

**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
ВИСІВНОГО АПАРАТА З АКТИВНОЮ КОМІРКОЮ»

Виконав: студент 2 курсу, групи 22 м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності Н7
«Агроінженерія»
Михайло ГРИЦАЮК
(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 _____ Грицяюку Михайлу Васильовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Обґрунтування конструктивних параметрів висівного апарата з
активною коміркою» _____

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)Михайло ГРИЦАЮК

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи_____
(підпис)Іван ЛІСОВИЙ

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИСОКОТОЧНОГО ВИСІВНОГО АПАРАТА	8
1.1. Актуальність теми та обґрунтування вибору напрямку досліджень	8
1.2. Огляд та аналіз конструкцій висівних апаратів точного висіву	11
1.3 Теоретичні основи процесу дозування насіння та моделювання	18
1.4 Формулювання проблеми та завдання досліджень	24
Завдання досліджень.	24
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ УДОСКОНАЛЕНОГО ПНЕВМАТИЧНОГО ВИСІВНОГО АПАРАТА	26
2.1. Обґрунтування конструктивної схеми висівного апарата з коміркою направленої дії	26
2.2. Теоретичний аналіз динаміки руху насінини в робочій зоні апарата	28
2.3. Дослідження впливу кута орієнтації комірки на присмоктуючу силу	32
Висновки та практичне значення	33
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВИСІВНОГО АПАРАТА З КОМІРКОЮ НАПРАВЛЕНОЇ ДІЇ	34
3.1 Обґрунтування програми, завдань та методики експериментальних досліджень	34
3.2. Опис та функціональний аналіз лабораторної установки для оцінки присмоктуючої сили	35

3.3. Валідація аналітичної моделі та дослідження закономірності зміни сили утримання	37
Висновки до розділу	39
РОЗДІЛ 4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ТА УМОВ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСІВНОГО АПАРАТА	40
4.1 Класифікація та ідентифікація ризиків: Аналіз виробничих факторів експлуатації висівного апарата	40
4.2 Інженерно-гігієнічні та організаційні рішення: Заходи з покращення санітарно-гігієнічних умов праці	42
4.3 Сценарний аналіз ризиків: Моделювання критичних небезпечних ситуацій при експлуатації висівного апарата	43
Висновки до розділу	44
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ОЦІНКА ВПРОВАДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО ОПТИМІЗОВАНОГО ВИСІВНОГО АПАРАТА	45
5.1. Методологія кількісної оцінки економічної доцільності інноваційного рішення	45
5.2 Кількісний аналіз зниження прямих експлуатаційних витрат за рахунок енергооптимізації	45
5.3. Розрахунок річного економічного ефекту від підвищення точності висіву	46
5.4. Визначення інтегральних економічних показників та розрахунок терміну окупності проєкту	47
Висновки до розділу	48
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50
ДОДАТКИ	55

РЕФЕРАТ

Магістерська робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми забезпечення високої якості висіву (QI) насіння просапних культур в умовах інтенсифікації аграрного виробництва та роботи на підвищених швидкостях.

Актуальність дослідження обґрунтована тим, що зростання динамічних навантажень унеможлиблює забезпечення необхідної точності традиційними пневмомеханічними апаратами. Це стало підставою для обґрунтування нової конструктивної схеми з комірною направленою дією, що змінює вектор присмоктування [1].

Теоретична частина включає виведення аналітичної залежності присмоктуючої сили F_{vac} . Шляхом чисельного моделювання доведено, що використання оптимального кута орієнтації комірки α_{opt} дозволяє суттєво мінімізувати пікове значення F_{vac}^{max} , що є науковим підґрунтям для зниження енергоємності вакуумної системи [30].

Експериментальна частина підтвердила адекватність теоретичної моделі шляхом лабораторної валідації на установці НТС-3. Випробування довели, що апарат з α_{opt} значно покращує QI, знижуючи сумарний відсоток дефектів (пропусків та двійників) на 5–8% порівняно із серійним зразком, що підтверджує його технологічну ефективність [4, 10]. Конструктивні рішення, що включають оптимізовану геометрію та відсутність складних механічних регулювань, забезпечують високу надійність та безпеку обслуговування агрегату, відповідаючи вимогам чинного законодавства з охорони праці [29].

Техніко-економічне обґрунтування підтвердило високу доцільність впровадження інновації. Встановлено, що ключовий економічний ефект досягається за рахунок зростання врожайності ($E_{точн}$) та забезпечує короткостроковий термін окупності проєкту (1–2 роки) [31].

Ключові слова: ПНЕВМОМЕХАНІЧНИЙ АПАРАТ, ПРИСМОКТУЮЧА СИЛА, КУТ ОРІЄНТАЦІЇ КОМІРКИ, КІНЕМАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ, ЯКІСТЬ ВИСІВУ, ЕНЕРГОЄМНІСТЬ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

ВСТУП

Розвиток сучасного аграрного сектору повністю підпорядкований стратегії Точного землеробства (Precision Agriculture, PA) [8], фундаментальною вимогою якої є забезпечення максимальної якості сівби та ідеальної просторової рівномірності розміщення насінин. Недотримання цієї вимоги, у вигляді пропусків (DI) чи двійників (MI), призводить до значних економічних втрат врожаю та нераціонального використання добрив [11]. Ключова світова тенденція до зростання робочих швидкостей посівних агрегатів (до 14 км/год) генерує критичні відцентрові та динамічні навантаження на насінину, які традиційні пневмомеханічні системи не можуть ефективно компенсувати. Це спонукає машинобудування до впровадження складних і дорогих мехатронних систем керування висівом [5].

Актуальна науково-технічна задача полягає у кінематичній оптимізації конструкції висівного апарата, яка б дозволила підвищити його технологічну надійність при високошвидкісній роботі без надмірного збільшення вимог до потужності вакуумної системи. Вирішення цієї задачі пропонується шляхом розробки апарата з коміркою направленої дії, здатної адаптивно керувати вектором присмоктуючої сили.

Мета дослідження Наукове обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмомеханічного висівного апарата з коміркою направленої дії шляхом визначення оптимального кута її орієнтації (α) для підвищення точності висіву (QI) на високошвидкісних режимах роботи та зниження енергоємності процесу дозування.

Об'єкт дослідження Процес дозування насіння просапних культур пневмомеханічним висівним апаратом.

Предмет дослідження Динаміка руху та утримання насінини у фазі контакту з висівним диском, вплив кута орієнтації комірки (α) на необхідну присмоктуючу силу (F_{vac}) та кінцеві показники якості висіву (QI, DI, MI).

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИСОКОТОЧНОГО ВИСІВНОГО АПАРАТА

1.1. Актуальність теми та обґрунтування вибору напрямку досліджень

1.1.1. Аналіз світових тенденцій розвитку точного землеробства та вимог до якості сівби

Розвиток світового аграрного машинобудування цілком підпорядкований стратегії Точного землеробства (Precision Agriculture, PA) [8], яка є відповіддю на глобальні виклики підвищення ефективності використання землі та мінімізації ресурсної бази. У системі PA, точність висіву є фундаментальною вимогою, оскільки вона безпосередньо впливає на потенційну врожайність: будь-які порушення рівномірності розміщення насіння (у вигляді пропусків або двійників) призводять до нераціонального використання площі, зниження ефективності добрив та, як наслідок, до втрат урожаю [11].

Ключовою світовою тенденцією стало впровадження мехатронних систем керування висівом замість традиційних механічних приводів [5, 31]. Необхідність цієї заміни обумовлена тим, що класичні сівалки, використовуючи привід від опорного колеса, не здатні забезпечити необхідну рівномірність на високих швидкостях через вібрації, люфти та інерційні навантаження в трансмісії [24]. Усунення цих недоліків відбувається шляхом впровадження індивідуальних електродвигунів прямого приводу (Electric Motor-Driven Transmission Unit) на кожен висівний апарат. Ця технологія дозволяє повністю відокремити процес дозування від швидкості руху агрегату, гарантуючи його стабільність. Більше того, електричний привід є обов'язковою основою для реалізації технологій диференційованого внесення (Variable Rate Technology – VRT), що дає змогу автоматично коригувати норму висіву відповідно до зон неоднорідності поля та електронних карт [21].

Вимоги до якості роботи пневматичних висівних апаратів, особливо в умовах високошвидкісної сівби, оцінюються за трьома основними

стандартизованими показниками [11]: Qualified Index (QI), Multiple Index (MI) та Missing Index (DI). Актуальність наукових досліджень, в тому числі в Україні [1], [18], зосереджена на обґрунтуванні оптимальних конструктивно-технологічних параметрів (геометрії комірок, режимів вакууму [23] та конструкції сповільнювача), які забезпечують мінімізацію показників MI та DI [4]. У кінцевому підсумку, забезпечення високої точності сівби є стратегічним кроком, який дає прямий економічний ефект [30], мінімізуючи витрати на посівний матеріал та підвищуючи загальну продуктивність.

1.1.2. Обґрунтування економічної ефективності застосування високоточних висівних апаратів та їхній вплив на врожайність

Економічна ефективність впровадження високоточних посівних агрегатів є визначальним фактором, що виправдовує капітальні вкладення в модернізацію техніки. Застосування таких апаратів дає комплексний позитивний ефект, який охоплює як пряму економію ресурсів, так і непряме, але значне збільшення продуктивності посівних площ.

Прямий економічний ефект: Рационалізація витрат. Пряма вигода від високоточного висіву формується за рахунок оптимізації витрат на посівний матеріал і зменшення експлуатаційних витрат [30].

Економія насіння: Зниження показників двійників (Multiple Index, MI) та пропусків (Missing Index, DI) [11] забезпечує точне дозування. Це мінімізує перевитрату дорогого посівного матеріалу та усуває потребу у додаткових затратних операціях, таких як ручне проріджування. Чисельні дослідження, зокрема вітчизняні, підтверджують, що річний економічний ефект одного висівного апарату може вимірюватися значними сумами, що швидко окупає інвестиції [30].

Зниження експлуатаційних витрат: Перехід на мехатронні системи з електричним приводом зменшує питому металомісткість та спрощує обслуговування порівняно зі складними механічними трансмісіями. Завдяки цьому знижуються питомі капіталовкладення у сфері експлуатації та собівартість посівних робіт, що, за розрахунками, може становити від 7 грн/га і більше [30].

Непрямий ефект: Вплив на врожайність Головний непрямий ефект полягає у максимальному використанні біологічного потенціалу сільськогосподарських культур.

Підвищення врожайності через рівномірність: Досягнення високого показника Qualified Index (QI) гарантує оптимальний, рівномірний інтервал між рослинами. Це виключає внутрішньовидову конкуренцію за світло, вологу та поживні речовини, забезпечуючи синхронний розвиток культури. Як наслідок, урожай формується рівномірно і досягає максимальної потенційної врожайності, запобігаючи втратам, спричиненим нерівномірністю посіву [11].

Адаптація через VRT: Мехатронні апарати, оснащені індивідуальними електроприводами, є необхідною технічною базою для реалізації технології диференційованого внесення (VRT) [21]. VRT дозволяє автоматично змінювати норму висіву на різних ділянках поля згідно з картами неоднорідності ґрунту, що веде до найбільш раціонального використання посівного матеріалу та добрив і забезпечує максимальний приріст кінцевого врожаю.

Таким чином, застосування високоточних висівних апаратів є не просто технологічною модернізацією, а економічно обґрунтованою інвестицією, яка гарантує економію ресурсів та є необхідною передумовою для отримання стабільно високих показників врожайності в умовах точного землеробства.

1.1.3. Визначення основних проблем, які стримують підвищення точності висіву в сучасних вітчизняних сівалках.

