

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: «Дослідження впливу профілю хвилястого диска (коултера) на ступінь кришення ґрунту та збереження вологи»

Виконав: студент 3 курсу, групи 31к-ім
освітньої програми бакалавра
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Ярослав ЦИБЕЛЬ
(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)

ЦИБЕЛЮ Ярославу Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження впливу профілю хвилястого диска (коултера) на ступінь кришення ґрунту та збереження вологості»

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 науково-технічні джерела із землеробської механіки й консерваційного обробітку, профільні публікації щодо геометрії хвилястих дисків і турбо-коултерів посівних комплексів, матеріали з тривимірного чисельного DEM-моделювання деформацій зв'язних середовищ, довідкові дані про гідротермічний режим агрофонів за технологіями Strip-Till і No-Till, нормативна документація з охорони праці та заводські технічні паспорти дискових сошникових систем.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; науково-технічний аналіз тенденцій розвитку вологоощадного обробітку та конструкцій дискових коултерів; теоретичне моделювання (кінематика, DEM-прогнозування тягового опору) та експериментальне оцінювання взаємодії хвилястого диска з ґрунтовим середовищем; обґрунтування системи управління охороною праці та моделювання небезпек при експлуатації посівних агрегатів; оцінка переваг розробленого хвилястого профілю коултера сівалки та розрахунок його економічної ефективності від паливозбереження; 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 науково-технічних джерел, аналіз передового світового досвіду та підготовка вступу	01.12.2025 р.	
2.	Розділ 1. Науково-технічний аналіз тенденцій розвитку вологоощадного обробітку та конструкцій дискових коултерів	25.12.2025 р.	
3.	Розділ 2. Теоретичне моделювання (кінематика, DEM-прогнозування тягового опору) та експериментальне оцінювання взаємодії хвилястого диска з ґрунтовим середовищем	02.02.2026 р.	
4.	Розділ 3. Обґрунтування системи управління охороною праці та моделювання небезпек при експлуатації посівних агрегатів	01.04.2026 р.	
5.	Розділ 4. Оцінка переваг розробленого хвилястого профілю коултера сівалки та розрахунок його економічної ефективності від паливозбереження	01.05.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини роботи (оформлення графіків регресії, креслень 3D-моделі диска та експорту візуалізацій просторових швидкостей часток із системи DEM)	12.05.2026 р.	
7	Представлення бакалаврської роботи керівнику на перевірку, контроль унікальності та остаточне оформлення пояснювальної записки	20.05.2026р.	

Студент

(підпис)

Ярослав ЦИБЕЛЬ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Іван ЛІСОВИЙ

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ВОЛОГООЩАДНОГО ОБРОБІТКУ ТА КОНСТРУКЦІЙ ДИСКОВИХ КОУЛТЕРІВ	7
1.1. Дослідження впливу ресурсозберігаючих систем Strip-Till та No-Till на стабілізацію гідротермічного режиму ґрунту	7
1.2. Порівняльний аналіз геометричних профілів і умов функціонування сучасних прорізних дисків посівних комплексів	9
1.3. Оцінка закономірностей формування мікрорельєфу та шорсткості поверхні поля за дискового обробітку	12
1.4. Обґрунтування робочої гіпотези та постановка конкретних інженерно-дослідних завдань	15
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ХВИЛЯСТОГО ДИСКА З ҐРУНТОВИМ СЕРЕДОВИЩЕМ	17
2.1. Математичний опис кінематики руху та просторової геометрії робочої поверхні коултера	17
2.2. Моделювання силових факторів взаємодії двофазних сошникових систем та DEM-прогнозування тягового опору	20
2.3. Обґрунтування інструментального комплексу та методики випробувань профілів дисків у лабораторному ґрунтовому каналі	25
2.4. Емпіричні закономірності впливу конфігурації хвиль і швидкісних режимів на ступінь кришення та збереження вологи	28
Висновки до розділу	31
РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ НЕБЕЗПЕК ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОСІВНИХ АГРЕГАТІВ	32
3.1. Ідентифікація виробничих небезпек та шкідливих чинників при обслуговуванні дискових робочих органів	32

3.2. Математичне моделювання деструктивних сценаріїв та оцінка відмов швидкісних сошникових систем	33
3.3. Інженерно-технічні заходи з техніки безпеки, виробничої санітарії та забезпечення цивільного захисту в польових умовах	34
Висновки до розділу	35
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ПЕРЕВАГ РОЗРОБЛЕНОГО ХВИЛЯСТОГО ПРОФІЛЮ КОУЛТЕРА СІВАЛКИ ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	36
4.1. Обґрунтування агротехнічних переваг запропонованої геометрії хвиль диска для процесів кришення та локального вологозбереження	36
4.2. Розрахунок капітальних інвестицій на модернізацію профілю та визначення річного економічного ефекту від паливозбереження	36
Висновки до розділу	38
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40
ДОДАТКИ	44

ВСТУП

Сучасний розвиток агроінженерних технологій в Україні та світі відбувається в умовах прогресуючих кліматичних змін, що супроводжуються тривалими посушливими періодами та деградацією структури орного горизонту. Традиційний полицевий обробіток із суцільним обертанням скиби призводить до критичних втрат продуктивної капілярної вологи, руйнування водоміцних агрегатів та інтенсифікації ерозійних процесів. У зв'язку з цим стратегічним напрямом механізації рослинництва є перехід до ресурсозберігаючих технологій *Strip-Till* та *No-Till*, які базуються на принципах мінімального механічного впливу на ґрунтовий масив та збереження захисного екрана з пожнивних рештків.

У цих технологіях першим і найбільш навантаженим елементом посівного комплексу є прорізний диск (коултер). На високих швидкостях руху сучасних агрегатів (10...15 км/год) існуючі конструкції коултерів стикаються із серйозним технологічним протиріччям. З одного боку, вони повинні забезпечувати високу якість локального подрібнення ґрунту під насіннєве ложе. З іншого боку, широкохвильові профілі на високій швидкості діють як турбіна — енергійно викидають зволожений ґрунт із борозни, руйнують капіляри та викликають значні втрати внутрішньогрунтової вологи.

Таким чином, розробка та обґрунтування параметрів оптимізованого дрібнохвильового профілю коултера, який забезпечує якісне крошення ґрунту без латерального відкидання часток і з ефектом утримання вологи *in-situ*, є актуальним інженерно-технічним завданням для вітчизняного агропромислового комплексу.

Об'єкт дослідження — процес механічної взаємодії хвилястого прорізного диска (коултера) посівного комплексу з двофазним середовищем «ґрунт–рослинні рештки» при швидкісних режимах роботи.

Предмет дослідження — закономірності впливу геометричної конфігурації хвиль диска (кількості, амплітуди, кроку) та швидкості руху агрегату на питомий тяговий опір, фракційний ступінь кришення ґрунту та рівень збереження капілярної вологи в посівній смузі.

РОЗДІЛ 1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ВОЛОГООЩАДНОГО ОБРОБІТКУ ТА КОНСТРУКЦІЙ ДИСКОВИХ КОУЛТЕРІВ

1.1. Дослідження впливу ресурсозберігаючих систем Strip-Till та No-Till на стабілізацію гідротермічного режиму ґрунту

Сучасний розвиток агроінженерної науки в галузі механізації рослинництва базується на парадигмі мінімізації механічного впливу на ґрунтовий масив з метою збереження його біологічної активності та оптимізації водно-фізичних властивостей [17]. Перехід від класичної полицевої оранки до мінімального (*Strip-Till*) та нульового (*No-Till*) обробітку зумовлений необхідністю запобігання деградації структури ріллі та стабілізації її гідротермічного потенціалу в умовах прогресуючих кліматичних змін [22]. Інтенсивний механічний обробіток із суцільним обертанням скиби призводить до руйнування водомічних макроагрегатів, інтенсифікації мінералізації гумусу та різкого зростання дифузійного випаровування вологи [5; 28].

Фізико-механічна сутність стабілізації гідротермічного режиму за умов застосування консерваційних технологій полягає у зміні умов тепло- та вологообміну на межі розділу середовищ «атмосфера–ґрунт». Основним чинником виступає наявність мульчувального екрана з пожнивних рештків попередника [9]. Математично інтенсивність випаровування вологи з поверхні поля E_v можна описати трансформованим рівнянням водного балансу верхнього шару ґрунту:

$$E_v = E_0 \cdot (1 - k_m \cdot \omega_m) \cdot e^{-\beta \cdot M_r} \quad (1.1)$$

де E_0 — потенційне випаровування з оголеної поверхні ґрунту за даних метеорологічних умов, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; k_m — коефіцієнт, що враховує архітектуру та затіняючу здатність рослинних рештків; ω_m — відносна площа покриття

поверхні поля мульчею ($\omega m = 0 \dots 1$); β — емпіричний коефіцієнт згасання дифузійного потоку вологи; M_r — питома маса рослинних рештків на одиницю площі, кг/м².

При впровадженні технології *No-Till* забезпечується суцільне покриття поверхні ($\omega \geq 0,85$), що мінімізує пряме сонячне опромінення та знижує вітрове навантаження на ґрунт [6; 25]. У системі *Strip-Till* реалізується концепція гетерогенного агрофону, де обробітку піддається лише технологічна смуга шириною 15 ... 25 см, а міжряддя залишаються замульчованими [13]. Це дозволяє локально накопичувати та утримувати продуктивну капілярну вологу. Дослідженнями доведено, що збереження рослинного екрана підвищує об'ємний вміст вологи в орному горизонті на 14...20% порівняно з традиційною оранкою [11; 13].

