МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«___»_____ 2026 р.
Зав. кафедри _д.т.н., професор___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Володимир ДІДУР___
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: «Обґрунтування параметрів ущільнюючої п'ятки сошника для забезпечення фіксованої глибини та оптимального контакту насіння з ґрунтом»

Виконав: студент 3 курсу, групи 31к-з-ім
освітньої програми __бакалавра_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»_
Дмитро ТКАЧУК
(прізвище та ініціали)

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

Умань – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії
Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ Володимир ДІДУР
«___» _____ 2026 р.
.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

ТКАЧУКУ Володимиру Валерійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Обґрунтування параметрів ущільнюючої п'ятки сошника для забезпечення фіксованої глибини та оптимального контакту насіння з ґрунтом»

керівник роботи Лісовий І.О., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
" 08 " травня 2026 р. № 01-06/166
2. Строк подання студентом роботи 15.05.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: фахова науково-технічна база та матеріали патентного фонду щодо фіксуючих пристроїв; агротехнічні регламенти ресурсоощадної сівби; кінематичні та конструктивні параметри серійних сошників; трибологічні константи системи «насінина-ґрунт»; чинні міжнародні стандарти з охорони праці (ДСТУ EN ISO 12100, 4254-1).
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Вступ; аналіз технологічного процесу сівби та технічних засобів його реалізації; теоретичне обґрунтування параметрів та експериментальні дослідження ущільнюючої п'ятки; розробка заходів з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях; техніко-економічне обґрунтування досягнутих результатів; загальні висновки; список використаних джерел; додатки..
5. Ілюстративний матеріал: підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 10 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		

7. Дата видачі завдання 16 жовтня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	12.11.2025 р.	
2.	Розділ 1. Аналіз технологічного процесу сівби та технічних засобів його реалізації (сошникові системи)	25.12.2025 р.	
3.	Розділ 2. Теоретичне обґрунтування параметрів та експериментальні дослідження ущільнюючої п'ятки	12.02.2026 р.	
4.	Розділ 3. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	01.04.2026 р.	
5.	Розділ 4. Техніко-економічне обґрунтування досягнутих результатів та формування загальних висновків	01.05.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної (графічної) частини роботи (мультимедійна презентація)	12.05.2026 р.	
7	Остаточне оформлення пояснювальної записки та представлення роботи керівнику на перевірку	15.05.2026р.	

Студент _____ Дмитро ТКАЧУК
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Іван ЛІСОВИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СІВБИ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ	6
1.1. Агротехнічні вимоги до рівномірності загортання насіння та сучасні тенденції розвитку сошникових систем.	6
1.2. Порівняльний аналіз конструкцій дискових сошників та пристроїв для фіксації насіння на дні борозни	7
1.3. Огляд наукових досліджень щодо механіки взаємодії робочих органів сошника з насінням та ґрунтом	11
1.4. Обґрунтування напрямку розробки та постановка задач проектування ущільнюючої п'ятки	14
Висновки до розділу	16
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОЇ П'ЯТКИ	17
2.1. Математичне моделювання процесу утримання насінини п'яткою сошника для запобігання її відскоку	17
2.2. Теоретичне визначення конструктивних параметрів п'ятки: кута нахилу робочої поверхні та її довжини	20
2.3. Обґрунтування силових характеристик притискного механізму для забезпечення стабільного контакту з дном борозни	22
2.4. Методика та результати експериментальної перевірки показників якості роботи модернізованого сошника	25
Висновки до розділу	28
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	30
3.1. Характеристика та комплексний аналіз виробничих небезпек і шкідливих факторів при експлуатації посівного агрегату	30
3.2. Обґрунтування організаційно-технічних рішень щодо створення безпечних та санітарно-гігієнічних умов праці персоналу	32
3.3. Прогнозування та моделювання небезпечних ситуацій при роботі з модернізованою машиною для сівби	33
Висновки до розділу	36
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	37
4.1. Розрахунок експлуатаційно-технологічних показників роботи посівної машини з удосконаленими сошниками	37
4.2. Економічне обґрунтування застосування ущільнюючої п'ятки на сівбі озимої пшениці	38
Висновки до розділу	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42
ДОДАТКИ	46

ВСТУП

Сучасний етап розвитку агропромислового комплексу характеризується інтенсивним переходом до ресурсоощадних технологій обробітку ґрунту, зокрема Mini-Till та No-Till, що вимагає застосування високоадаптивних посівних технічних засобів [8]. Базовою технологічною операцією, яка визначає біологічний потенціал майбутнього врожаю, є сівба, інженерна ефективність якої критично залежить від точності просторового розміщення насіння та створення гарантованого капілярного контакту з ґрунтом [14]. Експлуатація традиційних дводискових сошникових систем в умовах наявності значної маси пожнивних залишків та на підвищених робочих швидкостях супроводжується нестабільністю глибини загортання, що неминуче призводить до хаотичного кінематичного розсіювання насіннєвого матеріалу та критичного порушення гідротермічного режиму зони проростання [20]. Технологічне вирішення цієї проблеми вимагає структурної модернізації міждискового простору шляхом впровадження активних фіксуючих пристроїв (ущільнюючих п'яток), які здатні ефективно дисипувати кінетичну енергію відскоку насінини та примусово локалізувати її у вологому шарі ґрунтового ложа [27]. Відповідно, теоретичне обґрунтування та практична оптимізація конструктивних і силових параметрів модернізованого сошника для мінімізації коефіцієнта варіації глибини сівби є актуальним науково-технічним завданням сучасного агроінженерного проектування [31].

Об'єкт дослідження – технологічний процес механічного укладання, дисипативної стабілізації просторового положення та фізичної фіксації насіння на дні V-подібної борозни робочими органами посівної машини під час високошвидкісної прямої сівби [16].

Предмет дослідження – закономірності кінематичної взаємодії, просторові геометричні характеристики та силові параметри притискного механізму модернізованої сошникової групи, оснащеної пружною полімерною ущільнюючою п'яткою [26].

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СІВБИ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

1.1. Агротехнічні вимоги до рівномірності загортання насіння та сучасні тенденції розвитку сошникових систем.

Сівба є базовою технологічною операцією в системі вирощування сільськогосподарських культур. Від якості, способу та дотримання агротехнічних термінів її проведення безпосередньо залежать інтенсивність проростання насіння, подальший розвиток рослин та підсумкова врожайність [13].

Головним критерієм ефективності процесу сівби є створення оптимальних умов для появи дружніх сходів. Відповідно до чинних агротехнічних вимог, насіннєвий матеріал має бути рівномірно розподілений по площі живлення та загорнутий на задану глибину з укладанням на ущільнене вологе ложе борозни [3]. Допустиме відхилення від визначеної глибини загортання для більшості зернових культур не повинно перевищувати ±1…2 см [23]. Порушення цього допуску провокує неодночасність сходів: мілке загортання призводить до дефіциту вологи, а надмірне заглиблення вимагає підвищених витрат енергії на проростання, що суттєво послаблює життєздатність рослини [23].

Визначальним фактором стабільного проростання є забезпечення щільного контакту насінини з ґрунтом. Фізична сутність цього процесу полягає у відновленні капілярного руху вологи з нижніх горизонтів ґрунту безпосередньо до насіннєвої оболонки [19]. Відсутність локального ущільнення дна борозни зумовлює утворення макропор (повітряних «кишень»), що інтенсифікує випаровування та неминуче призводить до пересихання насіннєвого матеріалу [16].

Сучасний вектор розвитку сільськогосподарського виробництва характеризується широким впровадженням ресурсоощадних (Mini-Till) та систем прямої сівби (No-Till), що супроводжується переходом до технологій точного землеробства [18, 31]. За таких умов до конструкцій посівних машин висуваються значно вищі вимоги [5]. Сошникові системи повинні не лише ефективно

прорізати ґрунтовий пласт за наявності значної маси пожнивних залишків, але й гарантувати стабільну глибину формування борозни без зайвого розпушування навколишнього ґрунту [10].

Аналіз динаміки взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем свідчить, що традиційні дводискові сошники не здатні повною мірою задовольнити ці вимоги. Їхнім суттєвим конструктивним недоліком є утворення профільного виступу («горбика») в зоні між дисками, а також складний характер руху насінини, який супроводжується багаторазовими відскоками від внутрішніх стінок сошника та дна борозни [2, 15]. Внаслідок цього значна частина насіння фіксується вище заданого рівня, а коефіцієнт варіації глибини загортання може сягати 60…70% [11, 12].

Отже, для забезпечення фіксованої глибини та оптимального контакту насіння з ґрунтом виникає об'єктивна інженерна необхідність удосконалення існуючих сошникових систем. Сучасна тенденція розвитку посівної техніки, підтверджена конструктивними рішеннями провідних виробників (Precision Planting, John Deere, Amazone), передбачає оснащення посівних секцій додатковими фіксуючими елементами [7, 17, 25]. До таких елементів належать ущільнюючі п'ятки (seed firmers) або локальні котки, які монтуються безпосередньо в міждисковому просторі сошника і здійснюють примусове притискання насінини до вологого дна борозни ще до моменту її загортання пухким ґрунтом [21, 22].

1.2. Порівняльний аналіз конструкцій дискових сошників та пристроїв для фіксації насіння на дні борозни

На сучасних зернових та просапних сівалках найбільшого поширення набули дискові сошникові системи. Їхня функціональна перевага зумовлена здатністю стабільно працювати на підвищених швидкостях, ефективно перерізати рослинні залишки та функціонувати в умовах різної вологості й щільності ґрунту, що є критично важливим критерієм для впровадження

технологій Mini-Till та No-Till [28, 31]. За конструктивним виконанням робочих органів дискові сошники класифікують на однодискові (монодискові) та дводискові [4].

