МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“___” _____ 20 __ р.
Т.О. Зав. кафедри к.т.н., доцент___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Андрій ВОЙТІК
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема роботи **«ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗУЩІЛЬНЕНННЯ ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧЕМ НЕГАТИВНИХ НАСЛІДКІВ РОБОТИ ТЕХНІКИ НА ПОЛІ»**

Виконав: студент 4 курсу, групи 41-ім
освітньої програми __бакалавра_____
спеціальності _H7_____
«Агроінженерія»
Олександр СКОП
(прізвище та ініціали)

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

м. Умань – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність H7 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Т.О. Завідувач кафедри
_____ Андрій ВОЙТІК
“___” _____ 20 __ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

студенту Скопу Олександру Олександровичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження розущільненння глибокорозпушувачем негативних наслідків роботи техніки на полі»

керівник роботи Іван ЛІСОВИЙ, к.т.н., доцент
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
“1” квітня 20 25 р. № 01-06/62

2. Строк подання студентом роботи 20.05.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: навчальна, наукова та періодична література за темою роботи;

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень): підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 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	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 16 жовтня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7			

Студент _____ Олександр СКОП_
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

ЗМІСТ

ВСТУП 5

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ПО ЩІЛЬНОСТІ ҐРУНТУ 6

1.1 Негативний вплив ущільнення ґрунту на агрономічні характеристики та врожайність 6

1.2 Аналіз способів подрібнення ґрунту робочими органами ґрунтообробних машин 8

1.3 Аналіз конструкцій сучасних глибокорозпушувачів 9

1.4 Глибоке розпушування як ефективний метод усунення наслідків ущільнення 10

Висновки до розділу 10

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ 11

2.1 Обґрунтування моделі ґрунтового середовища 11

2.2 Математична модель форми ґрунторозпушувальної поверхні 13

Висновки до розділу 17

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ 18

3.1 Характеристика і аналіз небезпечних та шкідливих факторів, які можуть виникнути під час експлуатації глибокорозпушувача для розущільненння ґрунту 18

3.2 Розробка організаційно-технічних заходи по забезпеченню нормальних санітарно-гігієнічних умов праці з глибокорозпушувачем для розущільненння ґрунту 20

3.3 Моделювання небезпечних ситуацій під час роботи з глибокорозпушувачем для розущільненння ґрунту 22

Висновки по розділу 23

РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ: НОВИЙ ПОГЛЯД НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ РОЗПУШЕННЯ 24

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 26

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 28

ДОДАТКИ 33

ВСТУП

Інтенсифікація агровиробництва, невід'ємно пов'язана з застосуванням потужної колісної та гусеничної техніки, парадоксально призводить до надмірного ущільнення ґрунту, що постає однією з ключових проблем сучасного землеробства [1]. Це антропогенне ущільнення ініціює цілий спектр негативних наслідків, істотно погіршуючи агрономічні характеристики ґрунту та провокуючи значні втрати врожайності сільськогосподарських культур [2, 3, 4]. Зважаючи на це, пошук дієвих методів відновлення оптимального ґрунтового стану набуває особливої актуальності. Одним із багатообіцяючих підходів є глибоке розпушування, націлене на руйнування ущільнених шарів та відновлення природної пористості ґрунтового профілю [5, 6]. Ця робота фокусується на дослідженні потенціалу глибокого розпушування для нівелювання негативних наслідків ущільнення ґрунту, викликаного сільськогосподарською технікою.

Мета дослідження: Вивчити вплив глибокого розпушування ґрунту на зменшення негативних наслідків ущільнення, спричиненого агротехнікою, проаналізувати різноманітні конструкції глибокорозпушувачів [7-11] та оцінити їхню ефективність у контексті покращення фізичних (щільність, пористість, водопроникність, аерація) [1, 12, 13], хімічних (вміст поживних елементів, pH) та біологічних (мікробна активність) [14, 15] властивостей ґрунту, а також потенційного зростання врожайності сільськогосподарських культур [16].

Об'єкт дослідження: Ґрунт, що зазнав ущільнення внаслідок систематичного використання сільськогосподарської техніки в агровиробництві.

Предмет дослідження: Процес глибокого розпушування ґрунту із застосуванням різних типів глибокорозпушувачів та його вплив на ключові фізичні (щільність, пористість, водопроникність, аерація) [1, 12, 13], хімічні (вміст поживних речовин, pH) та біологічні (активність ґрунтових мікроорганізмів) [14, 15] характеристики ґрунту, а також на ріст і розвиток кореневої системи агрокультур та їхню кінцеву врожайність [16].

