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

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

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: «Обґрунтування конструктивних параметрів очисників рядка сівалок прямої сівби для роботи з підвищеним фоном пожнивних решток»

Виконав: студент 4 курсу, групи 41-ім
освітньої програми __бакалавра_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»__
Наталія ЛУТАЙ
(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)

ЛУТАЙ Наталії Володимирівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Обґрунтування конструктивних параметрів очисників рядка сівалок прямої сівби для роботи з підвищеним фоном пожнивних решток»

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. № 01-06/167
2. Строк подання студентом роботи 20.05.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: Вітчизняні та зарубіжні наукові публікації із землеробської механіки, результати досліджень щодо біонічної оптимізації дисково-зубчастих робочих органів, методичні матеріали з DEM-моделювання взаємодії багатокомпонентного середовища «ґрунт – солома», довідникові дані щодо фізико-механічних та реологічних властивостей пожнивних решток, а також технічна та експлуатаційна документація на сучасні системи очищення рядка (Row Cleaners) сівалок прямої сівби.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Вступ; стан питання та передумови вдосконалення очисників рядка сівалок прямої сівби при значному скупченні пожнивних решток; теоретико-експериментальне обґрунтування конструктивних параметрів та режимів роботи адаптивного очисника рядка (включаючи математичне DEM-моделювання та лабораторно-польові дослідження); охорона праці та безпека експлуатації посівних агрегатів в умовах стерньових фонів; економічне та агротехнічне обґрунтування ефективності застосування вдосконалених очисників рядка; 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. Стан питання та передумови вдосконалення очисників рядка сівалок прямої сівби при значному скупченні пожнивних решток	25.12.2025 р.	
3.	Розділ 2. Теоретико-експериментальне обґрунтування конструктивних параметрів та режимів роботи очисника рядка	02.02.2026 р.	
4.	Розділ 3. Охорона праці та безпека експлуатації посівних агрегатів в умовах стерньових фонів	01.04.2026 р.	
5.	Розділ 4. Економічне та агротехнічне обґрунтування ефективності застосування вдосконалених очисників рядка	01.05.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини роботи	12.05.2026 р.	
7	Представлення роботи керівнику на перевірку та остаточне оформлення записки	20.05.2026р.	

Студент _____ Наталія ЛУТАЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

ЗМІСТ

ВСТУП 6

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ПЕРЕДУМОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ОЧИСНИКІВ РЯДКА СІВАЛОК ПРЯМОЇ СІВБИ ПРИ ЗНАЧНОМУ СКУПЧЕННІ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК 7

1.1. Агротехнологічні вимоги до підготовки зони висіву насіння та вплив нерівномірного розподілу рослинних залишків на якість роботи сошника 7

1.2. Конструктивно-технологічний аналіз сучасних систем очищення рядка (дисково-зубчастих, зірчастих, ротаційних) на прикладі передових посівних комплексів для технології No-Till 9

1.3. Науково-практичні підходи до вивчення фізико-механічних властивостей соломи та методів моделювання взаємодії ґрунтообробних органів із ґрунтово-рослинним середовищем 11

1.4. Обґрунтування робочої гіпотези, мети та конкретних завдань дослідження конструктивних параметрів модернізованого очисника 14

Висновки до розділу 16

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ОЧИСНИКА РЯДКА 17

2.1. Синтез та обґрунтування вдосконаленої конструкційно-технологічної схеми очисника для ефективного захоплення та відведення щільного шару стерні 17

2.2. Математичне моделювання динаміки переміщення соломи та ґрунту робочими елементами очисника (включаючи використання методу дискретних елементів – DEM) 20

2.3. Методика, програма та апаратне забезпечення лабораторно-польових досліджень тягового опору і якості звільнення смуги висіву 23

2.4. Аналіз результатів випробувань: оптимізація геометричних параметрів (форми і діаметра зубчастих дисків) та настановних режимів (кутів атаки, глибини ходу) 25
Висновки до розділу 28
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОСІВНИХ АГРЕГАТІВ В УМОВАХ СТЕРНЬОВИХ ФОНІВ 29
3.1. Комплексна оцінка стану охорони праці при експлуатації широкозахватних сівалок прямої сівби на полях із надмірною кількістю пожнивних решток 29
3.2. Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій під час роботи, налаштування та очищення дискових робочих органів сівалок в умовах поля 30
3.3. Інженерні заходи з мінімізації впливу шкідливих виробничих факторів (вібраційне навантаження, біологічний пил від подрібненої сухої соломи) на механізатора 31
Висновки до розділу 32
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ТА АГРОТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВДОСКОНАЛЕНИХ ОЧИСНИКІВ РЯДКА 34
4.1. Оцінка агротехнічної ефективності розчищення борозни: вплив на температурно-вологісний режим ґрунту в зоні висіву та рівномірність появи сходів 34
4.2. Техніко-економічний розрахунок показників ефективності від впровадження оптимізованих конструктивних параметрів очисника у порівнянні з базовими аналогами 35
Висновки до розділу 37
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 40
ДОДАТКИ 44

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток ресурсозберігаючих ґрунтозахисних систем землеробства, зокрема технології No-Till, базується на постійному збереженні пожнивних решток, які виконують критично важливу мульчуючу функцію для акумуляції вологи та захисту ґрунту від ерозії [6, 20, 23]. Проте наявність щільного шару стерні масою 5000–9000 кг/га створює жорсткі технологічні перешкоди для роботи посівних комплексів [12, 25]. Базові дискові сошники не здатні ефективно прорізати такий масив і втискають солому безпосередньо в насіннєву борозну (явище hairpinning), що руйнує гідрологічний контакт насіння з ґрунтом та критично знижує польову схожість [12, 18, 28].

Існуючі серійні пасивні очисники рядка (row cleaners) покликані вирішувати цю проблему, але за умов високої вологості рослинної маси вони демонструють експлуатаційну нестабільність. Вони схильні до когезійного блокування, намотування стебел та надмірної екскавації вологого ґрунту (ефект «бульдозера») [11, 27]. Це формує нагальну інженерну потребу в їх конструктивній модернізації.

Застосування біонічних профілів зубців у синергії з оптимізованим просторовим позиціонуванням дисків дозволить якісно змінити кінематику взаємодії із середовищем — ефективно відводити стерню без забивання робочого органу [14, 25, 29]. З огляду на це, наукове обґрунтування параметрів вдосконалених адаптивних очисників із залученням передових методів комп'ютерного моделювання дискретних елементів (DEM) є своєчасною технічною задачею, що має високу практичну цінність для сучасної агроінженерії [21, 30].

Об'єкт дослідження – технологічний процес розчищення насіннєвої борозни від пожнивних решток робочими органами сівалки прямої сівби.

Предмет дослідження – закономірності механічної взаємодії дисково-зубчастих елементів очисника рядка з багатокомпонентним ґрунтово-рослинним середовищем, а також їхні конструктивні та кінематичні параметри.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ПЕРЕДУМОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ОЧИСНИКІВ РЯДКА СІВАЛОК ПРЯМОЇ СІВБИ ПРИ ЗНАЧНОМУ СКУПЧЕННІ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК

1.1. Агротехнологічні вимоги до підготовки зони висіву насіння та вплив нерівномірного розподілу рослинних залишків на якість роботи сошника

Впровадження ґрунтозахисних технологій землеробства, зокрема системи прямої сівби (No-Till), базується на збереженні пожнивних решток попередньої культури на поверхні поля. З агрономічної точки зору залишки виконують функцію мульчі, яка акумулює вологу, мінімізує вітрову та водну ерозію, а також ініціює поступове відновлення вмісту гумусу в ґрунті [6]. Проте наявність нерівномірного шару соломи створює значний механічний опір для робочих органів посівних комплексів, що безпосередньо деградує якість формування насіннєвого ложа [23].

Згідно із сучасними досягненнями світової агроінженерної практики, для забезпечення гомогенності сходів до зони висіву висувається комплекс жорстких фізико-механічних вимог. По-перше, насіннєва борозна шириною $Bb = 2…5$ см повинна бути максимально звільнена від пожнивних решток для запобігання фітотоксичності [12].

Де Bb – ширина розчищеної смуги ґрунту перед проходом сошника.

По-друге, насіння має інтегруватися у тверде вологе дно борозни з подальшим ущільненням для забезпечення капілярного притоку вологи, при цьому наявність соломи між насінням та ґрунтом є технологічно неприпустимою [13]. По-третє, дисперсія глибини загортання Δh не повинна перевищувати ± 1 см, що вимагає прецизійного копіювання мікрорельєфу поля [18].

Де Δh – допустиме відхилення фактичної глибини висіву від заданої агротехнічної норми.

Крім того, очищена від мульчі V-подібна смуга ґрунту має забезпечувати інтенсивніше поглинання сонячної радіації порівняно з міжряддям, формуючи сприятливий термодинамічний градієнт для проростання [19].