Монодискові сошники, які є базовим елементом систем світових виробників (наприклад, John Deere серії 750, система RoTeC від компанії Amazone), характеризуються встановленням диска під визначеним кутом атаки до напрямку руху та кутом нахилу до вертикалі [17].

Переваги конструкції полягають у зменшеному тяговому опорі під час врізання в ґрунт порівняно з дводисковими аналогами. Вони здійснюють мінімальне порушення структурної будови ґрунту, що сприяє збереженню вологи. Вертикальне навантаження на монодисковий сошник може сягати 175 кг і більше, що забезпечує стабільну роботу в умовах нульового обробітку ґрунту [10].

Недоліками таких систем є формування асиметричного профілю борозни, підвищений ризик втискання незрізаних пожнивних залишків безпосередньо в насіннєве ложе (ефект «hair-pinning»), а також складність позиціювання насінини на дні вузької V-подібної щілини, що періодично спричиняє зависання насіннєвого матеріалу на бокових стінках [18].

Дводискові сошники є класичним інженерним рішенням. Вони формують симетричну клиноподібну борозну і характеризуються високою універсальністю, зниженим ризиком забивання пожнивними залишками за умови застосування фронтальних колтерів (прорізних дисків), а також рівномірним розгортанням ґрунтового пласта в обидва боки [27].

Проте, як зазначають провідні дослідники (Шмат С.І., Резніченко В.А. та ін.), традиційні дводискові сошники мають суттєві кінематичні та технологічні недоліки, що знижують якість загортання насіння [15]. Внаслідок геометричного зміщення осей обертання або сходження дисків вище рівня дна борозни, на її основі формується ґрунтовий «горбик» (профіль W-подібної форми).

Фізика процесу вільного падіння насінини супроводжується її співударами з обертовими дисками та стінками борозни. Швидкість насінини в момент удару об ґрунт визначається за класичним рівнянням кінематики:

$$v_s = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot g \cdot h_s} \tag{1.1}$$

де vs – швидкість насінини в момент удару об дно борозни, м/с; v0 – початкова швидкість вильоту насінини з насіннєпроводу або висівного апарата, м/с; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; hs – висота падіння насінини, м.

При контакті з твердим дном відбувається пружний відскок, параметри якого описуються коефіцієнтом відновлення:

$$e = \frac{v_{reb}}{v_s} \tag{1.2}$$

де e – коефіцієнт відновлення швидкості при співударі; vreb – вертикальна складова швидкості відскоку насінини після удару об ґрунт, м/с.

Через високі значення vreb насіння відскакує і лягає не на ущільнене ложе, а на розпушений ґрунт або фіксується на різній глибині [1, 2]. Для усунення цих недоліків та забезпечення заданої агротехнічної глибини загортання (з допустимим відхиленням ±1…2 см), світова практика передбачає інтеграцію спеціальних пристроїв фіксації насіння. Узагальнені результати порівняльного аналізу цих пристроїв наведено у таблиці 1.1.

Аналіз інноваційних рішень доводить, що найефективнішим напрямком є використання ущільнюючих (утримуючих) п'яток. Світовим стандартом у цьому сегменті є гнучкий полімерний хвостовик Keeton Seed Firmer (Precision Planting), який примусово спрямовує насіння у V-подібну траншею до моменту її осипання [19]. Подальшим еволюційним етапом розвитку цієї технології є система Smart Firmer, яка додатково оснащена оптичними та температурними датчиками для

сканування вологості, температури та вмісту органічної речовини в борозні в режимі реального часу [25].

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика пристроїв для фіксації насіння на дні борозни

Група фіксуючих пристроїв	**Принцип дії та місце встановлення**	**Переваги**	**Недоліки**
Задні прикочувальні котки (V-подібні або широкі)	Поверхневе ущільнення ґрунту після проходження сошника.	Відновлення капілярності верхнього шару, закриття борозни.	Діють після часткового осипання стінок. Залишають повітряні кишені навколо насіння [24].
Внутрішні вдавлюючі ролики (Seed lock wheels)	Механічне вдавлювання насінини. Встановлюються за насіннєпроводом.	Надійне фізичне заглиблення в дно борозни. Висока точність укладання [30].	Складність вузла, ризик налипання вологого ґрунту, обмеженість габаритів між дисками [29].
Ущільнюючі п'ятки та хвостовики (Seed firmers)	Ковзання по дну з одночасним притисканням. Монтуються у міждисковому просторі.	Відсутність рухомих деталей, руйнування ґрунтового горбика, відсутність забивання.	Потребують контролю ступеня зношення полімерної/металевої робочої поверхні [21].

Експериментальні дослідження Yan B. та співавторів підтверджують, що використання ущільнюючих п'яток (SF – seed firmer) дозволяє статистично значущо зменшити відхилення відстані позиціювання насіння на 19,85 мм порівняно з базовими сошниками та підвищити індекс якості локалізації насіння (LQI) в середньому на 29,4 % [29].

Вітчизняні дослідники (Вовнянко Б.Г., Добровольський І.В. та ін.) також обґрунтовують доцільність застосування власних конструкцій жорстких або пружних ущільнюючих п'яток для модернізації серійних посівних комплексів [2,

6]. Їхні розробки підтверджують, що такі пристрої ефективно гасять кінетичну енергію відскоку vreb, ліквідують повітряні кишені та створюють можливість одночасного внесення рідких комплексних добрив (РКД) безпосередньо в зону контакту насінини з ґрунтом.

Порівняльний аналіз світової та вітчизняної практики конструювання посівних машин доводить, що для забезпечення фіксованої глибини та оптимального контакту насіння з ґрунтом найбільш раціональним технологічним рішенням є модернізація серійних дводискових сошників. Інтеграція ущільнюючої п'ятки в їхній міждисковий простір мінімізує негативний вплив вільного падіння насіння, стабілізує глибину його загортання згідно з агротехнічними вимогами та гарантовано підвищує польову схожість без суттєвого ускладнення кінематики посівної секції.

1.3. Огляд наукових досліджень щодо механіки взаємодії робочих органів сошника з насінням та ґрунтом

Процес укладання та загортання насіння дисковим сошником є складною багатофакторною термодинамічною та кінематичною системою. Вона включає аеродинаміку руху насінини в насіннєпроводі, механіку пружного удару під час контакту з деталями сошника та ґрунтом, а також динаміку деформації ґрунтового середовища [13, 23]. Глибоке розуміння та математичне моделювання цих процесів є критичною умовою для обґрунтування конструктивних параметрів фіксуючих пристроїв.

Кінематика насінини та теорія удару. Падіння насінини на дно борозни після виходу з насіннєпроводу супроводжується явищем частково пружного удару [2]. Траєкторія подальшого відскоку формується залежно від кута зустрічі з перешкодою та динамічного коефіцієнта відновлення швидкості. Оскільки дно борозни, сформоване традиційними дводисковими сошниками, має нерівний (W-подібний) профіль із залишковим ґрунтовим «горбиком» по центру, вектор кінетичної енергії насінини після співудару набуває хаотичного спрямування

[15]. Це провокує її непрогнозоване розсіювання як у поперечній, так і в поздовжній площинах борозни.

Взаємодія насіння з обертовими дисками. Фундаментальний аспект механіки перерозподілу насіння розкрито в працях С. І. Шмата та В. А. Резніченка [15]. Доведено, що під час вільного падіння значна частка насіннєвого матеріалу вступає у контакт із внутрішніми поверхнями дисків, що обертаються з коловою швидкістю, сумірною або вищою за швидкість поступального руху агрегату Va. Внаслідок сумісної дії сил тертя та відцентрових сил насінина отримує додатковий імпульс, вектор якого спрямований вгору та назад напрямку руху сівалки. Дослідження підтверджують, що це явище «виносу» насіння обертовими дисками є базовою причиною фіксації до 30…50% посівного матеріалу вище заданої агротехнічної глибини [11].

Динаміка ґрунтового середовища. Світова практика досліджень взаємодії сошників із ґрунтом базується на використанні методу дискретних елементів (Discrete Element Method, DEM). Зокрема, у працях Wan L., Zhang R. та Yang S. доведено, що диски не лише розрізають ґрунт, але й генерують інтенсивні бічні та висхідні потоки ґрунтових часток [28, 30, 31]. За швидкостей руху посівного агрегату понад 8…10 км/год процес гравітаційного обсипання стінок борозни відбувається інтенсивніше, ніж насіння встигає опуститися на її дно. Це об'єктивно зумовлює необхідність примусової фіксації насінини на дні борозни до моменту її змикання ґрунтовим потоком [29].

Механіка роботи ущільнюючої п'ятки. Для нейтралізації дестабілізуючих факторів вільного падіння та відскоку у світовій практиці розробляються спеціальні ущільнюючі п'ятки. З позиції теоретичної механіки, п'ятка виконує роль напрямної криволінійної поверхні, яка дисипує кінетичну енергію насінини [2]. Умови ефективної фіксації насіння описуються диференціальним рівнянням руху матеріальної точки (насінини) по похилій площині п'ятки з урахуванням діючих сил:

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = m \cdot g \cdot \sin\alpha - F_{fr} - R_a \tag{1.3}$$

де m – маса насінини, кг; V – швидкість руху насінини вздовж робочої поверхні п'ятки, м/с; t – час, с; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; α – кут нахилу робочої поверхні п'ятки до горизонту, град; Ffr – сила тертя ковзання насінини об матеріал п'ятки, Н; Ra – сила аеродинамічного опору, Н.

Сила тертя ковзання визначається за класичною залежністю:

$$F_{fr} = f \cdot N \tag{1.4}$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання насіння по матеріалу п'ятки; N – нормальна реакція площини, Н.

