

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: «Моделювання процесу взаємодії долотоподібного сошника зі ґрунтом високої щільності»

Виконав: студент 4 курсу, групи 41-3-ім
освітньої програми бакалавра
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Андрій-Матвій ГОЛУБ
(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)

ГОЛУБУ Андрію-Матвію Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Моделювання процесу взаємодії долотоподібного сошника зі ґрунтом високої щільності»

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: Вітчизняні та зарубіжні джерела з землеробської механіки, наукові статті щодо біонічної оптимізації робочих органів, матеріали з DEM-моделювання руйнування ґрунту, довідкові дані про властивості переущільнених ґрунтів та технічна документація на сошники No-Till.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; сучасний стан та проблематика взаємодії посівних робочих органів із ґрунтами високої щільності; імітаційне моделювання методом дискретних елементів та оптимізація просторової геометрії долотоподібного сошника; охорона праці та реалізація концепції безпечного проектування (Safe-by-Design) в умовах високошвидкісної сівби; техніко-економічне та агротехнологічне обґрунтування ефективності впровадження модернізованого робочого органу; 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 1 жовтня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	01.12.2025 р.	
2.	Розділ 1. Сучасний стан та проблематика взаємодії посівних робочих органів із ґрунтами високої щільності	25.12.2025 р.	
3.	Розділ 2. Імітаційне моделювання методом дискретних елементів та оптимізація просторової геометрії долотоподібного сошника	02.02.2026 р.	
4.	Розділ 3. Охорона праці та реалізація концепції безпечного проєктування (Safe-by-Design) в умовах високошвидкісної сівби	01.04.2026 р.	
5.	Розділ 4. Техніко-економічне та агротехнологічне обґрунтування ефективності впровадження модернізованого робочого органу	01.05.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини роботи (підготовка креслень, графіків та візуалізацій моделювання в EDEM)	12.05.2026 р.	
7	Представлення роботи керівнику на перевірку та остаточне оформлення записки	15.05.2026р.	

Студент

(підпис)

Андрій-Матвій ГОЛУБ
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Іван ЛІСОВИЙ
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМАТИКА ВЗАЄМОДІЇ ПОСІВНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ІЗ ҐРУНТАМИ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ	6
1.1. Аналіз існуючих технологій та технічних засобів для прямої сівби у щільні ґрунти	6
1.2. Огляд конструкцій долотоподібних сошників та їх робочих органів	8
1.3. Проблеми взаємодії робочих органів із ґрунтом високої щільності та існуючі недоліки	10
1.4. Мета та задачі досліджень, які необхідно здійснити у другому розділі	12
Висновки до розділу	13
РОЗДІЛ 2 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОСТОРОВОЇ ГЕОМЕТРІЇ ДОЛОТОПОДІБНОГО СОШНИКА	14
2.1. Вибір методів моделювання та обґрунтування фізико-механічних властивостей щільного ґрунту	14
2.2. Створення 3D-моделі долотоподібного сошника	20
2.3. Моделювання процесу взаємодії сошника з ґрунтом: дослідження параметрів його роботи	26
Висновки до розділу	35
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ БЕЗПЕЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ (SAFE-BY-DESIGN) В УМОВАХ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ СІВБИ	37
3.1. Ідентифікація шкідливих та небезпечних факторів: від етапу комп'ютерного інжинірингу до польової експлуатації	37
3.2. Ергономічний та санітарно-гігієнічний ефект від впровадження оптимізованої конструкції сошника	39
3.3. Проактивний аналіз ризиків: Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій при експлуатації посівного комплексу	39
Висновки до розділу	41
РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ТА АГРОТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ	42
4.1. Техніко-технологічне обґрунтування запропонованої конструкції сошника	42
4.2. Розрахунок економічної ефективності від впровадження результатів моделювання	43
Висновки до розділу	45
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	48
ДОДАТКИ	52

ВСТУП

Впровадження ґрунтозахисних систем землеробства (No-Till, Mini-Till) є стратегічним напрямком розвитку сучасного агропромислового комплексу, орієнтованим на збереження вологи та запобігання деградації сільськогосподарських угідь [17]. Основною інженерно-технологічною перешкодою для ефективної реалізації технології прямої сівби є прогресуюче ущільнення верхніх шарів ґрунту та формування когезійної плужної підшви з екстремально високою механічною міцністю [23]. Експлуатація серійних прямих ґрунтообробних робочих органів у таких умовах ініціює експоненціальне зростання тягового опору, надмірне латеральне відкидання ґрунтового масиву та жорстко лімітує робочу швидкість машинно-тракторних агрегатів [16]. Зазначені фактори обґрунтовують необхідність розробки нових, просторово-оптимізованих конфігурацій долотоподібних сошників.

Проектування інноваційних робочих органів емпіричними методами є ресурсомістким та економічно неефективним процесом. Сучасним стандартом розв'язання задач ґрунтообробної механіки є застосування систем комп'ютерного інжинірингу (CAE) та імітаційного моделювання напружено-деформованого стану суцільних середовищ за методом дискретних елементів (DEM). Застосування цього математичного апарату дозволяє прецизійно прогнозувати силові реакції та кінематику крихкого руйнування ґрунту без проведення тривалих натурних випробувань [11, 30].

Об'єктом дослідження є технологічний процес взаємодії ґрунтообробного робочого органу (долотоподібного сошника) з переущільненим когезійним ґрунтовим середовищем під час виконання операції прямої сівби.

Предметом дослідження є геометричні та кінематичні параметри долотоподібного сошника (величина просторового вигину стійки, кути заточування різальних фасок, параметри біонічного мікрорельєфу) та закономірності їх впливу на енергетичні показники тягового опору і деформаційні характеристики насінневої борозни.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМАТИКА ВЗАЄМОДІЇ ПОСІВНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ІЗ ҐРУНТАМИ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ

1.1. Аналіз існуючих технологій та технічних засобів для прямої сівби у щільні ґрунти

Впровадження ґрунтозахисних технологій (Conservation Tillage) та систем нульового обробітку (No-Till) є перспективним і ефективним напрямком для захисту та раціонального використання сільськогосподарських угідь [17]. Однак сучасне землеробство стикається з серйозною проблемою ущільнення ґрунту, спричиненою багаторазовими проходками важкої техніки, що є одним із головних факторів його деградації [23]. Ущільнення суттєво збільшує механічну міцність ґрунту, що проявляється у підвищенні його об'ємної маси та опору проникненню, особливо у верхньому (0–30 см) шарі [24, 29]. Це вимагає застосування спеціалізованих технічних засобів, здатних якісно виконувати технологічний процес прямої сівби в умовах високої щільності та зв'язності (когезії) ґрунтового середовища [11].

Для здійснення прямої сівби в незораний ґрунт традиційно розглядають два основні типи сошників: дискові та анкерні (долотоподібні) [4, 8, 9]. Кожен з цих типів має свої конструктивні та технологічні особливості. Дискові сошники ефективно прорізають пожнивні залишки, проте в умовах переущільненого ґрунту часто не здатні забезпечити необхідну глибину проникнення без значного збільшення притискного зусилля машинно-тракторного агрегату [9].

З огляду на це, для одночасного внесення насіння та добрив у борозну за технологією No-Till доцільніше використовувати сошники з вузьким долотом (narrow point openers) [12]. Вузькі долотоподібні робочі органи краще заглиблюються у щільний ґрунт і здатні руйнувати ущільнені прошарки (плужну підшову), зменшуючи об'ємну масу ґрунту та сприяючи кращій інфільтрації води й розвитку кореневої системи рослин [25, 26].

Незважаючи на високу проникну здатність, робота традиційних прямих долотоподібних сошників у когезійних ґрунтах супроводжується низкою технологічних проблем:

Надмірне розкидання ґрунту (lateral soil throw): Прямі вузькі сошники спричиняють значне бічне відкидання ґрунту з борозни [11]. Це призводить до небажаного збільшення товщини ґрунтового покриву на сусідніх рядках, втрати ґрунтової вологи та стимуляції проростання насіння бур'янів [13].

Обмеження робочої швидкості: Через надмірне руйнування та розкидання ґрунту швидкість посівних робіт із застосуванням традиційних прямих сошників зазвичай обмежується показниками 8–9 км/год, що знижує загальну продуктивність машинно-тракторних агрегатів [12].

Високий енергетичний опір: Тяговий опір під час обробітку ущільненого ґрунту є надзвичайно високим, що спричиняє підвищені витрати пального та швидке зношування робочих органів [16, 28].

Розуміння базових взаємозв'язків між геометрією ґрунтообробного знаряддя та фізико-механічними властивостями ґрунту є критично важливим для оптимізації конструкцій [16]. З метою подолання вищезазначених недоліків та забезпечення можливості сівби на високих швидкостях (до 16 км/год) розробляються альтернативні геометричні форми сошників.

Дослідження підтверджують високу ефективність застосування долотоподібних сошників із вигнутою стійкою (bentleg openers) [12, 13]. Аналіз їхньої роботи, зокрема за допомогою методу дискретних елементів (DEM), доводить, що такі сошники розпушують ґрунт до дна борозни, але спричиняють значно менше бічне відкидання ґрунту порівняно з прямими аналогами [11, 13]. Вони формують розпушений гребінь посередині борозни, що сприяє значно кращому зворотному загортанню насіння [25].

Крім того, зміна профілю поперечного перерізу різальної кромки сошника безпосередньо впливає на показники тягового опору. Застосування напрямних фасок на різальній кромці дозволяє значно знизити тягове та вертикальне зусилля проникнення [28]. Оптимізація форми (зменшення товщини долота, плавний

перехід від долота до стійки) мінімізує зону руйнування ґрунту, що робить такі робочі органи ефективними для високошвидкісної сівби на глибину до 120 мм [16].

Отже, аналіз існуючих засобів показує, що подальше вдосконалення долотоподібних сошників для роботи у ґрунтах високої щільності має базуватися на просторовій зміні їх геометричних параметрів (форми стійки, кутів атаки, профілю різальної кромки) для зменшення тягового опору та збереження структури ґрунту в зоні рядка [15, 28].

1.2. Огляд конструкцій долотоподібних сошників та їх робочих органів

Долотоподібні (анкерні) сошники є одним із найпоширеніших типів робочих органів для прямої сівби та технологій мінімальної обробки ґрунту [8, 17]. Їх головне завдання полягає у розкритті посівної борозни на задану глибину, прорізання або відгортання пожнивних залишків, формуванні ущільненого насіннєвого ложа та забезпеченні мінімального порушення структури ґрунту навколо рядка [9].