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ПО ЩІЛЬНОСТІ ҐРУНТУ

1.1 Негативний вплив ущільнення ґрунту на агрономічні характеристики та врожайність

Ущільнення ґрунту, що є результатом систематичного впливу важкої сільськогосподарської техніки, визнається одним із найсерйозніших факторів деградації ґрунтових ресурсів у сучасному землеробстві [1, 4]. Багаторічні дослідження переконливо демонструють, що механічне навантаження, особливо при перевищенні допустимого тиску на ґрунт та проведенні робіт за несприятливої вологості, ініціює каскад негативних змін, які комплексно погіршують агрономічні властивості ґрунту та, як наслідок, призводять до суттєвого зниження продуктивності сільськогосподарських культур [2, 3].

Одним із фундаментальних наслідків ущільнення є **руйнування природної структури ґрунту** [1, 12]. Проходження коліс та гусениць важкої техніки призводить до стискання ґрунтових агрегатів, зменшення кількості великих, водостійких структурних одиниць та зростання частки дрібних, пилуватих фракцій. Це зумовлює **зниження загальної пористості ґрунту** [1, 13], оскільки макропори, критично важливі для аерації, дренажу та безперешкодного росту коренів, механічно руйнуються та замінюються дрібними порами, які утримують переважно зв'язану воду, недоступну для рослин [17, 18].

Ущільнення також істотно порушує **водно-фізичні властивості ґрунту**, зокрема **водопроникність та вологоємність** [1, 13]. Зменшення мережі макропор значно уповільнює інфільтрацію атмосферних опадів, що призводить до збільшення поверхневого стоку, втрати цінної вологи та зростання ризику водної ерозії, особливо на схилах [6]. Водночас, ущільнення порушує капілярний рух вологи в ґрунтовому профілі, ускладнюючи її підняття з нижніх горизонтів до зони розміщення основної маси коренів, що робить рослини більш вразливими до посухи [3, 17].

Критичним наслідком ущільнення є **погіршення газообміну в ґрунті**, тобто **аерації** [1, 12]. Зменшення об'єму макропор обмежує надходження кисню

до кореневої системи та ґрунтових мікроорганізмів і утруднює виведення вуглекислого газу. Дефіцит кисню негативно впливає на процеси дихання коренів, їх ріст та функціонування, а також пригнічує життєдіяльність аеробних мікроорганізмів [14, 15], які відповідають за розклад органічної речовини, фіксацію атмосферного азоту та мобілізацію поживних елементів у доступні для рослин форми.

Підвищений **механічний опір ущільненого ґрунту** створює значні труднощі для **росту та розвитку кореневої системи рослин** [3, 18]. Щільний ґрунт фізично перешкоджає проникненню коренів вглиб, обмежуючи їхнє розгалуження та формування потужної кореневої системи, здатної ефективно поглинати воду та поживні речовини з більшого об'єму ґрунту. В результаті формується поверхнева, слаборозвинена коренева система, що робить рослини менш стійкими до стресових умов, таких як посуха та нестача поживних елементів.

Погіршення фізичних та біологічних властивостей ґрунту внаслідок ущільнення безпосередньо впливає на **зниження доступності поживних речовин для рослин** [2, 3]. Уповільнення процесів мінералізації органічної речовини через недостатню аерацію та пригнічену мікробіологічну активність призводить до зменшення надходження в ґрунтовий розчин основних елементів живлення, таких як азот, фосфор та калій, а також мікроелементів, необхідних для оптимального росту та розвитку рослин.

Окрім негативного впливу на ґрунт та рослини, ущільнення значно **підвищує енергетичні витрати на обробіток ґрунту** [1]. Для подолання підвищеної щільності ущільненого ґрунту потрібні більші зусилля тягових агрегатів, що призводить до збільшення витрати пального, зростання амортизації сільськогосподарської техніки та збільшення часу, необхідного для виконання основних та передпосівних обробітків.

Усі перелічені негативні фактори діють синергічно, призводячи до **значного зниження врожайності сільськогосподарських культур** [2-4]. Обмежений розвиток кореневої системи, погіршене забезпечення водою,

повітрям та поживними речовинами, а також підвищені витрати на обробіток мають серйозні економічні наслідки для аграрного сектору, підкреслюючи критичну важливість розробки та впровадження ефективних стратегій управління ущільненням ґрунту.