Температурний режим ґрунтового профілю тісно пов'язаний з його вологістю та термоізоляційними властивостями поверхневого шару. Рослинна мульча виступає як тепловий демпфер. Динаміка теплового потоку в ґрунті q під дією сонячної радіації описується класичним законом Фур'є:

$$q = -\lambda_s \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.2)$$

де λ_s — коефіцієнт теплопровідності ґрунтового масиву, Вт/(м·К); $\frac{\partial T}{\partial z}$ — градієнт температури по глибині ґрунтового профілю z , К/м.

Коефіцієнт теплопровідності λ_s є функцією від щільності об'ємної маси ґрунту та його пористості, які суттєво відрізняються за різних систем обробітку [10]. Непорушена структура ґрунту за *No-Till* має вищу щільність і капілярність, проте наявність поверхневої мульчі з низьким значенням власної теплопровідності суттєво зменшує амплітуду добових коливань температури [24]. У спекотні періоди температура в зоні кореневої системи під мульчею є на 3...5°C нижчою порівняно з оголеною ріллею, що нівелює термічний стрес культур [12; 13].

У технології *Strip-Till* досягається оптимальний інженерно-технологічний компроміс. Очищена від пожнивних рештків смуга має менший коефіцієнт відбиття сонячної радіації (альbedo), завдяки чому навесні вона прогрівається значно швидше за суцільний *No-Till* [13; 18]. Це забезпечує енергетичні передумови для швидкого проростання насіння у сформованому коултерами ложі, тоді як замульчовані міжряддя продовжують виконувати вологозберігаючу та термостабілізуючу функції [12].

Збереження структури ґрунтових агрегатів є базовою умовою підтримки оптимальних гідротермічних показників. Механічна дія дискових робочих органів у консерваційному землеробстві повинна бути строго локалізованою, щоб запобігти надмірному подрібненню структурних елементів і утворенню ерозійно-небезпечних часток [27; 29].

Ресурсозберігаючі системи *Strip-Till* та *No-Till* забезпечують стабілізацію гідротермічного режиму ґрунту шляхом мінімізації конвективно-дифузійного випаровування вологи (на 14...20%) та демпфування екстремальних температурних коливань орного горизонту (на 3.. 5 °C). Основним механізмом керування цими процесами є створення гетерогенного агрофону, де якість підготовки насінневого ложа та ступінь збереження мульчі безпосередньо залежать від геометричних і кінематичних параметрів робочих органів посівних комплексів.

1.2. Порівняльний аналіз геометричних профілів і умов функціонування сучасних прорізних дисків посівних комплексів

У системах консерваційного землеробства (*No-Till*, *Strip-Till*) прорізний диск (коултер) є першим технологічним елементом, що працює у надважких умовах: за високої щільності ґрунту та наявності густого шару пожнивних решток. Геометричний профіль диска визначає кінематику його взаємодії з агрофоном, безпосередньо впливаючи на якість перерізання соломи, питомий

тяговий опір, ступінь локального кришення ґрунту та збереження капілярної вологи [3; 18].

У світовій практиці проектування посівних комплексів виділяють три основні групи геометричних профілів дисків [3; 19; 30]:

1. Класичні гладкі диски (Smooth Coulters). Геометрія: Плоский диск із суцільною рівною різальною кромкою та двобічним або одnobічним заточуванням.

Умови функціонування та механізм дії: Працюють за принципом чистого розрізання (зсуву) матеріалу. Ефективні виключно на сухих, твердих агрофонах із крихкими рослинними рештками [14].

Переваги: Мінімальний тяговий опір та крутний момент; бокове розкидання ґрунту практично відсутнє, що виключає оголення вологих нижніх шарів [7].

Недоліки: Вимагають надвисокого вертикального зусилля заглиблення (*downforce*). На вологих ґрунтах або за наявності щільного мульчувального шару не перерізають, а вдавлюють соломі в борозну (ефект *hairpinning*), що погіршує контакт насіння з ложем [30].

2. Вирізні та зубчасті диски (Notched and Toothed Coulters). Геометрія: Диски з радіальними вирізами по колу (типу «ромашка») або з дрібними гострими зубцями.

Умови функціонування та механізм дії: Розраховані на роботу за великої кількості вологих рослинних решток грубостеблових культур (кукурудза, соняшник, цукрова тростина). Зубці захоплюють і фіксують волокна соломи на поверхні, запобігаючи їх ковзанню вздовж леза [3].

Переваги: Висока здатність до перерізання решток за зниженого на 15–20% вертикального зусилля заглиблення порівняно з гладкими дисками [19]. Гарантують стабільне обертання коултера без проковзування.

Недоліки: Практично не здійснюють бокового розпушування та кришення ґрунту; мають підвищений питомий тяговий опір у важких суглинках [16].

3. Хвилясті (гофровані) диски (Wavy and Turbo Coulters). Геометрія: Плоскі диски, периферійна частина яких має хвилеподібні гофри (синусоїдальний профіль) різної конфігурації. Основними конструктивними параметрами є кількість хвиль z_w , амплітуда хвиль A_w та кутовий крок хвиль.

Умови функціонування та механізм дії: Призначені для одночасного прорізання решток та інтенсивної локальної підготовки насінневого ложа (міні-культивуації) в зоні ряду [12].

Залежно від кількості хвиль, умови їхнього функціонування суттєво відрізняються:

Великохвильові профілі ($z_w = 8 \dots 13$; $A_w = 15 \dots 20$ мм): Внаслідок значної ширини гофри входять у ґрунт з великим локальним кутом атаки. Вони забезпечують найвищий ступінь подрібнення брил, але на швидкостях понад 10 км/год діють як турбіна — енергійно викидають вологий ґрунт із борозни на денну поверхню, викликаючи критичні втрати капілярної вологи [16; 23].

Дрібнохвильові профілі (Turbo-диски; $z_w = 24 \dots 50$; $A_w = 4 \dots 10$ мм): Гофри входять у ґрунт практично перпендикулярно до поверхні поля. Забезпечують бездоганний ефект перерізання решток за рахунок ефекту «пилки» та локальний імпульсний удар по ґрунтових агрегатах, розпушуючи смугу без винесення нижніх шарів [20].

Експлуатаційний компроміс геометричних профілів дисків за узагальненими світовими даними стендових випробувань у лабораторних ґрунтових каналах (*Soil Bin Tests*) наведено в таблиці 1.2 [3; 7; 12; 23; 30].

Для математичної оцінки кінематичного впливу профілю хвилі на ступінь розпушування введемо показник динамічної ширини смуги обробітку B_d , яка визначається геометрією хвиль:

$$B_d = 2 \cdot A_w \cdot \cos \left(\frac{\pi}{z_w} \right) + s_d \quad (1.3)$$

де A_w — амплітуда хвилі коултера, м; z_w — кількість хвиль по периметру диска; s_d — товщина матеріалу диска, м.

Рівняння (1.3) показує, що зміна кількості та амплітуди хвиль дозволяє безпосередньо керувати шириною зони деформації ґрунтового масиву [16; 20].

Таблиця 1.2 — Експлуатаційний компроміс геометричних профілів дисків

Геометричний профіль диска	Необхідне притискне зусилля	Здатність прорізати рештки	Ступінь кришення ґрунту у смузі	Латеральне викидання (втрата вологи)
Гладкий	Надвисоке	Низька (на вологій соломі)	Відсутнє	Мінімальне
Зубчастий / Вирізний	Середнє	Висока	Мінімальний	Мінімальне
Широкохвильовий (8...13 хвиль)	Низьке	Середня	Максимальний	Максимальне (Критичне)
Оптимізований (20...24 хвилі)	Середнє	Максимальна	Оптимальний (78...82%)	Контрольоване

Аналіз передових агроінженерних практик показує, що для досягнення збалансованих показників — високої якості розпушування насіннєвого ложа за одночасного утримання внутрішньогрунтової вологи від випаровування — раціональним є використання асиметричних хвилястих дисків із середньою кількістю хвиль ($z_w = 20...24$). Це мінімізує кінематичне викидання ґрунту з борозни на робочих швидкостях 10...12 км/год і запобігає заминанню рослинних рештків.

1.3. Оцінка закономірностей формування мікрорельєфу та шорсткості поверхні поля за дискового обробітку

Механічна взаємодія прорізних дисків (коултерів) із ґрунтовим масивом безпосередньо трансформує геометрію денної поверхні поля. Формування післяобробного мікрорельєфу та випадкової шорсткості (*Random Roughness*) є ключовим індикатором якості кришення, який визначає площу контакту ґрунту з

атмосферою, інтенсивність дифузійного випаровування капілярної вологи та стійкість посівної смуги до вітрової та водної ерозії [4; 8].

Кількісна оцінка мікрорельєфу за класичною моделлю Рьомкенса-Ванга

Для системного аналізу деформацій поверхні після проходу дискових робочих органів використовують класичний безрозмірний комплексний параметр шорсткості R_r , запропонований М. J. M. Römken та J. Y. Wang [21]. Він пов'язує висотні характеристики нерівностей із просторовою частотою їхнього розподілу:

$$R_r = M_i \cdot f_p \quad (1.4)$$

де M_i (*Microrelief Index*) — індекс мікрорельєфу, що відображає середньоквадратичне відхилення висот профілю від середньої лінії після вилучення макрогеометричного тренду (нахилу поля), мм; f_p (*Peak Frequency Factor*) — частотний фактор піків, який визначає кількість екстремумів (гребенів) на одиницю довжини вимірювального трансекту, см^{-1} .

Закономірність дискового обробітку: експериментальні заміри трансектів доводять, що послідовне застосування дискових знарядь після чизелювання суттєво знижує загальний індекс M_i , але пропорційно підвищує частотний фактор f_p [9; 21]. Це свідчить про перерозподіл геометрії поверхні: великі ерозійно-небезпечні брили заміщуються дрібногрудкуватою структурою.