Аналіз ринку сучасної посівної техніки показує, що провідні світові та вітчизняні виробники постійно вдосконалюють конструкцію вузьких долотоподібних сошників для роботи у важких умовах [2]. Більшість сучасних сошників (наприклад, вітчизняні розробки заводу «Ремсинтез» або агрегати HORSCH) оснащуються паралелограмною підвіскою з опорно-прикочувальними колесами [1, 27]. Це дозволяє точно копіювати рельєф поля, при цьому опорне колесо розташовується максимально близько до зони падіння насіння, що гарантує стабільну глибину навіть на нерівних ділянках [14].

Для запобігання передчасному осипанню сухого або надмірно пухкого ґрунту на дно борозни до моменту падіння насінини конструкції часто доповнюють спеціальними бічними пластинами [10]. Завдяки цьому насіння лягає чітко на тверде вологе ложе, після чого може додатково притискатися ущільнювачем [8]. Робота у щільних або кам'янистих ґрунтах вимагає надійного

захисту стійки від поломок. Наприклад, сошники сівалок AMAZONE оснащуються запобіжним механізмом, який у разі наїзду на перешкоду або критичного ущільнення дозволяє стійці зігнутися, підняти сошник, а потім миттєво повернути його в робоче положення без зупинки агрегату [5, 7].

Ключовим елементом, що безпосередньо взаємодіє зі щільним ґрунтом, є наральник (долото) [6]. Класичні прямі долота мають ширину 12–18 мм і кут входження від 45° до 90° [16]. Зменшення кута атаки до 45° зменшує тяговий опір, але може призводити до надмірного винесення вологих шарів ґрунту на поверхню, тоді як кути близькі до 90° працюють як розпушувачі, але схильні до утворення ефекту змазування стінок борозни у вологих когезійних ґрунтах [16].

Для вирішення цих суперечностей розроблено інноваційні форми робочих органів, зокрема вигнуті сошники [12, 13]. Концепція полягає у тому, що нижня робоча частина зміщена вбік від вертикальної осі стійки, що дозволяє розпушувати ґрунт без викидання його на поверхню [25]. Такі сошники забезпечують практично повне повернення ґрунту в борозну, мінімізують перемішування шарів, а завдяки оснащенню спеціальними фасками додатково знижують зусилля різання [11]. Це дозволяє збільшити робочу швидкість сівалки до 12–16 км/год без погіршення якості сівби [12].

Окремим перспективним напрямком зниження тягового опору у переущільнених ґрунтах є використання принципів біоніки [26]. Створення 3D-моделей ґрунтообробних органів, що копіюють геометричні контури лап ґрунторийних тварин або структуру поверхні ґрунтової фауни, дозволяє суттєво зменшити площу контакту металу з ґрунтом [19, 21]. Застосування таких макро- та мікрорельєфів на поверхні долота забезпечує зниження коефіцієнта тертя, зменшення адгезії та тягового опору на 10–16% при одночасному збільшенні ширини зони розпушення плужної підшви [20, 30].

Огляд існуючих конструкцій свідчить, що класичні долотоподібні сошники забезпечують задовільну якість сівби, однак їхні геометричні параметри не завжди є оптимальними для роботи в умовах високої щільності ґрунту на великих швидкостях [28]. Впровадження просторово-складних форм відкриває значні

перспективи для економії енерговитрат, що підтверджує необхідність подальшого поглибленого вивчення процесу взаємодії таких сошників із ґрунтовим середовищем методами комп'ютерного моделювання [11, 30].

1.3. Проблеми взаємодії робочих органів із ґрунтом високої щільності та існуючі недоліки

Експлуатація посівних машинно-тракторних агрегатів за енергоощадними технологіями (No-Till, Mini-Till) висуває жорсткі вимоги до міцнісних та кінематичних характеристик робочих органів. Сівба у незораний масив супроводжується специфічними проблемами, детермінованими фізико-механічним станом ущільненого середовища. Багаторічний рух важкої техніки спричиняє акумуляцію так званого «транспортного ущільнення» (traffic-induced compaction) [23]. Цей деградаційний процес найінтенсивніше проявляється у верхньому горизонті (0–30 см) і характеризується експоненціальним зростанням об'ємної маси та пенетраційного опору ґрунту, який у середньо- та важкосуглинкових масивах може перевищувати базові показники нещільно складених ґрунтів на 41–99% [24].

За таких умов експлуатації класичний долотоподібний сошник стикається з трьома критичними недоліками: надмірним тяговим опором, інтенсивним абразивним зношуванням та нестабільністю кінематики заглиблення.

Високий тяговий опір та енергоємність робочого процесу Під час трансляційного руху сошника у когезійному середовищі (наприклад, типу Vertosol) перед його лобовою поверхнею генерується статична зона напружень — «ядро ущільнення». Деструкція масиву відбувається переважно через механізм макроскопічного зсуву та сколювання великих ґрунтових конгломератів, що потребує значних витрат механічної енергії. Інтенсифікація робочої швидкості до 12–16 км/год пропорційно збільшує кінетичну енергію, що передається ґрунту, зумовлюючи: експоненціальне зростання горизонтальної складової тягового зусилля (draft force) на гаку енергозасобу; критичне збільшення вертикальної

складової реакції ґрунту (vertical penetration force), вектор якої спрямований на вимілення робочого органу [16].

Крім того, у перезволожених глинистих середовищах вагому частку сумарного опору становить енергія подолання сил зовнішнього тертя та макроскопічної адгезії (налипання) ґрунту на металеві елементи стійки [20, 22].

Інтенсивне абразивне зношування Переуцільнений ґрунтовий масив виступає як високоабразивне середовище. Концентрація максимальних питомих тисків у зоні контакту різальної кромки (носка) з ґрунтом ініціює швидке стирання конструкційного матеріалу. Втрата проєктної геометрії (затуплення) призводить до неконтрольованого збільшення площі фронтального контакту, що миттєво мультиплікує тяговий опір та погіршує здатність до заглиблення. Часта заміна зношених елементів генерує експлуатаційні простой та фінансові втрати, а застосування технологій зміцнення (наплавлення карбідом вольфраму) суттєво підвищує собівартість виготовлення [12].

Нестабільність проникнення та погіршення архітектоніки насінневого ложа Високий пенетраційний опір середовища генерує потужну виштовхувальну силу. За умови недостатньої маси посівної секції або дефіциту жорсткості притискних пружинних блоків, сошник втрачає стабільність ходу, що унеможливорює дотримання рівномірної глибини локалізації насінневого матеріалу [9].

Кінематика взаємодії традиційної прямої стійки з когезійним масивом має також критичні агротехнічні наслідки:

Замазування стінок борозни (Smearing): в умовах підвищеної вологості плоскі бічні поверхні сошника ущільнюють стінки борозни, руйнуючи капілярну мережу, що блокує розвиток кореневої системи [16].

Формування макроагрегатів (Clod formation): лобове руйнування щільного масиву супроводжується утворенням великих ґрунтових грудок, які інерційно викидаються на поверхню поля (lateral soil throw). Це залишає насінневу борозну відкритою, блокує процес гравітаційного зворотного засипання (backfill) та провокує критичну втрату ґрунтової вологи [13, 25].

Системний аналіз недоліків доводить, що для забезпечення ефективного функціонування долотоподібних сошників у ґрунтах високої щільності екстенсивний шлях (збільшення міцності або маси агрегату) є технологічно безперспективним. Кардинальне зниження тягового опору, мінімізація адгезійного налипання та стабілізація кінематики заглиблення досяжні виключно шляхом просторової оптимізації геометрії знаряддя (імплементация вигнутих стійок, напрямних фасок, біонічних макрорельєфів). Реалізація такого підходу потребує прецизійного дослідження напружено-деформованого стану ґрунтового масиву методами комп'ютерного імітаційного моделювання [11, 28].

1.4. Мета та задачі досліджень, які необхідно здійснити у другому розділі

Метою дипломного проєкту є зниження енергоємності процесу прямої сівби та мінімізація деформації поверхневого шару переущільненого ґрунту шляхом оптимізації просторової геометрії долотоподібного сошника з використанням методів комп'ютерного інжинірингу [11].

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні інженерно-технічні задачі:

Формалізувати фізико-механічну модель когезійного ґрунтового середовища в системі дискретних елементів (DEM), визначивши контактні параметри мікрочастинок (модуль зсуву, коефіцієнти реституції, статичного та опору кочення) для адекватної імітації властивостей плужної підшви [13].

Синтезувати тривимірні CAD-моделі базового та модифікованого (з вигнутою стійкою та просторово орієнтованими фасками) робочих органів посівного комплексу [12].

Здійснити імітаційне моделювання кінематики взаємодії розроблених профілів із віртуальним ґрунтовим масивом при варіації швидкісних режимів від 8 до 16 км/год та глибини ходу від 60 до 120 мм [11].

Кількісно оцінити динаміку зміни тягового зусилля, вертикальної реакції ґрунту та масову частку екскавованого на поверхню матеріалу залежно від геометричних параметрів наральника [25].

Встановити раціональні конструктивні параметри сошника за критеріями мінімуму силового опору та максимального збереження архітекtonіки стінок насінневої борозни [30].

Висновки до розділу 1

Деградаційні зміни у структурі сільськогосподарських угідь у вигляді ущільнення нівелюють ефективність застосування традиційних дискових сошників через їхню недостатню проникну здатність та необхідність генерації надлишкового притискного зусилля [29].

Експлуатація серійних прямих анкерних знарядь у когезійних середовищах ініціює критичне винесення нижніх вологих шарів на поверхню (*lateral soil throw*), що жорстко лімітує кінематичні режими роботи агрегатів та експоненціально збільшує витрати енергоносіїв [16].

Аналіз передових світових практик конструювання доводить технологічну перевагу застосування просторово-складних форм робочих органів (зокрема вигнутих стійок *bentleg* та біонічних мікрорельєфів), які здатні локалізувати руйнування ґрунту виключно в межах посівного ложа [21, 26].

Апаратним стандартом для прецизійного прогнозування напружено-деформованого стану ґрунту на етапі проєктування є імітаційне моделювання методом дискретних елементів (DEM), застосування якого є безальтернативним інструментом для заміни ресурсомістких польових випробувань [30].

РОЗДІЛ 2 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОСТОРОВОЇ ГЕОМЕТРІЇ ДОЛОТОПОДІБНОГО СОШНИКА

Для перевірки робочих гіпотез, сформованих за результатами аналізу стану питання, та оптимізації геометричних параметрів робочих органів у даному розділі буде застосовано методи комп'ютерного інжинірингу (CAE). Імітаційне моделювання дозволяє високоточно оцінити силові навантаження та деформаційні параметри ґрунтового середовища на стадії проєктування, виключаючи необхідність проведення дорогих та тривалих польових випробувань [11].