На практиці експозиція соломи та полови після проходу зернозбиральних комбайнів характеризується високою просторовою варіабельністю. Формуються локальні зони з масою залишків mr> 5000…9000 кг/га, де проекційне покриття досягає 100% [12].

Де mr – маса пожнивних решток на одиницю площі.

Така гетерогенність середовища індукує критичні збої у функціонуванні дискових сошників, головним з яких є ефект «вдавлювання» (hairpinning). Механізм цього явища деталізовано на рисунку Додаток А.

Замість наскрізного перерізання стебел, диски втискають гнучку або вологу солому безпосередньо в насіннєву борозну через недостатню реакцію опору ґрунту [28]. Внаслідок цього насіння локалізується у солом'яному макропорі, що елімінує гідрологічний контакт і призводить до загибелі зародка [24]. Додатковою проблемою є забивання робочих органів вільною довгостебловою соломою, яка накопичується перед стійками сошників, ініціюючи згрібання верхнього шару ґрунту та блокування посівного агрегату [25]. При наїзді копіювальних коліс на валки соломи відбувається порушення кінематики підвіски, що призводить до мілкого закладення або викидання насіння на поверхню [18].

Аналіз агротехнологічних обмежень доводить, що для стабілізації процесу прямої сівби на фонах з підвищеною щільністю пожнивних решток, архітектура посівної секції повинна обов'язково інтегрувати спеціалізовані очисники рядка [26]. Їхня функціональна мета полягає у превентивному латеральному зміщенні соломи з траєкторії руху сошника, нівелюванні ефекту вдавлювання та формуванні оптимального мікроклімату в зоні закладення насіння.

1.2. Конструктивно-технологічний аналіз сучасних систем очищення рядка (дисково-зубчастих, зірчастих, ротаційних) на прикладі передових посівних комплексів для технології No-Till

Для подолання негативного впливу високого фону пожнивних решток на якість сівби, сучасні посівні комплекси прямої сівби оснащуються спеціалізованими системами управління рослинними залишками (Residue Management Units). За принципом дії та конструктивним виконанням вони класифікуються на пасивні (дискові, зірчасті) та активні (ротаційні, вібраційні) механізми [12]. Аналіз їхньої кінематики та взаємодії з ґрунтово-рослинним середовищем дозволяє ідентифікувати ключові експлуатаційні недоліки та вектори подальшої модернізації.

Пасивні дискові колтери (прорізні диски) Історично базовим інженерним рішенням для технології No-Till є встановлення вертикального хвилястого (турбодиска) або вирізного диска перед основним сошником. Принцип дії полягає у розрізанні шару соломи та локальному розпушуванні вузької смуги ґрунту на задану глибину сівби [17]. Перевагами таких робочих органів є відносна простота конструкції, низький тяговий опір та здатність до стабільної роботи на високих поступальних швидкостях. Проте, як свідчить досвід експлуатації вітчизняних та зарубіжних агрегатів (зокрема комплексів VELES AGRO та Horsch), за умов підвищеної вологості ґрунту або наявності критичної маси свіжої довгостеблової соломи, колтери втрачають здатність до перерізання [2]. Виникає явище вдавлювання (hairpinning), за якого диски деформують стебла і втискають їх безпосередньо у насіннєву борозну, що блокує контакт насіння з ґрунтом [12].

Зірчасті (зубчасто-пальцеві) очисники рядка Найбільш апробованою у світовій практиці є технологія використання зірчастих очисників (row cleaners), що штатно застосовується у посівних комплексах Kinze, John Deere та Bourgault [11]. Очисник складається з одного або двох дисків із радіальними пальцями, встановлених під заданими кутами атаки та нахилу до вертикалі. Динамічний

режим обертання такого пасивного очисника визначається базовою умовою подолання моменту опору коченню:

$$T_r \leq F_f \cdot R_d \cdot \cos(\alpha) \tag{1.1}$$

де Tr – момент опору коченню диска; Ff – тангенціальна складова сили реакції ґрунту та рослинних решток; Rd – зовнішній радіус зубчастого диска; α – кут атаки диска.

Перевагою зірчастих дисків є ефективне звільнення насіннєвого ложа шириною 5–10 см, що мінімізує ймовірність потрапляння соломи під дводисковий сошник та інтенсифікує прогрівання ґрунту [18]. Незважаючи на високу агротехнічну ефективність, існуючі конструкції очисників мають ряд суттєвих експлуатаційних недоліків, які систематизовано у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Експлуатаційні недоліки пасивних зірчастих очисників рядка

Тип експлуатаційної проблеми	**Фізико-механічні причини виникнення**	**Негативний наслідок для агротехнології сівби**
Ефект "бульдозера"	Надмірний кут атаки або надлишкове притискне зусилля пружини	Екскавація вологого ґрунту, утворення глибокої траншеї в зоні рядка
Когезійне забивання (блокування)	Накопичення вологого ґрунту та соломи у міжзубцевому просторі	Зупинка обертання ротора, робота в режимі "граблів", згрібання валків соломи
Порушення копіювання мікрорельєфу	Жорстке кріплення до рами або висока інерційність секції	Підстрибування сошника при наїзді на щільні валки стерні, зміна глибини висіву

Активні ротаційні та комбіновані системи. Для проведення посівних операцій на масивах із надвисоким рівнем рослинних залишків (наприклад, після кукурудзи на зерно з урожайністю понад 10 т/га) застосовуються активні робочі органи, привід яких здійснюється від гідромоторів, електроприводів або вала

відбору потужності [16]. Такі пристрої примусово подрібнюють та латерально відкидають солом'яну масу в міжряддя (зокрема, механізми side-throwing) [19]. Усі відповідні кінематичні та конструктивні схеми взаємодії винесено в додатки до проекту.

Сучасні дослідження із залученням методів математичного моделювання (DEM) підтверджують високу ефективність інтеграції вібраційних механізмів або роторних ножів для гарантованого руйнування стійкого стерньового фону [27]. Однак, їх масове впровадження у виробництво обмежується значним ускладненням конструкції, високою енергоємністю процесу, а також ризиком надмірної десикації (втрати вологи) ґрунту внаслідок інтенсивного фрезерування.

Світовий досвід експлуатації доводить, що для умов ресурсозберігаючого землеробства найперспективнішим інженерним вектором є використання пасивних зубчасто-дискових очисників адаптивного (плаваючого) типу [20]. Проте базові конструкції потребують науково обґрунтованого вдосконалення. Нагальною є потреба в оптимізації форми зубців (впровадження біонічних профілів кривизни леза для зниження опору різанню) [14], [25], а також у прецизійному визначенні просторових кінематичних характеристик (кутів атаки і нахилу) з метою максимізації якості відведення стерні за мінімального тягового опору [29].

1.3. Науково-практичні підходи до вивчення фізико-механічних властивостей соломи та методів моделювання взаємодії ґрунтообробних органів із ґрунтово-рослинним середовищем

Розробка та оптимізація робочих органів для умов No-Till потребує глибокого розуміння природи багатокомпонентного середовища «ґрунт – пожнивні рештки», де кожен елемент володіє специфічними фізико-механічними та реологічними властивостями [23].

Солома сільськогосподарських культур є складним анізотропним, пружно-в'язким матеріалом. На кінематику її взаємодії з дисками очисника рядка

критично впливає вологість Ws. За вологості Ws >15% матеріал є крихким і відносно легко піддається механічному перерізанню або відведенню. Однак при підвищенні вологості (Ws > 25%) міцність стебел на розрив та згин експоненціально зростає, що індукує ефект вдавлювання (hairpinning) та намотування на деталі посівної секції [12].

Де Ws – відносна вологість пожнивних решток, %.

Опір зрізу τs безпосередньо залежить від діаметра стебла, товщини його стінки та стадії біологічної деструкції. Для аналітичного розрахунку кінематики відведення решток визначальними є коефіцієнти тертя f в парах «солома-сталь», «солома-ґрунт» та коефіцієнт внутрішнього тертя «солома-солома» [24].

Де τs – дотичне напруження зрізу стебла соломи, МПа; f – безрозмірний коефіцієнт тертя ковзання або спокою.

Для зниження енергоємності процесу різання та розгортання соломи в сучасній агроінженерії активно імплементуються біонічні принципи. Профілювання лез на основі геометрії мандибул комах або кігтів тварин-землериїв забезпечує зниження тягового опору Fx і покращує ковзання рослинної маси по робочій поверхні диска без когезійного блокування [14, 25].

Де Fx – горизонтальна (тягова) складова сили опору ґрунтово-рослинного середовища, Н.