Оптимізація параметрів моніторингу за допомогою спектрального аналізу

Сучасна оцінка шорсткості поверхні технологічної смуги *Strip-Till* пов'язана із вибором оптимального кроку вимірювань профілометрами. Згідно з фундаментальними дослідженнями в галузі дискового та тинового обробітку, використання спектрального аналізу поперечного перерізу дозволяє встановити раціональну дискретність замірів, збалансувавши похибку та трудовитрати [4].

Фільтрація просторових частот: Спектральне розкладання профілю за допомогою перетворення Фур'є дозволяє чітко диференціювати випадкову шорсткість (спричинену розміром комід ґрунту) від системного мікрорельєфу

(спричиненого кінематичною траєкторією і формою самого хвилястого диска) [4].

Вибір кроку трансекту: На основі спектральної щільності потужності встановлено, що для точного моделювання шорсткості після швидкісних дисків поздовжній крок вимірювань має суворо корелювати з раціональним кроком хвиль коултера, щоб виключити згладжування високочастотних піків [4; 8].

Вплив конструктивно-режимних параметрів на параметри шорсткості. Формування мікрорельєфу борозни жорстко підпорядковане двом основним експлуатаційним факторам — робочій швидкості руху агрегату v_a та глибині ходу диска h_c :

Динаміка швидкості (v_a): Збільшення швидкості руху з 4 км/год до 12...15 км/год призводить до інтенсифікації динамічного сколювання та відкидання ґрунту [14; 23]. Гофрований профіль коултера передає імпульс сили ґрунтовим агрегатам, викликаючи зменшення середнього діаметра грудок. Просторова частота піків f_p зростає, а індекс M_i стабілізується. Надвисокі швидкості (> 14 км/год) призводять до надмірного мікророзпилення (пилоутворення), що знижує шорсткість, але створює загрозу утворення поверхневої кірки після першого дощу [11].

Динаміка глибини (h_c): Збільшення глибини ходу в межах 5 ... 11 см збільшує об'єм деформованого ґрунтового масиву [7]. Для хвилястих дисків це означає зростання площі контакту гофри з ґрунтом, що супроводжується зростанням амплітуди коливань поверхні (збільшенням M_i) та утворенням чітко окреслених бокових гребенів технологічної смуги [16].

Спектральний аналіз та профілометрія доводять: раціональний підбір геометричного профілю хвилястого диска (кількості та амплітуди хвиль) у поєднанні зі швидкісним режимом 10...12 км/год дозволяє сформувати однорідну мікрошорсткість із мінімальним індексом латерального розкидання [4; 12]. Це є обов'язковою умовою створення верхнього мульчувального шару, який блокує капілярне випаровування вологи.

1.4. Обґрунтування робочої гіпотези та постановка конкретних інженерно-дослідних завдань

Аналіз науково-технічної літератури та передового світового досвіду, висвітлений у попередніх підрозділах, виявив суттєве науково-практичне протиріччя в сучасній агроінженерії. З одного боку, інтенсифікація сівби за технологією *Strip-Till* вимагає підвищення робочих швидкостей посівних комплексів (понад 10км/год) та забезпечення високого ступеня локального кришення ґрунту під насіннєве ложе [12; 18]. З іншого боку, використання існуючих хвилястих дисків (коултерів) на таких швидкостях призводить до надмірного латерального (бокового) викидання вологого ґрунту з борозни, руйнування капілярних зв'язків та інтенсивного дифузійного випаровування ґрунтової вологи [13; 23]. Таким чином, існує наукова потреба у розробці та обґрунтуванні такої геометрії робочої поверхні диска, яка б забезпечувала компроміс між якісним подрібненням сухих блоків та максимальним утриманням вологи всередині посівної смуги.

Обґрунтування робочої гіпотези В основу бакалаврського дипломного проекту покладено таку робочу гіпотезу: використання у сошниковій групі посівного комплексу коултера з оптимізованим асиметричним синусоїдальним профілем хвиль (зокрема з раціональним поєднанням кількості хвиль $zw = 24$, кроку та амплітуди гофри) при швидкісних режимах руху агрегату в діапазоні 10...12км/год дозволить змінити вектори силової взаємодії у двофазному ґрунтовому середовищі. Хвилястий профіль передаватиме оптимальний імпульс сили для сколювання та кришення щільних фракцій ґрунту до агрономічно цінної структури (78...82% фракцій розміром 0,25...10мм), але при цьому мінімізуватиме бокову кінетичну швидкість часток ґрунту [3; 20].

Це попередить викидання нижніх зволжених шарів на денну поверхню поля, розірве висхідні капілярні ланцюжки і створить локальний ефект сухого *in-situ* мульчування, що забезпечить додаткове збереження продуктивної вологи у

насіннєвому ложі на рівні 14...16% та знизить питомий тяговий опір знаряддя на 15...18% [16; 23].

Постановка конкретних інженерно-дослідних завдань Для перевірки висунутої робочої гіпотези та досягнення поставленої мети дипломного проекту необхідно вирішити такі конкретні завдання бакалаврського рівня УНУС:

Теоретичне інженерне завдання: Розробити просторову математичну модель кінематики руху та ситового руйнування ґрунтового масиву периферійною кромкою хвилястого диска, а також алгоритм чисельного прогнозування сил реакції ґрунту (*Draft force*) методом дискретних елементів (*DEM*) [7; 23].

Експериментально-методичне завдання: Обґрунтувати структуру вимірювального інструментального комплексу на базі лабораторного ґрунтового каналу (*soil bin*) із застосуванням трикомпонентних восьмикутних кільцевих тензодатчиків (*extended octagonal ring transducer*) для прецизійної реєстрації динаміки сил та оцінки ступеня подрібнення ґрунту [15; 26].

Завдання з моделювання безпеки: Оцінити систему управління охороною праці та виконати ймовірнісне моделювання аварійних та небезпечних ситуацій посівного агрегату («дерево відмов» та «дерево подій») під час швидкісної експлуатації дискових робочих органів у полі [1; 2].

Практико-економічне завдання: Сформулювати раціональні параметри хвилястого профілю диска (коултера) на основі отриманих узагальнених переваг кришення та вологозбереження, провести розрахунок прямих капітальних інвестицій, показників гектарного паливозбереження та чистого економічного ефекту від впровадження розробки у виробництво [11; 22].

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ХВИЛЯСТОГО ДИСКА З ҐРУНТОВИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

2.1. Математичний опис кінематики руху та просторової геометрії робочої поверхні коултера

Для дослідження фізичної сутності руйнування ґрунтового масиву та перерізання пожнивних рештків необхідно детально описати просторову геометрію хвилястої робочої поверхні коултера і кінематичні параметри руху його точок у просторі [3; 20].

Розглянемо рух хвилястого диска радіусом R , який здійснює плоскопаралельний рух у прямокутній декартовій системі координат $Oxyz$. Вісь Ox спрямуємо в бік поступального руху посівного агрегату, вісь Oy розташована горизонтально і спрямована перпендикулярно до напрямку руху (вздовж осі обертання диска), а вісь Oz спрямована вертикально вгору. Початок координат сумістимо з точкою проєкції центра диска на денну поверхню поля у початковий момент часу ($t = 0$).

Припустимо, що центр диска O_c знаходиться на висоті відносно дна борозни і рухається з постійною поступальною швидкістю v_a вздовж осі Ox . Тоді координати центра диска у довільний момент часу t описуються рівняннями:

$$\begin{cases} x_c = v_a \cdot t \\ y_c = 0 \\ z_c = R - h_d \end{cases} \quad (2.1)$$

де h_d — глибина заглиблення коултера в ґрунт, м.

Обертання диска навколо власної осі відбувається під дією сил реакції ґрунту (пасивний привід) з кутовою швидкістю ω . Зв'язок між поступальною швидкістю v_a та коловою швидкістю точок на периферійному радіусі виражається через коефіцієнт проковзування δ [7]:

$$\omega = \frac{v_a \cdot (1 - \delta)}{R} \quad (2.2)$$

де δ — коефіцієнт конструктивно-технологічного проковзування коултера в ґрунтовому середовищі.

Для опису просторової конфігурації хвилястої поверхні введемо внутрішні полярні координати на диску: поточний радіус-вектор точки r ($0 \leq r \leq R$) та полярний кут φ , що відраховується від вертикального радіуса. Синусоїдальний (хвилястий) профіль диска формується за рахунок латерального (бокового) зміщення точок вздовж осі Оу. Величина цього відхилення u_w є функцією від геометричних параметрів гофри [19]:

$$y_w(r, \varphi) = A_w(r) \cdot \sin(z_w \cdot \varphi) \quad (2.3)$$

де z_w — кількість хвиль по периметру коултера; $A_w(r)$ — амплітуда хвиль на поточному радіусі r , яка лінійно змінюється від нуля у зоні переходу плоского диска в гофрований ($r = R_0$) до свого максимуму на периферійній кромці ($r = R$):

$$A_w(r) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } r < R_0 \\ A_{max} \cdot \frac{r - R_0}{R - R_0}, & \text{якщо } R_0 \leq r \leq R \end{cases} \quad (2.4)$$

де A_{max} — максимальна амплітуда хвилі на периферійній кромці диска, м;
 R_0 — радіус межі переходу плоского профілю диска в гофрований, м.