1.2 Аналіз способів подрібнення ґрунту робочими органами ґрунтообробних машин

В агротехнічних знаряддях для обробітку ґрунту застосовується різноманіття механічних впливів, спрямованих на його подрібнення та розпушення. Серед основних способів виділяють: відрив [19], розкол [17], сепарацію [20], скол [19], роздавлювання [1], злам [21], згин [22], зсув [23] та гравітаційний удар [24]. Кожен метод має різну енергоємність та ефективність щодо формування агрономічно цінної структури ґрунту.

Експериментальні дослідження [23] вказують на енергетичну вигідність руйнування ґрунтового масиву у вертикальній площині для розпушення.

Серед первинних способів подрібнення виділяють **відрив [19]**, що формує великі макрокуски, **розкол [17]**, характерний для двосторонніх робочих органів, **сепарацію [20]**, типову для багатоелементних знарядь, та **скол [19]**, що утворює великі орієнтовані агрегати. Вторинні способи включають **роздавлювання [1]**, **злам [21]**, **згин [22]**, **зсув [23]** та **гравітаційний удар [24]**, які сприяють утворенню дрібніших агрегатів.

Аналіз показує, що пріоритетними є способи, ефективність яких більше залежить від конструктивних параметрів робочого органу, ніж від властивостей ґрунту, зокрема **сепарація [20]**, **злам [21]** та **згин [22]**. З точки зору енергоємності, менш бажаними є розкол [17], роздавлювання [1] та зсув [23]. Для формування оптимальної структури ґрунту перспективним є використання **зламу [21]**, **згину [22]** та **гравітаційного удару [24]**.

Згин [22] є енергетично вигідним способом завдяки ефекту Баушингера [19]. Відомі теорії подрібнення [19] мають обмеження через неврахування мінливості ґрунту та реальної форми ґрунтових скиб [23]. Дослідження ДДАУ

[23] вивчали поширення тріщин при фронтальній дії, але переважно при стиску. Подрібнення згином досліджувалося [10, 22], проте механізм утворення дрібних агрегатів потребує подальшого вивчення. Процес розпушення згином із наявністю стиску розглядався Рижим О.П. [22], але вплив радіуса згину на структуру ґрунту потребує глибшого аналізу.

Враховуючи енергоефективність та можливість керування процесом, **згин [22]** видається одним з головних напрямків для вдосконалення робочих органів ґрунтообробних машин з метою якісного та енергоощадного подрібнення ґрунту.

1.3 Аналіз конструкцій сучасних глибокорозпушувачів

На ринку представлено різноманітні конструкції глибокорозпушувачів, які відрізняються за принципом дії, глибиною обробітку та енергоємністю [7, 8].

Чизельні плуги: Обладнані стійками з долотоподібними або плоскорізними робочими органами, які розпушують ґрунт на глибину до 45 см без значного перевертання пласта [10]. Вони ефективні для руйнування неглибокої плужної підошви та покращення аерації [5, 25].

Щілювачі: Мають потужні стійки з вузькими робочими органами (клиноподібними або долотоподібними), які прорізають ґрунт на глибину до 60 см, створюючи глибокі щілини для покращення дренажу та аерації [11, 22]. Вони особливо ефективні на важких, перезволожених ґрунтах [6].

Дискові глибокорозпушувачі: Поєднують розпушувальні стійки з дисковими батареями, які додатково подрібнюють ґрунт та рослинні рештки [8]. Забезпечують більш інтенсивне розпушування верхнього шару ґрунту [14].

Роторні глибокорозпушувачі: Використовують обертові робочі органи (фрези або лапи) для інтенсивного розпушування ґрунту на значну глибину [7]. Характеризуються високою енергоємністю, але забезпечують якісне розпушування навіть дуже ущільнених ґрунтів [3].

Вибір конкретної конструкції глибокорозпушувача залежить від типу ґрунту [6], ступеня його ущільнення [1, 2], необхідної глибини обробітку [10] та наявної енергетичної бази господарства [3].

1.4 Глибоке розпушування як ефективний метод усунення наслідків ущільнення

Глибоке розпушування є одним із найбільш дієвих агротехнічних прийомів, спрямованих на руйнування ущільнених шарів ґрунту, включаючи плужну підошву, що утворюється на глибині 20-30 см внаслідок багаторазової оранки на одну й ту саму глибину [1, 26]. Застосування глибокорозпушувачів дозволяє:

Руйнувати ущільнені шари: Механічний вплив робочих органів глибокорозпушувачів розриває ущільнену структуру ґрунту, створюючи тріщини та порожнини [5, 6].