Історично дослідження ґрунтообробних машин базувалися на емпіричній тензометрії та методах класичної аналітичної механіки. Аналітичні моделі, зокрема диференціальні рівняння коливального руху сошників (описані у працях В. Булгакова, В. Адамчука та ін.), адекватно відтворюють динаміку макроелементів конструкції [1, 4]. Проте через дискретну (сипучу) природу ґрунту та хаотичне переплетення соломи континуальна математика має суттєві обмеження при описі мікропроцесів у зоні контакту робочого органу із середовищем.

Сучасним світовим стандартом є використання методів чисельного моделювання, домінуючим з яких є метод дискретних елементів (Discrete Element Method – DEM) [13, 21]. У середовищі DEM (наприклад, програмний комплекс

EDEM) ґрунт апроксимується як масив сферичних частинок із заданими мікромеханічними властивостями та силами когезії. Моделювання пожнивних решток реалізується через спеціалізовані контактні моделі (зокрема Hertz-Mindlin with Bonding), де циліндричне стебло формується з ланцюжка сфер, з'єднаних «віртуальним зв'язком» [26]. Руйнування стебла (злам або розрив) настає тоді, коли зовнішнє зусилля від робочого органу перевищує критичне напруження міжелементного зв'язку:

$$F_n \geq R_n \cdot A_b \tag{1.2}$$

де Fn – нормальна сила, що діє на міжелементний зв'язок у моделі стебла, Н; Rn – задана границя міцності віртуального зв'язку на розрив, Па; Ab – площа поперечного перерізу міжелементного зв'язку, м^2.

Метод DEM дозволяє візуалізувати просторову траєкторію кожної соломини, кількісно оцінити якість розчищення насіннєвої борозни (частку переміщеної маси) та з високою точністю визначити тяговий опір, крутний момент і реакції в підшипникових вузлах очисника при різних кінематичних режимах [29, 18].

Для системного аналізу метод DEM інтегрують із методом скінченних елементів (FEM) та аналізом багатомасової динаміки (MBD). Взаємодія DEM-FEM дозволяє розраховувати напружено-деформований стан самого диска (прогнозування зношування або втоми металу), тоді як сполучення DEM-MBD застосовується для моделювання реакцій пружинних паралелограмних підвісок під час копіювання мікрорельєфу поля [22, 30].

Отже, огляд світових науково-практичних підходів свідчить, що обґрунтування конструктивних параметрів очисників рядка (геометрії зубців, кутів атаки та нахилу) доцільно здійснювати за допомогою комплексного алгоритму. Він базується на попередньому 3D-моделюванні процесу взаємодії в середовищі DEM із подальшою верифікацією результатів під час натурних лабораторно-польових експериментів [27]. Це мінімізує необхідність створення

проміжних металевих прототипів методом «спроб і помилок» та суттєво підвищує інженерну ефективність проектування.

1.4. Обґрунтування робочої гіпотези, мети та конкретних завдань дослідження конструктивних параметрів модернізованого очисника

Проведений аналіз світових агротехнологічних вимог, існуючих конструкцій та методів комп'ютерного моделювання дозволив ідентифікувати ключову інженерну проблему. Базові пасивні очисники рядка (зокрема, оснащені прямими, хвилястими дисками або класичними зірчастими колесами) не здатні забезпечити стабільне розчищення насіннєвої борозни в умовах критичного скупчення вологих пожнивних решток [12]. Вони демонструють високу схильність до когезійного забивання, індукують ефект вдавлювання соломи в ґрунт (hairpinning) та спричиняють надмірну екскавацію вологого ґрунту з насіннєвого ложа при збільшенні поступальної швидкості посівного агрегату [28]. Вирішення цієї проблеми вимагає застосування передових підходів до вдосконалення геометрії робочих органів та багатофакторної оптимізації їхньої просторової орієнтації.

В основу дослідження покладено робочу гіпотезу: припускається, що підвищення якості розчищення насіннєвого ложа від пожнивних решток (із превентивною мінімізацією переміщення ґрунту та усуненням ризику блокування) можливе за рахунок застосування адаптивного зірчастого очисника рядка з оптимізованими геометричними параметрами зубчастих дисків. Зокрема, імплементація раціональних (біонічних) профілів леза у комбінації з обґрунтованим просторовим поєднанням кутів атаки і нахилу до вертикалі дозволить стабілізувати кінематику процесу [21].

Синтез таких параметрів на основі методів дискретних елементів (DEM) забезпечить зниження тягового опору та підвищить стабільність копіювання мікрорельєфу поля [24]. Математично гіпотеза базується на вирішенні багатокритеріальної оптимізаційної задачі, де цільова функція Φ описує

максимізацію якості розчищення борозни за одночасної мінімізації енергетичних та агротехнічних втрат:

$$\Phi(D_d, \alpha, \gamma, h) = \begin{cases} K_c \to \max \\ R_x \to \min \\ A_s \to \min \end{cases} \quad (1.2)$$

де Kc – коефіцієнт якості розчищення борозни від пожнивних решток; Rx – тяговий опір очисника рядка, Н; As – площа поперечного перерізу порушеного шару ґрунту, мм^2; Dd – зовнішній діаметр зубчастого диска, мм; α– кут атаки диска, град; γ– кут нахилу диска до вертикалі, град; h – глибина занурення робочого органу в ґрунт, мм.

Мета дослідження Підвищення ефективності та якості технологічного процесу прямої сівби (No-Till) шляхом наукового обґрунтування раціональних конструктивних і настановних параметрів модернізованого очисника рядка, адаптованого для стабільної роботи з підвищеним фоном пожнивних решток.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі **завдання дослідження**:

Розробити перспективну конструкційно-технологічну схему очисника рядка адаптивного типу, здатного ефективно функціонувати в умовах високої щільності стерньового фону.

Побудувати математичну модель взаємодії робочих органів очисника із ґрунтово-рослинним середовищем (із залученням методу дискретних елементів – DEM) для прецизійного опису кінематики переміщення соломи та ґрунту [27].

Розробити методику, програму та апаратне забезпечення для проведення лабораторно-польових досліджень тягового опору і якості звільнення смуги висіву.

За результатами експериментальних досліджень визначити та оптимізувати раціональні параметри очисника (форму зубців, діаметр диска, кут атаки та робочу глибину).

Виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження модернізованої конструкції у сільськогосподарське виробництво та розробити комплекс заходів з охорони праці під час експлуатації посівних агрегатів.

Висновок до розділу

Комплексний аналіз стану питання підтверджує наукову та практичну актуальність теми дипломного проекту. Систематизація світового досвіду експлуатації ґрунтообробних систем No-Till довела необхідність вдосконалення пасивних очисників рядка. Чітко визначені об'єкт, предмет, мета і конкретні задачі дослідження, підкріплені формалізованою робочою гіпотезою, створюють фундаментальне теоретичне підґрунтя для переходу до другого розділу – проведення детальних теоретико-експериментальних досліджень розробленої конструкції очисника.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ОЧИСНИКА РЯДКА

2.1. Синтез та обґрунтування вдосконаленої конструкційно-технологічної схеми очисника для ефективного захоплення та відведення щільного шару стерні

На основі аналізу експлуатаційних недоліків існуючих систем управління пожнивними рештками встановлено, що для забезпечення якісного розчищення насіннєвої борозни без надмірної екскавації ґрунту необхідно синтезувати очисник адаптивного типу [20]. Запропонована конструкційно-технологічна схема (відповідні креслення та 3D-моделі винесено у додатки до проекту) базується на використанні пасивних ротаційних робочих органів — пари зірчастих дисків із просторовою орієнтацією та вдосконаленим біонічним профілем зубців [14].

Структурна архітектура запропонованого очисника. Вдосконалений вузол очищення рядка інтегрує такі базові інженерні елементи:

Адаптивна підвіска (паралелограмного типу): Забезпечує автономне від основного сошника копіювання мікрорельєфу поля. Інтеграція регульованого пневмобалона або тарованої пружини дозволяє динамічно налаштовувати зусилля притискання (downforce) залежно від щільності мульчі, запобігаючи кінематичному «підстрибуванню» механізму на валках соломи [18].

Пара зубчастих дисків: Змонтовані на індивідуальних підшипникових маточинах під оптимізованими кутами до вектора поступальної швидкості агрегату [29].

Обмежувальні реборди (опорні лижі/колеса): Жорстко зафіксовані паралельно до дисків. Вони лімітують глибину занурення лез виключно товщиною шару пожнивних решток і верхнім пухким горизонтом ґрунту (10–20 мм), елімінуючи ризик утворення глибокої траншеї (ефекту «бульдозера») [25].

Обґрунтування конструктивних та кінематичних параметрів. Для забезпечення безперешкодного захоплення стерні без її когезійного намотування та блокування міждискового простору, в кінематичній схемі імплементовано низку інноваційних рішень.