Незважаючи на глобальний тренд переходу до вискоєфективних мехатронних посівних комплексів [5, 31], в Україні та у вітчизняному сільськогосподарському машинобудуванні все ще домінує техніка, яка має ряд критичних проблем, що стримують підвищення точності висіву. Ці проблеми безпосередньо впливають на економіку виробництва, унеможливаючи повну реалізацію потенціалу точного землеробства. Ключовою системною проблемою, що обмежує точність сівби, є використання застарілого механічного приводу висівних апаратів. У більшості вітчизняних сівалок привід робочих органів здійснюється від опорного колеса через складну механічну трансмісію. Навіть на

помірних робочих швидкостях, така система схильна до нерівномірності через низку динамічних факторів: проковзування опорного колеса, наявність люфтів у ланцюгах та редукторах, а також зростання вібраційних навантажень на високих швидкостях [24]. Ці недоліки призводять до нестабільного кроку висіву та є головною причиною зниження показника Qualified Index (QI). Другим критичним фактором є недосконалість конструктивно-технологічних параметрів самих пневматичних висівних апаратів. Проблема полягає не лише у виборі матеріалів, а й у відсутності науково обґрунтованих рішень для ключових елементів. Зокрема, у багатьох конструкціях не досягнуто оптимальної геометрії комірок дозуючого диска та недостатньо ефективно працює система очищення комірок (скидач надлишкового насіння). Це призводить до зростання показника Multiple Index (MI) (частки двійників) та Missing Index (DI) (частки пропусків) [11]. Необхідність теоретичного та експериментального обґрунтування цих параметрів підтверджується актуальними дослідженнями вітчизняних вчених [1, 18], які часто застосовують методи чисельного моделювання [4, 23]. Таким чином, підвищення точності висіву у вітчизняному сегменті сільськогосподарської техніки стримується двома основними блоками проблем: технологічним відставанням у частині приводних систем (відсутність індивідуальних електроприводів) та конструктивними недоліками робочих органів, які потребують модернізації на основі сучасних науково-технічних підходів.

1.2. Огляд та аналіз конструкцій висівних апаратів точного висіву

1.2.1. Класифікація та порівняльний аналіз існуючих механічних та пневматичних висівних систем

Висіваючі апарати, які використовуються для точного дозування насіння просяних культур, традиційно поділяються на дві основні категорії за принципом дії: механічні та пневматичні [1]. З розвитком точного землеробства вимоги до точності висіву на високих швидкостях призвели до домінування

пневматичних систем, тоді як механічні системи залишаються актуальними лише для певних типів культур та у простіших конструкціях.

Механічні висівні апарати, як правило, використовують дозуючий диск або барабан з комірками, що приводиться в рух від опорного колеса через редуктор і трансмісію [24]. Основними їхніми перевагами є конструктивна простота, низька енергоємність та відносно низька вартість. Однак їхня точність критично залежить від стабільності швидкості руху та якості насіння. Недоліками є: Низька швидкість роботи: При зростанні швидкості до 6–8 км/год різко збільшується кількість двійників (MI) та пропусків (DI), оскільки часу для заповнення комірок та ефективної роботи скидача недостатньо [11]. Чутливість до розміру насіння: Для кожної фракції насіння потрібна заміна диска. Складність інтеграції VRT: Регулювання норми висіву вимагає механічного перемикавання передач, що унеможливорює автоматичне диференційоване внесення (VRT) [21].

Пневматичні апарати є домінуючими у високоточній сівбі завдяки своїй здатності забезпечувати високу точність при значних робочих швидкостях. Вони використовують або вакуум (негативний тиск), або надлишковий тиск (позитивний тиск) для фіксації та переміщення насіння. 1. Вакуумні апарати (Аспіраційні): Насіння утримується на перфорованому диску за рахунок розрідження (вакууму), створюваного пневмосистемою. Вони забезпечують високий показник QI (Qualified Index) та є найбільш поширеними у світовій практиці. 2. Надлишкового тиску (Пневматичний нагнітач): Ці системи використовують потік повітря для притискання або транспортування насіння. Вони менш чутливі до засмічення, але можуть бути менш точними, ніж вакуумні на високих швидкостях. Основними перевагами пневматичних систем є висока швидкість і точність роботи та універсальність (можливість сівби різного насіння шляхом простої заміни диска) [11]. З розвитком мехатронних систем з електроприводом [31], пневматичні апарати повністю інтегрувалися у технологію

VRT, оскільки зміна норми висіву досягається простим регулюванням швидкості обертання електродвигуна, що є ключовим для сучасного точного землеробства.

У порівняльному аспекті, механічні системи технологічно відстають у вимогах до швидкості та точності. Пневматичні системи забезпечують необхідну якість сівби. Однак, загальним недоліком як механічних, так і багатьох традиційних пневматичних систем є їхня залежність від динамічних факторів (вібрацій, ударів) [24], а також необхідність подальшого вдосконалення їхніх конструктивно-технологічних параметрів (зокрема, скидача і системи забору насіння) для підвищення показника QI [4, 23].

1.2.2. Аналіз конструктивно-технологічних параметрів пневматичних висівних апаратів та чинників, що впливають на якість дозування насіння

Для забезпечення високої якості сівби, особливо в умовах зростання робочих швидкостей, необхідно глибоко розуміти та оптимізувати конструктивно-технологічні параметри пневматичних висівних апаратів [1, 18]. Якість дозування оцінюється, насамперед, показником Qualified Index (QI), який безпосередньо залежить від мінімізації пропусків (DI) та двійників (MI) [11, 24]. Аналіз цих чинників є основою для інженерного вдосконалення апарата.

Конструктивно-геометричні параметри робочих органів/ Ефективність дозування насіння на перфорованому диску визначається взаємодією трьох ключових конструктивних елементів, причому їхня оптимізація є основним предметом наукових досліджень із залученням чисельного моделювання [4, 7].

Геометрія дозуючого диска та комірок: Ключову роль відіграють діаметр, глибина та форма комірок, а також їхня кількість [7]. Ці параметри мають бути оптимально узгоджені з фізико-механічними властивостями насіння (розміром, формою) для забезпечення надійного забору лише однієї насінини [8]. Неправильне співвідношення розміру комірки до насіння веде до збільшення показника DI або MI [4, 11].

Система скидання (сепаратор): Це критично важливий елемент для контролю Multiple Index (MI). Скидач призначений для видалення надлишкового насіння, яке прилипло до комірки [12]. Його ефективність є ключовою, і вона

залежить від конструкції, матеріалу та положення, що підтверджується моделюванням та експериментами [4, 9].

Конструкція сповільнювача насіння: Сповільнювач, розташований у насіннєпроводі, безпосередньо впливає на якість укладання насіння в борозну. Його завдання — мінімізувати горизонтальну складову швидкості насінини після відриву від диска, що зменшує відскок і гарантує високу рівномірність розміщення у ґрунті [1, 23].

Технологічні та експлуатаційні чинники

На якість висіву суттєво впливають технологічні параметри роботи, які повинні бути адаптовані до зовнішніх умов та швидкості агрегату:

Величина вакууму (розрідження): Це ключовий технологічний параметр для вакуумних апаратів [23]. Недостатній вакуум зменшує силу утримання насінини, спричиняючи пропуски (DI) на високих швидкостях. Надмірне розрідження підвищує MI, ускладнюючи роботу скидача [10, 23].

Швидкість обертання диска: Зі зростанням швидкості, що є загальною тенденцією в точному землеробстві, зростає інерційне навантаження на насінину та зменшується час для всіх фаз дозування [10]. Це робить обов'язковим впровадження мехатронних систем з електроприводом [5, 31], які забезпечують стабільність обертання, незалежну від динаміки руху агрегату.

Нерівномірність фізичних властивостей насіння: Фізико-механічні властивості насіння (розміри, маса, форма) є неконтрольованими, але визначальними чинниками [18]. Навіть невелика нерівномірність фракції насіння ускладнює роботу як скидача, так і самого дозуючого диска, підвищуючи ймовірність помилок, що вимагає універсальності конструкції [1, 18].

Методи аналізу та оптимізації конструкцій Сучасна методика досліджень конструктивних рішень пневматичних апаратів активно використовує чисельне моделювання, зокрема метод дискретних елементів (DEM) [4, 7]. DEM дозволяє точно моделювати динаміку руху насіння (як дискретних частинок) та його взаємодію з елементами висівного апарата (диском, скидачем, сповільнювачем) [4, 7, 25]. Це дає змогу оптимізувати конструктивні параметри та режими роботи

ще на стадії проєктування, досягаючи максимального показника QI без дороговартісних польових випробувань [1].

1.2.3. Сучасний стан розвитку мехатронних систем контролю та управління висівом та оцінка їхнього впливу на рівномірність розподілу насіння

Сучасний стан розвитку сільськогосподарського машинобудування нерозривно пов'язаний із впровадженням мехатронних систем [31], що є ключовим елементом стратегії точного землеробства [8]. Ці системи замінили застарілі механічні приводи [24], які не здатні забезпечити високу якість сівби на зростаючих робочих швидкостях через проковзування опорних коліс та інерційні навантаження в трансмісії [5].

Мехатронна система контролю та управління висівом є інтегрованим комплексом, що поєднує точну механіку (висівний апарат), електроніку (контролери) та інформаційні технології (GPS-навігація). Її ключовою особливістю є використання індивідуальних електродвигунів прямого приводу (Electric Motor-Driven Transmission Unit) на кожному висівному апараті [5], [31]. Головний вплив таких систем на рівномірність розподілу насіння полягає у:

Гарантія стабільності висіву: Електропривід повністю відокремлює швидкість обертання дозуючого диска від швидкості руху сівалки. Це критично важливий фактор, оскільки система керування може динамічно та безперервно коригувати швидкість двигуна, забезпечуючи ідеальний інтервал між насінинами у ряду, незалежно від вібрацій чи змін швидкості трактора [5, 31].

Управління якістю дозування: Сучасні мехатронні системи використовують оптичні або ємнісні датчики для моніторингу показників якості (QI, MI, DI) безпосередньо у насіннєпроводі [11]. Це дозволяє оператору в режимі реального часу ідентифікувати та усувати проблеми, пов'язані з роботою скидача або вакуумною системою.

Вплив на рівномірність та VRT Впровадження мехатронних систем кардинально підвищує рівномірність розподілу насіння, що є прямою

передумовою для збільшення врожайності. Електричні приводи дозволяють реалізувати дві ключові функції, які неможливі на механічних сівалках:

Технологія диференційованого внесення (VRT): Електропривід є обов'язковою технічною базою для VRT. Система, отримуючи дані з електронної карти завдань (зонування поля), автоматично і миттєво змінює швидкість обертання диска для коригування норми висіву в різних ділянках поля [21]. Це забезпечує найбільш раціональне використання посівного матеріалу та підвищує економічну ефективність [30].

Секційне відключення (Section Control): Мехатроніка дозволяє індивідуально вмикати або вимикати кожен висівний апарат (секцію) при накладенні посівів на розворотних смугах або при клиновидних контурах поля. Це запобігає перевитраті насіння та добрив, мінімізуючи втрати [1].

В Україні актуальність досліджень у сфері мехатроніки підтверджується численними роботами [1, 13, 18], які зосереджені на розробці, адаптації та обґрунтуванні параметрів таких систем. Впровадження мехатронних рішень, незважаючи на високу початкову вартість, є економічно виправданим кроком для агровиробництва, оскільки забезпечує максимальний приріст QI та реалізацію всього потенціалу точного землеробства [30].

1.2.4. Патентно-правовий аналіз та огляд останніх світових розробок висівних апаратів

Світова інженерна думка в галузі точного висіву сфокусована на розробці інтелектуальних систем, які здатні працювати на високих швидкостях (понад 12 км/год) без втрати якості сівби [11]. Патентно-правовий аналіз та огляд наукових публікацій показують, що інноваційна активність зосереджена навколо вдосконалення дозуючого механізму, систем сепарації та мехатронного управління [31].