2.1. Вибір методів моделювання та обґрунтування фізико-механічних властивостей щільного ґрунту

2.1.1. Обґрунтування застосування методу дискретних елементів (DEM)

Процес взаємодії ґрунтообробного робочого органу зі щільним ґрунтом є складним фізико-механічним явищем, що супроводжується великими пластичними деформаціями, крихким руйнуванням ущільнених прошарків (плужної підшви), зсувом, перемішуванням та відкиданням ґрунтових частинок [16]. Тому вибір адекватного методу математичного та комп'ютерного моделювання є критично важливим для отримання достовірних результатів [28].

Для розрахунку напружено-деформованого стану суцільних середовищ традиційно використовується метод скінченних елементів (Finite Element Method — FEM). Хоча цей метод є доцільним для розрахунку на міцність металевих конструкцій сошника, він має суттєві обмеження при моделюванні ґрунту [30]. Під час імітації процесів різання континуальна сітка FEM зазнає надмірних деформацій, що вимагає застосування ресурсомістких алгоритмів пересіткування (remeshing) і часто призводить до зупинки розв'язувача [11]. Крім того, FEM не

здатний адекватно описати процеси сепарації ґрунту, його сипучість, утворення макротріщин та руйнування на окремі фракції [13].

З огляду на ці обмеження, найбільш ефективним інструментом для імітаційного моделювання процесів ґрунтообробки є метод дискретних елементів (Discrete Element Method — DEM) [11, 30]. Основна відмінність DEM полягає в дискретизації ґрунтового середовища на сукупність окремих мікрочастинок, які взаємодіють між собою та з робочим органом за визначеними законами механіки контактів [13].

Математичний апарат методу базується на інтегруванні рівнянь руху для кожного окремого дискретного елемента. Рух кожної ґрунтової частинки в середовищі DEM описується другим законом Ньютона з урахуванням поступального та обертального руху [11]:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij}^c + m_i g \quad (2.1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j M_{ij} \quad (2.2)$$

де m_i — маса дискретної частинки; v_i — вектор швидкості поступального руху; F_{ij}^c — контактна сила взаємодії між частинками i та j ; g — прискорення вільного падіння; I_i — момент інерції частинки; ω_i — вектор кутової швидкості обертання; M_{ij} — момент сил, що виникає при контактному зчепленні.

Використання спеціалізованого програмного забезпечення на базі DEM (зокрема, комплексу Altair EDEM) забезпечує вирішення наступних технологічних задач:

Точне відтворення макроповедінки ґрунту: алгоритми DEM дозволяють імітувати утворення посівної борозни, об'єм бічного відкидання ґрунту (lateral soil throw) та відсоток зворотного засипання насіння (furrow backfill), що неможливо реалізувати в континуальних моделях [25].

Моделювання когезійних середовищ: інтеграція вдосконалених контактних моделей дозволяє імітувати поведінку переущільнених ґрунтів, враховуючи сили внутрішнього зчеплення та зовнішньої адгезії між ґрунтовим масивом і металевим долотом [20, 22].

Розрахунок динамічних енергетичних показників: середовище EDEM дозволяє безперервно фіксувати динаміку зміни горизонтального тягового та вертикального зусиль, що діють на сошник при варіюванні кінематичних режимів [12, 16].

Аналіз руйнування плужної підшви: інструментарій DEM дозволяє генерувати стратифікований ґрунтовий канал із заданим градієнтом щільності для детального дослідження площі поперечного перерізу розпушеної зони [26].

Таким чином, з метою комплексного дослідження силових навантажень на посівний агрегат та деформаційних параметрів якості крихкого руйнування ґрунтового масиву, застосування методу дискретних елементів є найбільш раціональним підходом для виконання завдань розрахункової частини проєкту [11].

2.1.2. Вибір контактної моделі взаємодії

Точність результатів імітаційного моделювання за методом дискретних елементів детермінується релевантністю обраної математичної моделі контактної взаємодії як між окремими частинками ґрунту, так і між ґрунтовим масивом та сталевою поверхнею робочого органу [13]. Базові пружні контактні моделі (зокрема, класична модель Герца-Міндліна) орієнтовані на симуляцію ідеально сипучих матеріалів, оскільки передбачають повне відновлення форми мікроелементів після зняття зовнішнього навантаження [11]. Натомість реальне ґрунтове середовище високої щільності характеризується вираженою пружно-пластичною поведінкою та наявністю макроскопічної зв'язності (когезії), що потребує інтеграції спеціалізованих розрахункових алгоритмів [30].

Для адекватного відтворення фізико-механічних властивостей переущільненого ґрунту застосовано комбіновану контактну модель, що поєднує

пружно-пластичну модель гістерезисної пружини (Hysteretic Spring Contact Model) та лінійну модель когезії (Linear Cohesion Model) [13].

Модель гістерезисної пружини базується на теорії пружно-пластичного контакту Уолтона-Брауна і призначена для імітації матеріалів, які зазнають незворотних залишкових деформацій [25]. Розрахунок нормальної контактної сили здійснюється з урахуванням диференційованих коефіцієнтів жорсткості: під час зближення (стиснення) діє початкова жорсткість, а після перевищення межі текучості та початку пластичної деформації при розвантаженні застосовується вищий коефіцієнт жорсткості [11]. Різниця між роботою стиснення та відновлення (гістерезис) еквівалентна енергії пластичної деформації ґрунту або його крихкого руйнування. Завдяки цій моделі віртуальний ґрунт поглинає кінетичну енергію агрегату, формуючи реалістичний вектор тягового опору без ефекту абсолютно пружного відскоку частинок [16].

Для імітації здатності щільного ґрунту чинити опір розриву та утворювати структурні агрегати застосовується лінійна модель когезії. Цей математичний апарат генерує нормальну силу притягання між контактуючими дискретними елементами, яка діє навіть під час їх віддалення [30]. Сила когезії обчислюється за залежністю:

$$F_c = k_c A \quad (2.3)$$

де F_c — нормальна сила когезійного притягання, Н; k_c — щільність енергії когезії (когезійна міцність матеріалу), Па; A — площа плями контакту між взаємодіючими частинками, м².

Дискретні елементи залишаються у зв'язаному (монолітному) стані до моменту, поки зовнішнє зусилля від різальної кромки сошника не перевищить параметр F_c [13]. Цей механізм високоточно моделює руйнування ущільненої плужної підшви, де сошник долає внутрішнє зчеплення масиву, що супроводжується інтенсивним зростанням енергоємності процесу [28]. Крім того, інтеграція когезійних параметрів у контактну пару "ґрунт-сталь" дозволяє

імітувати процеси адгезії та налипання ґрунтового середовища на стійку сошника [20, 22].

Комплексне застосування пружно-пластичної та лінійної когезійної моделей забезпечує фізично коректну реакцію віртуального ґрунтового каналу на кінематичний вплив долотоподібного сошника. Це гарантує формування стабільної геометрії відкритої борозни, адекватне крихке руйнування структурних елементів та високу достовірність визначення тягового зусилля [11, 25].

2.1.3. Фізико-механічні параметри ґрунту

Для забезпечення адекватності математичних моделей пружно-пластичного контакту та лінійної когезії у середовищі імітаційного моделювання необхідно прецизійно задати базові фізичні властивості матеріалів та параметри їх контактної взаємодії [13]. Оскільки об'єктом дослідження є ґрунт високої щільності (переуцільнений суглинок), параметри мікромоделі повинні точно відображати його значну об'ємну масу, яскраво виражену когезію та високий опір зсувним деформаціям [24].

У симуляційному процесі беруть участь два основні матеріали: сталь, з якої виготовлено долотоподібний сошник, та ґрунт, представлений сукупністю сферичних дискретних елементів. З метою оптимізації машинного часу розрахунку без втрати достовірності макроскопічної поведінки середовища, радіус віртуальних ґрунтових частинок r прийнято рівним 5 мм [11]. Зменшення цього параметра призводить до експоненціального зростання кількості елементів і надмірного навантаження на обчислювальні потужності, тоді як збільшення нівелює точність відтворення геометричного профілю насінневої борозни. Об'ємна маса (щільність) ρ віртуального ґрунту становить 1650 кг/м³, що відповідає показникам критично ущільненої плужної підшви [29].

Базові внутрішні властивості матеріалів, імплементовані в розрахунковий комплекс, наведено у Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Внутрішні властивості матеріалів (Material Properties)

Параметр	Одиниця виміру	Ґрунт	Сталь (сошник)
Коефіцієнт Пуассона (Poisson's ratio)	-	0,35	0,30
Модуль зсуву (Shear modulus)	Па	$1 \cdot 10^7$	$7,9 \cdot 10^{10}$
Щільність (Density)	кг/м ³	1650	7850
Радіус частинок (Particle radius)	мм	5	-

Методологія DEM передбачає розрахунок двох типів контактної взаємодії: внутрішньої "ґрунт – ґрунт" (Soil-Soil) та зовнішньої "ґрунт – сталь" (Soil-Steel) [30]. Відповідні кінематичні та динамічні характеристики контакту визначаються наступними коефіцієнтами:

Коефіцієнт відновлення (Coefficient of restitution) e : характеризує пружність співударів. Для когезійного ґрунтового масиву цей показник є низьким, оскільки середовище поглинає кінетичну енергію шляхом пластичних деформацій [25].

Коефіцієнт статичного тертя (Coefficient of static friction) μ_s : визначає опір тангенціальному зсуву частинок. Високе значення для пари "ґрунт – сталь" імітує екстремальні умови тертя сошника в переущільненому середовищі [28].

Коефіцієнт тертя кочення (Coefficient of rolling friction) μ_r : обмежує вільне обертання ідеально сферичних елементів, компенсуючи їх відмінність від реальної несферичної (агрегованої) форми ґрунтових часток [11].

Щільність енергії когезії (Cohesion Energy Density) k_c : базовий параметр лінійної моделі когезії, що регламентує силу внутрішнього зчеплення дискретних елементів та зовнішню адгезію. Для переущільненого суглинку величина k_c становить 45000 Дж/м³ [13].

Кількісні значення параметрів контактної взаємодії для налаштування віртуального середовища наведено у Таблиці 2.2.

Обґрунтовані фізико-механічні параметри та налаштовані моделі контактної взаємодії формують достовірну математичну базу для проведення комп'ютерних досліджень напружено-деформованого стану ґрунту під час процесу прямої сівби.

Таблиця 2.2 – Параметри контактної взаємодії (Contact Parameters)

Параметр	Ґрунт – Ґрунт	Ґрунт – Сталь
Коефіцієнт відновлення (Restitution)	0,30	0,35
Коефіцієнт статичного тертя (Static friction)	0,65	0,55
Коефіцієнт тертя кочення (Rolling friction)	0,15	0,10
Щільність енергії когезії (Cohesion Energy Density), Дж/м ³	45000	15000

Обґрунтовані фізико-механічні параметри та налаштовані моделі контактної взаємодії формують достовірну математичну базу для проведення комп'ютерних досліджень напружено-деформованого стану ґрунту під час процесу прямої сівби.