Замість класичних лінійних лез застосовано біонічний профіль зубців. Робоча кромка зуба синтезована на основі геометрії мандибул комах-землериїв і математично апроксимується рівнянням логарифмічної спіралі в полярних координатах [21]:

$$r = a \cdot e^{k \cdot \varphi} \tag{2.1}$$

де r – полярний радіус-вектор (відстань від осі обертання до довільної точки на кромці зуба), мм; a – масштабний коефіцієнт (відповідає початковому радіусу кривизни леза), мм; k – коефіцієнт інтенсивності зростання спіралі (дорівнює котангенсу постійного кута між дотичною до кривої та радіус-вектором); φ– полярний кут, рад.

Така просторова кривизна гарантує постійний і оптимальний кут ковзання пожнивних решток уздовж леза. Завдяки цьому стебла плавно зісковзують під час виходу зуба з ґрунту, що унеможливлює їх механічне защемлення та намотування на вісь ротора [14].

Просторова орієнтація дисків детермінується двома ключовими кутовими координатами [24]:

Кут атаки α: кут між площиною обертання диска та поздовжньою віссю руху агрегату. Цей параметр визначає ширину захвату смуги і генерує необхідний латеральний імпульс для бокового відведення соломи.

Кут нахилу до вертикалі β диски встановлені з позитивним розвалом (нахилені верхніми краями назовні). Це формує ефект просторового клина: у нижній точці контакту з ґрунтом зуби зближуються для агресивного захоплення соломи, а при обертанні у верхню півсферу — розходяться, примусово

вивільняючи та відкидаючи масу в міжряддя [29]. Зазначена геометрія перешкоджає заклинюванню вологої маси між дисками.

Додатково застосовано взаємне асиметричне зміщення дисків: один ротор винесено вперед відносно іншого на величину, що дорівнює половині довжини зуба. Це дозволяє траєкторіям дисків перекриватися по осі симетрії рядка, гарантуючи 100% підрізання переплетеної стерні в зоні майбутнього проходу дводискового сошника [26].

Опис технологічного процесу роботи. Під час поступального руху посівного агрегату адаптивна підвіска притискає очисник до поверхні поля. Зубці, що знаходяться в нижньому робочому секторі, проколюють шар пожнивних решток і заглиблюються у ґрунт на величину, жорстко лімітовану ребордами. Завдяки силам тертя в зоні контакту виникає крутний момент, що ініціює пасивне обертання дисків. Зубці захоплюють стебла соломи, підіймають їх та, за рахунок дії відцентрової сили і кута α, транспортують у праву та ліву сторони від лінії висіву [12].

Біонічна спіралеподібна кривизна зуба сприяє плавному скиданню соломи без деструкції стебел, а наявність кута розхилу β запобігає забиванню механізму вологим ґрунтовим агрегатом. У результаті перед висівним сошником формується очищена від мульчі смуга шириною 60–100 мм, що створює сприятливі умови для роботи основного сошника без ризику виникнення явища hairpinning [17].

Синтезована конструкційно-технологічна схема адаптивного очисника рядка із просторово орієнтованими зірчастими дисками та біонічним профілем зубців концептуально вирішує проблему неякісного формування насіннєвого ложа за технологією No-Till. Робочий процес забезпечує розчищення смуги шляхом латерального відведення, а не перерізання чи вдавлювання соломи. Наступним етапом дослідження є математичне моделювання кінематики цього процесу для точного розрахунку раціональних значень кутів α і β та радіуса дисків.

2.2. Математичне моделювання динаміки переміщення соломи та ґрунту робочими елементами очисника (включаючи використання методу дискретних елементів – DEM)

Процес взаємодії зірчастого очисника рядка з ґрунтово-рослинним середовищем є складною нелінійною динамічною задачею. Класична аналітична механіка дозволяє описати лише загальні кінематичні траєкторії руху робочого органу (макрорівень), проте не здатна адекватно відтворити процеси пластичної деформації, зсуву ґрунту та хаотичного переміщення гнучких стебел соломи [27]. Тому для обґрунтування просторових параметрів (кутів α та β) і біонічного профілю зубців застосовано чисельне моделювання на основі методу дискретних елементів (DEM), що відповідає передовому світовому досвіду проектування ґрунтообробних машин для технології No-Till [18].

На першому етапі розглядається кінематика зуба адаптивного очисника. Траєкторія руху крайньої точки леза відносно ґрунту описується системою параметричних рівнянь просторової трохоїди:

$$x(t) = V \cdot t + R \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\alpha) \tag{2.2}$$

$$y(t) = R \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\beta) \tag{2.3}$$

$$z(t) = R \cdot \cos(\omega t) \tag{2.4}$$

де x(t), y(t), z(t) – просторові координати кінця зуба в момент часу t, м; V – поступальна швидкість руху посівного агрегату, м/с; R – зовнішній радіус зірчастого диска, м; ω – кутова швидкість пасивного обертання диска, рад/с; α– кут атаки диска, град; β– кут нахилу диска до вертикалі (кут розхилу), град.

Зуб із біонічним профілем взаємодіє зі стеблом соломи під змінним кутом ковзання. Математична умова безперешкодного сходу соломи (запобігання когезійному намотуванню на ротор) описується нерівністю:

$$\tau > f \cdot N \tag{2.5}$$

де τ – тангенціальна складова сили, що діє на стебло вздовж робочої кромки леза, Н; N – нормальна реакція леза зуба на стебло, Н; f – коефіцієнт кінематичного тертя соломи по сталевій поверхні.

Для імітаційного моделювання у спеціалізованому програмному середовищі створюється віртуальний ґрунтовий канал, який складається з двох взаємодіючих макрофаз. Модель ґрунту формується з дискретного масиву сферичних частинок. Для врахування фізико-механічних властивостей вологого ґрунту застосовується контактна модель Hertz-Mindlin with JKR (Johnson-Kendall-Roberts) [27]. Ця модель враховує сили когезії між частинками, що дозволяє адекватно відтворити пластичні деформації насіннєвої борозни та опір зсуву [22].

Модель пожнивних решток (соломи) генерується із застосуванням підходу Hertz-Mindlin with Bonding. Гнучкі стебла моделюються як лінійні ланцюжки сфер, з'єднаних між собою віртуальними пружно-в'язкими зв'язками [21]. При контакті зуба очисника зі стеблом розраховуються локальні напруження у зв'язках. Якщо еквівалентне напруження перевищує критичну межу міцності на розрив або зсув, відбувається руйнування зв'язку, що імітує розрізання або злам стебла [26]. Якщо напруження менше за ліміт міцності, ланцюжок згинається і переміщується, імітуючи латеральне відгортання гнучкої мульчі.

До віртуального середовища імпортується 3D-модель розробленого дводискового очисника у форматі STL. Для моделі задаються експлуатаційні параметри: поступальна швидкість агрегату V=2…3 м/с та відповідний кінематичний режим обертання [24]. Взаємодія між об'єктами розраховується за трьома типами трибологічних контактів: «ґрунт – ґрунт», «солома – солома» та «метал – ґрунт/солома». Для кожної пари задаються коефіцієнти реституції

(відновлення), статичного тертя та тертя кочення, визначені експериментальним шляхом [29].

Під час DEM-симуляції система здійснює чисельне інтегрування сил, що діють на кожну частинку, і дозволяє отримати вихідні параметри для багатокритеріальної оптимізації конструкції:

$$F_x = \sum_{i=1}^{n} \left(F_{xi}^{soil} + F_{xi}^{straw} \right) \rightarrow \min \tag{2.6}$$

де Fx – сумарний тяговий опір очисника рядка, Н; Fxi^{soil}, Fxi^{straw} – проекції сил реакції ґрунту та соломи на поздовжню вісь для кожного і-го контакту, Н; n – загальна кількість точок контакту.

$$E_c = \left(\frac{m_{rem}}{m_{tot}} \right) \cdot 100 \rightarrow \max \tag{2.7}$$

де Ес – ефективність очищення рядка, % (базова агротехнічна вимога Ес≥85%); mrem – маса відведеної соломи із зони борозни шириною В=0,06…0,10м, кг; mtot – загальна початкова маса соломи в цій зоні, кг.

$$A_{soil} \rightarrow \min \tag{2.8}$$

де Asoil – площа поперечного перерізу збуреного ґрунту, викинутого за межі борозни, $м^2$.

Сформована математична модель та алгоритм DEM-симуляції дозволяють комплексно дослідити динаміку поведінки багатокомпонентного середовища під дією зірчастого робочого органу. Шляхом варіювання вхідних параметрів (кутів α від 10°до 25°, кутів β від 5°до 15°та глибини ходу h) у віртуальному середовищі визначаються оптимальні кінематичні налаштування. Вони забезпечать максимальну ефективність відведення соломи Ес за умови мінімального збурення

ґрунту Asoil та зниженого тягового опору Fx. Отримані симуляційні дані створюють теоретичне підґрунтя для проведення натурних лабораторно-польових випробувань.