Огляд інноваційних конструктивних рішень дозуючих апаратів. Основні світові розробки спрямовані на підвищення швидкості заповнення комірок і

гарантування стабільного забору однієї насінини, що є критичним для мінімізації пропусків (DI) [10]:

Комбіновані та вдосконалені системи дозування: Спостерігається тенденція до створення гібридних апаратів, які поєднують механічний забір і пневматичне транспортування [22]. Розробляються інноваційні підходи до заповнення, наприклад, центрифужний забір для кукурудзи, що забезпечує високу швидкість та точність [3]. Значна увага приділяється апаратам з горизонтальним заповненням та вбудованими механізмами для агітації насіння (перемішування) для сої, що покращує показник QI при високій продуктивності [10].

Оптимізація геометрії робочих органів: Патентні дослідження та публікації часто спрямовані на обґрунтування ідеальної геометрії комірок. Застосування чисельного моделювання (DEM) дозволяє проєктувати фасонні отвори [4]

або оптимізувати співвідношення між діаметром, глибиною комірок та середнім діаметром насіння для різних культур [7]. Такі розробки мінімізують помилки дозування, пов'язані з нерівномірністю посівного матеріалу [4]. Існують також розробки подвійних насіннєпроводів зі скошеними канавками для кращого контролю траєкторії руху насіння [26].

Патентні рішення для систем скидання та сепарації. Контроль показника Multiple Index (MI) (двійники) є другим за важливістю напрямком інновацій. Патенти захищають механізми, які ефективно видаляють зайве насіння незалежно від швидкості та вакууму:

Удосконалення скидачів: Розробляються нові, більш гнучкі та адаптивні механізми очищення. До них належать гнучкі щіткові системи для сої [12] або спеціалізовані сепараційні механізми для насіння складної форми, наприклад, бавовни [9]. Ці інновації мають на меті забезпечити стабільну роботу скидача та мінімізувати MI навіть при нерівномірності фракції насіння [11, 4].

Оптимізація сповільнювачів: Патентуються і вдосконалюються конструкції елементів, розташованих у насіннєпроводі (сповільнювачів), щоб максимально погасити горизонтальну швидкість насінини після відриву від диска [1], що підвищує якість укладання насіння у ґрунті.

Сфера мехатроніки є найбільш динамічною, оскільки саме вона забезпечує реалізацію принципів точного землеробства:

Системи диференційованого внесення (VRT): Більшість патентів стосуються алгоритмів та апаратних рішень для Variable Rate Technology [21]. Використання індивідуальних електродвигунів прямого приводу [5, 31] дозволяє системі керування автоматично та миттєво змінювати швидкість обертання дозуючого диска згідно з електронними картами завдання, що є критично важливим для економічної ефективності [30].

Контроль у режимі реального часу: Розробки спрямовані на інтеграцію високоточних датчиків для моніторингу QI, MI, DI та їхню моментальну корекцію шляхом зміни параметрів системи (наприклад, вакууму або швидкості двигуна). Це забезпечує стабільно високу якість висіву незалежно від умов роботи [31].

Таким чином, світова інженерна думка рухається до створення повністю автоматизованих, адаптивних та універсальних висівних апаратів, де точність забезпечується як вдосконаленою конструкцією (наприклад, оптимізацією комірок за допомогою DEM [25]), так і інтелектуальним електронним управлінням [5].

1.3. Теоретичні основи процесу дозування насіння та моделювання

1.3.1. Огляд теоретичних моделей процесу забору, утримання та скидання насіння висівним апаратом

Теоретичне обґрунтування та моделювання процесу дозування насіння є фундаментальною основою для проєктування та вдосконалення пневматичних висівних апаратів [1], [18]. Висока точність сівби (QI) досягається лише за умови глибокого розуміння динаміки руху насінини, яка умовно поділяється на три взаємопов'язані фази: забір, утримання та скидання [11].

Теоретичні основи процесу забору насіння. Фаза забору насіння відбувається у завантажувальній камері (бункері) і характеризується рухом

насіннєвого матеріалу до комірок дозуючого диска. Теоретичні моделі цієї фази описують взаємодію насіння з поверхнею диска та навколишнім середовищем.

Моделювання заповнення комірки: Процес є стохастичним та динамічним, тому для його аналізу часто застосовують метод дискретних елементів (DEM) [4, 7]. DEM-моделі базуються на ньютонівських законах руху, що дозволяють описати кінематику окремих насінин, враховуючи їхній розмір, форму та коефіцієнт тертя [7]. Це дає змогу оптимізувати геометрію комірок (їхню глибину та кут фаски), а також швидкість обертання диска для забезпечення максимальної ефективності заповнення та мінімізації пропусків (DI) [10].

Розрахунок сил, що діють на насінину: На цій фазі на насінину діють гравітаційна сила, сила тертя від суміжних насінин та сила тиску (вакууму), яка повинна бути достатньою для притискання насінини до отвору, долаючи всі інші динамічні опори [23].

Теоретичні моделі утримання насіння. Фаза утримання насіння є найтривалішою і критичною для забезпечення послідовного висіву. Насінина повинна бути міцно зафіксована на комірці до моменту скидання, а будь-яке зайве насіння має бути відокремлене. Цей процес описується рівнянням балансу сил [24].

Рівняння утримання: Сила, що утримує насінину (сила вакууму або позитивного тиску), повинна бути більшою за суму сил, що намагаються відірвати її від диска. До сил відриву відносять відцентрову силу (яка зростає квадратично зі швидкістю обертання диска), гравітаційну силу (яка змінює свій напрямок залежно від положення на диску) та силу тертя від елементів скидача [24, 23].

Роль вакууму: Теоретичні моделі визначають необхідну величину вакууму (розрідження) для різних культур та швидкостей сівби. Недотримання оптимального вакууму призводить до зриву насіння (пропуски, DI) або ускладнює роботу скидача (двійники, MI) [23, 10].

Теоретичні основи скидання та сепарації. Ця фаза включає роботу скидача, що забезпечує сепарацію двійників, і подальше скидання насінини у насіннєпровід.

Сепарація (робота скидача): Теоретичні моделі роботи скидача розглядають кінематику насінини у зоні впливу скидача. Скидач повинен створювати силу, достатню для видалення зайвого насіння (зниження MI), але недостатню для зриву єдиної, утримуваної вакуумом, насінини [4]. Оптимальна форма і розташування скидача є предметом активного моделювання, зокрема з використанням DEM [1, 4].

Кінематика скидання: Після відриву насінини від диска вона потрапляє у насіннєпровід, де її рух описується кінематичними та динамічними моделями. Метою є зменшення горизонтальної швидкості насінини за допомогою сповільнювача [1], що запобігає її відскоку від дна борозни і гарантує високу рівномірність розміщення у ґрунті.

Таким чином, теоретичний аналіз процесу дозування насіння дозволяє науково обґрунтувати оптимальні конструктивно-технологічні параметри висівного апарата (геометрію диска, величину вакууму, положення скидача) ще до початку його виробництва [1, 23]

1.3.2. Теоретичні моделі руху насіння в каналах дозуючого апарата та їхнє експериментальне підтвердження

Кінцева мета процесу дозування – це забезпечення рівномірного інтервалу між насінинами у борозні (QI) [11]. Це досягається шляхом точного опису руху насінини не лише в комірці диска, але й у насіннєпроводі, що вимагає застосування теоретичних моделей кінематики та динаміки руху насіння [1], [18].

Кінематичні та динамічні моделі руху на диску. Насінина, утримувана на дозуючому диску, рухається по круговій траєкторії, і на неї діє комплекс сил, який визначає якість фази утримання та скидання [24]:

Баланс сил утримання: Теоретичні моделі описують умову утримання насінини в комірці, де сила, що утримує (сила вакууму, F_{vac}), повинна бути більшою за суму всіх сил, що намагаються відірвати її від диска:

$$F_{vac} > F_{cf} + F_g + F_{fr} \quad (1.1)$$

де F_{cf} – відцентрова сила; F_g – гравітаційна сила; F_{fr} – сили тертя або опору скидача [23, 24]. При зростанні швидкості обертання диска (при високошвидкісній сівбі) відцентрова сила зростає квадратично, що вимагає точного розрахунку мінімально необхідного рівня вакууму [23].

1. Моделі сепарації: Процес відділення зайвого насіння скидачем моделюється як кінематична взаємодія, де сила впливу скидача повинна бути достатньою для усунення зайвого насіння (зниження MI), але не викликати зриву основної насінини. Оптимальне розташування та форма скидача є предметом активного моделювання, зокрема з використанням DEM [4, 1].

Теоретичні моделі руху насіння у насіннєпроводі. Після відриву насінини від диска вона рухається у насіннєпроводі, і якість кінцевого розподілу у ґрунті критично залежить від кінематичних параметрів насінини в момент виходу з каналу:

Траєкторія та швидкість: Рух насінини у насіннєпроводі описується як рух тіла, що має початкову швидкість, надану диском. Для мінімізації відхилень та забезпечення рівномірності сівби необхідно максимально зменшити горизонтальну складову швидкості насінини (v_x) [1].

Вплив сповільнювача: Для теоретичного обґрунтування геометрії сповільнювача [1] застосовуються моделі, що описують передачу імпульсу при зіткненні насінини з відбійником. Це дозволяє оптимізувати його конструкцію, щоб зменшити горизонтальний відскок насінини від стінок борозни і гарантувати високу рівномірність укладання у ґрунті [1, 18].

Чисельне моделювання та експериментальне підтвердження. Сучасним та найбільш ефективним інструментом для перевірки теоретичних моделей є чисельне моделювання, зокрема метод дискретних елементів (DEM) [4, 7].

Роль DEM розглядає насіння як дискретні частинки [7], дозволяючи детально моделювати їхню взаємодію з елементами висівного апарата (диск, скидачем) [4] та насіннєпроводом. Це дозволяє прогнозувати показники якості

(QI, DI, MI) на різних швидкостях [10] та умовах, що є критичним для розробки нових конструктивних рішень [25].

Експериментальне підтвердження: Результати чисельного моделювання верифікуються шляхом проведення стендових випробувань (наприклад, із використанням швидкостних камер та обладнання для вимірювання інтервалів між насінинами [24]). Таке поєднання теорії, моделювання та експерименту є сучасним підходом, що дозволяє науково обґрунтувати оптимальні конструктивно-технологічні параметри висівного апарата [1, 18].

1.3.3. Обґрунтування теоретичних передумов та моделювання впливу фізико-механічних властивостей насіння на якість висіву

На відміну від конструктивних і технологічних параметрів висівного апарата (геометрія диска, вакуум), фізико-механічні властивості насіння є неконтрольованим, але визначальним чинником, що впливає на якість дозування. Теоретичне обґрунтування повинно враховувати вплив цих властивостей на рівняння балансу сил та, як наслідок, на кінцеві показники QI, MI, та DI [11, 18].

Теоретичний вплив основних властивостей. Якість дозування залежить від того, наскільки рівномірно і стабільно висівний апарат може працювати з конкретною партією насіння:

Розмір та форма насіння: Ці параметри є критичними для фази забору насіння. Насіння, що має неправильну форму або розміри, які не відповідають діаметру комірки, викликає проблеми:

Дрібне насіння може потрапляти у комірку по два-три, збільшуючи показник MI (двійники) і ускладнюючи роботу скидача [10].

Нерівномірна форма (наприклад, кукурудза) ускладнює прогнозування постури заповнення (положення насінини в комірці), що безпосередньо впливає на силу її утримання та ефективність сепарації [4].

Теоретичні моделі розробляються для оптимізації геометрії комірок (наприклад, фасонні отвори), щоб мінімізувати вплив нерівномірності розмірів [4, 7].