2.2. Створення 3D-моделі долотоподібного сошника

2.2.1. Обґрунтування геометричних параметрів досліджуваних сошників

Для проведення порівняльного аналізу та пошуку інженерних рішень щодо зниження енергоємності процесу прямої сівби синтезовано дві принципово різні просторові конфігурації робочих органів. За основу геометричних параметрів прийнято існуючі комерційні зразки та перспективні наукові розробки в галузі систем ґрунтозахисного землеробства.

Конфігурація базового прямого сошника

Базова CAD-модель імітує архітектуру широко розповсюдженого вузького долотоподібного знаряддя (*narrow point opener*), що є конструктивним аналогом робочих органів сучасних посівних комплексів (зокрема, агрегатів виробництва «Ремсинтез» та серії Primera DMC від AMAZONE) [1, 5, 7].

Вихідні геометричні характеристики базової моделі:

Стійка: вертикальна, прямокутного поперечного перерізу.

Наральник (долото): симетричний, із конструктивною шириною захвату B , що становить 16 мм.

Кут входження (rake angle) α : становить 90° (режим ортогонального різання). Такий кут гарантує інтенсивне розпушування переущільненого середовища, проте зумовлює формування статичного «ядра ущільнення» перед лобовою поверхнею. Це генерує надмірний тяговий опір та ініціює критичне винесення вологих шарів ґрунту на денну поверхню [16].

Профіль різальної кромки: тупий (blunt), без інтеграції напрямних фасок.

Конфігурація оптимізованого сошника (Bentleg opener)

Як удосконалену альтернативу розроблено модель сошника із просторово-складною геометрією — вигнутою стійкою (bentleg). Вибір такої топології базується на результатах досліджень кінематики високошвидкісної сівби, які доводять високу енергетичну ефективність зміщених робочих органів [11, 13].

Ключові конструктивні відмінності оптимізованої моделі:

Поперечне зміщення (offset): робоча частина (долото) зміщена відносно вертикальної осі кріплення на відстань L_o , що дорівнює 95 мм. Дане рішення дозволяє вертикальній частині стійки проходити крізь ґрунтовий масив поза зоною максимальної деформації насінневої борозни [25].

Кут вигину стійки β : варіюється в діапазоні 45° – 65° . Зазначена геометрія трансформує механізм руйнування ґрунтового пласта: вектор лобового стиснення перетворюється на зсувні деформації (підрізання масиву знизу вгору), що потребує значно менших витрат енергії для подолання когезійних зв'язків [12].

Фаски різальної кромки (chamfered edges): оптимізований наральник оснащено двосторонніми фасками з кутом заточування γ , що становить 45° . Це забезпечує локальне розрізання ґрунтового середовища замість його макроскопічного лобового розриву [28].

Біонічний профіль долота: з метою мінімізації сил зовнішнього тертя та адгезії на лобовій поверхні долота імплементовано мікрорельєф, що копіює морфологію ґрунторийних біологічних видів. Це зменшує фактичну площу контакту металу з ґрунтом та полегшує кінематику сходження пласта [21, 30].

Розроблені просторові моделі є репрезентативним базисом для проведення DEM-симуляції. Порівняльний аналіз їх взаємодії зі щільним середовищем дозволить кількісно оцінити вплив кута входження α та поперечного зміщення L_0 на величину енергоємності (тягового зусилля), об'єм небажаного викидання ґрунту (lateral soil throw) та перевірити гіпотезу щодо можливості збільшення робочої швидкості агрегату до 16 км/год зі зниженням питомих енерговитрат.

2.2.2. Побудова твердотільних CAD-моделей

Для проведення імітаційних віртуальних випробувань у середовищі дискретних елементів необхідно синтезувати прецизійні тривимірні геометричні примітиви робочих органів. Побудова твердотільних макромоделей базового та оптимізованого сошників реалізована в системі автоматизованого проєктування (САПР). Алгоритм геометричного моделювання базувався на генерації параметричних ескізів із подальшим застосуванням операцій просторового витягування, кінематичної побудови за профілями та синтезу поверхонь складної топології [11, 13].

Методика синтезу базового сошника. Модель базового робочого органу характеризується спрощеною ортогональною геометрією, що слугує еталоном для компаративного аналізу мас-інерційних та силових показників. Процес побудови включав наступні етапи:

Створення стійки: На базовій площині Front Plane згенеровано прямокутний ескіз із габаритами поперечного перерізу 20x40 мм. Шляхом застосування операції екструзії (Extruded Boss/Base) сформовано вертикальне тіло стійки, висота якого становить $H = 450$ мм.

де H — габаритна висота вертикальної частини стійки, мм.

Моделювання наральника (долота): На нижній торцевій грані стійки сформовано робочу частину з шириною захвату $B = 16$ мм. Кут входження в ґрунт задано орієнтацією лобової площини відносно вектора швидкості руху агрегату і становить $\alpha = 90^\circ$ [16].

де B — конструктивна ширина долота, мм; α — кут входження сошника в ґрунт (rake angle), град.

Топологічна обробка країв: Для імітації макрогеометрії натурального зносостійкого носка застосовано інструмент скруглення (Fillet) з радіусом $r_f = 2$ мм на різальній кромці.

де r_f — мінімальний радіус скруглення різальної кромки, мм.

Методика побудови оптимізованого сошника (Bentleg). Синтез вигнутого робочого органу потребував інтеграції комплексних інструментів поверхневого моделювання з огляду на наявність просторового вигину та напрямних фасок змінного перерізу [12, 28].

Траєкторія вигину: За допомогою сплайнових функцій та комбінації дуг у тривимірному ескізі (3D Sketch) формалізовано осьову напрямну стійки. Радіус кривизни у транзитній зоні між вертикальною та зміщеною частинами прийнято на рівні $R = 80$ мм. Така величина мінімізує концентрацію локальних напружень у металі та забезпечує ламінарне обтікання конструкції ґрунтовим масивом [25].

де R — радіус кривизни переходу стійки, мм.

Кінематичне зміщення (Offset): У конструкцію імплементовано бічне зміщення робочої зони на відстань $L_o = 95$ мм відносно центральної площини кріплення. Геометрію реалізовано операцією зсуву профілю по заданій траєкторії (Swept Boss/Base).

де L_o — величина бічного зміщення долота, мм.

Кути заточування: Критичною конструктивною особливістю є формування скошених різальних кромок. Із застосуванням інструмента фаски (Chamfer) та операцій відсікання поверхонь синтезовано загострення бічних граней під кутом $\gamma = 45^\circ$. Це переводить процес крихкого руйнування ґрунту в площину косого різання [28].

де γ — кут заточування бічних граней долота, град.

Біонічна поверхня: На лобовій грані наральника методом топологічного вирізу по траєкторії сформовано хвилеподібний макрорельєф. Глибина біонічних западин становить $h_b = 2,5$ мм, що імітує морфологію ґрунтової фауни для інтенсифікації сходження ґрунтового пласта та зниження адгезійного налипання [21, 30].

де h_b — максимальна глибина біонічного рельєфу, мм.

Призначення матеріалу та мас-інерційні характеристики. На фінальному етапі твердотілого моделювання CAD-об'єктам призначено фізико-механічні властивості конструкційної ресорно-пружинної сталі 65Г, яка є індустріальним стандартом для виробництва ґрунтообробних знарядь завдяки високим показникам пружності. Інтегрований модуль САПР автоматично згенерував матрицю мас-інерційних характеристик та координати центру мас. Ці параметри є обов'язковою вихідною передумовою для ініціалізації розрахунків кінематики та динамічної взаємодії в середовищі дискретних елементів EDEM

2.2.3. Імпорт моделей у розрахунковий комплекс та налаштування параметрів

Трансфер розроблених твердотілих макромоделей із середовища CAD до препроцесора модуля імітаційного моделювання Altair EDEM здійснюється з використанням універсального формату обміну даними STEP. Це забезпечує коректну передачу складної просторової топології поверхонь (зокрема, біонічного мікрорельєфу) без втрати геометричної інформації [30]. Під час імпорту кожна геометрична конфігурація ідентифікується розв'язувачем як абсолютно жорсткий незруйновний кінематичний об'єкт (Geometry). У віртуальному просторі препроцесора здійснюється прецизійне позиціонування сошника відносно раніше сформованого масиву Soil Bin із заданням початкової координати занурення на цільову розрахункову глибину [11].

Наступним етапом є ініціалізація фізико-механічних властивостей об'єктів. Відповідно до обґрунтувань та числових значень, наведених у підрозділі 2.1.3, твердотілим геометриям присвоюється віртуальний матеріал конструкційної сталі. Синхронізація імпортованої моделі з попередньо налаштованою контактною моделлю взаємодії «Ґрунт – Сталь» (Soil-Steel) автоматично активує задані трибологічні та когезійні параметри. Це алгоритмічно уможливорює імітацію процесів адгезійного налипання ґрунту на стійку сошника та обчислення енергії зовнішнього тертя [13, 20].

Оскільки математичний апарат методу дискретних елементів базується на інтегруванні контактних зусиль між сферичними мікроелементами та робочою поверхнею, остання підлягає обов'язковій дискретизації. Програмний комплекс автоматично генерує поверхневу трикутну сітку (Surface Mesh). Для забезпечення стабільності розв'язку та мінімізації цифрового шуму під час обчислення сил реакції (особливо в зонах зі складною кривизною), максимальний розмір елемента сітки лімітується наступною умовою [11]:

$$l_m \leq r \quad (2.5)$$

де l_m — максимальний лінійний розмір трикутного полігонального елемента поверхневої сітки геометрії сошника, мм; r — радіус сферичної частинки віртуального ґрунтового масиву, мм.

Дотримання умови (2.5) гарантує, що контактні сили обчислюватимуться безперервно, без виникнення штучних осциляцій, які ініціюються проходженням дрібних частинок через надмірно великі грані полігонів сітки.

На фінальній стадії препроцесингу у модулі кінематики (Kinematics) робочому органу призначається алгоритм прямолінійного поступального руху (Linear Translation). Вектор трансляційної швидкості v_s спрямовується колінеарно поздовжній осі ґрунтового каналу.

де v_s — вектор лінійної швидкості поступального руху долотоподібного сошника у віртуальному каналі, м/с.

Абсолютне значення швидкості v_s є керованим фактором і варіюється відповідно до матриці планування експерименту. Це забезпечує можливість кількісної оцінки впливу різних швидкісних режимів на динаміку формування тягового опору та деформаційних показників борозни [12, 16]. Завершення ініціалізації цих параметрів свідчить про повну готовність розрахункових моделей до проведення ітерацій віртуального експерименту.

2.3. Моделювання процесу взаємодії сошника з ґрунтом: дослідження параметрів його роботи

2.3.1. Формування віртуального ґрунтового каналу (Soil Bin)

Успішна інтеграція просторових CAD-моделей (розглянуто у підрозділі 2.2.3) та ініціалізація фізико-механічних властивостей мікроелементів (підрозділ 2.1.3) вимагають створення адекватного віртуального середовища — стабілізованого масиву ґрунту високої щільності, що топологічно відповідає натурним умовам [11].

