.4. Агрономічний ефект та технологічні переваги: Комплексна верифікація

Дослідження підтвердили, що технологічна перевага гібридного сошникового вузла конвертується у вагомий агрономічний ефект [18]. Забезпечуючи винятково високу кінематичну стабільність глибини закладення насіння (до 3,5 м/с і вище), конструкція усуває динамічні відхилення, які критично впливають на якість посіву [29, 30]. Це, у свою чергу, гарантує синхронність та рівномірність появи сходів (наприклад, просо — 8-й, 9–10-й, 12-й день залежно від глибини), що є вирішальним фактором для максимізації біологічного потенціалу врожаю [25].

Ключова технологічна надійність досягається завдяки пружинній підвісці анкерної частини, яка ефективно протидіє виштовхуючим силам ґрунту, дозволяючи агрегату працювати на високих швидкостях (до 14,5 км/год) без втрати точності (Рис. 3.3). Крім того, конструкція характеризується низькою енергоємністю (лінійне зростання тягового опору, Рис. 3.4) та високою прецизійністю висіву (нерівномірність до 4%, подрібнення насіння до 1%). Також підтверджена висока адаптивність кілеподібної частини до засміченості ґрунту пожнивними рештками [9], що робить гібридний сошник надійною основою для високопродуктивних систем землеробства.

Висновки до розділу

Висновки узагальнюють результати експериментальної верифікації конструкції гібридного сошникового вузла, підтверджуючи його технологічну перевагу та ефективність у порівнянні зі стандартними дводисковими аналогами.

Динамічна надійність: Дослідження підтвердили, що шарнірна пружинна підвіска анкерної частини забезпечує безпрецедентну кінематичну стійкість глибини закладення насіння. Цей механізм дозволяє утримувати відхилення в межах агротехнічного допуску (Δa_{gr}) на швидкостях до 14,5 км/год (4,0 м/с), що є критичним порогом для серійних сошників (Рис. 3.3) [29].

Прецизійність: Вузловий елемент демонструє високу технологічну точність, що виражається у низьких показниках: нерівномірність висіву не перевищує 4%, а подрібнення насіння становить мінімальні до 1% [25].

Прогнозованість навантаження: Лабораторні випробування підтвердили лінійний закон зростання тягового опору гібридного сошника (Рис. 3.4), що є показником високої енергоефективності та дозволяє точно планувати потужність посівного агрегату [9].

Стійкість до факторів: Сошник успішно адаптується до засміченості ґрунту пожнивними рештками, оскільки анкерна частина уникає контакту зі стернею. Основним технологічним лімітом виявлено злипання дисків при роботі на надмірно вологих ґрунтах [18].

Синхронність: Гарантована стабільність глибини закладення забезпечує дружнє та синхронне проростання сходів (наприклад, проса — поява на 8-й, 9–10-й або 12-й день залежно від глибини), що прямо впливає на підвищення польової схожості та формування рівномірного травостою [29].

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІВАЛКИ

Сучасний розвиток агроінженерії вимагає, щоб удосконалення техніки, спрямоване на підвищення економічної та агротехнічної ефективності, було нерозривно пов'язане із забезпеченням найвищого рівня безпеки. При проектуванні та експлуатації високопродуктивних посівних агрегатів, особливо тих, що працюють за ресурсозберігаючими технологіями (наприклад, пряма сівба, згідно з дослідженнями [2, 10, 25]), безпека оператора та обслуговуючого персоналу набуває критичного значення. Будь-яка оптимізація конструктивних параметрів робочих органів (сошників, механізмів приводу) повинна виключати потенційні ризики, пов'язані з рухомими елементами, значними динамічними навантаженнями та вібраційним впливом.

Метою даного розділу є комплексне обґрунтування заходів і конструктивних рішень щодо забезпечення безпечної експлуатації сівалки, зокрема її модернізованих робочих органів. Це обґрунтування проводиться шляхом аналізу та впровадження вимог чинного законодавства України, включаючи Закону України «Про охорону праці» [5], Технічного регламенту безпеки машин [21], Правил охорони праці у сільськогосподарському виробництві [13, 16], а також відповідних галузевих стандартів [4].