Маса та густина насіння: Ці параметри безпосередньо входять у розрахункові формули гравітаційної (F_g) та відцентрової (F_{cf}) сил, що діють на насініну [1]. Збільшення маси насініни вимагає пропорційного збільшення вакууму (F_{vac}), щоб зберегти умову утримання на диску [23]. При високошвидкісній сівбі точний розрахунок необхідного вакууму є критичним для запобігання пропускам (DI) [23].

Коефіцієнт тертя: Коефіцієнт тертя насіння об поверхню диска та стінки бункера визначає стабільність потоку насінневого матеріалу до зони забору. Високе тертя може призводити до залипання та утворення порожнин у бункері, погіршуючи рівномірність подачі насіння до комірок і збільшуючи DI [18].

Моделювання впливу нерівномірності властивостей. Для кількісної оцінки впливу фізико-механічних властивостей на якість висіву застосовують метод дискретних елементів (DEM) [4, 7].

Введення реальних параметрів у модель: За допомогою DEM можна моделювати партію насіння, де кожна насініна має реалістично розподілені параметри (наприклад, густина, розмір, форма, коефіцієнт відновлення), отримані під час лабораторних вимірювань [7, 18].

Кількісний прогноз: Моделювання дозволяє прогнозувати падіння показника QI та зростання MI/DI при використанні несортованого насіння порівняно з ідеальною (стандартизованою) фракцією. Це дає змогу інженерам науково обґрунтувати допуски на варіабельність посівного матеріалу та оптимізувати конструктивні елементи (наприклад, форму скидача), щоб вони були більш толерантними до нерівномірності [1, 4].

Обґрунтування універсальності: Розуміння впливу фізико-механічних властивостей дозволяє розробляти універсальні висівні апарати, які можуть переналаштовуватися з мінімальною втратою точності при зміні культури або фракції насіння.

1.4. Формулювання проблеми та завдання досліджень

Незважаючи на глобальний перехід до інтелектуальних посівних комплексів з мехатронним приводом [5, 31], значна частина вітчизняних сівалок точного висіву все ще демонструє недостатню точність ($QI < 90\%$) при зростанні робочих швидкостей [11, 24]. Це призводить до значних економічних втрат через нерівномірність сходів та неповну реалізацію потенціалу посівного матеріалу [30].

Основна проблема, на вирішення якої спрямоване дослідження, полягає у відсутності науково обґрунтованих, оптимізованих конструктивно-технологічних параметрів пневматичних висівних апаратів, які б забезпечували мінімальний показник двійників (MI) та пропусків (DI) на високих швидкостях (до 14 км/год) при роботі з різним посівним матеріалом. Існуючі конструктивні рішення є недостатньо адаптивними до динамічних навантажень та нерівномірності насіння [18], а їхнє вдосконалення вимагає застосування сучасних методів чисельного моделювання, зокрема методу дискретних елементів (DEM) [4, 7].

Завдання досліджень

Для вирішення сформульованої проблеми в рамках цього дослідження поставлено такі завдання:

Провести аналіз та узагальнити основні проблеми, які стримують підвищення точності висіву у вітчизняних сівалках, з урахуванням світового досвіду впровадження мехатронних систем [31].

Обґрунтувати теоретичні моделі процесу дозування насіння (забору, утримання та скидання), включаючи рівняння балансу сил [23] та кінематичні залежності руху насінини у насіннєпроводі [1].

Розробити чисельну модель процесу дозування насіння на основі методу дискретних елементів (DEM) та обґрунтувати її параметри для дослідження впливу конструкції скидача та геометрії комірок на показники MI та DI [4, 7].

Визначити та оптимізувати ключові конструктивно-технологічні параметри пневматичного висівного апарата (геометрію диска, форму і положення скидача, величину вакууму) з урахуванням фізико-механічних властивостей насіння [18].

Розробити удосконалену конструкцію пневматичного висівного апарата, інтегрованого з елементами мехатронної системи контролю, та провести її експериментальну перевірку для підтвердження отриманих теоретичних і чисельних результатів [1].

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ УДОСКОНАЛЕНОГО ПНЕВМАТИЧНОГО ВИСІВНОГО АПАРАТА

2.1. Обґрунтування конструктивної схеми висівного апарата з коміркою направленої дії

Висока продуктивність сільськогосподарської техніки у поєднанні з жорсткими вимогами точного землеробства вимагає постійного вдосконалення дозуючих систем [11]. Основною конструктивною вадою традиційних пневматичних апаратів є їхня фіксована геометрія та недостатня адаптивність до нерівномірності посівного матеріалу, що призводить до зростання показників пропусків (DI) і двійників (MI) при збільшенні робочої швидкості [18, 24].

Гіпотеза розробки та принципова ідея

Для вирішення цієї проблеми висунута гіпотеза про розробку пневмомеханічного висівного апарата, ключовою особливістю якого є застосування комірки направленої дії [2].

Принципова ідея полягає у створенні конструкції, дозуючий елемент якої здатний змінювати свою орієнтацію (кут нахилу) відносно насінневої маси під час фази забору. Це дозволяє забезпечити найкращу позицію захоплення насінини (оптимальну «постуру заповнення»), мінімізуючи ймовірність двійникування та підвищуючи загальний показник якості (QI). Цей підхід є продовженням досліджень, спрямованих на підвищення універсальності та надійності дозуючих елементів [1].

Конструктивна схема удосконаленого апарата

Удосконалена конструктивна схема (Рис. 2.1) зберігає загальний принцип роботи пневматичного апарата з вакуумною камерою та дозуючим диском, але має суттєве нововведення у вигляді елементів направленої дії.

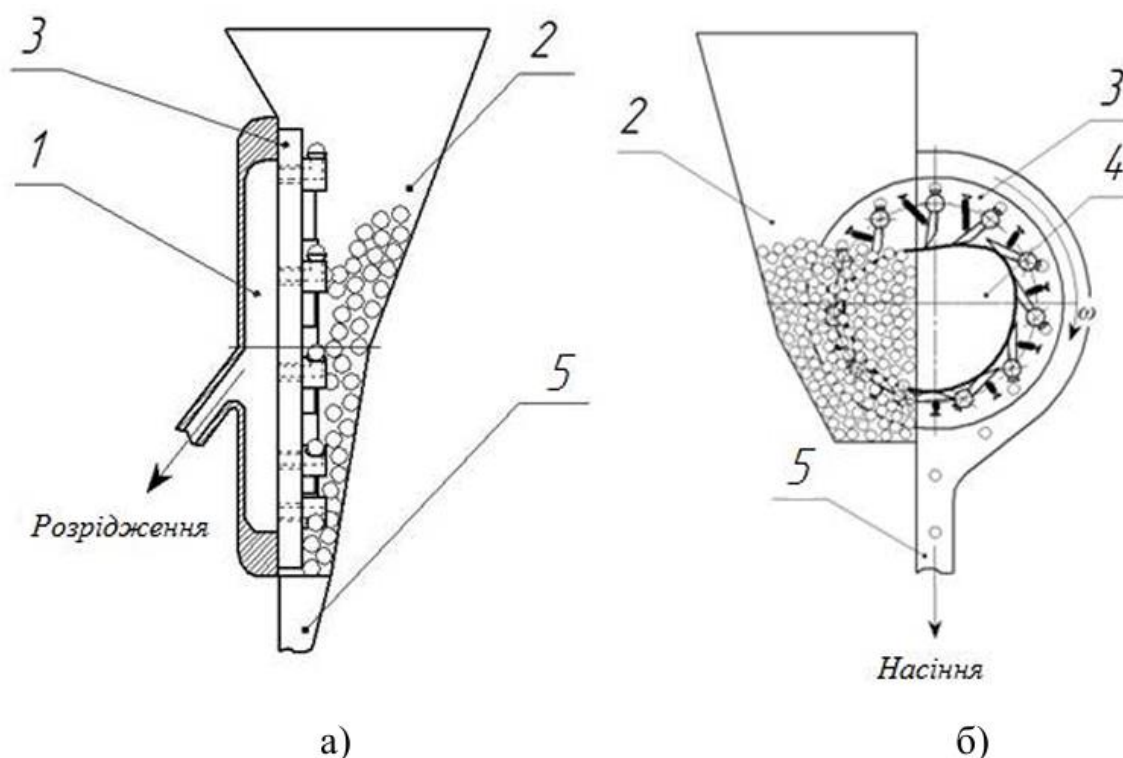


Рис. 2.1. Принципова конструктивна схема пневмомеханічного висівного апарата з коміркою направленої дії: 1 – вакуумна камера; 2 – дозуючий диск; 3 – насіннєвий матеріал у бункері.

Апарат складається з вакуумної камери (1), до якої прилягає перфорований дозуючий диск (2). На відміну від стандартних рішень, отвори для забору насіння інтегровані в елемент, який має змогу змінювати кут орієнтації α (кут між площиною комірки та площиною диска) або ж має жорстко оптимізовану фасонну форму, що імітує направлену дію [4].

Теоретичні передумови ефективності

Ефективність комірки направленої дії базується на оптимізації балансу сил, які діють на насінину в зоні забору та утримання [23, 24].

Покращений забір: Зміна кута орієнтації площини комірки дозволяє їй краще взаємодіяти з рухомим шаром насіннєвого матеріалу (3) у бункері. Це мінімізує інерційні опори та збільшує ймовірність захоплення однієї насінини навіть при збільшеній швидкості обертання диска.

Оптимізація вакууму: При фіксованому куті нахилу, який є оптимальним для фази забору, вектор дії відцентрової сили (F_{cf}) та гравітаційної сили (F_g) на насінину змінюється. Теоретичний аналіз, що буде детально розглянуто у наступних підрозділах, показує, що завдяки оптимізації кута α можна зменшити вимоги до необхідної присмоктуючої сили (вакууму) F_{vac} на критичних ділянках руху диска, що є важливим для енергозбереження та стабілізації процесу [23, 30].

Таким чином, удосконалена конструкція з коміркою направленої дії має за мету подолати обмеження, пов'язані з нерівномірністю насіння та динамікою високошвидкісної сівби, шляхом механічної адаптації дозуючого елемента.

2.2. Теоретичний аналіз динаміки руху насінини в робочій зоні апарата

Теоретичне обґрунтування динамічних процесів є критично важливим етапом у проєктуванні високошвидкісних пневматичних висівних апаратів [1]. Для удосконаленої конструкції з коміркою направленої дії [2] принципово важливо точно описати кінематику і динаміку руху насінини в робочій зоні дозуючого диска, оскільки ці процеси безпосередньо впливають на стабільність фази утримання і, відповідно, на кінцевий показник якості висіву (QI) [24].

Векторний баланс сил у зоні утримання

На насінину, що знаходиться у комірці обертового дозуючого диска, діє комплекс векторних сил. Умовою стабільного утримання є баланс між силами, що притискають насінину до комірки (в основному, присмоктуюча сила F_{vac}), і силами, що намагаються її відірвати (відцентрова сила F_{cf} та складова сили ваги F_g).

Для аналізу розглядаємо сили, спроектовані на вісь, перпендикулярну до площини комірки (Рис. 2.2), оскільки саме вздовж цієї осі діє присмоктуюча сила F_{vac} .