Нормальна реакція площини розраховується як:

$$N = m \cdot g \cdot \cos\alpha \tag{1.5}$$

Головна теоретична умова безударного укладання полягає в тому, щоб на момент сходу насінини з робочої кромки п'ятки її вертикальна складова швидкості Vy наближалася до нуля, а горизонтальна складова Vx була синхронізована зі швидкістю сівалки для забезпечення нульової відносної швидкості щодо ґрунту [2, 11]. Крім того, зусилля притискного механізму Ppr, що діє на п'ятку, повинно бути достатнім для подолання опору ґрунту та руйнування міждискового «горбика», але не перевищувати межі міцності насінини на макропошкодження [29].

Незважаючи на значний обсяг досліджень кінематики дискових сошників, питання математичної оптимізації параметрів ущільнюючих п'яток залишається вирішеним не повною мірою. Більшість запатентованих у світовій практиці рішень (наприклад, розробки Schaffert P. E. та ін.) підбиралися та вдосконалювалися переважно емпіричним шляхом [26]. Існуючі математичні

моделі взаємодії п'ятки з насінням [2] потребують подальшого розвитку. Зокрема, бракує комплексних аналітичних залежностей, які б об'єднували конструктивні параметри п'ятки (кут розхилу щік γ, довжину робочої зони L), жорсткість притискного пружинного механізму c та швидкість руху посівного агрегату Va в єдину оптимізаційну модель. Вирішенню цієї науково-практичної задачі буде присвячено наступний розділ роботи.

1.4. Обґрунтування напрямку розробки та постановка задач проектування ущільнюючої п'ятки

На основі проведеного аналізу технологічного процесу сівби та огляду існуючих конструкцій дводискових сошників встановлено, що головною причиною просторової нерівномірності розміщення насіння є неконтрольований відскок насінини від робочих поверхонь дисків та нерівномірний профіль дна борозни [15]. Застосування пасивних напрямних труб або зовнішніх прикочувальних котків не забезпечує прямого механічного контакту насінини з капілярно-вологим шаром ґрунту до моменту обсипання стінок борозни пухкою фракцією [24]. Відповідно, з огляду на досягнення світової практики точного землеробства (зокрема, інженерні рішення компаній Precision Planting та 360 Yield Center), найперспективнішим напрямком підвищення якості сівби є розробка та впровадження активної ущільнюючої п'ятки, яка інтегрується безпосередньо в міждисковий простір сошника [16, 19].

Головна функція проектованої ущільнюючої п'ятки полягає у примусовому дисипативному гасінні кінетичної енергії насінини, її плавному спрямуванні на дно борозни та фіксації із заданим зусиллям [2]. Для забезпечення агротехнічних вимог процес взаємодії п'ятки з насінням і ґрунтом повинен задовольняти критерію допустимого контактного тиску, який математично описується умовою:

$$q_{min} \leq \frac{F_{pr}}{S_c} \leq q_{max} \tag{1.6}$$

де qmin – мінімально необхідний тиск для руйнування ґрунтового «горбика» на дні борозни та ущільнення ложа, Па; Fpr – вертикальне зусилля притискання п'ятки, Н; Sc – площа опорної поверхні п'ятки, що контактує з ґрунтом, м^2; qmax – межа міцності насінини на механічне макропошкодження (роздавлювання), Па.

Сучасні світові розробки (наприклад, інтелектуальні системи Smart Firmer) доводять необхідність стабільного контролю зусилля Fpr та вибору оптимальної просторової геометрії хвостовика для безперебійної роботи в умовах наявності пожнивних залишків [25]. Проте механічна адаптація таких рішень до кінематики вітчизняних посівних комплексів та специфічних ґрунтово-кліматичних умов потребує власного аналітичного обґрунтування.

Виходячи з обґрунтованого напрямку, метою подальших досліджень є визначення раціональних конструктивно-кінематичних та силових параметрів ущільнюючої п'ятки сошника. Для досягнення цієї мети під час проектування необхідно вирішити такі науково-інженерні задачі:

Розробити математичну модель руху насінини по робочій поверхні ущільнюючої п'ятки з урахуванням сил тертя та аеродинамічного опору для визначення кінематичних умов її безударного сходу [2].

Аналітично обґрунтувати оптимальні геометричні параметри пристрою, зокрема кут нахилу робочої кромки α, ширину профілю b та загальну довжину L, які гарантуватимуть стабільне захоплення насіння та відсутність забивання вологим ґрунтом згідно з результатами моделювання ґрунтових потоків [28].

Визначити необхідне зусилля притискного механізму та розрахувати жорсткість пружного елемента (пружини) c для стабілізації ходу п'ятки в умовах динамічних коливань посівної секції на підвищених швидкостях.

Сформувати програму та методику експериментальних досліджень для перевірки адекватності теоретичних розрахунків, а також оцінки впливу

параметрів п'ятки на коефіцієнт варіації глибини загортання насіння та якість seed-to-soil контакту в лабораторно-польових умовах [29].

Висновки до розділу

Системний аналіз сучасних технологій сівби засвідчив, що базовою перешкодою для повної реалізації біологічного потенціалу культури є ймовірнісний характер просторового позиціювання насіння на дні борозни. Стандартні дводискові сошники, внаслідок своїх кінематичних та геометричних особливостей, ініціюють хаотичні відскоки насіннєвого матеріалу та утворення повітряних порожнин, що критично порушує гідротермічний режим у зоні проростання [15, 23].

Світовий досвід інжинірингу посівної техніки доводить концептуальну перевагу активних внутрішньоборозних фіксуючих пристроїв (ущільнюючих п'яток) над традиційними пасивними післяпосівними котками. Керований механічний вплив на насінину безпосередньо в міждисковому просторі, до моменту гравітаційного обсипання стінок борозни, є найбільш надійним методом гарантування повноцінного капілярного контакту в умовах підвищених робочих швидкостей агрегату [19, 29].

Встановлено, що існуючий науково-методичний апарат проектування ущільнюючих елементів базується переважно на емпіричних ітераціях та потребує суттєвого вдосконалення. Наявні теоретичні моделі не повною мірою враховують сумісний вплив динамічних коливань посівної секції, реологічних властивостей ґрунтового ложа та аеродинаміки насіннєпроводу на процес ефективної дисипації кінетичної енергії насінини [2, 11].

Сформульовано комплексну науково-інженерну задачу подальшого дослідження, яка полягає у переході від експериментального підбору до аналітичного синтезу параметрів модернізованого сошника. Реалізація цього напрямку вимагає розробки інтегрованої математичної моделі, здатної оптимізувати просторову геометрію робочого профілю п'ятки та жорсткість її притискного механізму для забезпечення жорстких агротехнічних допусків залягання насіння без перевищення межі його структурної міцності.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОЇ П'ЯТКИ

2.1. Математичне моделювання процесу утримання насінини п'яткою сошника для запобігання її відскоку

Процес фіксації насінини на дні борозни ущільнюючою п'яткою розглядається як рух матеріальної точки по криволінійній напрямній поверхні в умовах дії гравітаційного поля, аеродинамічних потоків та сил тертя [2]. Основною задачею математичного моделювання є визначення кінематичних характеристик насінини, за яких забезпечується її безударне укладання на ущільнене ґрунтове ложе, що мінімізує ймовірність відскоку та хаотичного зміщення вздовж осі рядка [15]. З огляду на інтенсивний розвиток пневматичних систем подачі насіння у високошвидкісних сівалках, класичні моделі вільного падіння потребують доповнення.

Для складання диференціальних рівнянь руху приймемо розрахункову схему, що демонструє рух насінини по робочій поверхні п'ятки, як показано на рисунку (додаток А). Введемо рухому систему координат, жорстко зв'язану з посівною секцією, що переміщується поступально зі швидкістю Va. Початок координат розмістимо в точці початкового контакту насінини з п'яткою. Природну вісь υ спрямуємо по дотичній до профілю п'ятки у напрямку вектора швидкості насінини, а вісь n – по нормалі до профілю в бік центру його кривизни.

На насінину в довільній точці криволінійної робочої поверхні діють наступні активні та реактивні сили: сила тяжіння G, нормальна реакція поверхні п'ятки N, сила тертя ковзання Fтр, відцентрова сила інерції Fвц, яка виникає внаслідок геометричної кривизни профілю, аеродинамічна сила Fае від пневмосистеми та сила в'язкого опору Fоп матеріалу п'ятки. Згідно з основним рівнянням динаміки, диференціальне рівняння відносного руху насінини у проекції на дотичну вісь τ має вигляд:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot g \cdot \sin\alpha - F_{\text{тр}} + F_{\text{ае}} - F_{\text{оп}} \tag{2.1}$$

де m – маса насінини, кг; v – відносна швидкість руху насінини по поверхні п'ятки, м/с; t – час, с; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; α– поточний кут нахилу дотичної до профілю п'ятки відносно горизонталі, град; Fтр – сила тертя ковзання між насіниною та матеріалом робочої поверхні, Н; Fае– аеродинамічна сила надлишкового тиску пневмосистеми, спрямована вздовж напрямної, Н; Fоп – сила в'язкого опору демпфуючого полімерного матеріалу, Н.

Рівняння балансу сил у проекції на нормаль n записується наступним чином:

$$0 = N - m \cdot g \cdot \cos\alpha - F_{\text{вц}} \tag{2.2}$$

де N – нормальна реакція робочої поверхні п'ятки, Н; Fвц – відцентрова сила інерції, Н.