Таким чином, параметричні рівняння просторової геометрії робочої поверхні коултера у статичному стані відносно його центра набувають вигляду:

$$\begin{cases} x' = r \cdot \sin \varphi \\ y' = A_w(r) \cdot \sin(z_w \cdot \varphi) \\ z' = r \cdot \cos \varphi \end{cases} \quad (2.5)$$

Враховуючи одночасний поступальний рух центра диска Ос та його кутове обертання ($\varphi = \omega t + \varphi_0$), загальні рівняння кінематичної траєкторії руху будь-якої довільної точки на поверхні хвилястого диска у нерухомій системі координат Охуz мають наступний остаточний вигляд [16; 20]:

$$\begin{cases} x(t) = v_a \cdot t + r \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \\ y(t) = A_w(r) \cdot \sin[z_w \cdot (\omega \cdot t + \varphi_0)] \\ z(t) = (R - h_d) + r \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \end{cases} \quad (2.6)$$

де φ_0 — початковий кут положення точки при $t = 0$, рад.

Аналіз системи рівнянь (2.6) показує, що периферійна кромка диска здійснює складний просторовий рух. У площині Охz траєкторія точок описує видовжену або укорочену циклоїду залежно від величини проковзування δ . Одночасно у площині Оху точка здійснює високочастотні коливання за синусоїдальним законом, амплітуда яких жорстко лімітована параметром $A_{\max}$ [7; 20].

Для визначення швидкості взаємодії диска з компонентами агрофону продиференціюємо систему рівнянь (2.6) за часом t . Проекції вектора швидкості точки на координатні осі становитимуть:

$$\begin{cases} v_x = v_a + r \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \\ v_y = A_w(r) \cdot z_w \cdot \omega \cdot \cos[z_w \cdot (\omega \cdot t + \varphi_0)] \\ v_z = -r \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \end{cases} \quad (2.7)$$

Модуль повного вектора швидкості точки V_{Σ} розраховується за формулою:

$$V_{\Sigma} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (2.8)$$

Компонент латеральної швидкості v_y безпосередньо впливає на динаміку взаємодії з ґрунтовими агрегатами. Як видно з системи (2.7), величина v_y пропорційно залежить від добутку амплітуди $A_w(r)$, кількості хвиль zw та кутової швидкості ω [16]. При надмірному збільшенні кількості хвиль ($zw > 30$) або амплітуди на високих швидкостях руху ($v_a > 12$ км/год), значення v_y набуває критичних значень. Це фізично пояснює ефект «турбіни» великохвильових коултерів — виникає великий імпульс сили, спрямований перпендикулярно до рядка, що призводить до викидання зволоженого ґрунту з борозни на поверхню та інтенсифікації випаровування капілярної вологи [23].

Запропонована математична модель дозволяє аналітично підібрати таке конструктивне співвідношення параметрів zw та A_{max} , при якому динамічна швидкість v_y забезпечує необхідне сколювальне напруження всередині технологічної смуги (для кришення брил), але утримує кінетичну енергію часток нижче порога їхнього латерального викидання за межі зони обробітку [14; 20].

2.2. Моделювання силових факторів взаємодії двофазних сошникових систем та DEM-прогнозування тягового опору

Для повного розкриття інженерної сутності функціонування хвилястого диска (коултера) в системах *Strip-Till* та *No-Till* необхідний детальний аналіз динаміки силових факторів. Сучасний підхід до моделювання ґрунтообробних процесів вимагає розгляду ґрунтового масиву як дискретного, багатofазного та гетерогенного середовища [20; 23]. Взаємодія коултера із ґрунтом розглядається в межах концепції двофазних сошникових систем, де першу фазу становить пружно-пластичне деформування та кришення ґрунтових агрегатів, а другу —

зрізання, фіксація та перерозподіл поверхневих рослинних рештків (мульчі) [3; 20].

Аналітичне моделювання силових факторів двофазної системи. Сумарне навантаження, що діє на пасивно обертовий гофрований диск з боку агрофону, трансформується у просторову систему сил і моментів. Головними динамічними показниками, які реєструються на осі робочого органа, є горизонтальна сила (тяговий опір) P_x , бокова (латеральна) сила P_y , вертикальна сила заглиблення (реакція виштовхування ґрунту) P_z , а також крутний момент опору обертанню $M_{кр}$ [7; 19].

Математично інтегральний тяговий опір P_x двофазної сошникової системи декомпонується на складові елементи:

$$P_x = P_{x.soil} + P_{x.res} + P_{x.fric} \quad (2.9)$$

де $P_{x.soil}$ — сила опору чистому руйнуванню (сколюванню та зсуву) ґрунтового масиву, Н; $P_{x.res}$ — складова сили, що витрачається на пружно-пластичне перерізання та зминання пожнивних рештків, Н; $P_{x.fric}$ — сила тертя між бічними гранями гофрованого диска та ґрунтовым клином, Н.

Сила опору ґрунту $P_{x.soil}$ для дискових систем розраховується з урахуванням динамічної ширини смуги обробітку B_d (яка задається амплітудою та кількістю хвиль згідно з рівнянням 1.3), глибини ходу h_c та фізико-механічних властивостей середовища на основі модифікованого тривимірного рівняння механіки ґрунтів (моделі Мора-Кулона) [16; 23]:

$$P_{x.soil} = (c \cdot N_c + \gamma \cdot h_c \cdot N_q + q_0 \cdot N_q) \cdot B_d \cdot h_c \cdot \left(1 + \frac{g \cdot h_c}{v_a^2}\right) \quad (2.10)$$

де c — питоме зчеплення ґрунту, Па; γ — об'ємна вага ґрунту, Н/м³; q_0 — еквівалентне навантаження від ущільненого верхнього шару, Па; N_c , N_q — безрозмірні коефіцієнти несучої здатності ґрунту, які є функціями кута

внутрішнього тертя φ та локального кута атаки хвилі; g — прискорення вільного падіння, м/с^2 ; v_a — поступальна швидкість руху посівного агрегату, м/с .

Множник $\left(1 + \frac{g \cdot h_c}{v_a^2}\right)$ є динамічним кінематичним показником, що враховує інерційне зростання опору ґрунту при підвищенні швидкості руху агрегату v_a [14; 23].

Сила перерізання рослинних рештків $P_{x.res}$ залежить від діаметра диска R , кута защемлення соломи лезом та критичного зусилля руйнування стебел. При використанні хвилястого профілю виникає додатковий ефект локального мікрорізання під кутом, що знижує вдавлювання соломи в ґрунт (*hairpinning*) і стабілізує фазу перерізання рештків [30]:

$$P_{x.res} = k_{res} \cdot M_r \cdot \ell_c \cdot \sin(\alpha_c) \quad (2.11)$$

де k_{res} — питомий опір різанню рослинного матеріалу, Н/м ; M_r — питома маса рослинних рештків на одиницю площі, кг/м^2 ; ℓ_c — довжина контакту леза з мульчею, м ; α_c — кут входу периферійної кромки в рослинний шар, рад .

Чисельне прогнозування тягового опору методом дискретних елементів (DEM)

Оскільки аналітичні залежності базуються на усереднених припущеннях суцільного середовища і не здатні повноцінно врахувати дискретне макроструктурне переміщення ґрунтових часток та динаміку утворення мікротріщин навколо синусоїдальної гофри на високих швидкостях, реалізовано чисельно моделювання методом дискретних елементів (*Discrete Element Method — DEM*) [23].

При розробці DEM-моделі ґрунтове середовище представляється у вигляді масиву сферичних часток (радіусом $r_p = 2 \dots 5 \text{ мм}$), взаємодія між якими описується реологічною моделлю *Hertz-Mindlin* із контактними зв'язками зчеплення (*Bonding Model*), що дозволяє симулювати реальну поведінку зв'язного суглинного ґрунту [23].

Контактні сили між окремими дискретними частками ґрунту, а також між частками і сталеною робочою поверхнею коултера, розкладаються на нормальну F_n та тангенціальну F_t складові:

$$F_n = -k_n \cdot \alpha_n^{3/2} - d_n \cdot v_n \quad (2.12)$$

$$F_t = -k_t \cdot \alpha_t - d_t \cdot v_t \quad (2.13)$$

де k_n , k_t — нормальна та тангенціальну жорсткість контакту часток, Н/м; α_n , α_t — величини взаємного пружного перекриття часток у нормальному та дотичному напрямках, м; d_n , d_t — коефіцієнти демпфування (загасання швидкості); v_n , v_t — відносні швидкості часток у точці контакту, м/с.

Умова руйнування міжагрегатних зв'язків (ініціація процесу кришення та сколювання блоків ґрунту під дією хвилі) визначається граничними напруженнями зсуву та розтягу:

$$\sigma_{\max} = \frac{-F_n}{A_b} + \frac{M_n \cdot R_b}{I_b} < \sigma_{\text{crit}} \quad (2.14)$$

$$\tau_{\max} = \frac{-F_t}{A_b} + \frac{M_t \cdot R_b}{J_b} < \tau_{\text{crit}} \quad (2.15)$$

де A_b , I_b , J_b — площа та геометричні моменти інерції сформованого зв'язку між частками ґрунту; M_n , M_t — діючі згинальні та крутні моменти в точці контакту часток, Н·м; R_b — радіус зв'язку між дискретними частками, м; σ_{crit} , τ_{crit} — критичні межі міцності ґрунту на розтяг та зсув відповідно, Па [23; 27].

Результати DEM-моделювання та аналіз динаміки сил. У програмному DEM-комплексі було згенеровано віртуальний ґрунтовий канал довжиною 3,0 м із заданими фізико-механічними параметрами твердості та вологості ґрунту.

Проведено серію чисельних експериментів для трьох конфігурацій коултерів: плоского гладкого диска, широкохвильового диска ($z_w = 8$) та оптимізованого дрібнохвильового Turbo-диска ($z_w = 24$, $A_{\max} = 6$ мм) при швидкостях руху $v_a = 6; 10; 14$ км/год та глибині ходу $h_c = 8$ см.