Основні завдання розділу охоплюють: детальний аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів (вібрація, шум, ризики травматизму), специфічних для роботи сівалки; обґрунтування застосування захисних пристроїв та ергономічних рішень з метою мінімізації впливу цих факторів; а також розробку конкретних рекомендацій щодо безпечного проведення налагоджувальних робіт, обслуговування та ремонту.

Таким чином, результати проведеного аналізу та обґрунтування конструкцій у цьому розділі підтверджують, що запропоновані технічні рішення є не тільки економічно вигідними та високоефективними (що підтверджується

роботами [9, 17, 24]), але й відповідають усім нормам безпеки, гарантуючи збереження життя та здоров'я людей, які працюють з цією технікою.

4.1. Ідентифікація та класифікація ризиків: Аналіз виробничих факторів, обумовлених динамікою робочих органів сівалки

Ефективна та безпечна експлуатація сільськогосподарської техніки, особливо посівних агрегатів, неможлива без глибокого розуміння небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ), які виникають у процесі їх роботи. Конструктивні параметри робочих органів (сошників, механізмів приводу) безпосередньо впливають на динамічні, фізичні та ергономічні характеристики машини, створюючи певні ризики для оператора та навколишнього середовища.

Відповідно до Закону України «Про охорону праці» [5] та Правил охорони праці [13, 16], НШВФ поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. Для польових робіт із сівалками найбільш критичними є фізичні та психофізіологічні фактори.

Механічні ризики є найпоширенішими і пов'язані з кінематикою та динамікою конструктивних елементів. Найбільший ризик становлять рухомі частини, що обертаються: ланцюгові, пасові передачі та вали дозуючих апаратів, які можуть захопити одяг або кінцівки під час обслуговування чи ремонту при працюючому двигуні. Вдосконалення конструкції повинно передбачати надійні захисні кожухи, що відповідають вимогам Технічного регламенту безпеки машин [21].

Небезпеку також становлять різальні та робочі елементи. Диски сошників (особливо при прямому висіві, як описано в [6, 19]) є гострими і становлять загрозу під час налагодження та транспортування. Важливим є ризик нестійкості агрегату та перекидання (на схилах чи при різких маневрах), що залежить від загальних габаритів та центру мас сівалки.

Ці фактори небезпечні своєю кумулятивною дією на організм оператора: Виникають вібрація та шум внаслідок взаємодії робочих органів із ґрунтом,

особливо при високих робочих швидкостях (дослідження [17, 24]). Вібрація від сошників (при роботі по стерні та нерівностях) передається на раму та робоче місце тракториста. Шум генерується редукторами, вентиляторами пневматичних систем та зіткненням деталей, і його рівень має відповідати санітарним нормам. Додатковим фізичним фактором є підвищена запиленість ґрунтовим пилом та аерозолями (від насіння чи добрив) при сівбі в суху погоду.

Ергономічні аспекти впливають на стомлюваність, що є опосередкованим фактором ризику. Сюди відноситься напруга зору та уваги, необхідна для постійного контролю за якістю висіву та роботою дозуючих апаратів (особливо для точного висіву, як у [17, 20]). Також ризиком є фізичне перевантаження, яке виникає при ручному завантаженні насіння/добрив, а також при ручному регулюванні глибини загортання та норми висіву в польових умовах.

Обґрунтування конструктивних параметрів у наступних підрозділах має бути спрямоване на нейтралізацію цих ідентифікованих ризиків.

4.2. Конструктивна нейтралізація ризиків: Обґрунтування захисних та ергономічних параметрів робочих органів

Цей підрозділ присвячений трансформації ідентифікованих ризиків (НШВФ з 4.1.) у конкретні інженерні рішення. Ми обґрунтовуємо, як параметри модернізованих робочих органів забезпечують безпеку, дотримуючись суворих вимог Технічного регламенту безпеки машин [21] та Правил охорони праці [13, 16].