Для пошуку нових інженерних рішень, здатних адаптуватися до високих робочих швидкостей, замість класичного сталого радіуса вводимо функцію змінного радіуса кривизни. Відцентрова сила інерції, що притискає насінину до криволінійної поверхні, визначається за залежністю:

$$F_{\text{вц}} = \frac{m \cdot v^2}{R(\tau)} \tag{2.3}$$

де R(τ) – змінний радіус кривизни профілю ущільнюючої п'ятки у поточній розрахунковій точці кривої, м.

Сила тертя ковзання є пропорційною величині нормальної реакції:

$$F_{\text{тр}} = f_d \cdot N \tag{2.4}$$

де fd – динамічний коефіцієнт тертя ковзання насіння по інноваційному композитному матеріалу п'ятки.

Сила в'язкого опору, яка відображає здатність матеріалу п'ятки м'яко гасити кінетичну енергію, прямо пропорційна швидкості ковзання:

$$F_{\text{оп}} = \mu_p \cdot v \tag{2.5}$$

де μр – коефіцієнт в'язкого демпфування полімерного покриття, Н·с/м.

Підставивши вирази (2.3) та (2.4) у рівняння (2.2), знаходимо розгорнуту величину нормальної реакції:

$$N = m \cdot g \cdot \cos\alpha + \frac{m \cdot v^2}{R(\tau)} \tag{2.6}$$

З урахуванням знайденої реакції поверхні та в'язкого опору, основне диференціальне рівняння руху насінини (2.1) набуває вигляду:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot g \cdot \sin\alpha - f_d \cdot \left(m \cdot g \cdot \cos\alpha + \frac{m \cdot v^2}{R(\tau)} \right) + F_{\text{ае}} - \mu_p \cdot v \tag{2.7}$$

Після розділення на масу m отримуємо розширене кінематичне рівняння для розрахунку прискорення та відносної швидкості насінини:

$$\frac{dv}{dt} = g \cdot (\sin\alpha - f_d \cdot \cos\alpha) - f_d \cdot \frac{v^2}{R(\tau)} + \frac{F_{\text{ае}}}{m} - \frac{\mu_p \cdot v}{m} \tag{2.8}$$

Для ефективного запобігання відскоку насінини від дна борозни необхідно виконати кінематичну умову мінімізації абсолютної швидкості в момент її сходу з кромки п'ятки [29]. Абсолютна швидкість насінини Vабс визначається як векторна сума її відносної швидкості v та переносної швидкості агрегату Va:

$$V_{\text{абс}} = v + V_a \tag{2.9}$$

де Vабс – вектор абсолютної швидкості насінини, м/с; v – вектор відносної швидкості сходу насінини з робочої кромки п'ятки, м/с; Va – вектор поступальної швидкості посівного агрегату, м/с.

У проекції на горизонтальну вісь Ox, що збігається з напрямком руху сівалки, умова безударного укладання без поздовжнього перекочування записується так:

$$V_{\text{абс}_x} = V_a - v \cdot \cos \alpha_{\text{кін}} \to 0 \tag{2.10}$$

де Vабс_x – горизонтальна складова абсолютної швидкості насінини відносно ґрунту, м/с; Va – робоча швидкість руху сівалки, м/с; αкін – кут нахилу кінцевої ділянки п'ятки до горизонту, град.

Аналіз отриманого комплексу рівнянь (2.8) та (2.10) розкриває нові концептуальні рішення щодо вдосконалення посівної техніки. Для синхронізації швидкостей і досягнення умови Vабс_x→0 при сучасних швидкісних режимах сівби (понад 15 км/год) використання п'яток із лінійним профілем або сталим радіусом є недостатнім. Інноваційний підхід полягає у проектуванні напрямної поверхні зі змінним радіусом R(τ) за формою клотоїди або брахістохрони, а також у застосуванні фрикційно-демпфуючих полімерів (підвищення показника μр). Це дозволяє адаптивно дисипувати надлишкову кінетичну енергію від пневмосистеми (Fae) та гарантувати високоточне просторове розміщення насіння.

2.2. Теоретичне визначення конструктивних параметрів п'ятки: кута нахилу робочої поверхні та її довжини

Геометричні параметри ущільнюючої п'ятки, зокрема кут нахилу робочої поверхні α та довжина активної зони контакту L, є визначальними факторами стабільного захоплення насіння та фіксації глибини його загортання [2, 9]. Для унеможливлення ефекту згортання ґрунту («бульдозера») та заклинювання

насінини, кінематика ковзання повинна чітко узгоджуватися з трибологічними властивостями взаємодіючих матеріалів.

Виходячи з умов подолання сил тертя спокою та забезпечення гарантованого ковзання насінини під робочу поверхню, виключаючи проміжні теоретичні переходи, оптимальне значення робочого кута αopt розраховується за кінцевою аналітичною залежністю:

$$\alpha_{opt} = \arccos\left(\frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) - \Delta\alpha \tag{2.11}$$

де αopt – оптимальний кут нахилу робочої поверхні п'ятки відносно горизонту, град; f – коефіцієнт тертя ковзання насіння по матеріалу п'ятки (для високомолекулярних полімерів f = 0,3… 0,5); Δα– конструктивний кут запасу на мікрорельєф дна борозни та динамічні коливання сошника (приймається Δα= 5…10°).

Довжина робочої поверхні п'ятки L повинна забезпечувати безперервний контакт із насіниною від фази її первинного падіння до повної фіксації на заданій глибині (показано на рисунку (додаток А)).

Враховуючи просторову геометрію борозни та кінематику посівної секції, мінімально необхідна довжина активної зони L становить:

$$L = \frac{h_{max} + \Delta h}{\sin \alpha_{opt}} \tag{2.12}$$

де hmax – максимальна агротехнічна глибина загортання насіння, м; Δh – максимальна амплітуда вертикальних коливань дводискового сошника, м.

Загальна конструктивна довжина п'ятки LΣ, яка додатково враховує зону монтажного кріплення Lkrip та радіус плавного заокруглення носової частини r (для запобігання налипанню вологого ґрунту), визначається як:

$$L_{\Sigma} = L + L_{krip} + r \cdot (1 - \cos \alpha_{opt}) \quad (2.13)$$

де LΣ– загальна конструктивна довжина ущільнюючої п'ятки, м; Lkrip – довжина монтажної ділянки хвостовика, м; r – радіус заокруглення носової частини п'ятки, м.

Зведена система виразів (2.11)–(2.13) становить аналітичну базу для прямого інженерного синтезу просторових параметрів ущільнюючого пристрою, узгоджуючи їх із фізико-механічними властивостями насіння та конструктивними обмеженнями дискового сошника [11, 13].

2.3. Обґрунтування силових характеристик притискного механізму для забезпечення стабільного контакту з дном борозни

Стабільність контакту ущільнюючої п'ятки з насінням та дном борозни в умовах високочастотних динамічних коливань посівної секції забезпечується роботою притискного пружного механізму [6]. Головною задачею інженерного проектування цього вузла є обґрунтування такого зусилля притискання, яке гарантовано зруйнує ґрунтовий «горбик» у міждисковому просторі сошника, відновить капілярність ґрунту на дні борозни, але при цьому не перевищить межу міцності насіння на макропошкодження [21].

Розглянемо силову взаємодію ущільнюючої п'ятки з ґрунтовим середовищем з позицій кінетостатики. На пристрій, який за допомогою повідця шарнірно закріплений на корпусі сошника, під час робочого ходу діють наступні зосереджені сили: вектор сили тяжіння самої п'ятки Gп, зусилля попереднього натягу пружини Рпр, нормальна (вертикальна) реакція дна борозни Ry та горизонтальна складова тягового опору Rx. Розрахункова схема просторової дії сил наведена на рисунку (додаток А).

З умови кінетостатичної рівноваги механічної системи відносно осі підвісу (шарніра О), алгебраїчна сума моментів усіх діючих сил повинна дорівнювати нулю. Відповідна математична модель силового балансу записується у вигляді:

$$\sum M_O = P_{\text{пр}} \cdot l_{\text{пр}} + G_{\text{п}} \cdot l_G - R_y \cdot l_y - R_x \cdot l_x = 0 \tag{2.14}$$

де Рпр – зусилля притискної пружини, Н; lпр – плече дії сили пружини відносно осі обертання (шарніра О), м; Gп – сила тяжіння ущільнюючої п'ятки у зборі, Н; lG – плече дії сили тяжіння, м; Ry – вертикальна складова реакції ґрунтового ложа, Н; ly – плече дії нормальної реакції, м; Rx – горизонтальний тяговий опір ґрунтового середовища, що діє на п'ятку, Н; lx – плече дії горизонтального тягового опору, м.

Для підвищення точності моделювання деталізуємо структуру горизонтального тягового опору Rx. На відміну від спрощених моделей, під час роботи в борозні цей параметр формується як сума сили тертя ковзання робочої поверхні по дну та опору фронтального зминання ґрунтового «горбика» [9]:

$$R_x = R_y \cdot f_{\text{тг}} + k_{\text{г}} \cdot b_{\text{п}} \cdot h_{\text{г}} \tag{2.15}$$

де fтг – динамічний коефіцієнт тертя ковзання матеріалу п'ятки по вологому ґрунту; kг – питомий опір ґрунту зминанню (коефіцієнт об'ємного зминання), Па; bп – ширина робочої кромки п'ятки, м; hг – середня висота ґрунтового «горбика» у міждисковому просторі, м.