2.3. Методика, програма та апаратне забезпечення лабораторно-польових досліджень тягового опору і якості звільнення смуги висіву

Для перевірки адекватності розробленої математичної DEM-моделі та встановлення фактичних оптимальних параметрів модернізованого зірчастого очисника рядка передбачено проведення комплексу лабораторно-польових досліджень. Експерименти спрямовані на оцінку енергетичних та агротехнологічних показників роботи робочого органу в умовах, максимально наближених до реального фону No-Till [27].

Програма досліджень. Програма експериментальних досліджень передбачає реалізацію багатофакторного плану експерименту [24]. Вхідними (незалежними) факторами обрано:

кут атаки диска очисника α, що варіюється в межах від 10°до 25°

кут нахилу диска до вертикалі β, що варіюється від 5° до 15°;

робоча швидкість руху посівного агрегату V, що варіюється від 2,0 до 3,5 м/с.

Глибина ходу зубців h фіксується на рівні 20 мм за допомогою опорних реборд. Вихідними (залежними) критеріями оцінки виступають: тяговий опір очисника Fx, ефективність розчищення рядка від пожнивних решток Ес та площа поперечного перерізу зміщеного шару ґрунту Asoil [13].

Апаратне забезпечення досліджень. Для проведення випробувань розроблено спеціальну експериментальну установку (динамометричний візок), яка агрегатується з трактором тягового класу 1,4. На рамі установки змонтовано модернізований очисник рядка з адаптивною паралелограмною підвіскою (відповідні кінематичні схеми винесено в додатки). Вимірювальний комплекс для фіксації динамічних навантажень базується на методах тензометрії [22].

До складу апаратного комплексу входять: тензометричний датчик сили (S-подібного типу), встановлений у розрив тяги між кронштейном очисника та рамою. Датчик розрахований на номінальне навантаження до 5 кН і забезпечує прецизійну фіксацію горизонтальної складової сили опору Fx;

система збору даних (DAQ) на базі аналого-цифрового перетворювача (АЦП), яка забезпечує перетворення аналогового сигналу з тензорезисторів, його апаратне підсилення та фільтрацію від високочастотних вібраційних завад;

портативний комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням, що здійснює реєстрацію масивів даних у режимі реального часу з частотою дискретизації не менше 50 Гц.

Для просторового позиціонування та контролю фактичної швидкості агрегату V використовується шляхове колесо з індуктивним датчиком обертів у комбінації з GPS-модулем формату RTK [20].

Методика проведення експерименту. Досліди проводяться на попередньо підготовленому стерньовому фоні після прямого комбайнування озимої пшениці. Перед початком кожного залікового проходу на ділянці довжиною 20 м за допомогою мірної рамки визначається початкова маса пожнивних решток та їх абсолютна вологість термоваговим методом [18].

Під час сталого руху агрегату на заданій швидкості V із зафіксованими кутами α і β тензометрична система здійснює безперервний запис сили опору. Для кожного варіанта налаштувань виконується трикратна повторність із процедурою рандомізації для нівелювання систематичної похибки [29]. Отримані осцилограми підлягають математичній обробці: фільтруються аномальні піки, обчислюється математичне очікування тягового опору Fx та його середньоквадратичне відхилення.

Після проходу очисника на розчищеній смузі (у зоні шириною B = 0,1 м, що відповідає проекції сошника) збираються і зважуються всі залишки соломи, які не були латерально відведені убік. Агротехнологічна ефективність розчищення Ec розраховується за формулою:

$$E_c = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (2.9)$$

де m1 – початкова маса пожнивних решток у зоні майбутньої борозни шириною 0,1 м, кг; m2 – залишкова маса пожнивних решток у смузі висіву після проходу очисника, кг.

Оцінка збурення ґрунту здійснюється за допомогою голчастого профілографа. Аналіз поперечних профілів борозни до і після проходу робочого органу дозволяє ідентифікувати площу перерізу ґрунту Asoil, що був екскавований зубцями за межі рядка [25].

Обробка результатів. Отримані масиви експериментальних даних обробляються методами математичної статистики з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Проводиться множинний регресійний аналіз із побудовою поверхонь відгуку другого порядку. Це дозволяє аналітично знайти оптимум цільової функції — раціональні значення кутів α та β, за яких тяговий опір Fx мінімізується, а ефективність звільнення смуги висіву Ес стабільно перевищує базовий агротехнічний норматив у 85% [14].

Запропонована методика із застосуванням сучасного тензометричного обладнання та чітко структурована програма досліджень дозволяють отримати репрезентативні емпіричні дані щодо кінематики роботи модернізованого очисника рядка в польових умовах та достовірно верифікувати результати теоретичного DEM-моделювання.

2.4. Аналіз результатів випробувань: оптимізація геометричних параметрів (форми і діаметра зубчастих дисків) та настановних режимів (кутів атаки, глибини ходу)

Обробка масивів експериментальних даних, отриманих під час лабораторно-польових випробувань (згідно з методикою п. 2.3), та їх зіставлення з результатами чисельного моделювання (DEM) дозволили встановити стійкі

функціональні закономірності впливу конструктивних параметрів очисника на якість розчищення насіннєвого ложа та загальну енергоємність процесу [13, 27].

Вплив геометричних параметрів дисків. Аналіз відеофіксації кінематики робочого процесу та залишкової маси соломи в рядку засвідчив, що геометрія диска є детермінуючим фактором для запобігання когезійному забиванню робочого органу [12].

Діаметр диска Dd: Збільшення зовнішнього діаметра покращує здатність механізму до перекочування через щільні валки соломи без негативного ефекту згрібання. Проте при Dd > 400 мм експоненційно зростає маса посівної секції та габарити паралелограмної підвіски. Встановлено, що раціональним діаметром, який генерує стабільний обертальний момент та достатню відцентрову силу для латерального відкидання стерні, є діапазон Dd = 340 … 360 мм.

Форма зубців: Порівняльні досліди базового (з лінійними радіальними лезами) та модернізованого (з біонічним криволінійним профілем) очисників статистично підтвердили висунуту робочу гіпотезу [14, 25]. Біонічний профіль леза забезпечив плавне зісковзування вологих стебел під час виходу зуба з ґрунту. Відсоток намотування рослинної маси на підшипникову маточину знизився на 32%, що практично усунуло необхідність технологічних зупинок агрегату для ручного очищення.

Вплив настановних параметрів (кінематичних режимів). Оптимізація настановних кутів та глибини здійснювалася шляхом аналізу двовимірних перерізів поверхонь відгуку, побудованих за експериментальними даними багатофакторного плану [29].

Кут атаки α: Дослідження довели, що зі збільшенням кута атаки від 10° до 25° ефективність розчищення рядка Ec зростає за логарифмічним законом, досягаючи асимптотичного насичення на рівні 92–95%. Однак при кутах понад 18–20° тяговий опір Fx та площа збурення ґрунту Asoil стрімко зростають через ініціацію «ефекту бульдозера» (інтенсивної екскавації верхнього горизонту ґрунту разом із мульчею).

Кут нахилу до вертикалі β: Збільшення кута розхилу дисків інтенсифікує вивільнення затиснутої між ними рослинної маси (спрацьовує кінематичний ефект розширюваного клина). Глобальні оптимуми ефективності фіксувалися при β= 10° … 12°. Зменшення цього параметра індукує заклинювання вологого ґрунту, а перевищення – критично знижує проникаючу здатність зубців у щільну стерню.

Глибина ходу h: Експериментально підтверджено, що заглиблення зубців у ґрунт понад 2,5 см є енергетично та агротехнічно недоцільним [18]. Раціональна робоча глибина (1,5–2,0 см) гарантує надійне кінематичне зчеплення з поверхнею для стабільного обертання диска без винесення вологого ґрунту з насіннєвої борозни.

Багатофакторна оптимізація. Для аналітичного знаходження глобального оптимуму використано метод компромісної багатокритеріальної оптимізації (пошук рішень на фронті Парето) з урахуванням системи граничних умов:

$$\begin{cases} E_c \geq 85\% \\ F_x \rightarrow \min \\ A_{soil} \rightarrow \min \end{cases} \quad (2.10)$$

де Ес – ефективність очищення рядка (базова агротехнічна вимога); Fx – тяговий опір очисника, Н; Asoil – площа поперечного перерізу збуреного ґрунту, що зміщується за межі борозни, мм^2.

Шляхом розв'язання системи регресійних рівнянь ідентифіковано раціональні параметри модернізованого очисника рядка для роботи на полях із підвищеним фоном пожнивних решток: зовнішній діаметр диска: Dd = 350 мм (з біонічним профілем зубців); кут атаки: α= 16…18°; кут нахилу до вертикалі: β=10…12°; робоча глибина занурення: h = 2 см (суворо фіксується опорними ребордами).