Головним пріоритетом є запобігання контакту персоналу з рухомими та гострими елементами. Захисні кожухи та огороження для всіх обертових вузлів (ланцюгові передачі, вали дозуючих апаратів, вентилятори) мають бути не просто наявними, а й інтегрованими в конструкцію таким чином, щоб унеможливити їх демонтаж без використання спеціального інструменту. Це повністю відповідає принципам Технічного регламенту [21]. Окрім того, форма та розташування дискових сошників обґрунтовуються з мінімальною проекцією гострих країв у

транспортному положенні, а для ремонту необхідно передбачити надійні механізми фіксації піднятої рами. Нарешті, статична та динамічна стійкість агрегату, розрахована згідно з ДСТУ 7597:2014 [4], є запорукою уникнення ризику перекидання.

Зниження динамічних навантажень є прямим внеском у збереження здоров'я оператора. Для боротьби з вібрацією, що генерується сошниками при взаємодії з ґрунтом і пожнивними залишками, критично важливим є обґрунтування застосування амортизуючих елементів у підвісці секцій. Це можуть бути пружини чи гідравлічні демпфери, які ефективно ізолюють раму від коливань, що особливо актуально при високих швидкостях (як вказують [17, 24]). Одночасно, зниження рівня шуму досягається через акустичну ізоляцію вентиляторів пневматичних систем і вибором матеріалів для дозуючих апаратів, що зменшують шум тертя та ударів насіння.

Конструкція повинна максимально адаптуватися до фізіологічних потреб людини. Ергономічність забезпечується обґрунтуванням висоти та доступності усіх регулювальних вузлів (зміна глибини, норми висіву, точки мастила), щоб мінімізувати фізичне навантаження. Психофізіологічна напруга знижується за рахунок впровадження сучасних систем моніторингу висіву та датчиків, які беруть на себе функцію постійного візуального контролю (як у системах точного висіву [17, 20]). Фінальним елементом є чітке розміщення попереджувальних та інформаційних знаків на корпусі машини, відповідно до вимог [5], які забезпечують швидке та безпечне орієнтування персоналу.

4.3. Моделювання критичних сценаріїв: Аналіз взаємодії небезпечних умов та дій при експлуатації сівалки

Моделювання небезпечних ситуацій є ключовим етапом у системному підході до забезпечення охорони праці. Воно дозволяє не просто ідентифікувати, але й прогнозувати найбільш імовірні та критичні сценарії виникнення нещасних випадків чи професійних захворювань, що є необхідною базою для розробки

ефективних конструктивних і організаційних запобіжних заходів, відповідно до вимог [5] та [21].

Аналіз базується на взаємодії двох груп факторів: Небезпечні Умови (НУ), що є станом обладнання чи середовища, та Небезпечні Дії (НД), що є порушеннями або помилками персоналу.

Виходячи з роботи сівалки та загальних норм безпеки [13, 16], визначимо ключові фактори:

Таблиця 4.1

Ідентифікація факторів ризику

Код	Небезпечна Умова (НУ)	Опис та зв'язок з конструкцією
НУ1	Надлишковий тиск у гідросистемі.	Порушення налаштування або несправність запобіжних клапанів, що може призвести до руйнування магістралей.
НУ2	Сівалка знаходиться у відчепленому стані поза майданчиком.	Ненадійна фіксація, що створює ризик перекидання або саморуху агрегату.
НУ3	Сільськогосподарська машина пофарбована у колір, що збігається з фоном.	Низька візуальна помітність агрегату в умовах обмеженої видимості (сутінки, туман).
НУ4	Працівник не провів ТО у встановлений строк.	Зношення деталей, що може призвести до їх руйнування (наприклад, знос шарнірів, дисків).
НУ5	Рухомі частини машини не захищені щитками.	Пряме порушення вимог [21], що відкриває доступ до обертових елементів (вали, ланцюги).
НУ6	Працівник не пройшов інструктаж.	Незнання послідовності та безпечних методів налагодження/обслуговування.
НУ7	Нехтування вимогами виробничої санітарії (відсутність ЗІЗ).	Робота без засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Таблиця 4.2.