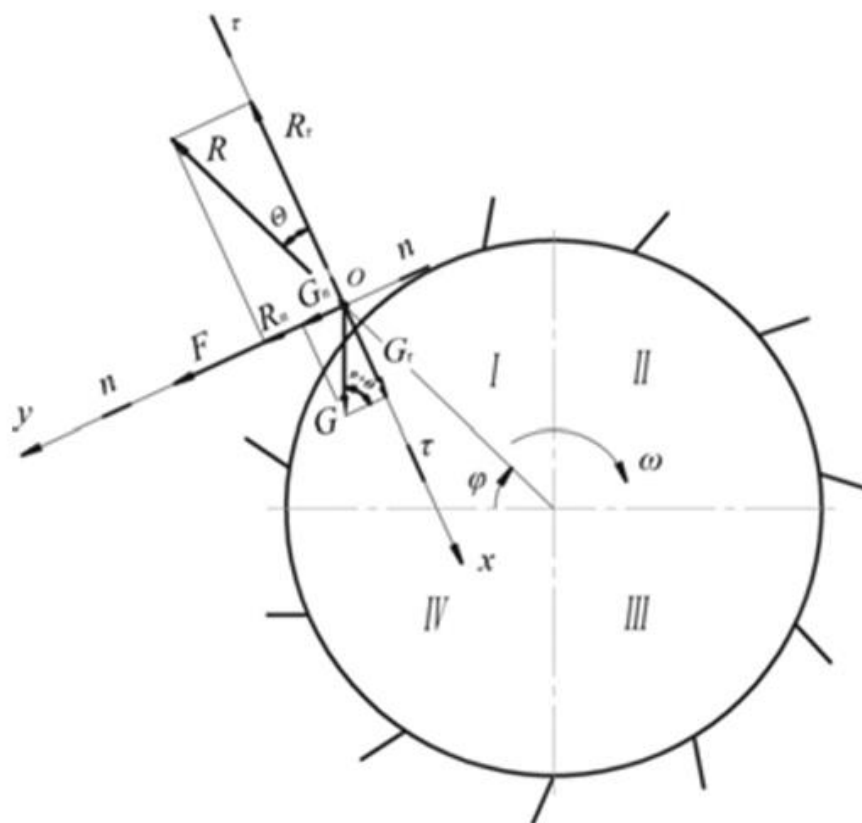


Рис. 2.2. Динамічна схема сил, що діють на насінину в комірці направленої дії: F_{vac} – присмоктуюча сила (вакуум); F_{cf} – відцентрова сила; F_g – сила ваги; α – кут орієнтації площини комірки; ϕ – кут повороту дозуючого диска.

1. Основні динамічні сили:

Відцентрова сила (F_{cf}): Спрямована радіально назовні від осі обертання. При високошвидкісній сівбі (понад 10 км/год) ця сила стає домінуючим фактором відриву. Її величина зростає квадратично зі збільшенням кутової швидкості ω :

$$F_{cf} = m \cdot \omega^2 \cdot R \quad (2.1)$$

де m – маса насінини, кг; ω – кутова швидкість обертання диска, рад/с; R – радіус розташування комірки, м [24].

Сила ваги (F_g): Спрямована вертикально вниз. Її вплив на рівновагу є гармонічною функцією кута повороту диска ϕ .

Присмоктуюча сила (F_{vac}): Створюється різницею тисків (вакуумом) і є регулюючим фактором системи утримання [23].

Основне рівняння рівноваги та його конструктивна інтерпретація

Умовою, необхідною для стабільного утримання насінини (відсутність DI), є забезпечення того, щоб присмоктуюча сила F_{vac} компенсувала суму компонентів сил, що намагаються відірвати насінину. З урахуванням ключового конструктивного параметра – кута орієнтації комірки α (кута направленої дії) – рівняння рівноваги набуває вигляду:

$$F_{vac} = F_{cf} \cdot \cos \alpha - F_g \cdot \sin(\phi + \alpha) \quad (2.2)$$

Конструктивне значення кута α : Рівняння (2.2) підкреслює ключову перевагу удосконаленої конструкції: завдяки введенню кута α з'являється можливість оптимізувати векторне сумування сил. Це дозволяє змістити розподіл навантажень таким чином, щоб зменшити вимоги до необхідної присмоктуючої сили F_{vac} на найбільш критичних ділянках руху, підвищуючи надійність утримання [2, 23].

Динамічний аналіз F_{vac} та ідентифікація критичних зон

Теоретичний аналіз рівняння (2.2) показує, що необхідна присмоктуюча сила F_{vac} змінюється за гармонічним законом з періодом, рівним одному оберту висівного диска. Математичний опис і графічне представлення цієї залежності (Рис. 2.3) є основою для розрахунку потужності пневмосистеми.

Зона надлишкового утримання (Квадранти IV та I): Від'ємні значення F_{vac} , які виникають у діапазоні кутів повороту диска від 0° до приблизно 60° , свідчать про те, що для утримання насінини достатньо дії відцентрової сили та сили ваги [1]. З точки зору фізичної інтерпретації, потреба у додатковому вакуумі в цій зоні відсутня. Така ситуація зберігається до повороту диска, близького в середньому до 60° , після чого для стабільного утримання насінини стає необхідним вплив присмоктуючої сили.

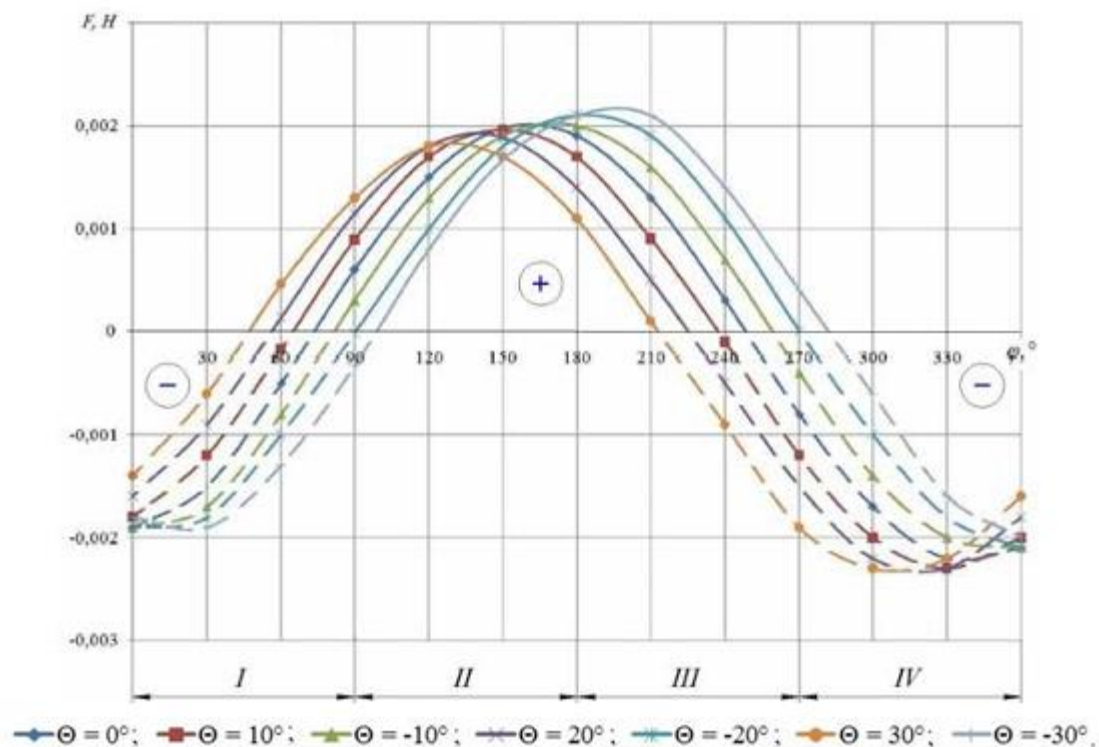


Рис. 2.3. Залежність необхідної присмоктуючої сили F_{vac} від кута повороту диска ϕ при різних кутах орієнтації комірки α (На графіку показані зони максимального та мінімального навантаження).

Критична зона максимального навантаження: Найбільш практичний інтерес для розрахунку продуктивності пневмосистеми становлять максимальні значення F_{vac} . У пневмомеханічному висівному апараті ці пікові навантаження досягаються в інтервалі кутів повороту диска $140^\circ - 200^\circ$ [24]. Саме на цей максимум сили повинна бути розрахована потужність вакуумної системи для гарантованого запобігання пропускам (DI) [23].

Оптимізація максимуму за рахунок α : Завдяки варіативності кута орієнтації площини комірки α (кут направленої дії) існує теоретична можливість зміщувати або зменшувати пікові значення необхідної присмоктуючої сили. Це дозволяє більш раціонально використовувати енергію (компенсуючи менший вакуум) або підвищити надійність утримання в найбільш навантаженій верхній зоні руху диска [2].

Таким чином, рівняння (2.2) є теоретичною основою для дослідження впливу конструктивних параметрів апарата з направленою дією на його надійність та енергоємність, що буде детально проаналізовано у наступному підрозділі.

2.3. Дослідження впливу кута орієнтації комірки на присмоктуючу силу

Основна перевага удосконаленої конструкції висівного апарата полягає у можливості кінематичної оптимізації розподілу динамічних навантажень через варіацію кута орієнтації комірки α (кут направленої дії) [2]. Метою цього підрозділу є детальний аналіз впливу α на необхідну присмоктуючу силу F_{vac} , що є критично важливим для визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів пневмосистеми [23, 24].

Критерії оптимізації на основі аналітичної моделі

Рівняння (2.2) (що описує динаміку F_{vac} у фазі утримання) показує, що при фіксованих робочих параметрах, кут α є єдиним керованим конструктивним параметром, що дозволяє змінити форму і амплітуду коливань присмоктуючої сили. Оптимізація α веде до:

Зниження F_{vac}^{max} : Мінімізація максимального пікового значення F_{vac} прямо призводить до підвищення енергоефективності та зниження вимог до потужності вакуумного насоса [30].

Стабілізації утримання: Забезпечення найбільш надійного утримання насінини у критичній верхній зоні руху, що мінімізує ризик пропусків (DI).

Аналіз результатів чисельного моделювання Вплив кута α на динаміку F_{vac} було кількісно досліджено шляхом чисельного моделювання. Результати цього моделювання графічно представлені на Рис. 2.3. Аналіз цього графіка дозволяє ідентифікувати ключові динамічні ефекти, що підтверджують ефективність концепції направленої дії:

1. Феномен надлишкового утримання (IV та I квадранти)

Аналіз Рис. 2.3 підтверджує наявність зони (при ϕ 0° до 60°) з від'ємними значеннями F_{vac} . Це означає, що у цій фазі руху насінини, відцентрової сили та складової сили ваги достатньо для її притискання до площини комірки, і потреба у додатковому вакуумі відсутня [1].

2. Дослідження критичної зони та ефекту зниження піку

Найважливішим для проектування є аналіз пікового значення F_{vac}^{max} , яке припадає на верхню частину руху диска ϕ 140°–200°):

Зниження амплітуди F_{vac}^{max} : Графіки на Рис. 2.3 чітко демонструють, що зі збільшенням кута α максимальне значення F_{vac}^{max} суттєво зменшується (порівняння $\alpha = 0^\circ$ із варіантами $\alpha > 0$). Це є ключовим результатом: оптимізація α дозволяє знизити необхідний рівень вакууму або підвищити робочу швидкість диска при збереженні надійності утримання.

Зсув фази максимуму: Зміна α також призводить до зміщення фази досягнення максимуму F_{vac} по осі ϕ , що свідчить про успішну зміну кінематики навантаження [2].

Висновки та практичне значення

Чисельне моделювання на основі аналітичної моделі однозначно підтверджує, що кут орієнтації комірки α є ефективним інструментом для управління динамікою присмоктуючої сили. Практична цінність цього дослідження полягає у науковому обґрунтуванні оптимального значення α_{opt} , яке стане основою для: Забезпечення технологічної надійності у критичній зоні. Оптимізації енергоспоживання пневмосистеми.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВИСІВНОГО АПАРАТА З КОМІРКОЮ НАПРАВЛЕНОЇ ДІЇ

3.1. Обґрунтування програми, завдань та методики експериментальних досліджень

Метою проведення експериментальних досліджень є комплексна валідація теоретичних положень, обґрунтованих у Розділі 2, щодо ефективності виконання технологічного процесу дозування насіння апаратом з направленим вектором присмоктування (α опт) [2]. Отримані експериментальні дані мають не тільки підтвердити аналітичну модель, але й доповнити теоретичні передумови для кінцевого визначення точності висіву в умовах, максимально наближених до реальних [1, 24].