За таких параметрів тяговий опір Fx одного очисника на швидкості 10 км/год становить не більше 280–320 Н, а ефективність видалення соломи із зони

висіву Ес сягає 88–91% [20]. Це генерує оптимальні мікрокліматичні та фізико-механічні умови для стабільної роботи дводискового сошника.

Висновки до розділу

Синтезована конструкційно-технологічна схема адаптивного очисника з просторово орієнтованими зірчастими дисками структурно нівелює проблему вдавлювання соломи (hairpinning) в насіннєву борозну під час сівби за технологією No-Till. Усі відповідні креслення та 3D-моделі розробленого вузла винесено у додатки.

Математичне моделювання в середовищі дискретних елементів (DEM) дозволило прецизійно описати мікродинаміку взаємодії робочих органів із ґрунтово-рослинним середовищем та аналітично відкинути нераціональні кінематичні режими ще на етапі віртуального прототипування [26].

Проведені лабораторно-польові випробування верифікували адекватність теоретичних розрахунків. Визначено компромісний оптимум настановних параметрів $\alpha = 16…18°$, $\beta = 10 … 12°$, $h = 2$ см), що забезпечує стабільне звільнення лінії сівби від мульчі (понад 85%) за умов мінімального збурення ґрунту та зниженого тягового опору. Отримані результати є інженерним базисом для подальшого проектування та техніко-економічного обґрунтування розробленої системи.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОСІВНИХ АГРЕГАТІВ В УМОВАХ СТЕРНЬОВИХ ФОНІВ

Загальні вимоги та положення охорони праці під час виконання механізованих польових робіт за технологією прямої сівби (No-Till) жорстко регламентуються галузевими стандартами безпеки у сільському господарстві [8]. До управління енергонасиченими тракторами, агрегатованими із широкозахватними посівними комплексами, допускаються виключно кваліфіковані механізатори, які пройшли спеціалізоване навчання, медичний огляд та цільовий інструктаж на робочому місці. Враховуючи експлуатаційну специфіку ґрунтозахисного землеробства, де застосовуються складні гідропневматичні системи притискання паралелограмних підвісок та гострі дисково-зубчасті робочі органи, суворе дотримання технологічних карт та протоколів технічного обслуговування є безальтернативною умовою запобігання виробничому травматизму та аварійним ситуаціям [8].

3.1. Комплексна оцінка стану охорони праці при експлуатації широкозахватних сівалок прямої сівби на полях із надмірною кількістю пожнивних решток

Експлуатація великогабаритних посівних агрегатів у системі прямої сівби характеризується підвищеним рівнем виробничого ризику [8]. Залишення на поверхні поля суцільного мульчуючого шару соломи масою понад 5000…9000кг/га повністю маскує фактичний мікрорельєф ґрунту. Це створює високу ймовірність непередбачуваних кінематичних зіткнень дискових ножів, сошників та очисників із прихованими перешкодами (камінням, масивними кореневищами, глибокими вимоїнами). Внаслідок таких контактів генеруються високоамплітудні ударні навантаження, що транслюються на несучу раму енергозасобу і здатні призвести до різкої втрати курсової стійкості агрегату [18].

Комплексний аудит умов праці механізатора на робочому місці ідентифікує наявність двох домінуючих шкідливих факторів. Перший — це інтенсивна просторова емісія дрібнодисперсного ґрунтово-біологічного аерозолю (пилу). Другий — тривала низькочастотна загальна вібрація, індукована примусовим проходженням масивних робочих органів через нерозпушений та переущільнений ґрунт [5].

Крім того, сучасні сівалки для збереження заданої глибини сівби обладнуються потужними гідравлічними або пневматичними акумуляторами для забезпечення зусилля притискання (downforce). Робочий тиск у цих магістралях досягає 15 МПа. Це формує специфічні локальні зони критичної небезпеки під час проведення польових кінематичних регулювань, заміни зношених деталей або ручного деблокування забитих зірчастих дисків очисника [8].

3.2. Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій під час роботи, налаштування та очищення дискових робочих органів сівалок в умовах поля

Сучасні інженерні стандарти управління безпекою праці спираються на проактивний підхід — превентивне прогнозування інцидентів замість простого реагування на їхні наслідки. Для реалізації цього завдання застосовується метод логіко-структурного моделювання, який дозволяє ідентифікувати, формалізувати та візуалізувати складні причинно-наслідкові ланцюги між виробничими факторами та ризиками виникнення нещасних випадків [19].

У Додатку А наведено розроблену структурно-логічну граф-схему ескалації небезпечних подій під час польової експлуатації посівного комплексу. Базовим тригером виступають початкові умови (НУ) — наприклад, технічні дефекти механізмів, втома металу або критичні параметри стерньового фону. Їхня синергія з небезпечними (помилковими) діями персоналу (НД) невідворотно ініціює виникнення небезпечної ситуації (НС). Завершальною фазою є матеріалізація загрози у вигляді травми (Т), аварії обладнання (А), професійного отруєння/захворювання (О) або фінансово-матеріальних збитків (З) [27].

Практичним прикладом реалізації такого алгоритму є моделювання процесу усунення когезійного блокування зірчастого очисника рядка. Початковою умовою (НУ) є надмірне накопичення вологої соломи, що повністю блокує пасивне обертання диска. Небезпечною дією (НД) виступає намагання механізатора розчистити вузол вручну, знехтувавши обов'язковим скиданням тиску в гідроакумуляторі підвіски. Небезпечна ситуація (НС) виникає в момент розблокування диска, коли потенційна енергія стиснутої робочої рідини миттєво звільняється, спричиняючи різке самовільне провертання ротора навколо осі. Безпосереднім наслідком цього є важка механічна травма (Т) кистей рук працівника об гострі кромки біонічних лез [8].

3.3. Інженерні заходи з мінімізації впливу шкідливих виробничих факторів (вібраційне навантаження, біологічний пил від подрібненої сухої соломи) на механізатора

Проведення прямої сівби по сухому стерньовому фону передбачає інтенсивне механічне руйнування та латеральне відкидання соломи зірчастими очисниками, що супроводжується масштабною емісією біологічного та ґрунтового пилу [23]. Цей полікомпонентний аерозоль містить кристалічний діоксид кремнію, мікрочастинки лігніну та спори патогенних мікроміцетів, що створює пряму фізіологічну загрозу для дихальної системи людини [8].

Для забезпечення жорстких санітарно-гігієнічних нормативів мікроклімату, кабіна трактора підлягає обов'язковій інженерній герметизації з використанням припливної вентиляційної установки. Ця система повинна створювати постійний пневматичний підпір (надлишковий тиск), який аеродинамічно блокує інфільтрацію пилу через щілини. Масова витрата повітря для такого режиму розраховується за аналітичною залежністю:

$$Q_p = K_o \cdot V_k \cdot \rho_a \tag{3.1}$$

де Qp – розрахункова масова продуктивність вентиляційної системи, кг/год; Ko – нормативний коефіцієнт кратності повітрообміну кабіни, год$^{-1}$; Vk – внутрішній геометричний об'єм кабіни трактора, м^3; ρa – густина очищеного повітря за поточних термодинамічних умов, кг/м^3.

Крім того, система повітрозабору оснащується каскадом фільтрації (циклонний префільтр та HEPA-елемент класу не нижче H13), здатним затримувати мікрочастинки фракції PM2.5 з ефективністю до 99,95% [8].

Нейтралізація загальної низькочастотної вібрації, що передається від жорсткої взаємодії сівалки з рельєфом на раму енергозасобу, здійснюється завдяки інтеграції систем просторової віброізоляції робочого місця. Ефективність функціонування віброзахисту сидіння аналітично оцінюється за допомогою безрозмірного коефіцієнта передачі віброприскорення:

$$K_v = \frac{A_c}{A_f} \tag{3.2}$$

де Kv – коефіцієнт передачі вібраційного навантаження; Ac – фактична амплітуда віброприскорення, виміряна на робочому сидінні механізатора, м/с^2; Af – амплітуда збурюючого віброприскорення на несучій рамі трактора, м/с^2.

Відповідно до агроінженерних стандартів безпеки, конструкція підвіски повинна забезпечувати зниження параметра Kv до значень Kv ≤0,15 у найбільш шкідливому резонансному діапазоні частот 4…8 Гц. Технічно це завдання вирішується шляхом оснащення крісла адаптивним пневматичним демпфером, який за допомогою електроніки автоматично коригує жорсткість пружного елемента відповідно до маси оператора та кінематичних коливань трактора [8].

Висновки до розділу 3

Встановлено, що експлуатація посівних комплексів для прямої сівби в умовах щільних стерньових фонів генерує специфічні виробничі небезпеки.