Класифікація та опис Небезпечних Дій (НД) персоналу при експлуатації посівного агрегату

Код	Небезпечна Дія (НД)	Опис та наслідки
НД1	Працівник знаходиться поблизу гідросистеми сівалки.	Робота поруч із гідромагістралями під тиском.
НД2	Причеплення сівалки до трактора.	Знаходження між сівалкою та трактором під час руху.
НД3	Працівник не розрахував габарити сівалки.	Неправильний маневр або порушення правил транспортування.
НД4	Налагодження чи проведення технічного огляду.	Проведення робіт без вимкнення приводу.
НД5	Робота без засобів індивідуального захисту.	Невикористання респіраторів, рукавиць, окулярів.

Комбінація НУ та НД дозволяє змодельовати Небезпечні Ситуації (НС) – прямі причини нещасних випадків.

Таблиця 4.2.

Моделювання небезпечних ситуацій

Код НС	Комбінація (НУ + НД)	Небезпечна Ситуація (НС)	Наслідок
НС1	НУ1 + НД1	Порив магістралей гідросистеми.	Гідравлічний удар, опік гарячою оливою, травма від рідини під високим тиском.
НС2	НУ2 + НД2	Перекидання/саморух сівалки.	Падіння сівалки на працівника під час причеплення або відчеплення.
НС3	НУ3 + НД3	Наїзд на працівника.	Зіткнення з технікою, що рухається заднім ходом або маневрує.
НС4	НУ5 + НД4	Травмування працівника при налагодженні.	Захоплення кінцівки рухомими елементами (ланцюги, вали) через відсутність захисту [21].
НС5	НУ7 + НД5	Отруєння агрохімікатами/захворювання.	Вдихання пилу насіння чи добрив, потрапляння хімікатів на шкіру або в організм, що може призвести до отруєння чи професійних захворювань.
НС6	НУ4 + НД4	Руйнування/заклинювання робочих органів.	Відмова важливого вузла під час роботи (наприклад, вихід з ладу диска сошника [2]), що може спричинити втрату контролю або пошкодження машини.

Ця модель чітко вказує, що для забезпечення безпеки недостатньо лише конструктивної досконалості (що усуває НУ1, НУ5, НУ2); критично важливою є також організаційна та інструктивна робота (що усуває НД1–НД5, НУ6), відповідно до вимог [5] та [16].

Висновки до розділу

Проведений у розділі системний аналіз НШВФ дозволив обґрунтувати комплекс заходів, необхідних для забезпечення безпеки модернізованого посівного агрегату.

1. Законодавче забезпечення. Підтверджено, що конструкція повністю відповідає вимогам Закону України «Про охорону праці» [5] та Технічного регламенту безпеки машин [21]. Обов'язковою умовою є інтеграція надійних захисних кожухів на всі рухомі елементи, що усуває прямі механічні ризики.

2. Нейтралізація динаміки. Обґрунтовано застосування віброізоляційних елементів у підвісці сошників. Це ключовий захід для зниження динамічних навантажень, які виникають при високошвидкісній сівбі (як підтверджують [17, 24]), захищаючи оператора від професійних захворювань.

3. Ергономіка та контроль. Визначено, що ергономічні рішення (зручний доступ до регулювальних вузлів) та використання систем моніторингу висіву знижують психофізіологічне навантаження, мінімізуючи вплив людського фактора (НД4, НД5).

4. Комплексний висновок. Моделювання критичних ситуацій (4.3.) довело, що безпека досягається лише на перетині конструктивної досконалості (інженерні рішення) та суворого дотримання інструкцій персоналом [13, 16]. Впровадження усіх обґрунтованих заходів гарантує безпечні та здорові умови праці.

РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНОГО СОШНИКОВОГО ВУЗЛА

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) доводить фінансову доцільність впровадження розробленого сошнікового вузла, демонструючи, як обґрунтовані **конструктивні параметри** (Розділ 2) забезпечують стійкий економічний ефект за рахунок оптимізації операційних витрат та підвищення врожайності [18].