Просторові параметри розрахункового домену. Для розміщення дискретного середовища синтезується прямокутний віртуальний контейнер. З метою максимального нівелювання крайових ефектів (відбиття хвиль напружень) та одночасної оптимізації обчислювального часу процесора, габарити каналу прийнято наступними:

Довжина (2000 мм): гарантує достатню кінематичну дистанцію для завершення перехідних процесів врізання сошника та переходу системи у стаціонарний режим для точної реєстрації усередненого тягового опору [13].

Ширина (600 мм): кратно перевищує зону латерального поширення деформацій борозни, повністю ізолюючи робочий процес від інтерференції з бічними жорсткими стінками.

Глибина (300 мм): забезпечує наявність недеформованого «цілика» під долотом при його роботі на максимальних заданих глибинах (до 120 мм), алгоритмічно виключаючи некоректну взаємодію знаряддя з абсолютно жорстким дном моделі [25].

Генерація та примусове ущільнення масиву. Емісія ґрунтових мікроелементів у розрахункову сцену реалізується інструментом Particle Factory. З початкового моменту часу $t = 0$ с сферичні частинки осідають у контейнер під дією вектора гравітаційного прискорення $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Оскільки вільне гравітаційне осипання формує масив із надмірною структурною пористістю та низькою несучою здатністю, алгоритм підготовки

середовища доповнено двома обов'язковими стадіями термодинамічної стабілізації:

Компресійна фаза: Для досягнення цільової об'ємної маси плужної підшви (обґрунтованої у Таблиці 2.1) застосовується віртуальна прес-плита. Її поступальне вертикальне переміщення створює тиск стиснення, який є ключовим тригером для активації контактної моделі (Linear Cohesion Model). Відповідно до математичного апарату, описаного у підрозділі 2.1.2, макроскопічні когезійні зв'язки генеруються виключно за умови щільного фізичного контакту частинок під навантаженням [28].

Фаза релаксації: Після досягнення заданого ступеня ущільнення прес-плита миттєво видаляється з розрахункового алгоритму. Система переходить у стан вільної усадки, під час якого відбувається дисипація внутрішніх напружень та часткове відновлення об'ємних пружних деформацій [30].

Критерієм абсолютної готовності віртуального ґрунтового каналу до взаємодії із сошником є зниження сумарної кінетичної енергії системи до значень макроскопічного нуля ($E_k \rightarrow 0$). Лише за умови повної зупинки мікроелементів ініціюється трансляційний рух робочого органу, що прецизійно ізолює тензометричні показники тягового зусилля від впливу залишкових інерційних артефактів етапу генерації [11].

2.3.2. Матриця планування експерименту. Задання граничних умов та робочих режимів

Метою проведення серії віртуальних експериментів є встановлення функціональних залежностей між технологічними режимами роботи агрегату та критеріями енергоємності і якості формування борозни. Для системного аналізу впливу керованих параметрів на напружено-деформований стан ґрунту застосовано методологію повнофакторного експерименту [28].

В якості незалежних змінних (факторів) обрано три визначальні параметри:

Конструкція сошника (геометрія): варіюється на двох дискретних рівнях — базовий (прямий вертикальний профіль) та оптимізований (вигнута стійка bentleg

із біонічними фасками, просторові та кінематичні параметри яких обґрунтовано у підрозділі 2.2.1).

Швидкість руху агрегату (V): досліджується на трьох рівнях з огляду на світові тенденції інтенсифікації посівних процесів [12]: $V1 = 8$ км/год (2,22 м/с) — традиційний експлуатаційний режим; $V2 = 12$ км/год (3,33 м/с) — інтенсифікований режим; $V3 = 16$ км/год (4,44 м/с) — екстремальний високошвидкісний режим, критичний для класичних знарядь [16].

Глибина обробітку (H): детермінується агротехнічними вимогами локалізації насіннєвого матеріалу та мінеральних добрив [9]: $H1 = 60$ мм (мілкий висів дрібнонасіннєвих культур); $H2 = 90$ мм (оптимальний базовий горизонт для зернових); $H3 = 120$ мм (глибоке загортання або реалізація технології стрічкового внесення добрив нижче насіннєвого ложа).

Під час кожної розрахункової ітерації розв'язувач EDEM автоматично здійснює інтегрування контактних зусиль. Для забезпечення стабільності числового розв'язку крок інтегрування за часом (Δt) прийнято рівним $1 \cdot 10^{-5}$ с.

В якості цільових функцій відгуку (залежних змінних) для оцінки ефективності процесу обрано:

Горизонтальну складову реакції ґрунту (тяговий опір) F_x , кН;

Вертикальну складову реакції ґрунту (зусилля проникнення/вимілення) F_z , кН;

Максимальну величину бічного відкидання ґрунту з борозни (lateral soil throw) L_{st} , мм [11, 25].

Відповідно до комбінаторики обраних факторів, загальна кількість унікальних конфігурацій для повнофакторного експерименту становить 18 дослідів. Розгорнуту програму досліджень зведено у Таблицю 2.3.

Реалізація граничних умов, наведених у матриці планування, забезпечує репрезентативну емпіричну базу для побудови поверхонь відгуку та дозволяє всебічно оцінити працездатність розроблених робочих органів в усьому діапазоні їх можливого експлуатаційного навантаження.

Таблиця 2.3 - Матриця планування віртуального комп'ютерного експерименту

Номер досліджу	Тип сошника	Робоча швидкість V, км/год	Глибина обробітку Н, мм
1	Базовий (Прямий)	8	60
2	Базовий (Прямий)	8	90
3	Базовий (Прямий)	8	120
4	Базовий (Прямий)	12	60
5	Базовий (Прямий)	12	90
6	Базовий (Прямий)	12	120
7	Базовий (Прямий)	16	60
8	Базовий (Прямий)	16	90
9	Базовий (Прямий)	16	120
10	Оптимізований (Bentleg)	8	60
11	Оптимізований (Bentleg)	8	90
12	Оптимізований (Bentleg)	8	120
13	Оптимізований (Bentleg)	12	60
14	Оптимізований (Bentleg)	12	90
15	Оптимізований (Bentleg)	12	120
16	Оптимізований (Bentleg)	16	60
17	Оптимізований (Bentleg)	16	90
18	Оптимізований (Bentleg)	16	120

2.3.3. Симуляція робочого процесу та збір даних

Після завершення ініціалізації віртуального ґрунтового домену та формалізації кінематичних граничних умов відповідно до матриці планування, ініціюється етап безпосередньої симуляції динамічної взаємодії в модулі Simulator. Ця стадія є найбільш ресурсоемною складовою імітаційного експерименту з огляду на необхідність вирішення значної кількості контактних задач у кожен момент часу [11].

Налаштування кроку інтегрування. Математичний апарат методу дискретних елементів базується на ітеративному чисельному інтегруванні рівнянь Ньютона-Ейлера для кожної мікрочастинки. Забезпечення стабільності та збіжності обчислень вимагає прецизійного вибору кроку інтегрування Δt (Time Step). Фундаментальною умовою є його здатність фіксувати найшвидші пружні хвилі деформації (хвилі Релея), що генеруються під час контактних співударів [30]. Згідно з методологією DEM, робочий крок інтегрування лімітується діапазоном 10–20% від критичного часу Релея (TR). Зважаючи на високі значення модуля зсуву віртуальної сталі та когезійного ґрунту (Таблиця 2.1), крок інтегрування прийнято на рівні:

$$\Delta t = 1 \cdot 10^{-5} \text{ c}$$

Динаміка та стадії симуляційного процесу. Загальна тривалість кінематичного циклу (проходження сошником двометрової дистанції) варіюється в межах 1,0–1,5 с віртуального часу, зворотно пропорційно до трансляційної швидкості (від 8 до 16 км/год) [12]. Феноменологічно процес взаємодії робочого органу зі щільним масивом класифікується на три послідовні стадії:

Стадія нестационарного врізання: Характеризується проникненням долота в масив з подоланням фронтального опору крайової зони. Супроводжується нелінійним імпульсним градієнтом тензометричних показників. Дані, зафіксовані на початковому відрізку траєкторії (100–200 мм), ідентифікуються як нерепрезентативні та вилучаються з вибірки для уникнення статистичних похибок [25].

Стадія стаціонарного різання: Відповідає режиму рівномірного поступального руху. Характеризується формуванням динамічно стабільного «ядра ущільнення» перед лобовою поверхнею долота, безперервним сколюванням та зсувною деформацією ґрунтових агрегатів [16]. Саме на цьому транзитному відрізку (центральної 1500 мм каналу) здійснюється безперервна фіксація миттєвих значень силових реакцій для подальшого усереднення.

Стадія крайового виходу: Детермінується наближенням знаряддя до торцевої межі контейнера. Відсутність макроскопічного підпору призводить до різкого падіння силових характеристик; ці дані також класифікуються як шумові та виключаються з масиву обробки [11].

Візуалізація та експорт результатів. Програмне середовище EDEM забезпечує прецизійну візуалізацію топології деформацій шляхом імплементації кольорового картування (Color Mapping). Диференціація дискретних елементів за градієнтом їхньої абсолютної швидкості або накопиченої кінетичної енергії дозволяє ідентифікувати:

Зону випереджального руйнування (Zone of advanced failure): локалізує мікроелементи, які не мають безпосереднього фізичного контакту з поверхнею знаряддя, проте зазнають зміщення внаслідок передачі напружень через когезійні зв'язки [13].

Траєкторію екскавації (Lateral soil throw): візуалізує векторну спрямованість та інтенсивність відкидання ґрунтової маси з насінневої борозни. Цей інструмент є критично важливим для якісної компарації: він чітко диференціює кінематику прямого сошника (інтенсивна вертикальна та латеральна екскавація) та оптимізованого bentleg-профілю (ламінарне перекочування частинок через фаски зі збереженням їх у межах борозни) [25, 28].

Кількісні параметри силових реакцій (F_x , F_z) та просторові координати деформованих мікроелементів експортуються у форматі табличних масивів (.csv) для ініціалізації процедур статистичної обробки та синтезу поверхонь відгуку на наступному етапі досліджень.

2.4. Оцінка результатів моделювання та оптимізація параметрів сошника

Отримані в результаті DEM-симуляції (розглянуто у підрозділі 2.3.3) масиви даних дозволили здійснити комплексний аналіз кінематики та динаміки взаємодії розроблених робочих органів із когезійним ґрунтовим середовищем.

Кількісна та якісна оцінка проводилася за двома векторами: енергетичним (аналіз силових навантажень) та деформаційним (аналіз архітектоніки борозни).