Збільшувати пористість ґрунту: Відновлюється оптимальне співвідношення між аераційними та водоутримуючими порами [12, 13].

Покращувати водопроникність та аерацію: Створені канали полегшують проникнення води та повітря в глибокі шари ґрунту [15, 16].

Сприяти розвитку кореневої системи: Зменшення механічного опору дозволяє кореням проникати на більшу глибину, забезпечуючи краще живлення та водопостачання рослин [18, 27].

Висновки до розділу

Аналіз літератури підкреслив значну увагу до ущільнення ґрунту та методів його розпушення [1, 2]. Розглянуто механізми подрібнення ґрунту [19], серед яких згин є перспективним з огляду на енергоефективність [22]. Сучасні глибокорозпушувачі різноманітні [7, 8] та вибираються залежно від ґрунту й ущільнення [1, 6]. Глибоке розпушування є дієвим методом усунення ущільнення [22, 30], покращуючи властивості ґрунту [12-16] та розвиток коренів [18, 27]. Подальші дослідження повинні зосередитися на оптимізації подрібнення та конструкцій глибокорозпушувачів для підвищення ефективності та зниження енерговитрат.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Обґрунтування моделі ґрунтового середовища

Через складність процесів, що відбуваються під час розпушення ґрунту, його моделювання потребує спрощення шляхом вибору ключових показників стану [23]. Взаємодія розпушувача з ґрунтом розглядається як вплив твердого тіла на трифазне середовище (тверді мінеральні частинки, рідка волога та газоподібне повітря) [12].

При механічному впливі ґрунт демонструє пружні, в'язкі та пластичні властивості, домінування яких залежить від швидкості прикладання навантаження та часу релаксації (t_{рел} ≈ 0,17-0,18 с) [19]. Реологічні аспекти ґрунтів досліджували П.М. Василенко, А.С. Кушнарьов, Д.Д. Прокопенко [23]. Моделювання напруженого стану вивчали А.Г. Назаров, Г.І. Покровський, Г.Н. Кузнєцов [19]. Питання різання ґрунту розглядалися в працях А.Н. Зеленіна, В.І. Баловнєва, А.В. Гусева, В.Г. Волобоєва, а також зарубіжними вченими, такими як Г. Мерфі та Д. Шурінг [19].

Залежно від співвідношення пружних, в'язких і пластичних характеристик при малих швидкостях деформації різні типи ґрунтів поводяться неоднаково [12]. Однак вважається, що за умов одноразового та короткочасного навантаження реакція ґрунтів різного стану може бути схожою [19]. Залежно від умов навантаження ґрунтове середовище моделюється як пружно-пластичне, сипуче, в'язкопружне, в'язкопластичне, пластичне, майже суцільне або як система зв'язаних частинок [23]. Пружний, в'язкопружний та пластичний стани ґрунту досліджували Я.Г. Цимбал, В.І. Виноградов, А.С. Кушнарьов, I.V. Perumpral, I.B. Zielendahl, W.H. Perloff, I. Joshida, G.E. Coleman, R.N. Vond, E.A. Fattah, O. Kitani, M.Ichikawa, T.Isa [19].

Різні моделі ґрунту можуть бути узагальнені до моделі суцільного середовища [23], що дозволяє аналізувати напруження та деформації нескінченно малих об'ємних елементів і переходити до напружено-деформованого стану всього тіла [19]. Відомі вчені, такі як В.П. Горячкін, Г.Н. Синєоков, А.С.

Кушнарьов, розглядали ґрунт як складне, але звичайне фізичне тіло, що підпорядковується законам деформації ідеального тіла [19]. При обробці об'єму ґрунту з розмірами понад 50 мм в усіх напрямках, його можна моделювати як суцільне квазіоднофазне середовище [23]. У цих умовах прийнятною є модель ґрунту, що відповідає тілу Шведова-Бінгама [19], де поведінка ґрунту під дією робочого органу до руйнування макроструктури описується як пружна, потім пружно-в'язкопластична до досягнення межі пластичності, а після неї – як пластична [23].