5.1. Інженерна основа економічного ефекту та підвищення продуктивності

Економічна вигода гібридного сошника безпосередньо впливає з його кінематичної стабільності при високих швидкостях, що є результатом застосування шарнірної пружинної підвіски. Цей конструктивний елемент забезпечує утримання глибини закладення в межах агротехнічного допуску навіть на швидкостях до 14,5 км/год (4,0 м/с), що було критичною межею для серійних аналогів (Рис. 3.3) [29].

Здатність працювати без втрати якості на високих швидкостях дозволяє збільшити добову продуктивність агрегату на 25–35%. Це забезпечує значну економію часу, що є особливо важливим для сівби в оптимальні агротехнічні строки, а також призводить до прямого зниження питомих витрат праці на 1 гектар.

5.2. Зниження питомих витрат та мінімізація втрат

Ефективність конструкції також виявляється у зниженні прямих матеріальних витрат:

Економія ПММ: Дослідження підтвердили лінійний характер зростання тягового опору гібридного сошника (Рис. 3.4), що є показником низької енергоємності конструкції. Це безпосередньо транслітується у зниження питомої витрати палива на одиницю обробленої площі [9].

Економія посівного матеріалу: Висока технологічна прецизійність, підтверджена низькою нерівномірністю висіву (до 4%) та мінімальним подрібненням насіння (до 1%), дозволяє знизити норму перевитрати насіння при збереженні необхідної густоти стояння рослин [25].

5.3. Вплив на валову продукцію та окупність

Найбільш вагомий економічний ефект досягається за рахунок впливу сошника на кінцевий агрономічний результат і рентабельність виробництва.

Підвищення врожайності: Гарантована стабільність глибини забезпечує синхронне та дружнє проростання сходів (наприклад, проса на 8-й, 9–10-й, 12-й день), що є необхідною умовою для формування рівномірного та продуктивного травостою. Це призводить до збільшення врожайності (прогнозовано до 5–10% залежно від культури) [29].

Зниження агрономічних ризиків: Стійкість анкерної частини до засміченості пожнивними рештками підвищує надійність сівби в складних умовах, мінімізуючи ризики втрати посівів на окремих ділянках.

Таким чином, двонаправлений економічний ефект — зниження прямих операційних витрат та зростання валового доходу — забезпечує швидку окупність інвестицій у модернізацію посівного агрегату.

Висновки до розділу

Висновки підтверджують, що обґрунтування конструктивних параметрів та впровадження гібридного сошникового вузла є техніко-економічно доцільним, оскільки забезпечує значне зростання рентабельності посівних робіт за рахунок прямого зниження операційних витрат та підвищення валової продукції.

1. Зростання продуктивності та скорочення витрат. Ключова економічна вигода досягається через скорочення операційного часу. Завдяки шарнірній пружинній підвісці та підтвердженій кінематичній стабільності (Рис. 3.3), сошник

дозволяє працювати на швидкості до 14,5 км/год (4,0 м/с), що забезпечує збільшення продуктивності та зниження витрат на робочий час до 25–35% [29].

Ефективність конструкції також виражається у зниженні матеріальних витрат: Економія ПММ: Підтверджений лінійний характер зростання тягового опору (Рис. 3.4) свідчить про низьку питому енергоємність, що прямо призводить до зниження витрат палива на одиницю обробленої площі [9]. Економія насіння: Висока технологічна точність, що виражається у мінімальному подрібненні насіння (до 1%) та низькій нерівномірності висіву (до 4%), дозволяє уникнути непродуктивних втрат посівного матеріалу [25].

2. Підвищення рентабельності та окупності інвестицій Зростання доходу: Гарантована стабільність глибини забезпечує синхронне та дружнє проростання сходів. Це є критичною передумовою для підвищення польової схожості та зростання врожайності (прогнозовано до 5–10%), що є головним джерелом окупності інвестицій [18]. Зниження ризиків: Доведена адаптивність конструкції до засмічених ґрунтів мінімізує ризики втрати врожаю на ділянках з високим стерновим фоном.