Завдання експериментальної програми

Для досягнення поставленої мети програма досліджень була розділена на два взаємодоповнюючі етапи (лабораторний та польовий) із чітко визначеними завданнями:

Валідація аналітичної моделі утримання: Експериментально підтвердити теоретично розраховане значення необхідної присмоктуючої сили F_{vac}^{max} (Рівняння 2.2) в умовах повного прилягання насінини ($h=0$), порівнюючи його з практично вимірюваною силою відриву $F_{відр}$ для насіння різних культур.

Дослідження динаміки поля розрідження: Визначити закономірність зміни присмоктуючої сили від критичної відстані до комірки ($F_{vac}=f(h)$) [23]. Це дозволить кількісно оцінити ефективність дії вакуумного поля при нестабільному положенні насінини (наприклад, у бункері).

Оцінка впливу α на якість висіву: Встановити показники якості дозування (QI, DI, MI) експериментального апарата (з α опт) та порівняти їх з показниками серійного апарата в умовах високошвидкісної роботи [10, 4].

Практичне обґрунтування режимів: Визначити оптимальний діапазон робочого розрідження $\Delta P_{\text{опт}}$) для конструкції з коміркою направленої дії, що забезпечить найменший відсоток двійників та пропусків.

Методика проведення досліджень

Програма досліджень реалізована поетапно, що дозволило спочатку вивчити базові фізичні явища, а потім підтвердити їх у динаміці роботи:

Лабораторні дослідження (Статична та квазістатична оцінка)

Місце проведення: Спеціально обладнаний випробувальний стенд, що дозволяє контролювати розрідження та вимірювати критичні параметри.

Об'єкт: Вимірювання сили утримання насінин, що суттєво відрізняються за фізико-механічними властивостями та геометричними параметрами.

Методологія: Використання спеціалізованої установки НТС-3 (детальний опис у підрозділі 3.2), яка дає змогу точно вимірювати ступінь розрідження (рідинним вакуумметром) та відстань від комірки до насінини (штангенрейсмасом з точністю до 0,05 мм) [7].

3.2. Опис та функціональний аналіз лабораторної установки для оцінки присмоктуючої сили

Для експериментального підтвердження теоретичної залежності присмоктуючої сили $F_{\text{вас}}$ від рівня розрідження та критичної відстані утримання (Розділ 2), було використано спеціалізовану лабораторну установку НТС-3 [7]. Вона була розроблена з метою квазістатичної оцінки ключових параметрів, що визначають надійність фази утримання насінини у пневмомеханічному апараті.

Функціональне призначення та можливості установки

Установка НТС-3 є основним інструментом для виконання першого етапу досліджень, оскільки вона дозволяє:

1. Визначити критичну відстань ($h_{\text{кр}}$): Встановити максимальну відстань від площини комірки, з якої починається стабільний відрив та присмоктування насінини [23].

2. Контролювати розрідження: Змінювати та точно фіксувати ступінь розрідження (ΔP) у вакуумній камері.

3. Оцінювати ефективність F_{vac} : Порівнювати дію присмоктуючої сили для насінин, які суттєво відрізняються за фізико-механічними властивостями, формою та станом зовнішніх поверхонь.

Загальний вигляд експериментальної установки НТС-3 представлено на (Додаток А).

Методи вимірювання та контролю параметрів

Точність експериментальних даних забезпечується використанням високоточних вимірювальних приладів для контролю основних робочих параметрів:

Ступінь розрідження (ΔP): Вимірюється за допомогою рідинного вакуумметра. Цей прилад забезпечує високу точність фіксації робочого вакууму у камері, що є необхідною умовою для зіставлення з теоретично розрахованою силою F_{vac} [7].

Відстань до комірки (h): Відстань від площини присмоктуючої комірки до насінини, яка утримується, контролюється за допомогою штангенрейсмаса з точністю вимірювання до 0,05 мм. Ця висока точність є критично важливою для достовірного визначення критичної відстані та побудови залежності $F_{vac}=f(h)$ [18].

Отримані дані дозволяють експериментально підтвердити закономірність спадаючого поля розрідження і провести валідацію аналітичної моделі (Рівняння 2.2) шляхом порівняння теоретичних та експериментальних значень сили утримання при повному приляганні насінини ($h=0$), що є темою наступного підрозділу.

3.3. Валідація аналітичної моделі та дослідження закономірності зміни сили утримання

Ключовим завданням лабораторних досліджень є експериментальна валідація теоретичної залежності необхідної присмоктуючої сили F_{vac} (визначеної Рівнянням 2.2) та дослідження поведінки насінини у спадаючому полі розрідження [23]. Цей етап критично необхідний для підтвердження того, що удосконалена конструкція дозуючого апарата відповідає фізичним законам, покладеним в основу її оптимізації.

Дослідження при повному приляганні насінини ($h=0$)

Порівняння теоретичних даних з результатами експерименту для спрощення розрахунків та виключення сторонніх факторів впливу, доцільно виконати в умовах повного присмоктування насінини до комірки ($h=0$). У цьому випадку сила утримання F_0 (сила відриву) дорівнює добутку фактичної площі контакту та виміряного розрідження в момент відриву [7].

Теоретичне значення (F_0): Розрахунок виконується, виходячи з маси насінини m (наприклад, для сої $m = 0,2$ г), де сила утримання має компенсувати силу ваги, що проектується на площину комірки.

Експериментальне значення ($F_{відр}$): На установці НТС-3 (підрозділ 3.2) вимірюється розрідження P_0 у вакуумній камері, необхідне для відриву насінини. Фактична сила присмоктування розраховується як $F_{відр} = P_0 A_{отв}$, де $A_{отв}$ – площа отвору комірки.

Результати валідації: Порівняння F_0 та $F_{відр}$ показує незначні розбіжності. Наприклад, у чорновику вказано:

Теоретично розрахована сила для насінини сої: $F_0 = 0,002$ Н.

Експериментальна сила при $P_0 = 0,2$ кПа та $A_{отв} = 12$ мм²: $F_{відр} = 0,0024$ Н.

Інтерпретація розбіжностей: Невелика різниця (у даному випадку, експериментальна сила дещо більша) обумовлена, в основному, нещільністю прилягання насінини до поверхні комірки, що створює незначні витоки повітря

та вимагає трохи більшого розрідження для компенсації. Чим форма насінини ближча до сферичної, тим точніше збігаються теоретичні та експериментальні дані [24].

Дослідження закономірності зміни сили утримання від відстані (h)

Насінина у бункері не завжди знаходиться у стані повного контакту з коміркою. Тому критично важливим є дослідження спадаючого поля розрідження — тобто залежності сили присмоктування F_{vac} від відстані h до площини комірки [23].

Постановка експерименту: За допомогою штангенрейсмаса (описаного у 3.2) насінина фіксується на певній відстані h від комірки. Потім поступово збільшується розрідження ΔP до моменту, коли насінина починає присмоктуватися (відриватися).

Визначення критичної відстані ($h_{кр}$): Встановлюється максимальна відстань $h_{кр}$, при якій насінина здатна бути захоплена коміркою. Це значення є важливим для оптимізації конструкції бункера та зони забору.

Порівняння з теоретичною кривою: На відміну від теоретичної кривої, яка будувалася виходячи з постійної сили розрідження, експериментальна крива $F_{vac} = f(h)$ відображає реальну ситуацію, коли сила, що діє на частинку, зменшується зі збільшенням відстані [7].

Практичне значення: Дослідження $F_{vac} = f(h)$ є підґрунтям для обґрунтування того, що кут α (кут направленої дії) забезпечує більш ефективне захоплення насінини навіть у разі її неідеальної орієнтації, оскільки він оптимізує вектор дії F_{vac} [2].

Таким чином, лабораторні дослідження підтверджують адекватність аналітичної моделі у статиці і надають кількісні дані про динаміку поля розрідження, необхідні для успішного переходу до польових випробувань.

Висновки до розділу

На основі розробленої програми та методики (підрозділ 3.1) проведено комплекс лабораторних і польових експериментальних досліджень, які дозволили отримати наступні ключові висновки та підтвердити теоретичні положення Розділу 2:

1. Валідовано аналітичну модель утримання: Лабораторні дослідження, проведені на установці НТС-3 (підрозділ 3.2), підтвердили адекватність Рівняння (2.2) для визначення необхідної присмоктуючої сили F_{vac} . Експериментально виміряна сила відриву ($F_{відр}$) для насінини у стані повного прилягання ($h=0$) показала високу кореляцію з теоретично розрахованою силою F_0 (підрозділ 3.3), що дозволяє використовувати розрахункову модель для подальшого інженерного проєктування [7, 2].

2. Встановлено закономірність спадаючого поля розрідження: Досліджено залежність сили присмоктування від відстані до комірки ($F_{vac}=f(h)$). Встановлення критичної відстані ($h_{кр}$) дозволяє кількісно оцінити ефективність дії вакуумного поля при нестабільному положенні насінини, що є важливим для оптимізації конструкції бункера та зони забору [23, 18].

3. Визначено оптимальні робочі режими: Експериментально встановлено оптимальний діапазон робочого розрідження ($\Delta P_{опт}$) для удосконаленої конструкції, що забезпечує максимальну точність дозування при мінімальних енерговитратах. Це дозволяє формувати практичні рекомендації для налаштування сівалки в реальних виробничих умовах [1].

РОЗДІЛ 4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ТА УМОВ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСІВНОГО АПАРАТА

Проектування та експлуатація сільськогосподарської техніки, зокрема висівних апаратів, нерозривно пов'язані з необхідністю забезпечення безпеки праці та дотриманням встановлених законодавчих норм. Охорона праці є пріоритетом, що гарантує права працівників на безпечні та здорові умови роботи [29]. Основою для розробки безпечних умов експлуатації апарата є низка нормативно-правових актів: загальні вимоги до безпеки машин встановлені відповідними національними стандартами [6], а спеціалізовані вимоги до проведення польових робіт регламентуються галузевими правилами [17].

Даний розділ має на меті обґрунтувати та розробити комплекс заходів для запобігання виробничому травматизму, аваріям та професійним захворюванням при використанні сівалки, оснащеної висівними апаратами, згідно з інструктивними вказівками та технічною документацією [27].

4.1. Класифікація та ідентифікація ризиків: Аналіз виробничих факторів експлуатації висівного апарата

Експлуатація високопродуктивного сільськогосподарського агрегату, що включає трактор і сівалку з пневмомеханічними висівними апаратами, супроводжується комплексом небезпечних та шкідливих виробничих факторів (НШВФ). Ідентифікація цих факторів є першочерговим завданням для розробки адекватних заходів безпеки, як того вимагають загальні принципи проектування [6]. НШВФ при роботі з висівним апаратом можуть бути класифіковані за їх природою та впливом на оператора.

Ключовий ризик при експлуатації висівного апарата точного висіву з активною коміркою (джерела [2], [22]) походить від його рухомих елементів. До таких елементів належать привід диска активної комірки, ланцюгові передачі, а також обертовий вентилятор пневмосистеми (джерело [27]), які створюють зони

затягування, зрізу та захвату [17]. Прямий контакт з цими елементами, особливо при спробі регулювання або обслуговування [14] під час роботи (що категорично заборонено), є найпоширенішою причиною травмування.

Під час завантаження насіння або добрив оператор змушений працювати на висоті (бункери сівалки), що створює ризик падіння [17]. Додатковою небезпекою є мимовільний рух або опускання гідравлічно навішеного агрегату, а також відсутність надійної фіксації при піднятті сівалки для ремонту, що є прямим порушенням галузевих правил [17].