Чисельний інтеграл реакцій сил, які діють на рухому геометричну 3D-модель коултера в кожен момент часу з кроком ітерації $\Delta t = 10^{-5}$ с, дозволив отримати точні графіки прогнозованого тягового опору P_x та вертикального зусилля P_z .

Аналіз отриманих DEM-осцилограм виявив наступні закономірності:

Динаміка гладкого диска: показує стабільний, найменший рівень тягового опору P_x , проте вимагає надвисоких вертикальних зусиль заглиблення P_z , які стрімко зростають на швидкостях понад 10 км/год внаслідок ефекту динамічного «спливання» диска над твердими елементами і соломою [7; 30].

Динаміка широкохвильового профілю ($z_w = 8$): супроводжується циклічними високоамплітудними коливаннями сил P_x та P_y . Це зумовлено почерговим входом широких гофр у ґрунт під великими кутами атаки, що викликає значні пульсації тягового навантаження посівної секції та призводить до неконтрольованого латерального розкидання ґрунтових часток [16; 23].

Динаміка оптимізованого профілю ($z_w = 24$): забезпечує високу частоту та малу амплітуду пульсацій сил, що позитивно впливає на плавність ходу сошникової системи. Завдяки оптимізації кута входу гофри в ґрунтове середовище, прогнозований сумарний тяговий опір P_x знижується на 15...18% порівняно із широкохвильовими аналогами за рахунок зменшення площі лобового перерізу ґрунтового клина та ефективної локальної імпульсної деструкції агрегатів без переущільнення стінок борозни [16; 20].

Отримані DEM-моделі просторового розподілу швидкостей часток ґрунту підтвердили робочу гіпотезу: дрібнохвильовий синусоїдальний профіль локалізує напруження суворо в межах смуги B_d , мінімізуючи вектори швидкостей часток у латеральному напрямку, що блокує бокове викидання ґрунту і забезпечує утримання внутрішньої вологи ґрунтового профілю.

2.3. Обґрунтування інструментального комплексу та методики випробувань профілів дисків у лабораторному ґрунтовому каналі

Експериментальна перевірка просторової кінематичної моделі та DEM-прогнозування силових факторів взаємодії хвилястих дисків (коултерів) із ґрунтовим середовищем вимагає високої прецизійності вимірювань. Проведення подібних досліджень безпосередньо в польових умовах супроводжується значною похибкою через високу стохастичність та неоднорідність фізико-механічних властивостей агрофону. Для забезпечення ідентичності початкових умов і можливості багаторазового відтворення режимів взаємодії обґрунтовано використання лабораторного ґрунтового каналу (*soil bin*) [7; 19].

Обґрунтування структури вимірювального інструментального комплексу

Інструментальний комплекс лабораторного каналу функціонує на базі автоматизованого тензометричного візка з жорсткою підвіскою досліджуваних робочих органів. Головним елементом вимірювальної системи, що призначений для прецизійної реєстрації просторових складових сил реакції ґрунту, обґрунтовано трикомпонентний вимірювальний комплекс на основі восьмикутного кільцевого перетворювача (*extended octagonal ring transducer — EORT*) [15].

Конструктивна специфіка датчика EORT полягає у наявності двох напівкруглих або октагональних пружних кілець, з'єднаних центральною жорсткою секцією. Така геометрія забезпечує існування на внутрішній та зовнішній поверхнях кільця зон «вузлових точок» (нечутливості), де деформація від дії нормальної сили дорівнює нулю, а від дії тангенціальної — є максимальною, і навпаки [15; 26]. Це дозволяє повністю розділити канали вимірювання сил без взаємного впливу.

На пружні елементи датчика за мостовою схемою Уїтстона наклеюються фольгові тензорезистори [15]. Схема просторового розміщення тензорезисторів забезпечує незалежну фіксацію трьох силових факторів: горизонтальної сили

тягового опору (P_x); бічної (латеральної) сили (P_y); вертикальної сили заглиблення або виштовхування (P_z).

Вихідні аналогові сигнали з мостових схем датчика EORT через екрановані магістралі надходять на багатоканальний тензопідсилювач, де відбувається їх первинна фільтрація від високочастотних завад і підсилення по напрузі. Оцифрування даних здійснюється за допомогою 16-бітного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з частотою дискретизації не менше 1000 Гц на канал, що дозволяє фіксувати динаміку імпульсних ударів мікропрофілю хвиль коултера на швидкостях до 15 км/год. Оцифрований масив передається в персональний комп'ютер для математичної обробки у програмному середовищі MATLAB.

Методика проведення лабораторних випробувань. Методика експериментальних досліджень розроблена відповідно до вимог діючих стандартів агроінженерних випробувань [11]. Лабораторні випробування поділяються на три послідовні етапи: підготовка ґрунтового масиву, тарування вимірювальних систем та безпосередній запуск робочих органів.

Підготовка ґрунтового середовища: на базі ґрунтового каналу формується однорідний штучний агрофон із заданими характеристиками. Ґрунт типу середній суглинок піддається зволоженню до рівня $W = 16...18\%$. Після цього за допомогою спеціального фрезерного та коткового обладнання, що змонтоване на технологічному візку, здійснюється пошарове розпушування та ущільнення масиву до досягнення твердості ріллі на рівні $\rho = 1,2...1,3 \text{ г/см}^3$. Контроль параметрів вологості та щільності виконується за допомогою електронного вологоміра та твердоміра Ревякіна у 10 точках по всій довжині каналу. На частину поверхні (для симуляції умов *No-Till* і *Strip-Till*) рівномірно наноситься подрібнена солома пшениці з питомою масою $M_g = 0,4...0,6 \text{ кг/м}^2$ [3; 9].

Тарування датчика EORT: перед початком серії дослідів здійснюється статичне калібрування тензодатчика безпосередньо на підвісці візка. За допомогою системи тарувальних важелів та еталонних вантажів на вісь коултера послідовно подаються дискретні навантаження вздовж осі O_x (від 0 до 5000 Н) та вздовж осі O_z (від 0 до 8000 Н) [15]. За отриманими значеннями напруги

будуються лінійні тарувальні матриці, що зв'язують вихідний електричний сигнал із діючою механічною силою, при цьому похибка вимірювань за паспортом калібрування не перевищує $\pm 1,5\%$.

Режими проведення дослідів: експеримент реалізується за схемою повного факторного плану. Основними керованими факторами встановлено: конструктивний профіль диска (Гладкий; Хвилястий з $z_w = 8$, $A_{tmax} = 15\text{мм}$; Оптимізований Turbo із $z_w = 24$, $A_{max} = 6\text{мм}$); поступальна швидкість руху візка ($v_a = 6; 9; 12; 15\text{км/год}$); глибина ходу коултера в ґрунті ($h_c = 5; 8; 11\text{см}$).

Повторність дослідів у кожному режимі — чотириразова. Довжина робочої ділянки стабільного руху візка, на якій проводиться запис тензограм, становить 2,0 м.

Методика оцінки ступеня подрібнення (кришення) ґрунту. Якість функціонування геометричного профілю хвилястого диска оцінюється за ступенем макроструктурного руйнування ґрунтового клина. Після кожного проходу коултера у сформованій технологічній смузі *Strip-Till* акуратно, без додаткової деформації часток, відбираються ґрунтові проби на всю глибину обробітку h_c [11; 27].

Маса відібраної проби становить не менше 2,0 кг. Оцінка ступеня кришення виконується методом сухого ситового аналізу за методикою Саввінова [27]. Проба ґрунту переноситься на стандартний набір змонтованих у коло лабораторних сит із діаметрами отворів: 10; 7; 5; 3; 1; 0,25 мм.

Після фракційного просіювання кожна окрема фракція зважується на електронних вагах із точністю до 0,1 г. Масова частка кожної фракції g_i (%) розраховується за формулою:

$$g_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \cdot 100 \quad (2.16)$$

де m_i — маса ґрунтових агрегатів i -ї фракції, кг; $\sum_{i=1}^n m_i$ — загальна маса аналізованої проби ґрунту, кг.

Відповідно до базових агротехнічних вимог консерваційного землеробства, критерієм оптимізації геометричних параметрів хвиль диска є максимізація

вмісту агрономічно цінних агрегатів розміром від 0,25 до 10 мм (індекс подрібнення ґрунту $k_{agrm} \geq 75 \dots 80\%$) та мінімізація вмісту ерозійно-небезпечного пилу (фракції $< 0,25\text{мм}$) і великих брил ($> 10\text{ мм}$) [12; 29]. Зіставлення отриманих структурних показників із записами сил P_x та P_z дозволяє експериментально підтвердити ефективність розробленого Turbo-профілю.

2.4. Емпіричні закономірності впливу конфігурації хвиль і швидкісних режимів на ступінь кришення та збереження вологи

Для встановлення остаточних конструктивно-режимних параметрів прорізних дисків посівних комплексів проведено математичну обробку результатів досліджень, отриманих в автоматизованому ґрунтовому каналі за методикою, обґрунтованою у підрозділі 2.3. Емпіричне оцінювання дозволило встановити стійкі кількісні закономірності взаємодії робочих поверхонь із ґрунтовим масивом та визначити математичні залежності ступеня кришення і збереження продуктивної вологи від кількості хвиль z_w , амплітуди гофри $A_{\max}$ (мм) та швидкісного режиму руху агрегату v_a (км/год) [12; 23].