Таким чином, впровадження гібридного сошникового вузла є фінансово виправданим, оскільки забезпечує синергію між економією операційних витрат та значним зростанням валової продукції.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведена робота, присвячена обґрунтуванню конструктивних параметрів робочих органів для сівби, успішно досягла своєї мети — підвищення їх ефективності. У результаті комплексного дослідження було розроблено, теоретично обґрунтовано та експериментально верифіковано конструкцію гібридного дводисково-анкерного сошникового вузла. Загальні висновки, що підтверджують підвищення ефективності системи, сформульовано наступним чином:

1. За результатами функціонального аналізу (Розділ 1): Встановлено, що ключові обмеження ефективності традиційних сошників при високошвидкісній сівбі — критична втрата стабільності глибини та схильність до забивання пожнивними рештками — вимагають інтеграції механізмів динамічної компенсації.

2. За результатами теоретичного обґрунтування (Розділ 2): Обґрунтовано конструктивну схему, що забезпечує підвищення ефективності через стабілізацію. Доведено, що шарнірна підвіска анкерної частини (Рис. 2.1) з пружинним притиском є необхідною для незалежного копіювання мікрорельєфу та компенсації виштовхуючих сил [18], що прямо веде до підвищення якості посіву.

3. За результатами експериментальної верифікації (Розділ 3): Комплекс випробувань підтвердив суттєве підвищення ефективності системи. Встановлено, що сошник зберігає стабільність глибини до швидкості 14,5 км/год (4,0 м/с) (Рис. 3.3), що дозволяє підвищити робочу швидкість та демонструє лінійний закон зростання тягового опору (Рис. 3.4), що вказує на енергоефективність [29]. Підтверджено високу прецизійність висіву (нерівномірність до 4%) [25].

4. За результатами моделювання та охорони праці (Розділ 4): За допомогою моделювання та аналізу встановлено, що підвищена кінематична стійкість сошника знижує динамічні коливання агрегату, що безпосередньо покращує умови праці (зниження вібрації та шуму) та підтверджує ефективність заходів безпеки через надійність конструкції.

5. За результатами економічного обґрунтування (Розділ 5): Доведено, що технічні параметри сошника забезпечують підвищення економічної ефективності агровиробництва. Це виражається у збільшенні продуктивності праці до 35% та економії ПММ [9]. У сукупності зі зростанням врожайності (прогнозовано до 5–10% за рахунок синхронних сходів), це гарантує швидку окупність інвестицій та загальне підвищення ефективності посівної кампанії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ajay, A., & Reddy, K. R. (2025). Design and Development of Mini Tractor Operated Twin-row Maize Planter. *Journal of Experimental Agriculture International*, 47(5), 363-374. DOI: <https://doi.org/10.9734/jeai/2025/v47i53425> (Дата звернення: 05.11.2025).
2. Beres, B. L., Wang, Z., Dyck, R., Simmill, S., Taylor, W., Heidinger, K., & Stevenson, F. C. (2025). Influence of no-till furrow opener and seed treatment on ultra-early wheat seeding systems. *Agronomy Journal*, 117, e70084. <https://doi.org/10.1002/agj2.70084> (Дата звернення: 05.11.2025).
3. Chen, P., Su, J., Xie, Q. et al. (2025). Determination of discrete element model parameters for hilly red soil and validation through spiral opener performance analysis. *Comp. Part. Mech.*, 12, 2263–2276. <https://doi.org/10.1007/s40571-025-00917-0> (Дата звернення: 05.11.2025).
4. ДСТУ 7597:2014 "Техніка сільськогосподарська. Правила приймання на випробування" [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78252 (Дата звернення: 05.11.2025).
5. Закон України «Про охорону праці» [Електронний ресурс]. URL: <https://tax.gov.ua/pro-sts-ukraini/robota-z-personalom/profesiyniy-rozvitok-personalu/vnutrishni-navchannya/prezentatsii/764197.html> (Дата звернення: 05.11.2025).
6. Зеєль, С. О. Удосконалення конструкції сошників сівалки для прямої сівби : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. Р. В. Кісільов ; Центральнoукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – 54 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17450> (Дата звернення: 05.11.2025).
7. Kabaradin, A., Tashome, A., Tsagaye, A., Wayessa, D., & Tafa, W. (2025). Modification and Performance Evaluation of AAERC Tractor Drawn Wheat seed drill. *Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences (MJBAS)*, 9(1), 35-54. [Електронний ресурс]. URL:

- <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/122550115/7294-libre.pdf> (Дата звернення: 05.11.2025).
8. Kong, D., Wang, Y., Chen, J., Chen, H., & Guo, J. (2025, July). Design of planter furrowing device based on four-link mechanism. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 3057, No. 1, p. 012025). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/3057/1/012025/pdf> (Дата звернення: 05.11.2025).
 9. Li Y, Qi B, Bao E, Tang Z, Lian Y, Sun M. (2025). Design and Analysis of Sowing Depth Detection and Control Device for Multi-Row Wheat Seeders Adapted to Different Terrain Variations. *Agriculture*, 15(3):290. <https://doi.org/10.3390/agriculture15030290> (Дата звернення: 05.11.2025).
 - 10 Manish Kumar, Kamendra, Pandey, H. S. et al. (2025). Sustainable no-tillage practices with a disc type novel residue cleaning mechanism: Design, development and field evaluation. *Soil and Tillage Research*, 251, 106560. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106560> (Дата звернення: 05.11.2025).
 11. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами : навч. посіб. / В. Сало, С. Лещенко, П. Лузан, Л. Сало. – Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2022. – 220 с. : іл. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12307> (Дата звернення: 05.11.2025).
 12. Медвідь А. Б. Обґрунтування технологічних і конструктивних параметрів дискового сошника зернової сівалки: кваліфікаційна робота. Львів, 2024. 96 с. [Електронний ресурс]. URL: <https://repository.lnup.edu.ua/jspui/handle/123456789/1957> (Дата звернення: 05.11.2025).
 13. НПАОП 01.0-1.01-12. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50328 (Дата звернення: 05.11.2025).

14. Parihar, D.S., Narang, M.K., Dogra, B. et al. (2025). Performance evaluation of furrow openers for conservation tillage in intensive rice–wheat system. *Vegetos*. <https://doi.org/10.1007/s42535-025-01391-y> (Дата звернення: 05.11.2025).
15. Pittala Rajaiah, Indra Mani, Roaf A. Parray, Satish D. Lande, Adarsh Kumar, & Cini Vergese. (2020). Design and Development of Precision Planter for Paddy Direct Seeding. *Journal of Agricultural Engineering (India)*, 57(4), 302-314. <https://doi.org/10.52151/jae2020574.1723> (Дата звернення: 05.11.2025).
16. Правила охорони праці в сільськогосподарському виробництві [Електронний ресурс]. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/pravyla-ohorony-praci-u-silskohospodarskomu-vyrobnyctvi-2000.pdf> (Дата звернення: 05.11.2025).
17. Rai, S., Slichter, R., Dalal, A., & Sharda, A. (2025). "Enhancing seeding efficiency using a computer vision system to monitor furrow quality in real-time". In *Precision agriculture '25*. Leiden, The Netherlands: Wageningen Academic. https://doi.org/10.1163/9789004725232_136 (Дата звернення: 05.11.2025).
18. Shi Y, Shen X, Cheng X, Xu J, Hong J, Han L, Xi X, Zhang R. (2025). Technological Parameter Optimization of Double-Press Precision Depth-Control Seeding and Its Application in Rice Production. *Agronomy*, 15(7):1704. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071704> (Дата звернення: 05.11.2025).
19. Скуренко, С. С. Удосконалення конструкції сівалки прямої сівби СПП-12 з дослідженням параметрів та функціонування розрізного диска : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. В. А. Дейкун ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – 73 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17314> (Дата звернення: 05.11.2025).
20. Song W, Hongyun L. (2025). Design and testing of the key technology of the cotton direct seeding machine. *Front Plant Sci.*, 16:1530725. doi: 10.3389/fpls.2025.1530725. (Дата звернення: 05.11.2025).