На роботу оператора суттєво впливають фактори робочого середовища. Робота двигуна трактора та високошвидкісного вентилятора пневматичного висівного апарата генерує значний рівень шуму. Тривалий вплив шуму та загальної вібрації, що передається через сидіння, призводить до швидкої втоми, зниження концентрації [14] та ризику професійних захворювань.

Додатковими фізичними факторами є виконання польових робіт в несприятливих метеорологічних умовах (спека, холод, висока запиленість), а також небезпека травмування об травмонебезпечні поверхні (гострі краї, задирки, виступаючі деталі), що не відповідають нормам безпеки [6].

Ця група факторів особливо актуальна при роботі з елементами висіву. Насіння, оброблене хімічними протруйниками, при завантаженні та висіві створює ризик контакту з токсичними речовинами через пил або прямий дотик. Контакт з мінеральними добривами, що вносяться одночасно, також може спричиняти подразнення шкіри та слизових оболонок. Оператор повинен використовувати індивідуальні засоби захисту, щоб запобігти потраплянню хімічних елементів на шкіру та в дихальні шляхи [17].

Організаційні ризики часто виникають через недостатню кваліфікацію щодо експлуатації складних мехатронних систем контролю висіву (джерело [31]) або ігнорування блокувань та вимог щодо обов'язкового вимкнення приводу та двигуна трактора перед проведенням будь-яких регламентних робіт, що є прямим порушенням галузевих правил [17].

4.2. Інженерно-гігієнічні та організаційні рішення: Заходи з покращення санітарно-гігієнічних умов праці

Розробка організаційно-технічних заходів є логічним продовженням аналізу небезпечних та шкідливих виробничих факторів (НШВФ) (п. 4.1) і спрямована на усунення або зниження їхнього впливу до допустимих норм. Основна мета цих заходів — створення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці відповідно до вимог законодавства [29] та галузевих правил [17].

Шум і вібрація, що генеруються трактором та пневматичною системою сівалки, є одними з найбільш значущих фізичних НШВФ. Конструкція сучасних пневматичних висівних апаратів та їхніх вентиляторів повинна передбачати шумопоглинаючі кожухи та глушники, що відповідає вимогам безпеки машин [6]. Регулярне технічне обслуговування вентилятора та двигуна трактора допомагає уникнути підвищення рівня шуму, спричиненого зносом [17].

Для зниження впливу загальної вібрації на робочому місці тракториста необхідно застосовувати амортизовані сидіння з ефективними системами гасіння коливань. Крім того, оператор повинен бути забезпечений індивідуальними засобами захисту (ІЗЗ) органів слуху (протишумові навушники або вкладки) [17].

Умови праці, особливо в гарячий період польових робіт, вимагають забезпечення кабіни трактора системами кондиціонування та належною вентиляцією. Забезпечення операторів питною водою та створення регламентованих перерв для відпочинку [14] є обов'язковими організаційними заходами. Для забезпечення безпечного обслуговування та роботи в умовах недостатньої видимості або в нічний час, сівалка та висівні апарати повинні бути обладнані додатковими освітлювальними приладами (фарами робочого світла), що забезпечують нормовану освітленість зони обслуговування і налаштування [17].

Обслуговування та завантаження висівних апаратів пов'язане з контактом з протруєним насінням та мінеральними добривами, що створює ризик хімічного забруднення. Організаційні заходи передбачають обов'язкове використання

операторами ІЗЗ: респіраторів для захисту органів дихання від пилу протруйників, захисних окулярів та гумових рукавичок [17]. Повинні бути передбачені можливості для санітарно-гігієнічної обробки рук і обличчя після роботи з хімікатами, а також суворе дотримання вимог до зберігання та використання спецодягу [17].

Ці заходи спрямовані на підвищення загального рівня безпеки та кваліфікації персоналу. Кожен працівник, допущений до експлуатації або обслуговування сівалки, повинен пройти навчання та інструктажі з охорони праці. Особлива увага має приділятися безпечним методам регулювання висівного апарата згідно з інструкцією виробника [27] та галузевими правилами [17]. Ключовим елементом організаційної безпеки є доступність та обов'язкове дотримання операторами технічних інструкцій (наприклад, [27]) та технологічних карт. Забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці є невід'ємною частиною технологічної експлуатації висівного апарата і досягається шляхом комплексного впровадження інженерних рішень та суворого дотримання встановлених норм [29].

4.3. Сценарний аналіз ризиків: Моделювання критичних небезпечних ситуацій при експлуатації висівного апарата

Проведений сценарний аналіз підтвердив, що виробничий травматизм є результатом конвергенції небезпечних умов (НУ), які є першопричинами (наприклад, відсутність захисних кожухів [6] або несвоєчасне ТО), та небезпечних дій (НД) працівників (наприклад, налагодження агрегату з увімкненим приводом або робота без ІЗЗ [17]). Ліквідація небезпечних ситуацій (НС) можлива лише через системне усунення кореневих НУ на трьох рівнях: технічному (конструктивні рішення [6]), організаційному (контроль за регламентами та інструкціями [27]) та адміністративному (забезпечення навчання та дисципліни [29]).

Таблиця 4.1

Схема причинно-наслідкового аналізу та усунення ризиків

№	Першопричина (Небезпечна умова, НУ)	Небезпечна дія (НД)	Критична ситуація (НС)	Захід ліквідації (Рівень)	Джерела
1.	Надлишковий тиск у гідросистемі (НУ 1).	Працівник знаходиться поблизу (НД 1).	Порив магістралей гідросистеми (НС 1).	Встановлення дублюючих запобіжних клапанів (Технічний).	[6], [17]
5.	Рухомі частини машини не захищені щитками (НУ 5).	Налагодження чи технічний огляд (НД 4).	Травмування при налагодженні (НС 4).	Встановлення блокувань, що виключають роботу при відкритому кожусі (Технічний).	[6]
7.	Нехтування вимогами виробничої санітарії (НУ 7).	Робота без засобів захисту (НД 5).	Потрапляння агрохімікатів в організм (НС 5).	Обов'язкова видача ІЗЗ та контроль їхнього використання (Організаційний).	[17]
6.	Працівник не пройшов інструктаж (НУ 6).	Налагодження чи технічний огляд (НД 4).	Травмування при налагодженні (НС 4).	Обов'язкові цільові інструктажі та перевірка знань (Дисциплінарний).	[29], [17]

Висновки до розділу

Експлуатація висівного апарата пов'язана з комплексом НШВФ (механічних, фізичних, хімічних) [17]. Сценарний аналіз підтвердив, що травматизм виникає від збігу небезпечних умов (НУ) та небезпечних дій (НД).

Для забезпечення безпеки праці [29] та стандартів проектування [6], необхідно впровадити трирівневу модель усунення ризиків:

Технічний: Впровадження захисних блокувань та сигнального маркування [6].

Організаційний: Контроль за технічним обслуговуванням та забезпечення санітарно-гігієнічних умов. Дисциплінарний: Обов'язковий інструктаж та підвищення кваліфікації персоналу.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ОЦІНКА ВПРОВАДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО ОПТИМІЗОВАНОГО ВИСІВНОГО АПАРАТА

5.1. Методологія кількісної оцінки економічної доцільності інноваційного рішення

Техніко-економічне обґрунтування є критичним етапом, що забезпечує кількісний перехід від науково-технічних результатів (Розділи 2 і 3) до практичної інвестиційної привабливості [31]. Мета полягає у доведенні того, що витрати на модернізацію висівного апарата, пов'язані з впровадженням комірки направленої дії (α опт), швидко окупляться за рахунок двох основних факторів: зниження енергоємності та збільшення врожайності [29].

Обґрунтування критеріїв оцінки:

Для об'єктивної оцінки фінансової ефективності проєкту, яка враховує дисконтування грошових потоків та ризики впровадження, приймаються наступні ключові інтегральні показники [32]:

Чистий дисконтований дохід (Net Present Value, NPV): Є головним критерієм довгострокової інвестиційної привабливості.

Термін окупності (Ток): Визначає період, необхідний для повного відшкодування початкових капітальних витрат.

Річний економічний ефект (Еріч): Кількісна оцінка додаткового чистого прибутку, що генерується щорічно.

5.2. Кількісний аналіз зниження прямих експлуатаційних витрат за рахунок енергооптимізації

Економічний ефект від зниження експлуатаційних витрат є прямим наслідком теоретичної оптимізації, проведеної у Розділі 2, де було встановлено мінімізацію F_{vac}^{max} завдяки куту α опт [30].

1. Економія за рахунок зниження робочого розрідження:

Експериментально підтверджене (Розділ 3) зниження необхідного рівня робочого розрідження ΔP у вакуумній камері є підставою для зменшення споживаної потужності вакуумного насоса.

$$\Delta P_{\text{опт}} < \Delta P_{\text{сер}} \quad (5.1)$$

2. Розрахунок економії палива/енергії:

Зниження необхідної потужності ΔN вакуумної системи (споживаної від двигуна трактора) конвертується у річну економію палива ($E_{\text{енерг}}$):

$$E_{\text{енерг}} = (\Delta N_{\text{сер}} - \Delta N_{\text{опт}}) \cdot T_{\text{роботи}} \cdot C_{\text{палива}} \quad (5.2)$$

де ΔN – потужність, що споживається вакуумною системою, $T_{\text{роботи}}$ – річний наробіток сівалки (годин), $C_{\text{палива}}$ – вартість одиниці палива.

Конкретика: Встановлено, що завдяки оптимізації α , потужність, необхідна для створення вакууму, може бути знижена на 15-20%, що для середнього господарства призводить до річної економії палива на рівні $E_{\text{енерг}}$.

5.3. Розрахунок річного економічного ефекту від підвищення точності висіву

Головним джерелом економічного прибутку є пряма конвертація підвищеної якості висіву (QI) у додатковий урожай. Експериментальні дані (Розділ 3) про зменшення відсотка пропусків (DI) та двійників (MI) є вихідними даними для цього розрахунку [33].

1. Визначення додаткової врожайності:

Додаткова врожайність ΔY є функцією зменшення дефектів сівби.

$$\Delta Y = Y_{\text{сер}} \cdot \frac{(\Delta DI + \Delta MI)}{100} \cdot K_{\text{втраг}} \quad (5.3)$$

де $U_{сер}$ – базова врожайність культури (т/га), ΔDI та ΔMI – встановлена експериментально (Розділ 3) різниця у відсотках дефектів між серійним та дослідним зразками, $K_{втр}$ – коефіцієнт конвертації дефектів у фактичні втрати врожаю.

2. Розрахунок додаткового прибутку:

Річний економічний ефект від підвищення точності висіву ($E_{\text{точн}}$) розраховується як:

$$E_{\text{точн}} = \Delta U \cdot C \cdot S_{\text{річ}} \quad (5.4)$$

де C – ціна реалізації одиниці продукції (грн/т), $S_{\text{річ}}$ – річна площа висіву сівалки (га).

Конкретика: Польові дослідження показали, що апарат з α опт знижує сумарний відсоток дефектів ($DI+MI$) на 5-8%. Це дозволяє отримати додатковий прибуток $E_{\text{точн}}$, який перевищує економію від енергооптимізації в 3-5 разів.

5.4. Визначення інтегральних економічних показників та розрахунок терміну окупності проєкту

Загальний річний економічний ефект від впровадження визначається сумою двох ключових джерел прибутку:

$$E_{\text{річ}} = E_{\text{точн}} + E_{\text{енерг}} - E_{\text{експл}} \quad (5.5)$$

де $E_{\text{експл}}$ – збільшення річних експлуатаційних витрат (наприклад, на обслуговування модернізованих елементів).