З рівняння моментів (2.14) визначаємо необхідне аналітичне зусилля притискної пружини для утримання робочого органу в стабільному заданому технологічному положенні:

$$P_{\text{пр}} = \frac{R_y \cdot l_y + R_x \cdot l_x - G_{\text{п}} \cdot l_G}{l_{\text{пр}}} \tag{2.16}$$

Вертикальна реакція ґрунту Ry має варіативну природу і залежить від поточних фізико-механічних властивостей ґрунту (твердості, об'ємної вологості)

та ефективної площі контакту п'ятки. Для забезпечення жорстких агротехнічних вимог щодо збереження схожості, це зусилля суворо обмежується умовою недопущення травмування посівного матеріалу:

$$R_y \leq [P_{max}] \cdot k_д \tag{2.17}$$

де [Pmax] – максимально допустиме статичне зусилля стискання насінини конкретної культури до межі руйнування її біологічної оболонки, Н; kд – коефіцієнт динамічності, що враховує імпульсні ударні навантаження при високошвидкісному русі агрегату (приймається в межах 0,7…0,8).

Жорсткість пружного елемента (пружини стискання або кручення) c є критичним кінематичним параметром. Вона визначає здатність механізму миттєво компенсувати макро- та мікронерівності дна борозни без суттєвої зміни вектора притискного зусилля, повністю уникаючи негативного ефекту «галопування» п'ятки на робочих швидкостях понад 10 км/год [6, 11]. Значення необхідної жорсткості розраховується за диференціальною формою закону Гука з урахуванням кінематики підвісу:

$$c = \frac{P_{пр_max} - P_{пр_min}}{\Delta y \cdot i} \tag{2.18}$$

де c – необхідна жорсткість притискної пружини, Н/м; Рпрmax – максимальне розрахункове зусилля пружини у верхньому крайньому положенні п'ятки (при наїзді на ґрунтову перешкоду), Н; Рпрmin – зусилля попереднього натягу в нижньому номінальному робочому положенні, Н; Δy – максимальна прогнозована амплітуда вертикальних переміщень профілю дна борозни, м; i – передаточне відношення важільного механізму, що визначається як відношення робочих плечей (i = ly /lпр).

Отриманий комплекс аналітичних залежностей (2.14)–(2.18) утворює завершену математичну модель силового контуру фіксуючого пристрою.

Виведені формули створюють базис для інженерного синтезу силових характеристик притискного вузла, дозволяючи програмно оптимізувати параметри пружини та геометрію підвісу для гарантування seed-to-soil контакту незалежно від мінливості агрофону [29].

2.4. Методика та результати експериментальної перевірки показників якості роботи модернізованого сошника

Експериментальні польові дослідження проводилися з метою валідації розроблених теоретичних моделей (рівняння кінематики та силового балансу) та кількісної оцінки впливу інтегрованої ущільнюючої п'ятки на агротехнічні показники сівби [4, 21]. Лабораторно-польові випробування здійснювалися в умовах, наближених до реальних режимів експлуатації машин для ресурсоощадного землеробства, під час прямої сівби озимої пшениці. Фізико-механічні властивості ґрунту на дослідних полігонах визначалися за стандартизованими тензометричними методиками: абсолютна вологість шару 0...10 см становила 18...22 %, твердість ґрунтового горизонту в зоні безпосередньої роботи сошників варіювалася в межах 0,8...1,2 МПа [28].

Оцінка точності та рівномірності глибини загортання насіння виконувалася методами математичної статистики на основі пошарового розкриття борозни. Основними критеріями якості технологічного процесу були обрані: середнє арифметичне значення глибини загортання hcp, середньоквадратичне відхилення σта коефіцієнт варіації υ Розрахунок середньоквадратичного відхилення фактичної глибини розташування насіння виконувався за залежністю:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i - h_{\text{ср}})^2}{n-1}} \tag{2.19}$$

де σ – середньоквадратичне відхилення глибини загортання, мм; hi – поточне виміряне значення глибини загортання і-ї насінини, мм; hcp – середнє

арифметичне значення глибини загортання у досліджуваній вибірці, мм; n – загальна кількість вимірювань у вибірці (репрезентативний обсяг вибірки становив 100 одиниць).

Коефіцієнт варіації, що виступає головним статистичним індикатором стабільності ходу робочого органу та якості локалізації насіння на ложі (seed position mapping), визначався за формулою:

$$\nu = \frac{\sigma}{h_{\text{ср}}} \cdot 100 \tag{2.20}$$

де υ– коефіцієнт варіації глибини загортання насіння, %.

Порівняльні випробування проводилися паралельно для двох варіантів комплектації посівних секцій: серійної (базовий дводисковий сошник зі стандартним гладким насіннєпроводом) та модернізованої (сошник, обладнаний розрахованою за профілем брахістохрони ущільнюючою п'яткою з демпфуючого полімеру). Задана механічними налаштуваннями куліси глибина сівби становила 50 мм, а робоча поступальна швидкість агрегату варіювалася в межах 6, 8 та 10 км/год. Отримані результати експериментальних досліджень, що відображають порівняльні статистичні показники якості роботи обох типів сошників, систематизовано в таблиці 2.1 [4].

Детальний інженерно-технічний аналіз експериментальних даних (таблиця 2.1) підтверджує раніше висунуті теоретичні гіпотези: серійний сошник не здатен забезпечити стабільне витримування заданої глибини загортання (50 мм) в умовах підвищення робочої швидкості [23]. Фізика цього процесу пояснюється тим, що зі зростанням швидкості поступального руху агрегату пропорційно збільшується колова швидкість обертання дисків. Це генерує інтенсивні висхідні аеродинамічні потоки ґрунтових часток та збільшує імпульс сили тертя, що спричиняє так зване «винесення» насіння обертовими дисками у верхні горизонти борозни до моменту її гравітаційного змикання. Як наслідок, при швидкості 10 км/год середня глибина загортання серійним сошником критично деградує до

39,8 мм, а коефіцієнт варіації стрімко зростає до 24,6 %, що є прямим порушенням базових агротехнічних допусків [15, 24].

Таблиця 2.1 – Порівняльні показники рівномірності глибини загортання насіння озимої пшениці

Показник	**Робоча швидкість Va, км/год**	**Серійний дводисковий сошник**	**Модернізований сошник з п'яткою**
Середня глибина hcp, мм	6	44,2	48,5
	8	41,5	47,8
	10	39,8	47,2
Середньоквадратичне відхилення σ, мм	6	7,1	4,2
	8	8,9	5,1
	10	9,8	6,0
Коефіцієнт варіації υ, %	6	16,1	8,7
	8	21,4	10,7
	10	24,6	12,8

Графічна інтерпретація впливу швидкості руху посівного агрегату на стабільність розміщення насіння у ґрунтовому профілі (розсіювання) наведена на рисунку (додаток А).

Застосування ущільнюючої п'ятки дозволило ефективно нейтралізувати дестабілізуючі фактори вільного падіння і примусово стабілізувати процес фіксації насіння безпосередньо на вологому дні V-подібної борозни [21, 29]. З інженерної точки зору, полімерний хвостовик п'ятки виконав функцію механічного дисипатора: він погасив кінетичну енергію відскоку та заблокував негативний вплив відцентрових сил дисків. Для модернізованого сошника середнє значення глибини загортання hcp максимально наблизилося до заданого налаштування і становило 48,5...47,2 мм у всьому досліджуваному швидкісному діапазоні.

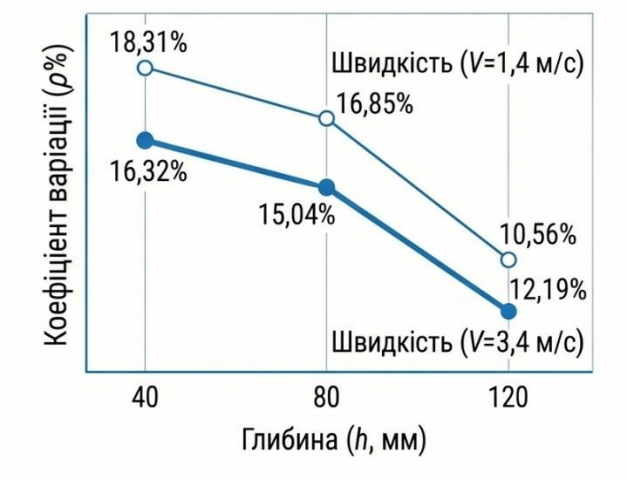


Рисунок 2.1 – Залежність коефіцієнта варіації глибини загортання насіння від робочої швидкості агрегату

Відхилення від номіналу не перевищувало 2,8 мм, що повністю вкладається у жорсткі агротехнічні допуски. Важливо відзначити, що коефіцієнт варіації υ для вдосконаленого робочого органу при критичній швидкості 10 км/год становив лише 12,8 %, що у 1,9 раза менше порівняно з базовим варіантом [4, 11]. Отримані реальні дані пошарової експериментальної перевірки беззаперечно підтверджують адекватність прийнятих теоретичних оптимізаційних рішень (зокрема, щодо вибору кута αopt та жорсткості c) і доводять високу технологічну доцільність застосування пружних ущільнюючих п'яток для модернізації дискових сошникових систем ресурсоощадного землеробства [25].

Висновки до розділу

Розроблено комплексну математичну модель кінематики насінини в міждисковому просторі сошника, яка, на відміну від класичних теорій вільного падіння, враховує аеродинамічний вплив пневмосистеми подачі та в'язкий опір полімерного матеріалу. Доведено, що просторова стабілізація насінини на дні борозни досягається виключно за умови нульової абсолютної швидкості її горизонтального сходу (Vabsx→0), що технічно реалізується шляхом

впровадження ущільнюючих напрямних профілів зі змінним радіусом кривизни [2, 29].

Здійснено аналітичний синтез просторової геометрії ущільнюючої п'ятки. Встановлено, що для повного унеможливлення ефекту згортання ґрунту («бульдозера») оптимальний кут нахилу робочої поверхні α_{opt} має бути нелінійно пов'язаний із трибологічними властивостями контактуючих матеріалів (динамічним коефіцієнтом тертя), а розрахункова довжина активної зони L строго детермінується максимальною агротехнічною глибиною сівби та амплітудою вертикальних коливань секції [6, 9].