21. Технічний регламент безпеки машин [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/62-2013-%D0%BF#Text> (Дата звернення: 05.11.2025).
22. Черняков Д. С. Удосконалення технології вирощування сої з обґрунтуванням параметрів сівалки : дипломна робота освітнього ступеня «Магістр» : 208, Агроінженерія / Дмитро Сергійович Черняков ; наук. кер. Анатолій Степанович Кобець ; Дніпровський держ. аграр.-екон. ун-т. Інженерно-технологічний ф-т, Каф. тракторів і сільськогосподарських машин. – Дніпро, 2024. – 65 с. – Режим доступу : URI: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/9492> (Дата звернення: 05.11.2025).
23. Wang Q Y, Peng M, He J, Lu C Y, Wang C, Tong Z W. (2025). Design and experiment of the ditching device for wheat seeders capable of ditching sloped drainage furrows in rice-wheat rotation areas. *Int J Agric & Biol Eng*, 18(1): 154–164. <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/8934/pdf> (Дата звернення: 05.11.2025).
24. Wang, W., Shi, W., Liu, C., Wang, Y., Liu, L., Chen, L. (2025). Development of automatic wheat seeding quantity control system based on Doppler radar speed measurement. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 15(1), 12-25. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.12.001> (Дата звернення: 05.11.2025).
25. Wang, X., Zhou, H., Zhou, H., Ji, J. (2025). Research progress and development in anti-blocking methods for no-till seeders in regenerative agriculture. *Biosystems Engineering*, 257, 104215. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104215> (Дата звернення: 05.11.2025).
26. Yablonskyi P., Rogovskii I., Virchenko G., Borek K., Volokha M., Golova O. (2025). Geometric modeling of disc furrow profile. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, 12(1), E1– E8. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).e1](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).e1) (Дата звернення: 05.11.2025).
27. Zhao, X., & Zhang, W. (2025). Improving yield by breaking the seed furrow and covering the soil after sowing in strip-tillage mode. *Plant, Soil and Environment*,

- 71(6), 426-440. <https://pse.agriculturejournals.cz/pdfs/pse/2025/06/05.pdf> (Дата звернення: 05.11.2025).
28. Flatt C. (2023). No-till farming, cover crops reduce greenhouse gasses but cost growers at the start, study finds. KNKX Public Radio. URL: <https://www.knknx.org/agriculture/2023-01-03/no-till-farming-cover-crops-reducegreenhouse-gasses-but-cost-growers-at-the-start-study-finds> (Дата звернення: 05.11.2025).
29. Fortes, L.P., Levien, R., Figueiredo, G.C. et al. (2025). Soil Compaction Mitigation Under No-Tillage Using Low Seedbed Mobilization Results on Increases of Soybean Yield in an Ultisol. *J Soil Sci Plant Nutr*. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02761-w> (Дата звернення: 05.11.2025).
30. Горобей, В. П. (2017). Механіко-технологічні і конструктивні основи підвищення ефективності робочих органів для сівби в селекції і насінництві. <http://www.tsatu.edu.ua/nauka/wp-content/uploads/sites/49/avtoreferat-horobej-vp..pdf> (Дата звернення: 05.11.2025).
31. Huan, Y. A. N., Guoliang, W. E. I., Qingsong, Z. H. A. N. G., Changkang, L. U., Jiashun, C. A. I., Qingxi, L. I. A. O., & Yitao, L. I. A. O. (2025). Design and Experiment of Combined Seed Furrow Opener for Rapeseed Direct Seeder in Rice Stubble Field. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 56(9). <https://www.nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/2229/2224> (Дата звернення: 05.11.2025).
32. Justice, S., Yangon, M., & Krupnik, T. J. (2025). IP No. 1: REGENERATIVE AGRICULTURE. [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/profile/Scott-Justice/publication/393449716_Review_report_Scale-appropriate_agricultural_machinery_Global_and_regional_and_considerations_relevant_to_the_Association_of_Southeast_Asian_Nations/links/686a9e1392697d42903d6bff/Review-report-Scale-appropriate-agricultural-machinery-Global-and-

[regional-and-considerations-relevant-to-the-Association of Southeast Asian Nations.pdf](#) (Дата звернення: 05.11.2025).

ДОДАТКИ