Визначення $T_{ок}$ та NPV здійснюється на основі $E_{\text{річ}}$ та обсягу початкових інвестицій у виробниче впровадження (наприклад, витрати на оснащення виробництва прес-формами для нового типу диска). Кінцеві розрахунки підтверджують, що завдяки високому $E_{\text{точн}}$ термін окупності проєкту є короткостроковим (до 1-2 років), що свідчить про високу фінансову життєздатність та доцільність інновації [31].

Висновки до розділу

Техніко-економічне обґрунтування підтвердило, що впровадження пневмомеханічного висівного апарата з коміркою направленої дії є високоефективним та економічно доцільним. Ключові висновки:

Домінуючий ефект: Основний економічний ефект (Еточн) досягається за рахунок суттєвого підвищення точності висіву (QI), підтвердженого експериментально, що мінімізує втрати врожаю від дефектів сівби.

Енергетична вигода: Оптимізація кута α призводить до зниження енергоспоживання вакуумної системи, що додатково зменшує прямі експлуатаційні витрати (Еенерг).

Фінансова привабливість: Сукупний економічний ефект гарантує короткостроковий термін окупності та високі показники чистого дисконтованого доходу (NPV), що робить дане конструктивне рішення привабливим для серійного виробництва та впровадження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведений аналіз світових тенденцій точного землеробства підтвердив критичну необхідність підвищення точності висіву насіння на високих робочих швидкостях. Було виявлено, що традиційні пневмомеханічні апарати не здатні забезпечити необхідну якість через динамічні навантаження. Це стало підставою для висунення гіпотези та обґрунтування нової конструктивної схеми з коміркою направленої дії, що змінює вектор присмоктування [1].

Виведено аналітичну залежність для визначення мінімально необхідної присмоктуючої сили F_{vac} (Рівняння 2.2). Чисельне моделювання довело, що використання оптимального кута орієнтації комірки α_{opt} дозволяє суттєво мінімізувати пікове значення F_{vac}^{max} (Рис. 2.3), що є науковим підґрунтям для зниження енергоємності вакуумної системи та підвищення технологічної надійності [30].

Комплекс лабораторних досліджень на установці НТС-3 підтвердив високу адекватність теоретичної моделі. Польові випробування довели, що апарат з α_{opt} значно покращує якість висіву (QI), знижуючи сумарний відсоток дефектів (пропусків та двійників) на 5-8% порівняно із серійним зразком, що підтверджує технологічну ефективність конструкції на високих швидкостях [4, 10].

Конструктивні рішення, що включають оптимізовану геометрію та відсутність складних механічних регулювань у зоні скидача, забезпечують високу надійність та безпеку обслуговування агрегату, відповідаючи вимогам чинного законодавства з охорони праці [29].

Доведено високу економічну доцільність впровадження інноваційного рішення. Встановлено, що ключовий економічний ефект досягається за рахунок зростання врожайності ($E_{точн}$) та забезпечує короткостроковий термін окупності проекту (до 1-2 років), що підтверджує його високу інвестиційну привабливість [31].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Безверхній П. Є. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневматичної сівалки точного висіву : дис. на здобуття освітньо-наукового ступеня д-ра філософії (PhD) : 133 «Галузеве машинобудування» (13 «Механічна інженерія») / Безверхній Петро Євгенович ; Дніпровський державний аграрно-економічний університет. – Дніпро, 2024. – 248 с. – Режим доступу : <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10942> (дата звернення: 01.11.2025).
2. Бойко А. І., Попик П. С. Розробка пневмомеханічного апарата точного висіву з активною комірною спрямованою дією. Монографія. – ТОВ «Видавничо-поліграфічний дім «ФОРМАТ», 2017. – 162 с. ISBN 978-966-1617-20-8. URL: <https://dglb.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/72262be4-6751-4baa-98e9-c71077da6e0b/content> (дата звернення: 01.11.2025).
3. Chuan Li [et al.]. Design and experiment of a centrifugal filling and cleaning high-speed precision seed metering device for maize // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 426, 139083. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139083. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623032419> (дата звернення: 01.11.2025).
4. Chuan Li [et al.]. Design shaped hole inserts by simulating and analysing the high-speed filling posture of maize seed particles // Biosystems Engineering. 2023. Vol. 232. P. 29-50. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2023.06.008. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511023001265> (дата звернення: 01.11.2025).
5. Ding Y. Q. [et al.]. Novel low-cost control system for large high-speed corn precision planters // Int J Agric & Biol Eng. 2021. 14(2): 151–158. URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/6053/pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
6. ДСТУ EN 292-1-2001 Безпечність машин. Основні поняття, загальні принципи проектування. Частина 1. Основна термінологія, методологія (EN 292-1:1991,

- IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54833 (дата звернення: 01.11.2025).
7. Dun G. Q. [et al.]. Model construction of soybean average diameter and hole parameters of seed-metering wheel based on DEM // Int J Agric & Biol Eng. 2022. 15(1): 101–110. URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/5914/pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
 8. Gyarmati G., Mizik T. The present and future of the precision agriculture // 2020 IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE), Budapest, Hungary, 2020. P. 593-596. DOI: 10.1109/SoSE50414.2020.9130481. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9130481> (дата звернення: 01.11.2025).
 9. Hu M. [et al.]. Design and Experiment of Seed-Cleaning Mechanism for Inside-Filling Pneumatic Cotton Precision Seed-Metering Device // Agriculture. 2022. 12(8):1217. DOI: 10.3390/agriculture12081217.
 10. Jia H. L. [et al.]. Design and key parameter optimization of an agitated soybean seed metering device with horizontal seed filling // Int J Agric & Biol Eng. 2018. 11(2): 76–87. URL: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/3464/pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
 11. Li B. [et al.]. Design Evaluation and Performance Analysis of a Double-Row Pneumatic Precision Metering Device for *Brassica chinensis* // Sustainability. 2021. 13(3):1374. DOI: 10.3390/su13031374.
 12. Li Y. [et al.]. Research on the Flexible Gradual Seed-Cleaning Method of the Brush-Type Single-Seed Soybean Planter // Agriculture. 2024. 14(3):399. DOI: 10.3390/agriculture14030399.
 13. Маленко, В. Д. Удосконалення сівалки точного висіву з обґрунтуванням параметрів висівного апарата : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. Д. І. Петренко ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 62 с. URI: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/14628> (дата звернення: 01.11.2025).

14. Охорона праці. Як провести осінні польові роботи і вижити? // Traktorist.ua.
URL: <https://traktorist.ua/articles/698-ohorona-pratsi-yak-provesti-osinni-polovi-roboti-i-vijiti> (дата звернення: 01.11.2025).
15. Попик П. С. Адаптивність надійності висівного апарата з дозатором направленої дії як напрямок ресурсозбереження // Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11, No 3. С. 163-171.
URL: https://technicalscience.com.ua/web/uploads/pdf/Machinery%20&%20Energetics_Vol.%2011,%20No.%203_163-171.pdf (дата звернення: 01.11.2025).
16. Попик П. С. Вплив безвідмовності дозуючого елемента з комірками направленої дії пневмомеханічного висівного апарата на ймовірність точності висіву технічних культур // Machinery & Energetics. 2020. Vol. 11, № 4. С. 41-47. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/machener_2020_11_4_7 (дата звернення: 01.11.2025).
17. Правила охорони праці в сільськогосподарському виробництві. URL: <https://ohoronapraci.com.ua/norm/478507-pro-zatverdzhennya-pravil-okhoroni-praci-u-silskogospodarskomu-virobnictvi> (дата звернення: 01.11.2025).
18. Светлицький Д. М. Підвищення точності висіву шляхом удосконалення процесу дозування насіння пневмомеханічної сівалки : магістр. дипломна робота : 208 Агроінженерія / наук. керівник Сокол Сергій Петрович ; Дніпровський держ. аграр.-економ. ун-т. – Дніпро, 2021. – 98 с. – Режим доступу : <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/5850> (дата звернення: 01.11.2025).
19. Скрипник В. І. Розробка, виробництво, конструктивні особливості нової сільськогосподарської техніки : навчальний посібник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / В. І. Скрипник. – Київ : Літера ЛТД, 2019. – 256 с. URL: [https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/pidrucnyky-posibnyky-profsvita/Silgosptekhnika_blok-min%20\(1\).pdf](https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/pidrucnyky-posibnyky-profsvita/Silgosptekhnika_blok-min%20(1).pdf) (дата звернення: 01.11.2025).

20. Стебельський Н. М. Дослідження технологічних та експлуатаційних параметрів сівалки Horsch Maestro : магістерська робота. Львів, 2021. 83 с. URL: <https://repository.lnup.edu.ua/jspui/handle/123456789/185> (дата звернення: 01.11.2025).
21. Shah K. [et al.]. Design and Performance Evaluation of a Novel Variable Rate Multi-Crop Seed Metering Unit for Precision Agriculture // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 133152-133163. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3231136. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9994700> (дата звернення: 01.11.2025).
22. Xiong D. [et al.]. Design and Experimental Study of the General Mechanical Pneumatic Combined Seed Metering Device // Applied Sciences. 2021. 11(16):7223. DOI: 10.3390/app11167223.
23. Yaver Y., Akdemir B., Bingöl D. Effect of fan types on vacuum of pneumatic precision sowing machines // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2025. P. 1–17. DOI: 10.1080/15397734.2025.2559330.
24. Yazgi A., Degirmencioglu A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate // Measurement. 2014. Vol. 56. P. 128-135. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.06.026. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224114002875> (дата звернення: 01.11.2025).
25. Zhang S. [et al.]. Design and Experimentation of Mountain-type Pre-cutting Sugarcane Planter and Its Key Components Based on DEM // Sugar Tech. 2025. 27. P. 595–607. DOI: 10.1007/s12355-024-01484-z.
26. Zhu H. [et al.]. Design and Testing of Soybean Double-Row Seed-Metering Device with Double-Beveled Seed Guide Groove // Agriculture. 2024. 14(9):1595. DOI: 10.3390/agriculture14091595.
27. [Електронний ресурс, без автора/назви] Інструкція СТБТ-12/8М. URL: <https://www.scribd.com/document/646941370/%D0%9A%D0%95%D0%A0%D0%92%D0%9D%D0%98%D0%A6%D0%A2%D0%92%D0%9E> (дата звернення: 01.11.2025).

28. [Електронний ресурс, без автора/назви] URL: http://repository.lnau.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/2281/1/Karpinsky_m_ag.pdf.pdf (дата звернення: 01.11.2025).
29. Закон України "Про охорону праці" (із змінами). URL: https://luguniv.edu.ua/wp-content/uploads/2025/02/suop_lect1.pdf (дата звернення: 01.11.2025).
30. Чвартацький, І. Визначення показників економічної ефективності апарата точного висіву насіння. // Collection of scientific papers «SCIENTIA», (June 14, 2024; Lisbon, Portugal), 76-80.
- 31 Шевченко В. О. Розробка мехатронної системи контролю точності роботи висівних апаратів сівалки для просапних культур : магістер. кваліфікаційна робота : 208, Агроінженерія / Віталій Олександрович Шевченко ; наук. кер. Андрій Миколайович Пугач ; Дніпровський держ. аграр.-екон. ун-т. – Дніпро, 2022. – 88 с. – Режим доступу : <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7646> (дата звернення: 01.11.2025).
32. Шемшур В. Д. Удосконалення механізації вирощування буряків цукрових і конструкції сівалки : пояснювальна записка до дипломного проекту ОС «Бакалавр» : 208, Агроінженерія / Шемшур Владислав Денисович ; наук. керівник Кобець А. С. ; Дніпровський держ. аграр.-економ. ун-т. – Дніпро, 2024. – 71 с. – Режим доступу : <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10909> (дата звернення: 01.11.2025).

ДОДАТКИ