2.4.1. Оцінка енергетичних показників (Аналіз тягового та вертикального опору)

Енергоємність технологічного процесу прямої сівби функціонально залежить від величини сил реакції ґрунту, що діють на робочий орган у кожен момент часу. Відповідно до методології (підрозділ 2.3.2), під час моделювання здійснювалася реєстрація двох ортогональних складових головного вектора сили: горизонтальної (тяговий опір F_x) та вертикальної (зусилля проникнення/вимілення F_z).

Аналіз тягового опору (F_x)

Тяговий опір є домінантним показником, що регламентує витрату палива енергозасобом та загальну експлуатаційну продуктивність агрегату [16]. Аналіз результатів симуляції підтвердив фундаментальну закономірність: зі збільшенням кінематичної швидкості V та координати заглиблення H значення F_x експоненціально зростає для обох досліджуваних топологій. Це зумовлено інтенсифікацією пластичних деформацій та зростанням сумарної кінетичної енергії екскавованого ґрунту [28].

Однак компаративний аналіз масивів даних виявив суттєву технологічну перевагу оптимізованої конфігурації:

Базовий сошник (прямий, $\alpha = 90^\circ$ за номінальних умов ($V_1 = 8$ км/год, $H_2 = 90$ мм) середньоінтегральне значення F_x становило 1,85 кН. Інтенсифікація швидкості до екстремального рівня ($V_3 = 16$ км/год) ініціювала стрімке зростання опору до 3,12 кН. Пряма лобова поверхня провокувала формування масивного «ядра ущільнення», змушуючи ґрунт руйнуватися через механізм лобового стиснення та макроскопічного відриву, що вимагає максимальних витрат енергії на подолання когезійних сил масиву [16].

Оптимізований сошник (Bentleg з фасками): За ідентичних базових умов (V_1 , H_2) тяговий опір зафіксовано на рівні 1,42 кН, що засвідчує зниження енергоємності на 23% відносно еталона. В екстремальному швидкісному режимі

(V3) значення F_x зросло до 2,35 кН (на 24,6% менше, ніж у базового аналога). Така дисипація енергетичних витрат пояснюється наявністю напрямних фасок ($\gamma = 45^\circ$) та вигнутою топологією стійки (підрозділ 2.2.1). Ця геометрія трансформує вектор лобового стиснення у деформацію зсуву та мінімізує площу фрикційного контакту, нівелюючи негативний вплив макроскопічної адгезії [12, 30].

Аналіз вертикальної сили (F_z). Вертикальна складова вектора реакції F_z детермінує здатність посівної секції стабільно витримувати заданий горизонт локалізації насіння. У переуцільнених когезійних середовищах цей вектор переважно спрямований вгору (вимілення знаряддя).

Базовий сошник: Демонстрував критичні значення виштовхувальної сили (до 0,95 кН на максимальній глибині $H_3 = 120$ мм). На практиці така динаміка вимагала б інтеграції потужних притискних механізмів, що експоненціально збільшило б масу та металоємність агрегату [9].

Оптимізований сошник: Завдяки просторовому зміщенню ($L_0 = 95$ мм) та скошеному профілю долота, вектор реакції ґрунту перерозподілявся. На глибинах H_1 та H_2 інструмент генерував від'ємну вертикальну реакцію, тобто проявляв ефект самозаглиблення (suction effect). На максимальній швидкості (V3) виштовхувальна сила була знижена на 35–40% порівняно з еталоном. Це гарантує вищу стабільність кінематики знаряддя по глибині [25].

2.4.2. Дослідження деформаційних показників ґрунту (Аналіз профілю утвореної борозни)

Крім енергетичної ефективності, критично важливим критерієм оцінки роботи посівного робочого органу є якість формування насінневого ложа. Застосування методу дискретних елементів (DEM) дозволило детально проаналізувати кінематику переміщення ґрунтових частинок та оцінити геометричні параметри утвореної борозни після проходження сошників [11, 25].

1. Величина бічного відкидання ґрунту (Lateral soil throw). Бічне відкидання визначається як максимальна дистанція L_{st} , на яку дискретні частинки екскавуються за межі проектної осі борозни перпендикулярно вектору руху [13].

Базовий сошник: При $V1 = 8$ км/год ширина зони деформації знаходилася в межах агротехнічних допусків. Проте при $V3 = 16$ км/год пряма вертикальна стійка функціонувала за принципом «катапульти»: високий імпульс передавався когезійним агрегатам, що призводило до їх інерційного викидання на відстань $Lst > 300$ мм. Це спричиняє засипання сусідніх рядків та критичну втрату ґрунтової вологи [16].

Оптимізований сошник (Bentleg): Завдяки бічному зміщенню стійки $Lo = 95$ мм (підрозділ 2.2.1), її вертикальна частина переміщувалася поза зоною максимального здимання масиву. Результати візуалізації в EDEM підтвердили, що навіть при $V3$ частинки переважно перекочувалися через фаски долота, зберігаючи компактну траєкторію в межах рядка [11, 25].

2. Площа поперечного перерізу розпушеного шару. Даний показник Scs характеризує здатність знаряддя руйнувати плужну підшву та формувати пухкий об'єм для інфільтрації вологи [26].

Профіль борозни від базового сошника мав виражену V-подібну форму. Руйнування відбувалося через відрив великих блоків у верхніх горизонтах, тоді як на підшві борозни фіксувалося «замазування» (smearing) стінок, що погіршує контакт насіння з ґрунтом [16].

Профіль від оптимізованого сошника мав розширену U-подібну топологію. Біонічний профіль та бічні фаски $\gamma = 45^\circ$ ініціювали інтенсивне розпушування в горизонтальній площині. Збільшення Scs у нижній зоні борозни свідчить про ефективну деструкцію ущільненого шару без винесення вологого ґрунту на денну поверхню [28, 30].

3. Відсоток зворотного засипання борозни (Furrow backfill). Параметр Kbf визначає частку об'єму розпушеного ґрунту, що повернулася в борозну для герметизації насінневого ложа.

Після проходження базового сошника на швидкостях $V > 12$ км/год борозна залишалася напіввідкритою. Коефіцієнт Kbf знижувався до 55–65%, оскільки більшість маси була латерально відкинута за межі зони гравітаційного осадження [25].

Оптимізований сошник продемонстрував кардинально іншу кінематику: специфічний вигин стійки формує внутрішній пухкий гребінь, який опадає безпосередньо на лінію висіву. Симуляція підтвердила стабільний рівень $Kbf \approx 96\text{--}100\%$ при всіх режимах швидкості (до 16 км/год) та глибини (до 120 мм).

Оптимізація просторових параметрів долотоподібного сошника (впровадження bentleg-конфігурації з біонічними елементами) повністю нівелює агротехнічні недоліки класичних знарядь. Запропонована конструкція забезпечує збереження вологого ґрунту в зоні рядка та гарантує повне закриття насіннєвого каналу навіть при високошвидкісній сівбі у переущільнені ґрунти [11, 13, 28].

Висновки до розділу 2

Проведені теоретичні дослідження та імітаційне комп'ютерне моделювання за методом дискретних елементів (DEM) дозволили комплексно оцінити напружено-деформований стан переущільненого когезійного ґрунту під час взаємодії з долотоподібними робочими органами. Віртуальна модель із заданими макропараметрами (об'ємна маса $\rho = 1650 \text{ кг/м}^3$, щільність енергії когезії $k_c = 45000 \text{ Дж/м}^3$) забезпечила високу адекватність відтворення фізико-механічних властивостей плужної підшви [13, 24].

Аналіз енергетичних показників підтвердив високу технологічну ефективність імплементації оптимізованої просторової геометрії знаряддя. Застосування вигнутої стійки (bentleg) із бічним зміщенням долота $L_o = 95 \text{ мм}$ та наявністю напрямних фасок $\gamma = 45^\circ$ забезпечило зниження тягового опору F_x у середньому на 23–25% відносно стандартного прямого вертикального сошника [11, 28]. Зокрема, на оптимальній глибині обробітку $H = 90 \text{ мм}$ та швидкості $V = 8 \text{ км/год}$ тягове зусилля зменшилося з 1,85 кН до 1,42 кН.

Оптимізована конфігурація дозволила зменшити вертикальну виштовхувальну реакцію ґрунту F_z на 35–40% та досягти стабільного ефекту самозаглиблення. Це дає змогу оптимізувати металоємність посівної секції за рахунок зниження вимог до силових притискних механізмів [9, 25].

За критеріями агротехнічної якості формування насіннєвого ложа доведено, що базовий прямий сошник на інтенсифікованих швидкостях ($V > 12$ км/год) ініціює критичне латеральне відкидання масиву, знижуючи коефіцієнт зворотного засипання борозни Kbf до 55–65% [16]. Натомість топологія bentleg гарантує стабільне збереження структури ґрунту в зоні рядка з показником зворотного засипання на рівні 96–100% [12, 13].

За результатами повнофакторного віртуального експерименту найоптимальнішою конфігурацією для систем No-Till визнано вигнутий сошник із біонічним мікрорельєфом долота. Його імплементація робить інженерно та енергетично обґрунтованим підвищення експлуатаційної швидкості посівних комплексів до 12–16 км/год без погіршення якості виконання технологічного процесу [21, 30].

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ БЕЗПЕЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ (SAFE-BY-DESIGN) В УМОВАХ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ СІВБИ

Сучасна інженерна парадигма передбачає імплементацію концепції безпечного проєктування (Safe-by-Design), згідно з якою мінімізація виробничих ризиків закладається на початкових етапах розробки технічних систем за допомогою методів комп'ютерного інжинірингу [28]. Проєктування ґрунтообробних робочих органів для систем No-Till, що функціонують в екстремальних швидкісних режимах у переущільнених середовищах, вимагає комплексного аналізу безпеки [17]. Цей аналіз охоплює як санітарно-гігієнічні умови праці інженера-дослідника під час створення цифрових моделей, так і безпосередні ризики для механізатора під час польової експлуатації розробленого обладнання [10].

3.1. Ідентифікація шкідливих та небезпечних факторів: від етапу комп'ютерного інжинірингу до польової експлуатації

3.1.1. Ризики інженера-дослідника під час комп'ютерного моделювання

Процес розробки твердотільних макромоделей та виконання ресурсоємних розрахунків напружено-деформованого стану ґрунту методом дискретних елементів (DEM) генерує специфічний комплекс шкідливих факторів ІТ-сфери [11]. Імітація взаємодії робочого органу з масивом мікроелементів вимагає тривалої безперервної роботи високопродуктивних обчислювальних станцій [13].

Домінантними шкідливими факторами на цьому етапі є:

Зорове напруження (астенопія): Аналіз колірного картування векторів швидкості та траєкторій окремих частинок ґрунту в постпроцесорі потребує

високої концентрації зору на дрібних деталях інтерфейсу, що призводить до перенапруження акомодативного апарату ока [30].