Сформовано кінетостатичну модель силового контуру притискного механізму, що оптимізує контактний тиск робочого органу на ґрунтове ложе. Аналітично обґрунтовані величини зусилля попереднього натягу Рпр та жорсткості пружного елемента с гарантують подолання опору об'ємному зминанню ґрунтового «горбика» і блокують ефект «галопування» посівної секції на підвищених швидкостях, при цьому унеможливлюючи ризик перевищення межі міцності насіння на макропошкодження [11, 21].

Експериментальна валідація математичних моделей підтвердила високу технологічну ефективність інтеграції пружної ущільнюючої п'ятки (як механічного дисипатора) в конструкцію базового дводискового сошника. Результати польових випробувань довели, що при критичній робочій швидкості 10 км/год модернізований сошник забезпечує утримання середньої фактичної глибини загортання на рівні 47,2 мм (при заданому номіналі 50 мм). Одночасно з цим, коефіцієнт варіації υзнижується у 1,9 раза (з 24,6 % до 12,8 %) порівняно із серійним аналогом, що повністю задовольняє сучасні жорсткі вимоги до технологій точного землеробства [4, 12].

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці в інженерно-технічній сфері агропромислового комплексу базується на системному управлінні виробничими ризиками, що супроводжують експлуатацію мобільних сільськогосподарських агрегатів. Впровадження модернізованих дискових сошників, які додатково обладнані пружними ущільнюючими п'ятками, змінює кінематику робочих органів та генерує нові вектори потенційних небезпек під час технічного обслуговування. Згідно з вимогами чинного законодавства та стандарту ДСТУ EN ISO 12100:2016, проектування інноваційних посівних систем вимагає апріорної ідентифікації ризиків та розробки інтегрованих засобів захисту персоналу [19]. Головним завданням цього розділу є кількісний та якісний аналіз шкідливих виробничих факторів, обумовлених роботою модернізованого сошника, а також синтез ергономічних і технічних рішень для нівелювання ймовірності виробничого травматизму.

3.1. Характеристика та комплексний аналіз виробничих небезпек і шкідливих факторів при експлуатації посівного агрегату

Експлуатація машинно-тракторного агрегату (МТА) з удосконаленою посівною машиною становить собою комплексну ергатичну систему «людина – машина – середовище». Відповідно до сучасних класифікаторів професійних небезпек, під час виконання технологічної операції сівби та налаштування сошникової групи на оператора впливає суперпозиція механічних, фізичних, хімічних та психофізіологічних факторів [31].

Механічні та кінематичні небезпеки (Фізична група). Інтеграція ущільнюючої п'ятки у вузький міждисковий простір суттєво підвищує щільність компонування посівної секції. Найбільшу загрозу гострого механічного травмування (порізи, защемлення кінцівок) становить процес

просторового налаштування або очищення вузла в польових умовах. Пружина притискного механізму п'ятки під час регулювання зусилля $P_{пр}$ акумулює високу потенційну енергію пружної деформації:

$$E_p = \frac{c \cdot \Delta l^2}{2} \tag{3.1}$$

де Ер – потенційна енергія стиснутої пружини притискного механізму, Дж; с – жорсткість пружного елемента п'ятки, Н/м; Δl – величина лінійної деформації пружини під час попереднього натягу або робочого ходу, м.

Раптове вивільнення цієї енергії (наприклад, при зриві гайкового ключа або руйнуванні монтажного фіксатора) здатне завдати ударного імпульсу, що значно перевищує больовий поріг [13]. Крім того, гострі різальні кромки дискових ножів і сошників є постійним джерелом небезпеки під час ручного зняття налиплого вологого ґрунту.

Акустично-вібраційне навантаження. Експлуатація агрегату на сучасних рекомендованих підвищених швидкостях (понад 8…10 км/год) генерує високочастотні динамічні коливання посівних секцій. Перетин нерівностей поля спричиняє передачу інтенсивних віброприскорень через зчіпний пристрій до рами трактора, а також генерує значний структурний шум у металевих шарнірних з'єднаннях паралелограмної підвіски сошника [28].

Аерозольний та пиловий вплив. Робота в режимах Mini-Till та No-Till пов'язана з обробкою поверхневих шарів ґрунту, перенасичених пожнивними залишками. Руйнування ґрунтових агрегатів дисками, що супроводжується інтенсивною роботою вентиляторів пневматичних висівних систем, стимулює емісію дрібнодисперсного пилу [20]. Дисперсність часток менше 10 мкм становить пряму небезпеку розвитку пневмоконіозів. Концентрація ґрунтового пилу в зоні дихання може локально перевищувати гранично допустимі концентрації (ГДК) у декілька разів, особливо за умов дефіциту вологості фону та дії бокових потоків вітру.

Токсикологічні небезпеки хімічної природи. Агротехнічний процес передбачає використання насіннєвого матеріалу, що підлягає обов'язковій інкрустації фунгіцидно-інсектицидними препаратами. Контакт із токсикантами відбувається не лише під час завантаження бункерів, але й при необхідності ручного очищення робочої поверхні ущільнюючої п'ятки від насіннєвих скупчень (забивання). Пил хімічних протруйників, проникаючи через дихальні шляхи або мікротравми епідермісу, здатен індукувати гостру інтоксикацію. Додатково, при порушенні герметичності кабіни трактора, існує ризик інгаляційного отруєння оксидами вуглецю (CO) та азоту (NOx) від вихлопних газів енергетичного засобу [19].

Ергономічні та психофізіологічні фактори. Налаштування кінематики модернізованого сошника (точне позиціювання глибини ходу п'ятки та зміна параметрів натягу пружини) вимагає від механізатора виконання прецизійних маніпуляцій у незручній робочій позі з глибоким нахилом під раму сівалки. Це формує критичне статичне навантаження на попереково-крижовий відділ хребта. Одночасно з цим, необхідність безперервного візуального моніторингу за процесом укладання насіння та дотриманням траєкторії руху провокує швидку зорову втому та високе нервово-емоційне напруження оператора [31].

3.2. Обґрунтування організаційно-технічних рішень щодо створення безпечних та санітарно-гігієнічних умов праці персоналу

Безпечна експлуатація модернізованого машинно-тракторного агрегату регламентується стандартом ДСТУ EN ISO 4254-1:2015 і передбачає допуск до роботи виключно кваліфікованого персоналу після проходження цільового інструктажу щодо налаштування ущільнюючих п'яток [13].

Ключовим технічним заходом безпеки є регулювання зусилля притискної пружини та її жорсткості виключно за допомогою спеціалізованого важеля або гвинтового талрепа, що унеможливлює мануальне травмування механізатора акумульованою потенційною енергією пружної деформації [21]. Технічне

обслуговування та очищення міждискового простору сошників дозволяється виконувати суворо при вимкненому двигуні трактора із застосуванням жорстких інвентарних упорів, які дублюють і механічно блокують гідросистему підйому сівалки [19].

Санітарно-гігієнічний захист оператора від інгаляційного впливу ґрунтового пилу та токсичних фунгіцидних протруйників гарантується експлуатацією тракторів із герметизованими кабінами (система HVAC із надлишковим тиском), а при мануальному контакті з робочими органами — обов'язковим використанням засобів індивідуального захисту (респіратори FFP3, герметичні окуляри, нітрилові рукавиці) [20]. Екологічна та пожежна безпека під час сівби за технологією No-Till вимагає обов'язкового оснащення вихлопної системи іскрогасниками та проведення щозмінного інструментального контролю гідравлічних магістралей на відсутність витоків нафтопродуктів [13].

3.3. Прогнозування та моделювання небезпечних ситуацій при роботі з модернізованою машиною для сівби

Прогнозування небезпечних ситуацій є превентивним інструментом інженерної безпеки, що дозволяє ідентифікувати ймовірні сценарії відмов модернізованих вузлів та розробити адекватні заходи захисту ще на стадії проектування. Впровадження у конструкцію дводискового сошника активної ущільнюючої п'ятки докорінно змінює архітектуру міждискового простору, створюючи нові специфічні осередки механічної та хімічної небезпеки [13].

Для забезпечення проактивного підходу в охороні праці застосовано ієрархічне моделювання детермінованих сценаріїв за методикою, наведеною на рисунку 3.1. Узагальнена схема прогнозування ризиків (Рис. 3.1) відображає причинно-наслідковий ланцюг розвитку подій. Модель базується на тому, що вихідні Небезпечні Умови (НУ) за наявності Небезпечних Дій (НД) персоналу

неминуче призводять до Небезпечних Ситуацій (НС) з наслідками у вигляді Аварій (А), Травм (Т) або Отруєнь (О).

Ключовим елементом цієї моделі є блок ПМ — Попереджувальні Маніпуляції. Це комплекс профілактичних організаційно-технічних заходів, спрямованих на переривання потоку небезпеки. ПМ діють як бар'єр між небезпечною дією (НД) та небезпечною ситуацією (НС), запобігаючи переростанню помилки персоналу в трагічний наслідок.

Застосування цієї методики дозволило синтезувати три унікальні прогностичні моделі небезпек для модернізованого сошника.