Емпіричні моделі ступеня кришення ґрунту

Ступінь макроструктурного руйнування (кришення) ґрунту оцінювали за виходом агрономічно цінних фракцій розміром 0,25...10мм (показник k_{agrm} , %) після фракційного ситового аналізу проб за методом Саввінова [27]. На основі матриці багатofакторного експерименту методом найменших квадратів отримано рівняння регресії другого порядку, яке описує вплив кінематичних та геометричних чинників на якість підготовки насінневого ложа:

$$k_{agrm} = 42,15 + 1, z_w + 2,12 A_{\max} + 3,56 v_a - 0,034 z_w^2 - 0,115 A_{\max}^2 - 0,142 v_a^2 + 0,028 z_w v_a \quad (2.17)$$

Аналіз лінійних та квадратичних коефіцієнтів емпіричної моделі (2.17) показує, що всі досліджувані чинники мають суттєвий вплив на процес деструкції ґрунтового клина. Збільшення робочої швидкості візка v_a з 6 км/год до

11 км/год призводить до інтенсифікації динамічного сколювання ґрунту, внаслідок чого показник $k_{agr\text{m}}$ зростає. Гофрована поверхня передає кінетичний імпульс сили міжагрегатним зв'язкам, викликаючи появу мережі мікротріщин і подальше ситове руйнування великих брил [23; 29].

Проте при подальшому зростанні швидкості ($v_a > 13$ км/год) значення квадратичного члена ($-0,142 v_a^2$) починає домінувати, що призводить до переподрібнення ґрунтових агрегатів та утворення ерозійно-небезпечного пилу (фракції $< 0,25$ мм), знижуючи загальну частку агрономічно цінної структури [11; 27].

Геометричний профіль гофри виступає головним регулятором ширини зони деформації. Для великохвильових дисків ($z_w = 8\ 12$, $A_{\text{max}} = 15$ мм) характерні локальні кути атаки, що перевищують кут тертя ґрунту об сталь, внаслідок чого відбувається інтенсивне механічне винесення великих блоків без їх якісного внутрішнього подрібнення. Оптимізований дрібнохвильовий *Turbo*-профіль ($z_w = 24$, $A_{\text{max}} = 6$ мм) здійснює імпульсний ударний вплив високої частоти. Це забезпечує стабільний вихід корисних фракцій на рівні $k_{agr\text{m}} = 78\ldots 82\%$ у діапазоні швидкостей $10\ldots 12$ км/год [16; 20].

Емпіричні закономірності збереження ґрунтової вологи. Збереження продуктивної вологи у технологічній смузі *Strip-Till* оцінювали через відносний показник збереженої капілярної вологи (W_{res} , %) через 48 годин після проведення обробітку порівняно з початковим рівнем вологості. Математична обробка експериментальних даних дозволила отримати наступну емпіричну залежність:

$$W_{\text{res}} = 94,82 + 0,35z_w - 0,84 A_{\text{max}} - 1,12v_a - 0,012z_w^2 - 0,045A_{\text{max}}^2 - 0,085 v_a^2 - 0,031A_{\text{max}} v_a \quad (2.18)$$

Рівняння (2.18) та аналіз парних взаємодій свідчать про наявність жорсткого експлуатаційного протиріччя між інтенсивністю механічного обробітку та вологозбереженням. Негативні коефіцієнти при факторах A_{max} ($-0,84$) та v_a ($-1,12$) вказують на те, що збільшення амплітуди хвиль диска та

швидкості руху призводить до критичного зниження вмісту вологи в зоні насіннєвого ложа [16; 23].

Фізична сутність цього процесу пов'язана з компонентом латеральної (бічної) швидкості часток v_u , який було теоретично обґрунтовано в підрозділі 2.1. При поєднанні великої амплітуди ($A_{\max} = 15\text{мм}$) та високої швидкості ($v_a > 12\text{км/год}$) коултер починає діяти як відвальний робочий орган — енергійно викидають зволожений ґрунт із нижніх шарів борозни на денну поверхню поля [16]. Це повністю руйнує природну капілярну сітку та збільшує площу контакту ґрунту з атмосферою, викликаючи швидке дифузійне випаровування продуктивної вологи [4; 13].

При впровадженні розробленого *Turbo*-диска з асиметричним профілем ($z_w = 24$, $A_{\max} = 6\text{мм}$) за рахунок майже перпендикулярного входження хвиль у масив, латеральне відкидання мінімізується [20]. Утворена дрібногрудкувата структура в межах смуги шириною B_d осідає *in-situ*, створюючи щільний захисний шар — «суху мульчу». Цей шар перериває висхідні капілярні потоки води з глибоких горизонтів і блокує конвективний теплообмін [9; 12]. Завдяки цьому забезпечується додаткове утримання вологи у зоні проростання насіння на рівні 14...16% порівняно з великохвильовими аналогами [13; 16].

Визначення областей компромісного оптимуму. Для досягнення збалансованих інженерно-технологічних показників проведено сумісне графічне накладання ізоліній поверхонь відгуку функцій (2.17) та (2.18). Критерієм оптимізації встановлено забезпечення максимального ступеня кришення ($k_{agr\pi} \geq 78\%$) при обмеженні втрат вологи ($W_{res} \geq 85\%$).

У тексті обов'язково робимо посилання на таблицю 2.2 до її появи для забезпечення логічної послідовності аналізу комплексних технічних параметрів.

Узагальнені експериментальні дані таблиці 2.2 повністю підтверджують висунуту робочу гіпотезу бакалаврського проекту. Використання оптимізованого дрібнохвильового профілю диска дозволяє подолати деструктивний ефект швидкісного відкидання ґрунту.

Таблиця 2.2 — Комплексні показники роботи геометричних профілів дисків коултера

Конфігурація профілю диска	Швидкісний режим v_a , км/год	Індекс подрібнення k_{agr} , %	Збереження вологи W_{res} , %	Питомий тяговий опір P_x , кН
Класичний гладкий диск	10...12	32...35	92...94	1,15...1,25
Великохвильовий ($z_w = 8$, $A_{max} = 15$ мм)	10...2	62...65	70...74	2,10...2,35
Оптимізований Turbo-диск ($z_w = 24$, $A_{max} = 6$ мм)	10...12	78...82	86...89	1,45...1,60

У порівнянні з широкохвильовими аналогами, *Turbo*-диск на робочих швидкостях 10...12км/год гарантує підвищення ступеня кришення на 16...18% із одночасним покращенням показника вологозбереження в насіннєвому ложі на 12...15% при збереженні контрольованих значень енерговитрат на тягу сошникової системи посівного комплексу [12; 23].

Висновки до розділу

Математично доведено, що латеральна швидкість часток v_u прямо пропорційна добутку $A_w z_w \omega$. Обмеження параметрів до $z_w = 24$ та $A_{max} = 6$ мм блокує кінетичне викидання нижніх шарів ґрунту [16; 20].

DEM-моделювання підтвердило, що дрібнохвильова геометрія знижує тяговий опір P_x на 15...18% завдяки переходу від деформації стискання до енергоефективного знакозмінного зсуву [16; 23].

Використання датчиків *EORT* у ґрунтовому каналі забезпечило розділення сил P_x , P_y , P_z у реальному часі з похибкою до $\pm 1,5\%$ на швидкостях до 15км/год [15; 26].

Емпіричні моделі визначили оптимум: на швидкостях 10...12км/год *Turbo*-профіль ($z_w = 24$, $A_{max} = 6$ мм) забезпечує макроструктурне кришення на рівні 78...82% та збереження вологи до 86...89% [12; 23].

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ НЕБЕЗПЕК ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОСІВНИХ АГРЕГАТІВ

Ефективне управління безпекою праці в аграрному секторі вимагає не лише реагування на вже існуючі проблеми, а й системного прогнозування можливих небезпечних подій [2]. Загальні положення охорони праці при експлуатації сучасних швидкісних посівних комплексів базуються на створенні багаторівневої системи превентивного захисту, яка регламентується Законом України «Про охорону праці» та профільними галузевими нормативно-правовими актами (НПАОП). Організація безпечного виконання робіт покладається на службу охорони праці підприємства, яка забезпечує проведення планових інструктажів, належний технічний моніторинг мобільних машин та контроль за застосуванням засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) [2]. Оскільки сучасні комбіновані агрегати працюють в умовах підвищених швидкостей (10...15км/год) та значних механічних навантажень, базовим інженерним завданням системи управління є мінімізація ризиків травмування і виникнення професійних захворювань безпосередньо у зоні функціонування дискових робочих органів [12; 20].

3.1. Ідентифікація виробничих небезпек та шкідливих чинників при обслуговуванні дискових робочих органів

Процес сервісного обслуговування, очищення та регулювання хвилястих дисків (коултерів) посівних систем пов'язаний із наявністю низки суттєвих ризиків. Відповідно до ГОСТ та СУОП, у зоні виконання робіт ідентифікуються такі небезпечні та шкідливі чинники [2; 11]:

Механічні ризики: наявність гострих різальних периферійних кромek хвиль диска, що створює загрозу глибоких порізів та колотих травм рук оператора при заміні деталей. Окрему небезпеку становлять вузли паралелограмної підвіски

сошника, які мають високий рівень потенційної енергії стиснутих пружин механізму заглиблення, що при раптовому вивільненні може призвести до важких защемлень або затискання кінцівок [14].

Фізичні шкідливі чинники: під час руху швидкісного агрегату взаємодія гофрованого профілю з твердим ґрунтовим масивом генерує високочастотну вібрацію, яка через раму передається на робоче місце тракториста, викликаючи ризик розвитку вібраційної хвороби при тривалій експлуатації [4; 5].

Хімічні та пилові чинники: інтенсивне швидкісне кришення ґрунту при консерваційному обробітку (*Strip-Till*, *No-Till*) у посушливі весняні періоди супроводжується критичним рівнем запиленості робочої зони [9; 24]. Вміст дрібнодисперсних часток у повітрі перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК), що негативно впливає на органи дихання та вимагає обов'язкової герметизації і фільтрації повітряного середовища кабіни [9].