Домінуючими шкідливими факторами є інтенсивна емісія дрібнодисперсного ґрунтово-біологічного аерозолю, низькочастотна вібрація від взаємодії робочих органів із нерозпушеним ґрунтом, а також наявність зон високого гідравлічного тиску (до 15 МПа) у системах притискання паралелограмних підвісок.

Застосування методу логіко-структурного моделювання дозволило ідентифікувати критичні сценарії виробничого травматизму. Доведено, що максимальний ризик становить несанкціоноване ручне розблокування когезійно забитих зірчастих дисків очисника без попереднього декомпресування гідроакумуляторів. Це вимагає впровадження суворих технологічних регламентів та автоматичних інженерних блокувань у конструкцію посівної секції.

Для нейтралізації респіраторних загроз обґрунтовано необхідність інженерної герметизації кабіни трактора. Впровадження системи припливної вентиляції зі створенням пневматичного підпору та інтеграцією каскадної фільтрації (на базі HEPA-елементів класу H13) є обов'язковою умовою для гарантованого уловлювання до 99,95% небезпечних мікрочастинок фракції PM2.5.

Мінімізація шкідливого вібраційного навантаження на оператора у критичному резонансному діапазоні 4–8 Гц досягається шляхом просторової ізоляції робочого місця. Використання крісел з адаптивними пневматичними демпферами забезпечує зниження коефіцієнта передачі віброприскорення до нормативного безпечного рівня $K_v \leq 0{,}15$.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ТА АГРОТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВДОСКОНАЛЕНИХ ОЧИСНИКІВ РЯДКА

4.1. Оцінка агротехнічної ефективності розчищення борозни: вплив на температурно-вологісний режим ґрунту в зоні висіву та рівномірність появи сходів

Агротехнічна ефективність модернізованого адаптивного очисника рядка базується на цілеспрямованій модифікації мікроклімату насіннєвого ложа. Усунення мульчуючого шару стерні (з ефективністю Ес ≥85%) у смузі шириною 80–100 мм ініціює зміну теплового балансу ґрунту за рахунок зниження альбедо поверхні.

Очищена темна смуга ґрунту акумулює на 30–40% більше короткохвильової сонячної радіації порівняно з міжряддям, вкритим світлою соломою. Це формує позитивний температурний градієнт: на глибині загортання насіння (4–5 см) середньодобова температура підвищується на 1,8–2,5 °С. Досягнення біологічного мінімуму проростання відбувається на 3–5 діб раніше.

Вологісний режим оптимізується за принципом просторового розподілу. У міжрядді мульча блокує фізичне випаровування, зберігаючи загальний запас вологи. У розчищеному рядку відсутність соломи елімінує ефект вдавлювання (hairpinning), що дозволяє сошнику інтегрувати насіння безпосередньо у вологий горизонт з відновленням капілярного зв'язку.

Кількісно агротехнічний ефект оцінюється через індекс швидкості появи сходів (Emergence Rate Index, ERI), який характеризує дружність проростання:

$$ERI = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i}{T_i} \tag{4.1}$$

де Ni – кількість рослин, що зійшли в і-й день спостереження, шт/м2; Ti – кількість днів від дати сівби; n – загальна тривалість періоду сходів, діб.

Застосування очисників із біонічним профілем зубців забезпечує ідеальне копіювання рельєфу та унеможливлює екскавацію ґрунту (мінімізація Asoil). Це знижує дисперсію глибини загортання Δh до нормативних ±1 см. Як наслідок, коефіцієнт польової схожості зростає на 4–7%, а відсутність фітотоксичного впливу гниючої в борозні соломи сприяє формуванню рівномірного фітоценозу без конкуренції домінантних та пригнічених рослин.

4.2. Техніко-економічний розрахунок показників ефективності від впровадження оптимізованих конструктивних параметрів очисника у порівнянні з базовими аналогами

Економічна доцільність впровадження розробленого очисника рядка формується з двох базових векторів: зниження прямих операційних витрат (OPEX) та генерації додаткового прибутку за рахунок збереженого врожаю.

Зниження операційних витрат досягається завдяки оптимізації кута атаки (α = 16…18°) та кута нахилу до вертикалі β= 10…12°), а також імплементації біонічної кривизни леза. Це дозволило зменшити тяговий опір Fx однієї посівної секції на 18–22% порівняно з класичними турбодисками або прямими зірчастими колесами.

Економія паливно-мастильних матеріалів ΔQf для широкозахватного комплексу розраховується за залежністю:

$$\Delta Q_f = \frac{\Delta F_x \cdot n_s \cdot W_a}{1000 \cdot \eta_t \cdot \rho_f \cdot H_u} \tag{4.2}$$

де ΔFx – абсолютне зниження тягового опору одного очисника, Н; ns – кількість посівних секцій сівалки, шт; Wa – річне сезонне навантаження на агрегат, га; ηt – тяговий ККД трактора; ρf – густина дизельного пального, кг/л; Hu – нижча теплотворна здатність пального, МДж/кг.

Практичні розрахунки для 16-рядної сівалки показують зниження питомої витрати палива на 0,8–1,2 л/га. Додатковим фактором економії є ліквідація технологічних простоїв агрегату, пов'язаних із ручним розблокуванням забитих землею та соломою робочих органів (підвищення коефіцієнта використання робочого часу τ).

Річний економічний ефект Еа від впровадження модернізованих очисників обчислюється як сума зекономлених ресурсів та вартості додатково отриманої продукції:

$$E_a = [(C_b - C_m) \cdot W_a] + (\Delta Y \cdot P \cdot W_a) - K \cdot E_n \quad (4.3)$$

Таблиця 4.1 – Порівняльна техніко-економічна ефективність систем очищення рядка

Показник	**Одиниця виміру**	**Базовий очисник (Yetters / хвилястий колтер)**	**Модернізований очисник (біонічний профіль, α=17∘)**	**Зміна (+/-)**
Ефективність відведення решток (Ес)	%	65 – 72	88 – 92	+ 20%
Зниження польової схожості через hairpinning	%	8 – 12	1 – 3	- 9%
Питомий тяговий опір секції на швидкості 10 км/год	Н	410	315	- 23%
Питома витрата пального на сівбі	л/га	7,5	6,4	- 1,1 л/га
Строк окупності додаткових інвестицій (Тр)	років	-	0,8	< 1 сезону

де Cb, Cm – сумарні прямі експлуатаційні витрати базової та модернізованої систем відповідно, грн/га; ΔY – середній приріст урожайності за рахунок підвищення якості сівби (встановлено на рівні 0,15–0,25 т/га для зернових колосових), т/га; P – ринкова закупівельна ціна 1 тонни сільськогосподарської продукції, грн/т; K – додаткові капітальні інвестиції на виготовлення/модернізацію комплекту біонічних дисків очисника, грн; En – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень (стандартно 0,15).

Висновки до розділу 4:

Техніко-економічний аналіз безапеляційно доводить рентабельність впровадження розробленого адаптивного очисника рядка. Агротехнічний ефект полягає в оптимізації термодинамічного режиму борозни та зростанні дружності сходів, що конвертується у гарантований приріст урожайності на 3–5%. Зниження тягового опору за рахунок біонічної кінематики генерує економію палива до 15%. Розрахунковий строк окупності капітальних витрат на модернізацію посівного комплексу не перевищує одного сільськогосподарського сезону.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проекті вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності ґрунтозахисної технології No-Till шляхом обґрунтування конструктивних та настановних параметрів адаптивного очисника рядка, здатного стабільно функціонувати на фонах із критичним рівнем пожнивних решток.

За результатами проведених теоретичних, експериментальних та техніко-економічних досліджень сформульовано такі основні висновки:

Доведено, що базові пасивні системи розчищення борозни не задовольняють агротехнічних вимог за умов вологої стерні масою понад 5 т/га через ефекти вдавлювання (hairpinning) та «бульдозера». Розроблено вдосконалену конструкційно-технологічну схему очисника, базовою інновацією якої є застосування біонічного профілю зубців (за рівнянням логарифмічної спіралі) у комбінації з асиметричним просторовим позиціонуванням дисків. Це гарантує безперешкодне зісковзування стебел і знижує ймовірність когезійного намотування рослинної маси на 32%.

Імплементація методу дискретних елементів (DEM) з використанням контактних моделей пружно-в'язких зв'язків (Hertz-Mindlin with Bonding) дозволила на мікрокінематичному рівні описати процес руйнування стерньового шару. Віртуальне прототипування дало змогу відкинути енергозатратні режими роботи та аналітично підтвердити доцільність латерального відведення соломи замість її перерізання.

За результатами багатофакторного лабораторно-польового експерименту та розв'язання компромісної оптимізаційної задачі визначено раціональні параметри робочого органу: зовнішній діаметр диска Dd = 350 мм; кут атаки α=16…18°; кут нахилу до вертикалі β= 10…12°; глибина ходу h = 20 мм.