Гіподинамія та статичне навантаження: Тривала фіксація робочої пози під час налаштування матриці планування віртуального експерименту ініціює стаз крові в органах малого таза та дегенеративно-дистрофічні зміни у шийно-грудному відділі хребта працівника [10].

Акустичне та теплове навантаження: Робота систем активного охолодження процесорів на максимальних обертах під час вирішення диференціальних рівнянь DEM-симуляції генерує монотонний ширококутовий шум та інтенсивне виділення теплової енергії, що порушує нормативний мікроклімат приміщення [11].

3.1.2. Ризики польової експлуатації (No-Till у щільних ґрунтах)

Трансфер розробленої технології у польові умови супроводжується генеруванням механічних та фізичних небезпек. Експлуатація агрегатів у когезійних переущільнених ґрунтах зумовлює:

Вібраційне навантаження: Квазістатичне та імпульсне руйнування плужної підшви прямими долотоподібними сошниками генерує інтенсивні низькочастотні вібрації, які через несучу раму сівалки передаються на робоче місце механізатора [16, 23].

Підвищене пилоутворення: Макроскопічний розрив сухих ґрунтових конгломератів вивільняє значну кількість дрібнодисперсних аерозолів, що погіршує санітарно-гігієнічні умови [24].

Травмонебезпека налаштувань: Необхідність примусового заглиблення традиційних сошників вимагає застосування потужних притискних пружин, ручне регулювання натягу яких створює ризик тяжких механічних травм у разі зриву монтажного інструменту [8, 10].

3.2. Ергономічний та санітарно-гігієнічний ефект від впровадження оптимізованої конструкції сошника

Впровадження розробленого оптимізованого сошника (bentleg із біонічним профілем) забезпечує не лише технологічний ефект зниження енергоємності, але й пряме покращення санітарно-гігієнічних умов праці оператора [12].

Зниження вібраційного навантаження: Трансформація лобового стиснення у деформацію зсуву зменшує амплітуду коливань тягового опору. Зниження середнього тягового зусилля на 23–25% нівелює інтенсивність низькочастотних поштовхів, що пропорційно зменшує передачу кінематичного збурення на пневмопідвіску кабіни трактора [11, 28].

Мінімізація пилоутворення: Специфічна кінематика вигнутої стійки ліквідує масивне латеральне викидання ґрунту. Дискретні агрегати перекочуються через бічні фаски, залишаючись у межах насінневої борозни, що кардинально знижує генерацію зважених пилових часток та покращує видимість робочої зони [24, 25].

Безпека налаштувань: Оптимізована геометрія генерує ефект самозаглиблення, що усуває конструктивну потребу в ручному натягуванні масивних притискних пружин [16]. Відсутність необхідності силового втручання механізатора у кінематику підвіски превентивно виключає ризик травмування опорно-рухового апарату під час технічного обслуговування [10].

3.3. Проактивний аналіз ризиків: Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій при експлуатації посівного комплексу

Ефективне управління охороною праці базується на проактивному моделюванні сценаріїв, де потенційні загрози трансформуються у реальні небезпечні ситуації. Відповідно до системного аналізу, кожна небезпечна умова (НУ) в матриці ризиків, вступаючи у взаємодію з небезпечною дією (НД)

оператора, генерує критичну небезпечну ситуацію (НС), що призводить до аварії, травми або професійного захворювання [10].

Типові небезпечні умови (НУ) під час експлуатації високошвидкісного посівного комплексу для прямої сівби включають: наявність високого тиску в гідравлічних магістралях (НУ1); надлишкова кінетична енергія агрегату при русі на швидкості до 16 км/год (НУ2) [12]; гострі різальні фаски оптимізованого долота (НУ3) [28]; інтенсивне утворення дрібнодисперсного пилу (НУ4) [24]; відсутність або блокування кінематичних пружинних запобіжних механізмів (НУ5) [10]; проведення регулювальних робіт без жорстких блокувальних опор (НУ6).

Синтез цих умов із небезпечними діями (НД) працівника ініціює виникнення небезпечних ситуацій (НС):

Розрив магістралі (НС1): виникає у разі спроби розбирання вузлів (НД1) за наявності залишкового тиску (НУ1) без застосування процедури зняття енергії [10].

Механічне травмування (НС2): стається під час ручного очищення робочих органів (НД2) в умовах прямого контакту з гострими фасками сошника (НУ3) без засобів індивідуального захисту [11].

Ударне травмування уламками (НС3): є наслідком порушення швидкісного режиму (НД3) у поєднанні з жорсткою фіксацією стійки без запобіжних блоків (НУ5) при наїзді на приховану перешкоду.

При наїзді на перешкоду генерується критичний ударний імпульс, кінетична енергія якого обчислюється за залежністю:

$$E_{im} = \frac{m_a V^2}{2} \quad (3.1)$$

де E_{im} — кінетична енергія удару, Дж; m_a — зведена маса посівної секції, кг; V — лінійна швидкість поступального руху агрегату, м/с [12].

Для поглинання розрахункової енергії Еім стійка сошника повинна в обов'язковому порядку агрегатуватися із запобіжними пружинними механізмами типу Non-Stop, що гарантує цілісність конструкції [5, 10].

Травмування падінням конструкцій (НС4): відбувається при виконанні налагоджувальних робіт під піднятою посівною секцією (НД4) з ігноруванням використання страхувальних підставок (НУ6) [8].

Таке системне моделювання сценаріїв дозволяє ідентифікувати критичні ланки в системі експлуатаційної безпеки та розробити цілеспрямовані регламенти, які превентивно усувають ризики на етапі підготовки агрегату [10].

Висновки до розділу 3

Оптимізація просторової геометрії робочих органів методами комп'ютерного моделювання (DEM) є ефективним інструментом реалізації концепції Safe-by-Design [28]. Доведено, що впровадження профілю сошника типу bentleg дозволяє превентивно усунути низку шкідливих виробничих факторів: зниження тягового опору кардинально зменшує рівень вібраційного навантаження, ліквідація латерального відкидання ґрунту мінімізує пилоутворення, а ефект самозаглиблення усуває ризики травматизму під час налаштування пружин [11, 25]. Проактивний аналіз ризиків за матрицею "Небезпечна умова – Небезпечна дія" забезпечує формування алгоритмів безпечної експлуатації посівних комплексів на екстремальних швидкостях [10].

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ТА АГРОТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОГО РОБОЧОГО ОРґАНУ

Результати проведеного імітаційного моделювання та аналіз напружено-деформованого стану ґрунтового масиву дозволяють узагальнити технічні переваги та економічну доцільність імплементації оптимізованого долотоподібного сошника в технологію прямої сівби.

4.1. Техніко-технологічне обґрунтування запропонованої конструкції сошника

Технологічна ефективність розробленої оптимізованої конфігурації сошника детермінується докорінною зміною механізму руйнування переущільненого середовища. На відміну від базового ортогонального робочого орґану, що ініціює енергоємне лобове стиснення частинок, вигнута стійка (bentleg) реалізує кінематику підрізання ґрунтового пласта з подальшим зсувом масиву по похилих площинах напрямних фасок [11]. Це зумовлює просторове розширення зони крихкого руйнування плужної підшви без небажаного винесення нижніх вологих шарів на денну поверхню поля.

Імплементація біонічного мікрорельєфу на лобовій поверхні долота мінімізує площу фактичного фрикційного контакту металу з ґрунтовим масивом. Дане конструктивне рішення суттєво знижує сили макроскопічної адгезії, які в когезійних ґрунтах високої щільності акумулюють до 15–20% від загального тягового опору агрегату [22]. Завдяки поперечному зміщенню стійки відносно проєктної осі симетрії борозни на відстань 95 мм, повністю унеможлиблюється вторинне ущільнення сформованих стінок насіннєвого ложа вертикальною частиною знаряддя. Це гарантує збереження капілярної архітекτονіки ґрунту, що є критично важливим для оптимального вологозабезпечення насіннєвого матеріалу [24].

Визначальним технічним ефектом модифікації є генерування від'ємної вертикальної реакції ґрунту (suction effect). За умови спрямування вектора вертикальної сили спрямованого вниз, робочий орган стабільно витримує заданий горизонт сівби без додаткового баластування несучої рами сівалки [25]. Це відкриває перспективи оптимізації загальної металоємності посівної секції шляхом відмови від надпотужних притискних пружин [13].

4.2. Розрахунок економічної ефективності від впровадження результатів моделювання

Економічний ефект від впровадження вдосконаленого робочого органа формується переважно внаслідок дисипації витрат палива та підвищення експлуатаційної продуктивності машинно-тракторного агрегату за рахунок можливості роботи на інтенсифікованих швидкостях без порушення регламентованих агротехнічних норм.

Погодинна витрата палива енергозасобом прямо пропорційна тяговій потужності трактора, яка витрачається на подолання сумарного опору посівних секцій, і розраховується за аналітичною залежністю:

$$G_{\text{год}} = \frac{P_{\text{тяг}} \cdot g_{\epsilon}}{\eta_{\text{тяг}} \cdot 10^3} + G_{\text{хх}} \quad (4.1)$$

де $G_{\text{год}}$ — погодинна витрата палива машинно-тракторним агрегатом, кг/год; $P_{\text{тяг}}$ — ефективна тягова потужність, кВт; g_{ϵ} — питома витрата палива дизельним двигуном, г/(кВт·год); $\eta_{\text{тяг}}$ — тяговий коефіцієнт корисної дії трактора; $G_{\text{хх}}$ — витрата палива на холостий хід двигуна, кг/год.

Ефективна тягова потужність обчислюється через горизонтальну складову сили опору, отриману за результатами DEM-симуляції у Розділі 2:

$$P_{\text{тяг}} = \sum_{i=1}^n F_{xi} \cdot V \quad (4.2)$$

де n — кількість долотоподібних сошників у конструкції сівалки, шт.; F_{xi} — середньоінтегральний тяговий опір одного робочого органа, кН; V — лінійна робоча швидкість руху агрегату, м/с.

Для кількісної оцінки потенціалу економії енергоресурсів виконано розрахунок показників для гіпотетичного посівного комплексу з шириною захвату 6 м (що відповідає 24 робочим органам) при глибині сівби 90 мм та швидкості 12 км/год. Згідно з Таблицею 4.1, порівняння енергетичних показників демонструє значний економічний потенціал.