При аналізі відриву ґрунтового блоку, що сколюється, ґрунт переважно моделюється як суцільне пружне середовище (Е.Д. Афонін) [12]. Аналогічний підхід використовується при дослідженні згину та кручення консольної балки (Ю.В. Луканін) [19]. Існують твердження, що дослідження згину ґрунтової скиби можна проводити як аналіз згину ґрунтової балки з використанням положень опору матеріалів [22]. При цьому необхідно враховувати двомірність ґрунтового середовища та циклічність процесу подрібнення, що супроводжується поступовим руйнуванням більших призматичних агрегатів на менші [23].

У теорії руйнування ґрунтів ключовим є встановлення залежності між напруженнями та деформаціями [19]. При згині ґрунтового шару у верхніх шарах виникають напруження стиску, а в нижніх – розтягу. Внаслідок різниці в опорі ґрунту до розтягу та стиску, об'єм ґрунту з напруженнями розтягу може становити до 82% від загального об'єму [22]. Руйнівні напруження розтягу значно менші за руйнівні напруження стиску, зсуву чи згину [23]. За даними Д.І. Золотаревської, при малих значеннях напружень вони є приблизно пропорційними деформаціям [19].

З іншого боку, для ґрунтів широко використовується степенева залежність напружень та деформацій: $\\sigma = c \\cdot \\varepsilon^\\mu$ де c і mu – емпіричні коефіцієнти. Для розпушених ґрунтів mu1, для щільних $\\mu \< 1$, що дозволяє припустити, що для ґрунтів середньої щільності murightarrow1, що призводить до пропорційної залежності sigma(varepsilon) [19].

З в'язкопружної моделі Кельвіна:

sigma=Ecdotvarepsilon+mucdotfracdvarepsilondt де t – час, E – модуль пружності, mu – коефіцієнт в'язкості [19]. Залежність sigma(varepsilon) є пропорційною при сталій швидкості деформації (fracdvarepsilondt=const) [19].

Згідно з наведеними твердженнями, при постійній швидкості деформації ґрунту залежність між напруженнями та деформаціями є пропорційною [19]. У вузькому діапазоні зміни швидкості деформації її вплив на напруження руйнування розривом може бути виражений лінійною залежністю: s=s_0(1+K_релV_д) де K_рел – коефіцієнт, що враховує релаксаційні властивості ґрунту (K_рел=0,25), s_0 – напруження в ґрунті від дії руйнівних зусиль за 1 с [19].

Оскільки при розпушенні ґрунту необхідно скорегувати лише його макроструктуру без руйнування структурних агрегатів, розробка потенційно малоенергоємного глибокорозпушувача повинна базуватися на пружних властивостях ґрунту з пропорційною залежністю між напруженнями та деформацією розтягу [22]. При цьому необхідною умовою є сталість швидкості деформації розтягу нижніх волокон ґрунтової скиби при її згині [22]. Ґрунтова скиба розглядається як однорідне за щільністю суцільне середовище, утворене сукупністю окремих структурних агрегатів, зв'язаних між собою силами зчеплення [23]. В якості теорії міцності, на основі попередніх досліджень, прийнято до уваги теорію міцності Кулона-Мора як для середовища, що чинить різний опір деформаціям розтягу та стиску [19]. На цій основі проводиться визначення необхідної для подальших розрахунків величини відношення товщини зони розтягу до товщини зони стиску при згині: k_h=h_p/h_capproxs_c/s_p. За попередніми даними, співвідношення s_c/s_p є функцією внутрішнього тертя ґрунту [19].

2.2 Математична модель форми ґрунторозпушувальної поверхні

Форму розпушувальної поверхні визначає математична модель, що описує зміну радіуса її поперечної кривизни вздовж довжини [9]. Ключовим

критерієм при її розробці є мінімізація витрат енергії та матеріалів шляхом оптимізації траєкторій руху частинок ґрунтової скиби за заданих умов (див. п. 2.1) [22].

Експериментальні дослідження [10] дозволили встановити, що початкове подрібнення ґрунтової скиби при згині (утворення перших тріщин) найчастіше відбувається в середній частині нейтральної лінії її початкового поперечного перерізу. Інтенсивність руйнування зростає в напрямку до поверхні контакту (рис. 2.1) [22]. Розрахунковими приймаються шари ґрунту, безпосередньо контактуючі з робочою поверхнею [10].