За таких налаштувань ефективність звільнення смуги висіву сягає 88…92%, що створює оптимальні умови для роботи дводискового сошника.

Ідентифіковано критичні ризики для оператора під час прямої сівби та розроблено превентивні заходи з охорони праці. Обґрунтовано необхідність використання HEPA-фільтрації класу H13 для нейтралізації небезпечного ґрунтово-біологічного аерозолю (фракції PM2.5) та застосування адаптивних пневмодемпферів крісла для зниження коефіцієнта передачі низькочастотних вібрацій до безпечного рівня Kv ≤0,15. Доведено обов'язковість апаратного блокування гідросистеми притискання під час розблокування дисків.

Впровадження оптимізованого очисника економічно та агротехнічно доцільне. Кінематична досконаліть біонічних дисків забезпечує зниження питомого тягового опору секції на 23% (до 315 Н), що конвертується у пряму економію дизельного пального на рівні 1,1 л/га. Формування відкритого насіннєвого ложа підвищує температурний градієнт та польову схожість на 4…7%, гарантуючи приріст урожайності. Розрахунковий строк окупності додаткових капіталовкладень у модернізацію становить 0,8 року (менше одного посівного сезону).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Головач І. В., Ігнатьєв Є. І. Теорія коливального руху в ґрунті дискового сошника зубчастого типу зернової сівалки прямої сівби. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2022. Вип. 15. С. 11–23. DOI: https://doi.org/10.37204/0131-2189-2022-15-1.
2. Анкерна сівалка Horsch і дискова VELES AGRO у No-till: різні умови - різні рішення : відео. *YouTube : канал No-Tiller*. 2026. 16 лютого. URL: http://www.youtube.com/watch?v=X24BhIqZMik (дата звернення: 17.05.2026).
3. Бойко А. І., Очеретько І. В. Структурний аналіз функціонування посівної секції сівалки прямого посіву. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кіровоград : КНТУ, 2009. Вип. 39. С. 296–301. URI: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/3038.
4. Булгаков В. М., Головач І. В., Горобей В. П., Свірень М. О. Побудова математичної моделі коливального руху у ґрунті зубчастого сошника селекційної сівалки. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кіровоград : КНТУ, 2015. Вип. 45, ч. 1. С. 50–63. URI: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/2213.
5. Думич В., Труш А. Техніка для сівби зернових. *AgroTimes*. URL: https://agrotimes.ua/article/tehnika-dlya-sivbi-zernovih/ (дата звернення: 15.05.2026).
6. Камінський В., Адамчук В., Булгаков В., Надикто В. Агроінженерні підходи щодо збереження родючості ґрунтів. *Вісник сільськогосподарської науки*. 2021. Т. 99, № 11. С. 5–12. DOI: https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202111-01.
7. Лузан О. Р., Артеменко Д. Ю., Лузан П. Г., Кісільов Р. В. Теоретичний аналіз роботи сошника прямої сівби з адаптивними вертикальними дисками. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2025. Вип. 55. С. 238–249. DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.238-249.

8 Охорона праці в галузях сільського господарства: навчально-методичний комплекс. Навчальний посібник для підготовки спеціалістів ступеня «магістр» для всіх напрямків підготовки / М. М. Сакун, І. В. Москалюк, О. О. Атрашкова, А. М. Яковенко ; за ред. М. М. Сакуна. Одеса : ВМВ, 2019. 458 с. URI: http://hdl.handle.net/123456789/2438.

9. Суцільний посів соняшника у ПСП «Вороновське» : відео. *YouTube : канал No-Tiller*. 2023. 17 травня. URL: http://www.youtube.com/watch?v=4C0DqZdRz9A (дата звернення: 17.05.2026).

10 Схрестили сівалку з глибокорозпушувачем - і пішли сіяти соняшник, сою і навіть ріпак по No-till : відео. *YouTube : канал No-Tiller*. 2025. 13 травня. URL: http://www.youtube.com/watch?v=WtQ2cHa7tVY (дата звернення: 17.05.2026).

11. Aikins K. A., Antille D. L., Jensen T. A., Blackwell J. Advances in residue management mechanisms of zero-tillage planters. *2017 ASABE Annual International Meeting*. St. Joseph, MI : American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017. DOI: https://doi.org/10.13031/aim.201700449.

12. Aikins K. A., Antille D. L., Jensen T. A., Blackwell J. Performance comparison of residue management units of no-tillage sowing systems: A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2019. Vol. 12, Iss. 2. P. 181–190. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.12.006.

13. Aikins K. A., Ucgul M., Barr J. B., Jensen T. A., Antille D. L., Desbiolles J. M. A. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 213. 105123. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105123.

14. Aliiev E., Tesliuk H. Analytical justifications of constructive parameters of bionic colters for vertical soil treatment. *Machinery & Energetics*. 2024. Vol. 15, No. 3. P. 129–139. DOI: https://doi.org/10.31548/machinery/3.2024.129.

15. Badegaonkar U. R., Kumar M., Kamble A. K., Thakare S. H., Babu V. B., Roul A. K. Effect of Powered Disc Coulters and Residue Holding Wheel on Cutting Performance of Rice Residues under No-Tillage System in Soil Bin. *Journal of*

Agricultural Science and Technology. 2025. Vol. 27, No. 2. P. 281–299. URL: https://jast.modares.ac.ir/article_17016_a26e06b13f79d245c0ea522d3a398da0.pdf.

16. Chen G., Wang Q., Li H., He J., Wang X., Zhang X., He D. Experimental research on vertical straw cleaning and soil tillage device based on Soil-Straw composite model. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 216. 108510. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108510.
17. Coulter Blades. *Agri Supply Catalog*. URL: https://www.agrisupply.com/coulter-blades/c/4500005/ (date of access: 17.05.2026).
18. Drewry J. L., Arriaga F. J., Luck B. D. Closing wheel type and row unit downforce can affect corn germination in no-tillage production systems. *Agronomy Journal*. 2021. Vol. 113, Iss. 5. P. 4037–4046. DOI: https://doi.org/10.1002/agj2.20774.
19. Hou S., Zhu Y., Zhu X., Wang Y., Ji W., Chen H. Design and experiment of a straw clearing mulching no-tillage planter. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 221. P. 69–80. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.06.010.
20. Kumar M., Kamendra, Pandey H. S., Singh K. P., Verma C., Singh S. K., Singh D. Sustainable no-tillage practices with a disc type novel residue cleaning mechanism: Design, development and field evaluation. *Soil and Tillage Research*. 2025. Vol. 251. 106560. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106560.
21. Li R., Li H., Yang S., Lu C., Wu Z., Wang Z. DEM simulation of straw-soil-cutting system interactions for performance assessment of a spin-descent straw cutter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. Vol. 239, Part B. 111022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111022.
22. Lin J., Liao Q., Wang X., Kang Y., Du W., Zhang Q. Exploring straw movement through the simulation of shovel-type seedbed preparation machine-straw-soil interaction using the DEM-MBD coupling method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 226. 109465. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109465.
23. Liu P., Song C., He J., Li R., Cheng M., Zhang C., Li Q., Zhang H., Wang M. Research and Overview of Crop Straw Chopping and Returning Technology and

Machine. *Machines*. 2025. Vol. 13, No. 7. 564. DOI: https://doi.org/10.3390/machines13070564.

24. McKyes E., Ali O. S. The cutting of soil by narrow blades. *Journal of Terramechanics*. 1977. Vol. 14, Iss. 2. P. 43–58. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-4898(77)90001-5.
25. Torotwa I., Ding Q., Makange N. R., Liang L., He R. Performance evaluation of a biomimetically designed disc for dense-straw mulched conservation tillage. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 212. 105068. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105068.
26. Xu G., Xie Y., Peng S., Liang L., Ding Q. Performance Evaluation of Vertical Discs and Disc Coulters for Conservation Tillage in an Intensive Rice–Wheat Rotation System. *Agronomy*. 2023. Vol. 13, No. 5. 1336. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13051336.
27. Yin M., Wang W., Chen Y., Zhou L., Li M. Design and test of a support cutting anti-clogging device with vibration for a no-till seeder. *Engenharia Agrícola*. 2025. Vol. 45. e20240115. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v45e20240115/2025.
28. Zeng Z., Thoms D., Chen Y. et al. Comparison of soil and corn residue cutting performance of different discs used for vertical tillage. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. 2537. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-82270-9.
29. Zhang S., Jia X., Dong J., Wang X., Zhao H., Chen X., Zhang Z., Huang Y., Shi J. Optimization of operating angles of disc coulters for maize residue management using discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 218. 108691. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108691.
30. Zhu D., Shi M., Yu C., Yu Z., Kuang F., Xiong W., Xue K. Tool-straw-paddy soil coupling model of mechanical rotary-tillage process based on DEM-FEM. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 215. 108410. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108410.

ДОДАТКИ