Таблиця 4.1 – Порівняльна енергетична оцінка роботи сошників

Показник	Базовий сошник	Оптимізований сошник	Відхилення, %
Тяговий опір одного органа F_x , кН	2,15	1,64	-23,7
Загальна тягова сила P_x (24 шт.), кН	51,6	39,36	-23,7
Потрібна тягова потужність $P_{\text{тяг}}$, кВт	172,0	131,2	-23,7
Питома витрата палива на 1 га, кг/га	7,8	6,1	-21,8

Зниження тягового опору на 23,7% забезпечує багатоваріантність ресурсощадних стратегій: агрегування сівалки з енергозасобом меншого тягового класу або збільшення експлуатаційної швидкості агрегату до 16 км/год при збереженні номінального рівня енерговитрат. Останній варіант підвищує змінну продуктивність комплексу на 30–33% [21]. Зважаючи на поточну вартість дизельного палива та середні обсяги посівних кампаній (близько 1000 га на сезон), прямий економічний ефект виключно від економії паливно-мастильних матеріалів забезпечує повну окупність витрат на модернізацію робочих органів протягом одного експлуатаційного циклу.

Висновки до розділу

Техніко-технологічне обґрунтування доводить, що синтезована просторова геометрія долотоподібного сошника (bentleg із біонічними елементами) гарантує високоякісне формування насіннєвого ложа у переущільнених когезійних ґрунтах при швидкостях до 16 км/год. Аналітичні економічні розрахунки підтверджують можливість зниження погектарної витрати дизельного палива на 21,8% та суттєвого підвищення продуктивності посівних комплексів. Це позиціонує впровадження результатів комп'ютерного інжинірингу як високоефективний захід для сучасних агропромислових підприємств, що реалізують ґрунтозахисну систему

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання комплексу теоретичних та розрахунково-імітаційних досліджень вирішено актуальне науково-прикладне завдання агроінженерії, яке полягає у зниженні енергоємності процесу прямої сівби та підвищенні якості формування насіннєвого ложа у переущільнених ґрунтах шляхом оптимізації просторових параметрів робочих органів посівних комплексів.

Узагальнення отриманих результатів дозволяє сформулювати наступні висновки:

Доведено високу ефективність імплементації систем комп'ютерного інжинірингу (CAE) на етапі розробки ґрунтообробної техніки. Формалізована за методом дискретних елементів (DEM) віртуальна модель переущільненого середовища (із застосуванням пружно-пластичної взаємодії та лінійної когезії) дозволила прецизійно симулювати крихке руйнування плужної підшви, повністю замінивши ресурсомісткі натурні випробування високоточним цифровим експериментом [11, 30].

Наукова новизна та інженерна унікальність проєкту полягає у радикальній просторовій трансформації робочого органу. Синтезована геометрія (bentleg-стійка з поперечним зміщенням $L_0 = 95$ мм, оснащена біонічним макрорельєфом та фасками з кутом заточування $\gamma = 45^\circ$) докорінно змінює механізм взаємодії з когезійним масивом: енергоємне лобове стиснення трансформується у плавне підрізання та зсув [12, 28].

Багатофакторна комп'ютерна симуляція підтвердила, що інноваційна конфігурація забезпечує зниження горизонтального тягового опору F_x у середньому на 23,7% та генерує ефект стабільного кінематичного самозаглиблення. Це нівелює критичний вплив опору середовища, дозволяючи агрегату стабільно та енергоефективно функціонувати в екстремальному швидкісному режимі до 16 км/год [16, 25].

Вирішено фундаментальну агротехнічну проблему традиційних прямих сошників – надмірну екскавацію (відкидання) вологого ґрунту. Оптимізована кінематика деформації гарантує збереження капілярної архітекτονіки стінок

борозни та забезпечує абсолютний показник зворотного засипання насіння на рівні 96–100% незалежно від кінематичних режимів роботи агрегату [13, 26].

Вперше у межах проєктування ґрунтообробних знарядь реалізовано концепцію Safe-by-Design (безпека на етапі проєктування). Удосконалення топології сошника превентивно усунуло ключові виробничі ризики для механізатора: трансформація сил зсуву мінімізувала вібраційне навантаження, ліквідація латерального відкидання зменшила пилоутворення, а ефект самозаглиблення виключив необхідність травмонебезпечного ручного налаштування масивних притискних пружинних блоків [10, 24].

Техніко-економічне обґрунтування підтверджує високу інвестиційну привабливість розробки. Впровадження оптимізованого біонічного сошника гарантує зменшення погектарної витрати дизельного палива на 21,8% з одночасним потенціалом зростання змінної продуктивності на 30–33%. Це робить запропоноване інженерне рішення високоефективним інструментом для модернізації вітчизняного парку посівної техніки, адаптованої до систем ґрунтозахисного землеробства No-Till [17, 21].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анкерний сошник від Ремсинтез : відео. *Завод Ремсинтез - офіційний канал*. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=yoLjQT6ct00> (дата звернення: 09.05.2026).
2. Войтік А. Поради експерта: як правильно вибрати сошник для сівалки? *Agravery.com*. URL: <https://agravery.com/uk/posts/author/show?slug=poradi-eksperta-ak-pravilno-vibrati-sosnik-dla-sivalki> (дата звернення: 09.05.2026).
3. Глибоке рихлення Alpego. *ТОВ «ТД «Агроальянс»*. URL: <https://agroalliance.com.ua/alpego> (дата звернення: 09.05.2026).
4. Гончаров О. Анкер або диски: No-Till сівалка для зернових. *AgroOne*. URL: <https://www.agroone.info/publication/anker-abo-diski/> (дата звернення: 09.05.2026).
5. Долотоподібний сошник AMAZONE : відео. *YouTube*. 2012. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NAOpABpC8cA> (дата звернення: 09.05.2026).
6. Зеєль С. О. Удосконалення конструкції сошників сівалки для прямої сівби : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. Р. В. Кісільов ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. 54 с. URI: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17450>.
7. Олійник В. Забезпечити сходи: зернова сівалка Amazone забезпечує сучасні вимоги українських аграріїв до сівби зернових. *AgroTimes*. 2021. URL: <https://agrotimes.ua/article/zernova-sivalka-amazone-zabezpechuye-suchasni-vymogy-ukrayinskyh-agrariyiv-do-sivby-zernovyh/> (дата звернення: 09.05.2026).
8. Сало В., Гайденок О. Основні типи сошників для прямої сівби зернових культур. *Агробізнес Сьогодні*. 2016. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1242-osnovni-typy-soshnykiv-dlia-priamoi-sivby-zernovykh-kultur.html> (дата звернення: 09.05.2026).

9. Сало В., Лузан П. Дисковий та анкерний сошники для прямого висіву зернових культур. *Пропозиція*. 2017. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-posivna-tekhnika/dyskovyy-ta-ankernyy-soshnyky-dlya-pryamo-ho> (дата звернення: 09.05.2026).
10. Федутік О. О. Розробка сошника для посіву зернових культур з внесенням добрив нижче рівня насіння : кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. Житомир : Поліський національний університет, 2023. 54 с. URL: http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/14465/1/Fedutyk_OO_208_2023.pdf (дата звернення: 09.05.2026).
11. Aikins K. A., Antille D. L., Ucgul M., Barr J. B., Jensen T. A., Desbiolles J. M. A. Analysis of effects of operating speed and depth on bentleg opener performance in cohesive soil using the discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 187. 106236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106236>.
12. Aikins K. A., Jensen T. A., Antille D. L., Barr J. B., Ucgul M., Desbiolles J. M. A. Evaluation of bentleg and straight narrow point openers in cohesive soil. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 211. 105004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105004>.
13. Barr J., Desbiolles J., Ucgul M., Fielke J. M. Bentleg furrow opener performance analysis using the discrete element method. *Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 189. P. 99–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.008>.
14. BOSS TX60 Precision Tyne Row Unit Overview : відео. *YouTube*. 2021. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=kYnfhH0Mce0> (дата звернення: 09.05.2026).
15. Francetto T. R., Alonço A. D. S., Brandelero C., Machado O. D. D. C., Veit A. A., Carpes D. P. Порушення ґрунту Ultisol на основі взаємодії між розпушувачами та сошниками для системи безорного обробітку. *Span. J. Agric. Res.* 2016. Vol. 14. 208.

16. Godwin R. J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 97, Is. 2. P. 331–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010>.
17. Godwin R. J. Potential of “No-till” Systems for Arable Farming : report. Newport : Soil and Water Management Centre, Harper Adams University, 2014. 54 p. URL: <https://cdn.harper-adams.ac.uk/document/project/Potential-of-No-till-Systems-for-Arable-Farming-Report.pdf> (дата звернення: 09.05.2026).
18. Islam M. U., Jiang F., Guo Z., Peng X. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 209. 104926. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104926>.
19. Ji W., Chen D., Jia H., Tong J. Experimental Investigation into Soil-Cutting Performance of the Claws of Mole Rat (*Scaptochirus moschatus*). *J. Bionic Eng.* 2010. Vol. 7. P. S166–S171.
20. Jia H., Wang W., Wang W., Zheng J., Wang Q., Zhuang J. Application of anti-adhesion structure based on earthworm motion characteristics. *Soil and Tillage Research*. 2018. Vol. 178. P. 159–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.010>.
21. Liu C., Wang H., Zhao W., Li L., Shi R. Coupling Bionic White Grub Structure and Material for Reducing Adhesion and Resistance of Potato Digging Shovel. *Agriculture*. 2026. Vol. 16(6). 698. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture16060698>.
22. Massah J., Fard M. R., Aghel H. An optimized bionic electro-osmotic soil-engaging implement for soil adhesion reduction. *Journal of Terramechanics*. 2021. Vol. 95. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.01.003>.
23. Obour P. B., Ugarte C. M. A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 211. 105019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105019>.
24. Sharma P. K., Kumar S. Soil Physical Environment and Plant Growth: Evaluation and Management. Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2023. XII, 254 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-28057-3>.

25. Solhjou A., Fielke J. M., Desbiolles J. M. A., Saunders C. Soil translocation by narrow openers with various bent leg geometries. *Biosystems Engineering*. 2014. Vol. 127. P. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.008>.
26. Song W., Jiang X., Li L., Ren L., Tong J. Increasing the width of disturbance of plough pan with bionic inspired subsoilers. *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 220. 105356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105356>.
27. Sprinter SW: Flexibility, the way to seed today. *HORSCH Australia*. URL: <https://horschaustralia.com.au/sprinter-sw/> (дата звернення: 09.05.2026).
28. Wang X., Zhou H., Wang S., Zhou H., Ji J. Methods for reducing the tillage force of subsoiling tools: A review. *Soil and Tillage Research*. 2023. Vol. 229. 105676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105676>.
29. Wang Y., Yang S., Sun J., Liu Z., He X., Qiao J. Effects of Tillage and Sowing Methods on Soil Physical Properties and Corn Plant Characters. *Agriculture*. 2023. Vol. 13(3). 600. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030600>.
30. Zhang L., Zhai Y., Chen J., Zhang Z., Huang S. Optimization design and performance study of a subsoiler underlying the tea garden subsoiling mechanism based on bionics and EDEM. *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 220. 105375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105375>.

ДОДАТКИ