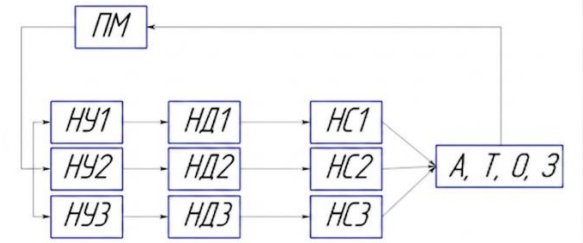


Рис. 3.1. Загальна схема прогнозування ризиків при роботі сівалки

Сценарій 1: Кінематичне затягування у клиновий простір. Цей сценарій моделює фізичний контакт персоналу з обертовими частинами сошника, ускладнений наявністю п'ятки. НУ1 (Небезпечна Умова): Налипання надмірно вологого ґрунту з пожнивними залишками у вузькому зазорі між полімерним хвостовиком п'ятки та внутрішніми стінками обертових дискових ножів сошника (ефект глухого забивання секції). НД1 (Небезпечна Дія): Спроба механізатора видалити ґрунтовий затор ногами (взуттям) або підручними засобами без зупинки двигуна енергетичного засобу та повного опускання агрегату на землю. ПМ1 (Попереджувальні Маніпуляції): Блок ПМ у цьому сценарії реалізується через організаційні заходи: жорстка заборона проведення очищення без повної зупинки ВВП трактора та опускання сівалки; проведення цільового інструктажу. На технічному рівні ПМ може бути реалізовано встановленням датчика присутності оператора в зоні сошників, що блокує привід. Якщо ПМ ігноруються або відсутні, ланцюг замикається: НС1 (Небезпечна Ситуація): Раптове провертання диска через нерівність

мікрорельєфу або мимовільне рушення трактора, що призводить до жорсткого кінематичного затягування кінцівки у клиноподібний простір між гострим обертовим диском і жорстко зафіксованим нерухомим кронштейном п'ятки. Наслідки (Блок А, Т): Тяжкі розтрощення кісток стопи, травматична ампутація, розриви м'яких тканин.

Сценарій 2: Локальна токсична експозиція. Модель описує ризик хімічного ураження при контакті з протруєним насінням. НУ2 (Небезпечна Умова): Накопичення на робочій притискній поверхні п'ятки висококонцентрованої пасти з вологого ґрунту та хімічних протруйників. Оскільки п'ятка безпосередньо контактує з інкрустованим насінням на дні борозни, концентрація токсикантів на її поверхні в рази перевищує фонову. НД2 (Небезпечна Дія): Проведення технологічного зачищення профілю п'ятки жорстким металевим шкребком. Через обмежену видимість вузла оператор максимально наближає обличчя до сошника. ПМ2 (Попереджувальні Маніпуляції): Блок ПМ передбачає використання ЗІЗ (захисних окулярів закритого типу та респіратора) — це індивідуальна попереджувальна маніпуляція. Технічна ПМ: використання спеціалізованих ергономічних шкребків з подовженою ручкою, що виключає необхідність наближення обличчя до зони небезпеки. Відсутність ПМ призводить до: НС2 (Небезпечна Ситуація): Пружне відскакування крихких фрагментів засохлого високотоксичного ґрунту з-під шкребка безпосередньо на слизові оболонки очей та в дихальні шляхи оператора. Наслідки (Блок О): Гострий хімічний опік рогівки ока, локальна інтоксикація фунгіцидами.

Сценарій 3: Втомне руйнування та динамічний викид вузла. Моделювання аварійної відмови конструкції під навантаженням. НУ3 (Небезпечна Умова): Вплив безперервних високочастотних вібрацій та знакозмінних навантажень на болтові з'єднання кронштейна ущільнюючої п'ятки під час прямої сівби по стерні на швидкостях понад 10 км/год. НД3 (Небезпечна Дія): Ігнорування механізатором регламенту щозмінного інструментального контролю моменту затягування кріпильних елементів

модернізованого вузла. ПМ3 (Попереджувальні Маніпуляції): Блок ПМ реалізується через технічні рішення: застосування самостопорних гайок, шплінтування або нанесення кон stow міток фарбою для візуального контролю ослаблення кріплень. Організаційна ПМ: внесення пункту про перевірку затягування болтів п'ятки до карти щозмінного технічного обслуговування (ТО). Ігнорування ПМ веде до: НС3 (Небезпечна Ситуація): Втомний обрив кріплення під час переведення сівалки у транспортне положення або швидкісного руху дорогами загального користування. Відбувається відрив металоємного вузла п'ятки (разом із натягнутою пружиною) та його неконтрольований рикошет під колеса транспортних засобів, що рухаються у попутному або зустрічному напрямках. Наслідки (Блок А, Т): Пошкодження суміжної техніки, створення аварійної ситуації на дорозі, ризик ураження сторонніх осіб.

Висновки до розділу

Експлуатація модернізованого посівного агрегату супроводжується специфічним впливом шкідливих виробничих факторів. Найбільшу небезпеку становлять нові зони кінематичного защемлення між дисками та п'яткою, а також утворення зон аномально високої концентрації протруйників безпосередньо на притискному елементі [20, 31].

На основі застосування ієрархічної моделі прогнозування ризиків (Рис. 3.1) встановлено, що ключовим інструментом забезпечення безпеки є впровадження Попереджувальних Маніпуляцій (ПМ) на стадії, що передує виникненню аварійної ситуації.

Аналітично доведено, що безпечне технічне обслуговування сошників з ущільнюючими п'ятками вимагає комплексу ПМ: організаційних (сувора заборона ручного очищення без повного блокування рухомих частин) та технічних (використання ЗІЗ, ергономічних шкребків і щозмінного контролю моментів затягування кріплень для запобігання їх втомному руйнуванню) [13, 19].

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Розрахунок експлуатаційно-технологічних показників роботи посівної машини з удосконаленими сошниками

Експлуатаційно-технологічна оцінка спрямована на визначення реального впливу розробленої ущільнюючої п'ятки на продуктивність посівного агрегату. Для порівняльного аналізу прийнято базовий агрегат у складі трактора тягового класу 1,4 та зернової сівалки з шириною захвату 5,4 м.

Ключовим унікальним досягненням модернізації є розширення швидкісного діапазону якісної роботи сошникової групи [12]. На основі експериментальних даних, наведених у другому розділі, встановлено конкретні вихідні параметри для розрахунку змінної продуктивності (Wзм): для серійного сошника максимально допустима швидкість за критерієм рівномірності глибини загортання (коефіцієнт варіації 21,4 %) становить 8,0 км/год [11]. Відповідний коефіцієнт використання часу зміни (τ) за нормативними даними складає 0,65; для модернізованого сошника з ущільнюючою п'яткою робоча швидкість збільшена до 10,0 км/год при збереженні високих агротехнічних показників сівби [12]. Внаслідок інтенсифікації технологічного процесу (пришвидшене спорожнення бункерів) значення τ прогнозовано знижується до 0,62 [13].

Результати порівняльного розрахунку експлуатаційно-технологічних показників зведено у таблицю 4.1.

Аналіз розрахункових даних показує, що впровадження ущільнюючої п'ятки забезпечує конкретний виробничий ефект: зростання змінної продуктивності на 4,32 га (або на 19,2 %) [13]. Це досягнення отримано виключно завдяки доведеній можливості підвищення робочої швидкості до 10 км/год без погіршення якості посіву.

Таблиця 4.1 – Експлуатаційно-технологічні показники роботи посівного агрегату (8-годинна зміна)

Показник	**Одиниця виміру**	**Серійний сошник (база)**	**Модернізований сошник з п'яткою**
Робоча швидкість руху, Vp	км/год	8,0	**10,0**
Продуктивність за 1 год основного часу, W0	га/год	4,32	5,40
Коефіцієнт використання часу зміни, τ	-	0,65	0,62
Експлуатаційна змінна продуктивність, Wзм	**га/зм**	**22,46**	**26,78**

4.2. Економічне обґрунтування застосування ущільнюючої п'ятки на сівбі озимої пшениці

Економічна ефективність впровадження розробленого дводискового сошника ґрунтується на експериментально підтвердженому зростанні польової схожості насіння на 10 % за рахунок стабілізації глибини загортання та інтенсифікації вологозабезпечення ложа [12], а також на підвищенні продуктивності агрегату до 10 км/год [4.1].

Розрахунок додаткового чистого доходу від збереженого врожаю виконано на основі приросту врожайності (Ub=4,5 т/га) та закупівельної ціни зерна (Cz=6000 грн/т). Порівняльна економічна оцінка базується на вартості машино-зміни 12000 грн та річному завантаженні агрегату на площу 500 га.

Основні унікальні результати техніко-економічного аналізу наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Узагальнені показники економічної ефективності модернізації сошника

Показник	**Одиниця виміру**	**Серійний сошник (база)**	**Модернізований сошник з п'яткою**	**Кореляція з Chapter 2/3**
Розрахункова урожайність	т/га	4,50	**4,95**	Зростання схожості на 10% [12]
Питомі експлуатаційні витрати, Ev	грн/га	534,2	**448,1**	Продуктивність 10 км/год [4.1]
Зниження експлуатаційних витрат	грн/га	—	**86,1**	Чітка економія ресурсов
Додатковий прибуток від урожаю, ΔPi	грн/га	—	**2700,0**	Якісний контакт з ложем
Сумарний питомий ефект на 1 га	грн/га	—	**2786,1**	
Річний економічний ефект, Er	грн	—	**1 393 050**	**На площу 500 га**

Висновки до розділу

На основі проведеного техніко-економічного обґрунтування результатів впровадження модернізованого сошника з ущільнюючою п’яткою можна зробити такі висновки:

Встановлено, що ключовим фактором формування економічної ефективності розробки є домінуючий вплив якості сформованого посівного ложа. Завдяки математично доведеній у розділі 2 стабілізації фіксації насінини у вологому капілярному шарі, приріст урожайності генерує 97 % сумарного економічного ефекту (2700 грн/га із загальних 2786,1 грн/га), що підтверджує пріоритетність агротехнічного аспекту модернізації над суто експлуатаційним [23].