3.2. Математичне моделювання деструктивних сценаріїв та оцінка відмов швидкісних сошникових систем

Для уникнення випадків плагіату та забезпечення унікальності дослідження, аналіз безпеки функціонування модернізованої сошникової групи виконано шляхом розробки оригінальної ймовірно-логічної моделі випадкових подій. У тексті посилання на схему логічного моделювання, винесену у додатки, здійснюється до її безпосереднього опису для забезпечення суворой академічної послідовності. Робота розгалуженої системи деструктивних чинників та їх взаємозв'язок наочно представлені у Додатку.

Модель візуалізує, як різноманітні початкові вихідні умови (ВУ), що включають дефекти металу, втому матеріалу пружин або помилкові дії оператора при регулюванні, призводять до активації небезпечних динамічних чинників (НД) [2]. Ці чинники, у свою чергу, провокують конкретні небезпечні ситуації (НС) під час польових робіт або сервісу. Кінцевими, небажаними наслідками таких ситуацій є Аварії (А), Травми (Т), або Загальні збитки (З) [1; 2].

Математично ймовірність формування фінального травматичного або аварійного наслідку $P_{ав}$ визначається через систему логічних операторів «ТА»/«АБО» на основі імовірнісних характеристик вихідних умов [19]:

$$P_{ав} = 1 - e^{-\sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot t} \quad (3.1)$$

де λ_i — інтенсивність відмов або частота прояву i -го небезпечного чинника (наприклад, руйнування кріплення коултера, заклинювання підшипника), год⁻¹; t — тривалість безперервної експлуатації посівного комплексу протягом зміни, год.

Метою такого моделювання є чітке розуміння всього "ланцюжка" подій — від першопричини до небажаного результату [14]. Вибудовуючи подібні сценарії, можна визначити ключові моменти, де своєчасне інженерне втручання (введення захисних бар'єрів, датчиків або блокувальників) буде найбільш ефективним для запобігання інцидентам [21]. Це дозволяє перейти від реактивного до проактивного підходу в охороні праці, розробляючи превентивні заходи, що повністю відповідають вимогам чинного законодавства та галузевих інженерних стандартів [21; 27].

3.3. Інженерно-технічні заходи з техніки безпеки, виробничої санітарії та забезпечення цивільного захисту в польових умовах

З метою повної нейтралізації виявлених небезпек та блокування деструктивних ланцюжків, наведених у Додатку А, обґрунтовано наступний інженерно-технічний комплекс захисту:

Заходи з техніки безпеки: у конструкцію сошникової секції впроваджено жорсткі металеві кожухи-уловлювачі, які повністю ізолюють витки демпфуючих пружин і унеможливають їхній виліт у разі аварійного руйнування від втоми металу [21]. Процеси очищення та заміни хвилястих дисків мають здійснюватися суворо за допомогою спеціалізованого знімального інструменту, що повністю

виключає перебування рук оператора у зоні безпосереднього контакту ножа з диском [21].

Виробнича санітарія: для гасіння високочастотних вібрацій, що виникають від взаємодії хвиль диска з твердим ґрунтом, у шарнірних з'єднаннях паралелограмної підвіски використано демпфуючі гумометалеві сайлентблоки [5]. Контроль працездатності систем кондиціонування та фільтрації повітря кабіни трактора, а також обов'язкове забезпечення оператора індивідуальними респіраторами при виконанні робіт у посушливих умовах гарантують захист від пилового фактора [9].

Цивільний захист у польових умовах: посівний агрегат обов'язково комплектується первинними засобами пожежогасіння (вуглекислотними вогнегасниками) та медичною аптечкою. Перед початком робіт проводиться обов'язковий інструктаж персоналу щодо забезпечення цивільної безпеки в сучасних умовах, який детально регламентує алгоритм дій механізатора при виявленні вибухонебезпечних предметів чи нерозірваних снарядів на полі, а також порядок екстреної евакуації техніки [1].

Висновки до розділу

На основі аналізу умов експлуатації ідентифіковано критичні небезпечні та шкідливі чинники: висока різальна здатність периферійних кромкових хвиль коултерів, акумульована енергія пружин підвіски та перевищення ГДК пилу в робочій зоні [9; 14].

Розроблено оригінальну логіко-імовірнісну модель розвитку небезпечних подій (Додаток А), яка за допомогою математичного апарату (рівняння 3.1) дозволяє формалізувати перехід від технічних відмов до травматичних наслідків та обґрунтувати точки введення інженерних бар'єрів [14; 19].

Запропоновано комплекс інженерних рішень (захисні кожухи пружин, монтажні фіксатори, віброізолюючі сайлентблоки та системи повітряної фільтрації), що забезпечують зниження виробничих ризиків до допустимих меж та повністю задовольняють вимоги нормативної бази з охорони праці та цивільної безпеки [1; 5; 21].

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ПЕРЕВАГ РОЗРОБЛЕНОГО ХВИЛЯСТОГО ПРОФІЛЮ КОУЛТЕРА СІВАЛКИ ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1. Обґрунтування агротехнічних переваг запропонованої геометрії хвиль диска для процесів кришення та локального вологозбереження

Впровадження розробленого дрібнохвильового *Turbo*-профілю прорізного диска ($z_w = 24$, $A_{\max} = 6$ мм) забезпечує суттєві агротехнічні переваги порівняно з серійними гладкими та великохвильовими коултерами за рахунок оптимізації векторів силової взаємодії з двофазним середовищем [3; 19; 20].

Головні конструктивно-технологічні переваги запропонованої геометрії:

Локалізація зони деформації: периферійне гофрування диска входять у ґрунт під кутом, близьким до нормалі, що обмежує динамічну ширину смуги обробітку B_d (рівняння 1.3) в межах 18...22 мм та запобігає руйнуванню мульчувального екрана в міжряддях [16].

Оптимізація фракційного складу: імпульсна ударна дія високої частоти формує в щільному масиві систему мікротріщин, забезпечуючи стабільний вихід агрономічно цінних агрегатів розміром 0,25...10мм на рівні 78...82% без ризику утворення ерозійно-небезпечного пилу [27; 29].

Ефект сухого мульчування *in-situ*: подрібнені ґрунтові частки осідають безпосередньо у смузі посіву, створюючи захисний ізоляційний шар, який перериває висхідні капілярні потоки та знижує дифузійне випаровування води. Це гарантує додаткове збереження вологи в насіннєвому ложі на рівні 14...16% [9; 13].

4.2. Розрахунок капітальних інвестицій на модернізацію профілю та визначення річного економічного ефекту від паливозбереження

Економічна оцінка інженерного рішення базується на зіставленні додаткових капітальних вкладень із річним експлуатаційним ефектом від зниження тягового опору сошникової системи [11].

Величина прямих капітальних інвестицій на модернізацію посівного комплексу $K_{\text{мод}}$ розраховується за формулою:

$$K_{\text{мод}} = n_c \cdot (\Pi_{\text{новий}} - \Pi_{\text{клас}}) + Z_{\text{монт}} \quad (4.1)$$

де n_c — кількість сошникових секцій з коултерами в посівному комплексі ($n_c = 24$), шт.; $\Pi_{\text{новий}}$ — собівартість виготовлення розробленого *Turbo*-диска, грн; $\Pi_{\text{клас}}$ — ринкова вартість стандартного гладкого диска, грн; $Z_{\text{монт}}$ — витрати на демонтаж та слюсарно-монтажні роботи, грн.

Зменшення інтегрального тягового опору диска на 15...18% (підтверджене DEM-моделюванням у підрозділі 2.2) безпосередньо забезпечує зниження витрат дизельного палива [23]. Річне зменшення витрат палива ΔQ (кг) становить:

$$\Delta Q = q_{\text{га}} \cdot \eta_{\text{еф}} \cdot \Omega_{\text{рік}} \quad (4.2)$$

де $q_{\text{га}}$ — базовий рівень гектарної витрати палива при посіві, кг/га; $\eta_{\text{еф}}$ — коефіцієнт паливозбереження за рахунок зниження опору ($\eta_{\text{еф}} = 0,10 \dots 0,12$); $\Omega_{\text{рік}}$ — річний обсяг напрацювання посівного комплексу, га.

Чистий річний економічний ефект $E_{\text{рік}}$ від впровадження розробленого профілю розраховується з урахуванням додаткових амортизаційних відрахувань та нормативного коефіцієнта ефективності:

$$E_{\text{рік}} = \Delta Q \cdot \Pi_{\text{пал}} - (A_{\text{дод}} + E_{\text{норм}} \cdot K_{\text{мод}}) \quad (4.3)$$

де $\Pi_{\text{пал}}$ — вартість 1 кг дизельного палива, грн; $A_{\text{дод}}$ — додаткові річні амортизаційні відрахування на модернізовані вузли, грн; $E_{\text{норм}}$ — нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень.

Перед висвітленням підсумкових техніко-економічних показників проекту модернізації зазначимо, що посилання на результати розрахунків наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Техніко-економічні показники ефективності модернізації коултера

Найменування техніко-економічного показника	Одиниця виміру	Значення показника
Кількість модернізованих дисків на агрегаті пс	шт.	24
Прямі капітальні інвестиції на модернізацію Кмод	грн	28400
Питоме зниження тягового опору сошника	%	15...18
Гектарне паливозбереження	%	10...12
Річний обсяг напрацювання агрегату Ωрік	га	800
Чистий річний економічний ефект Е рік	грн	114600
Строк окупності капітальних інвестицій Ток	років	0,25

Розрахунки (таблиця 4.1) підтверджують високу інженерно-економічну спроможність розробки: повна окупність капітальних інвестицій досягається за перші 1–2 місяці роботи посівного комплексу в полі за рахунок сумарного паливозбереження та утримання продуктивної ґрунтової вологи [13; 22].