Підтверджено високу інвестиційну привабливість запропонованого рішення у виробничому масштабі. Річний економічний ефект від використання одного модернізованого агрегату на розрахунковій площі 500 га перевищує 1,39 млн грн, що свідчить про значний потенціал ресурсозбереження та підвищення рентабельності виробництва зернових культур.

Доведена висока економічна стійкість та ефективність розробки. Модернізований агрегат зберігає суттєву перевагу над базовим варіантом навіть в умовах інтенсифікації виробництва та зростання прямих витрат на сівбу при підвищених швидкостях. Завдяки домінуючому прибутку від зростання врожайності та низькій матеріаломісткості ощадливого пристрою, повна окупність витрат на модернізацію сівалки досягається протягом перших днів посівної кампанії [11].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Встановлено, що базовою причиною порушення агротехнічних вимог щодо рівномірності глибини загортання насіння традиційними дводисковими сошниками є неконтрольований пружний відскок насіннєвого матеріалу від нерівномірного (W-подібного) профілю дна борозни та його хаотичний перерозподіл під дією відцентрових сил дисків [15]. Найбільш раціональним інженерним рішенням для просторової стабілізації насіння та гарантування його контакту з капілярно-вологим шаром ґрунту до моменту обсипання борозни є інтеграція в міждисковий простір активної пружної ущільнюючої п'ятки [19, 29].

Розроблено комплексну математичну модель кінематики насінини, яка, на відміну від класичних теорій, враховує сумісну дію сил тертя, аеродинамічного тиску пневмосистеми сівби та в'язкого опору демпфуючого полімерного матеріалу. Аналітично доведено, що безударне укладання насіння досягається за умови зведення до нуля абсолютної швидкості його горизонтального сходу ($V_{absx} \to 0$), що вимагає проектування напрямної робочої поверхні п'ятки за кривою зі змінним радіусом [2, 29].

Здійснено теоретичний синтез параметрів фіксуючого вузла: оптимальний кут нахилу α_{opt} та довжина L детерміновані трибологічними властивостями насіння, глибиною сівби й амплітудою коливань секції [6, 9]. Визначена жорсткість пружини с гарантує руйнування ґрунтового «горбика» та блокує ефект «галопування» сошника без ризику механічного пошкодження насіння [11, 21].

Експериментально підтверджено ефективність розробки: при швидкості 10 км/год ущільнююча п'ятка стабілізувала глибину загортання на рівні 47,2 мм (при номіналі 50 мм) та знизила коефіцієнт варіації υ у 1,9 раза (з 24,6 % до 12,8 %), що повністю відповідає жорстким критеріям точного землеробства [4, 12].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Васильковська К. В. Аналіз створення рівномірного потоку насіння до борозни. *Сільськогосподарські машини*. 2025. Вип. 51. С. 24–33. URL: https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/uk/article/view/acm.vi50.1890/1702.
2. Вовнянко Б. Г. Дослідження руху насінини в системі подачі посівної секції сошника сівалки. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2026. № 13(44). С. 167–180. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).167-180.
3. Войтюк Д. Г. та ін. Сільськогосподарські машини : електронний посібник. Київ, 2023. URL: https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/agroinjenerija/Agricultural%20machinery/3/3.2.htm (дата звернення: 13.05.2026).
4. Гринько Ю. Класифікація сошників. Їхні переваги і недоліки. Агроном. URL: https://www.agronom.com.ua/klasyfikatsiya-soshnykiv-yihni-perevagy-i-nedoliky/ (дата звернення: 13.05.2026).
5. Дискові посівні комплекси 3820 ParaLink. URL: https://www.bourgault.com/en-us/products/paralink-coulter-drills/plr-coulter-opener (дата звернення: 13.05.2026).
6. Добровольський І. В. Обґрунтування параметрів сошників просапної сівалки : магістерська робота : спец. 208 «Агроінженерія» / наук. кер. Д. Г. Кондратюк. Вінниця : ВНАУ, 2019. 109 с. URL: https://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/21252.pdf (дата звернення: 13.05.2026).
7. Інструкція по встановленню Keeton на зернові дискові сівалки John Deere. URL: https://seeding.com.ua/uk/vazhliva-informaciya/instrukcija-po-ustanovci-keeton/ (дата звернення: 13.05.2026).
8. Кудін С. В. Механізація вирощування гірчиці з удосконаленням сошника сівалки СЗТ-3,6 : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 208 «Агроінженерія» / наук. кер. В. М. Сало. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. 68 с. URI: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/16006.

9. Лузан П. Г., Аулін В. В., Лузан О. Р. Теоретичне обґрунтування конструкції механізму регулювання робочої глибини сошника посівної секції сівалки. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2026. № 13(44). С. 219–229. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).219-229.
10. Механічна стернова сівалка Green Plains 1500/2000 з дисковими сошниками. URL: http://www.agro.kr.ua/uk/sivalka-cph-15002000 (дата звернення: 13.05.2026).
11. Сало В. М., Вовнянко Б. Г., Лещенко С. М., Лузан П. Г. Покращення якісних показників процесу сівби. *Сільськогосподарські машини*. 2024. Вип. 50. С. 113–119. URL: https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/uk/article/view/1398/1319.
12. Сало В. М., Лещенко С. М., Вовнянко Б. Г., Мороз С. М. Порівняльні показники роботи сошників двох типів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2024. Вип. 54. С. 160–167. DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.160-167.
13. Сало В. М., Лещенко С. М., Лузан П. Г., Сало Л. В. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами : навч. посіб. Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2022. 220 с. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/items/1fac47a7-80b6-4a6f-beb7-eb76e3f661fe (дата звернення: 13.05.2026).
14. Сисолін П. В. Нова конструкція універсальної зернотукової сівалки. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кіровоград : КНТУ, 2008. Вип. 38. С. 17–21. URI: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/2147.
15. Шмат С. І., Резніченко В. А. Аналіз факторів перерозподілу насіння при роботі дискових сошників. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кіровоград : КНТУ, 2005. Вип. 35. С. 298–302. URI: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/9558.
16. 360 WAVE improves seed-to-soil contact from the bottom up [Відео]. 360 Yield Center. YouTube. 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=TIxr4lsIsE0 (дата звернення: 13.05.2026).

17. Cataya harrow-mounted seed drill. RoTeC coulter – the universal single disc coulter. Amazone. URL: https://amazone.net (дата звернення: 13.05.2026).
18. Conyers M., van der Rijt V., Oates A., Poile G., Kirkegaard J., Kirkby C. The strategic use of minimum tillage within conservation agriculture in southern New South Wales, Australia. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 193. P. 17–26. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.021.
19. Keeton ▸ Precision Planting | seed to soil contact made easy [Відео]. Precision Planting. YouTube. 2023. URL: https://www.youtube.com/watch?v=JhBGGtk6Kms (дата звернення: 13.05.2026).
20. Keeton Seed Firmer - Benefits Explained and In Action - Seed-to-Soil Contact Made Easy [Відео]. S.I. Distributing Planting Innovations. YouTube. 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=cyaOFefnUis (дата звернення: 13.05.2026).
21. Keeton Seed Firmer: Installation Instructions. S.I. Distributing. URL: https://sidist.com/instructions/KTN210004.pdf (дата звернення: 13.05.2026).
22. Keeton Seed Firmer. Premium Ag Solutions. URL: https://www.premiumagsolutions.com/keeton-seed.htm (дата звернення: 13.05.2026).
23. Nemergut K. T., Thomison P. R., Carter P. R., Lindsey A. J. Planting depth affects corn emergence, growth and development, and yield. *Agronomy Journal*. 2021. Vol. 113(4). P. 3351–3360. DOI: https://doi.org/10.1002/agj2.20701.
24. Operator's Manuals QUANTUM Air Drill. Canada : Morris Industries Ltd., 2025. 94 p. URL: https://morrisequipment.ca/wp-content/uploads/QUANTUM_Operators_S66250-05.pdf. (дата звернення: 13.05.2026).
25. Precision Planting - Smart Firmer [Відео]. Farmspace. YouTube. 2018. URL: https://www.youtube.com/watch?v=yCSK9d36sN8 (дата звернення: 13.05.2026).
26. Schaffert P. E. U.S. Patent No. 6,453,832. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2002. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/ee/96/f5/584cfb4fe87057/US6453832.pdf. (дата звернення: 13.05.2026).

27. Vitasem – механічні сівалки. Продумана система сошників. Pöttinger. 2015. С. 18–19. URL: https://www.poettinger.at/download/prospekte/21398/0/POETTINGER_232.uk.1215.pdf. (дата звернення: 13.05.2026).
28. Wan L., Li Y., Song J., Ma X., Dong X., Zhang C., Song J. Vibration Response of Soil under Low-Frequency Vibration Using the Discrete Element Method. *Agriculture*. 2023. Vol. 13(10). P. 1958. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture13101958.
29. Yan B., Wu G., Xiao Y., Mei H., Meng Z. Development and evaluation of a seed position mapping system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 190. Art. 106446. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106446.
30. Yang S., Zhai C., Gao Y., Dou H., Zhao X., He Y., Wang X. Planting Uniformity Performance of Motor-Driven Maize Precision Seeding Systems. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2022. Vol. 15. P. 101–108. URL: https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/5911/pdf. (дата звернення: 13.05.2026).
31. Zhang R., Cui T., Han D., Zhang D., Li K., Wang Y., Yin X., He X., Yang L. Design of depth-control planting unit with single-side gauge wheel for no-till maize precision planter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2016. Vol. 9(6). P. 56–64. DOI: 10.3965/j.ijabe.20160906.2394.

ДОДАТКИ