Висновки до розділу

Модернізована геометрія хвиль диска ($z_w = 24$, $A_{\max} = 6\text{мм}$) локалізує зону деформації ґрунту в межах 18...22мм, повністю зберігаючи захисний мульчувальний шар у міжряддях [16; 20].

Створення дрібногрудкуватої структури *in-situ* (78...82% корисних фракцій) формує ефект сухої мульчі, яка перериває капілярний вологообмін і додатково утримує 14...16% вологи в ложі [9; 27].

Капітальні інвестиції на переобладнання 24-рядного агрегату становлять 28400 грн, що забезпечує гектарне паливозбереження на рівні 10...12% завдяки зниженню тягового опору сошників [11; 23].

Чистий річний економічний ефект від впровадження розробки становить 114600 грн при річному напрацюванні 800...га, а термін окупності витрат не перевищує 0,25року [13; 22].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Науковий аналіз показав, що для збереження вологи в ґрунті при технологіях *Strip-Till* та *No-Till* необхідно створити захисний шар мульчі, а механічний обробіток робити тільки в зоні посіву, не руйнуючи міжряддя.

Розрахунки геометричних параметрів диска довели, що бічне відкидання ґрунту залежить від його швидкості, кількості та амплітуди хвиль. Новий дрібнохвильовий *Turbo*-диск ($z_w = 24$, $A_{\max} = 6$ мм) працює у вузькій смузі (18...22мм) і не викидає вологі нижні шари ґрунту на поверхню.

Чисельне DEM-моделювання та тензометричні дослідження у лабораторному ґрунтовому каналі за допомогою датчиків *EORT* підтвердили високу інженерну ефективність нової геометрії хвиль. Завдяки реалізації знакозмінного зсуву та мікросколювання замість енергоємного стискання досягнуто зниження питомого тягового опору сошникової системи P_x на 15...18% [15; 23].

Лабораторні дослідження визначили найкращий режим роботи: на швидкості 10...12 км/год *Turbo*-диск забезпечує кришення ґрунту до агрономічно цінних грудочок на рівні 78...82%. При цьому в зоні висіву зберігається до 86...89% вологи за рахунок ефекту «сухої мульчі».

Запропонована ймовірісно-логічна модель розподілу виробничих ризиків дозволила формалізувати ланцюжки відмов у польових умовах та обґрунтувати впровадження превентивних загороджувальних кожухів, вібродемпфуючих сайлентблоків і засобів індивідуального захисту, що знижує небезпеку травматизму до допустимих меж відповідно до стандартів охорони праці та цивільної безпеки [1; 2; 5].

Розрахунок економічної ефективності довів високу комерційну спроможність проекту модернізації сошникової групи сівалки. За умови прямих капітальних інвестицій у розмірі 28400 грн на переобладнання одного 24-рядного агрегату досягається гектарне паливозбереження на рівні 10...12%. Чистий річний економічний ефект становить 114600 грн при терміні окупності капіталовкладень 0,25 року [11; 13; 22].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Забезпечення цивільної безпеки в сучасних умовах : матеріали міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Мелітополь, 26–30 квітня 2021 р.) / за заг. ред. О. В. Яцук. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. 200 с. URL: <https://elar.tsatu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/fd03e033-bdfc-42a1-8a19-a0772a6d05a7/content> (дата звернення: 17.05.2026).
2. Курепін В. М. Особливості системи управління охороною праці в аграрних підприємствах: економічні аспекти розвитку. *Modern Economics*. 2021. № 29. URL: <https://modecon.mnau.edu.ua/issue/29-2021/kurepin.pdf> (дата звернення: 17.05.2026).
3. Bianchini A., Magalhães P. S. G. Evaluation of coulters for cutting sugar cane residue in a soil bin. *Biosystems Engineering*. 2008. Vol. 100, Issue 3. P. 370–375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.04.012>.
4. Bögel T., Osinenko P., Herlitzius T. Assessment of soil roughness after tillage using spectral analysis. *Soil and Tillage Research*. 2016. Vol. 159. P. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.004>.
5. Busari M. A., Kukal S. S., Kaur A., Bhatt R., Dulazi A. A. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*. 2015. Vol. 3, Issue 2. P. 119–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>.
6. De Laune P. B., Sij J. W. Impact of tillage on runoff in long term no-till wheat systems. *Soil and Tillage Research*. 2012. Vol. 124. P. 32–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.04.009>.
7. Endrerud H. C. Dynamic Performance of Drill Coulters in a Soil Bin. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1999. Vol. 74, Issue 4. P. 391–401. DOI: <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0477>.
8. Fanigliulo R., Antonucci F., Figorilli S., Pochi D., Pallottino F., Fornaciari L., Grilli R., Costa C. Light Drone-Based Application to Assess Soil Tillage Quality

- Parameters. *Sensors*. 2020. Vol. 20, Issue 3. Art. 728. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20030728>.
9. Fanigliulo R., Biocca M., Pochi D. Effects of six primary tillage implements on energy inputs and residue cover in Central Italy. *Journal of Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 47, Issue 3. P. 177–180. DOI: <https://doi.org/10.4081/jae.2016.519>.
 10. Fanigliulo R., Biocca M., Pochi D. Evaluation of traditional and conservation tillage methods for cereal cultivation in central Italy. *Chemical Engineering Transactions*. 2017. Vol. 58. P. 211–216. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1758036>.
 11. Fanigliulo R., Biocca M., Pochi D. An analysis of eight tillage methods in a silty-clay soil: proposal for flexible tillage cycles. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 56, No. 3. P. 49–58. URL: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20193027550> (дата звернення: 17.05.2026).
 12. Fanigliulo R., Pochi D., Servadio P. Conventional and Conservation Seedbed Preparation Systems for Wheat Planting in Silty-Clay Soil. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, Issue 11. Art. 6506. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13116506>.
 13. Gałęzewski L., Jaskulska I., Kotwica K., Lewandowski Ł. The Dynamics of Soil Moisture and Temperature—Strip-Till vs. Plowing—A Case Study. *Agronomy*. 2023. Vol. 13, Issue 1. Art. 83. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010083>.
 14. Gebresenbet G., Jönsson H. Performances of seed drill coulters in relation to speed, depth and rake angles. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1992. Vol. 52. P. 121–145. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(92\)80055-W](https://doi.org/10.1016/0021-8634(92)80055-W).
 15. Godwin R. J. An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1975. Vol. 20, Issue 4. P. 347–352. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(75\)90071-2](https://doi.org/10.1016/0021-8634(75)90071-2).
 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, Issue 2. P. 331–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010>.

17. Lal R., Reicosky D. C., Hanson J. D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 93, Issue 1. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.11.004>.
18. Ma Y., Li Z., Xu Y., Li C., Ding H., Li C., Tang Q., Liu M., Hou J. The Development of No-Tillage Seeding Technology for Conservation Tillage—A Review. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, Issue 5. Art. 1808. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17051808>.
19. Magalhães P. S. G., Bianchini A., Braunbeck O. A. Simulated and Experimental Analyses of a Toothed Rolling Coulter for Cutting Crop Residues. *Biosystems Engineering*. 2007. Vol. 96, Issue 2. P. 193–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.10.014>.
20. Rogovskii I. L., Titova L. L., Trokhaniak V. I., Rosamaha Yu. O., Blesnyuk O. V., Ohiienko A. V. Engineering management of two-phase coulter systems of seeding machines for implementing precision farming technologies. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 58, No. 2. P. 137–146. URL: <https://api.inmateh.eu/public/uploads/58-15-Rogovskii-I.L.ee13d835-695f-459b-9574-bee733ed904d.pdf> (дата звернення: 17.05.2026).
21. Römken R. L., Wang J. Y. Effect of tillage on surface roughness. *Transactions of the ASAE*. 1986. Vol. 29, No. 2. P. 429–433. URL: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19862429138> (дата звернення: 17.05.2026).
22. Rusu T. Energy efficiency and soil conservation in conventional, minimum tillage and no-tillage. *International Soil and Water Conservation Research*. 2014. Vol. 2, Issue 4. P. 42–49. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30057-5](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30057-5).
23. Sadek M. A., Chen Y., Zeng Z. Draft force prediction for a high-speed disc implement using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 202. P. 133–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.12.009>.
24. Sherer D. V., Chumanova N. N. Development of a coulter for subsoil broadcasting of grain crops. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 66. Art. 012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/66/1/012033>.

25. Soane B. D., Ball B. C., Arvidsson J., Basch G., Moreno F., Roger-Estrade J. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*. 2012. Vol. 118. P. 66–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>.
26. Spoor G., Godwin R. J. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1978. Vol. 23, Issue 3. P. 243–258. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(78\)90099-9](https://doi.org/10.1016/0021-8634(78)90099-9).
27. Tagar A. A., Adamowski J., Memon M. S., Do M. C., Mashori A. S., Soomro A. S., Bhayo W. A. Soil fragmentation and aggregate stability as affected by conventional tillage implements and relations with fractal dimensions. *Soil and Tillage Research*. 2020. Vol. 197. Art. 104494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104494>.
28. Tebrügge F. No-Tillage Visions - Protection of Soil, Water and Climate and Influence on Management and Farm Income. *Conservation Agriculture*. 2003. Vol. 1. P. 327–340. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-1143-2_39.
29. Usaborisut P., Prasertkan K. Specific energy requirements and soil pulverization of a combined tillage implement. *Heliyon*. 2019. Vol. 5, Issue 11. Art. e02574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02574>.
30. Wang Q., Zhu L., Li M., Huang D., Jia H. Conservation Agriculture Using Coulters: Effects of Crop Residue on Working Performance. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, Issue 11. Art. 4099. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10114099>.

ДОДАТКИ