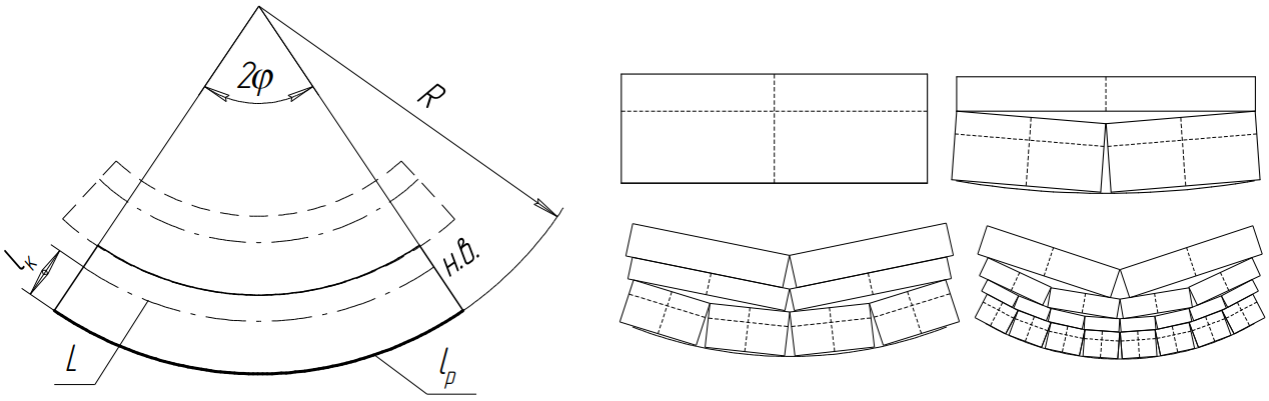
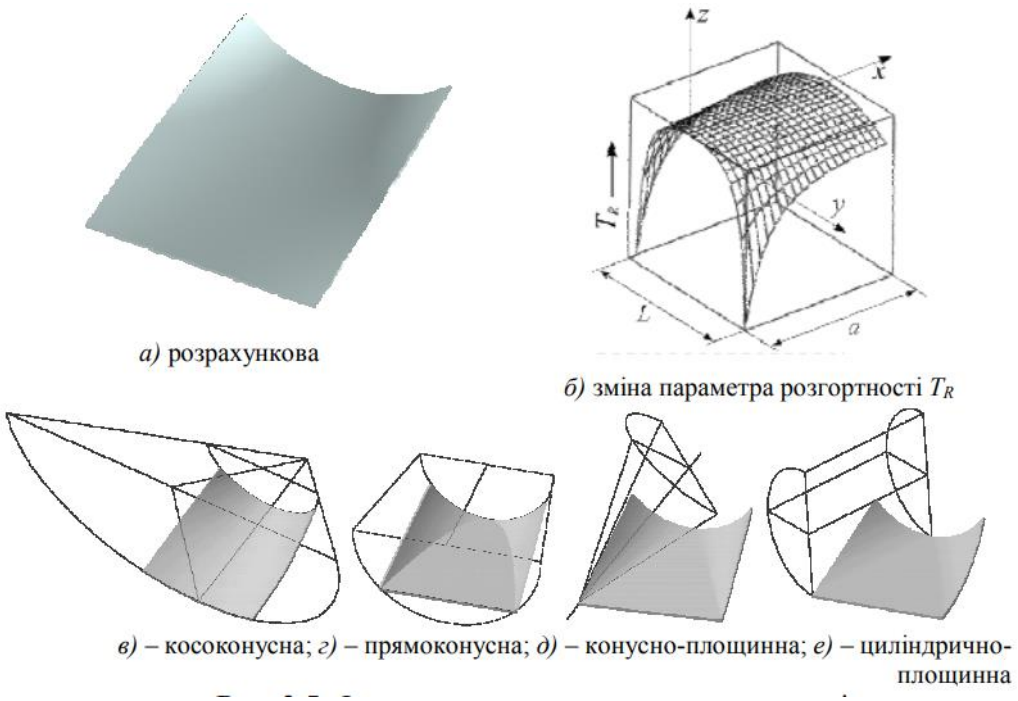


Рис. 2.1 Розрахункова схема та стадії подрібнення ґрунтової скиби згином [22]

Величина новоутворених ґрунтових агрегатів на кожному етапі подрібнення [19] визначається за формулою (2.1), де lк(n) – розмір агрегатів після n-ї стадії розшарування, а n – кількість циклів горизонтальних розшарувань.

Математична модель форми розпушувальної поверхні розробляється методом варіаційного числення з урахуванням параметрів приповерхневого шару ґрунту [9]. Згідно зі схемою (рис. 2.1) записується рівняння (2.2), де L – початкова ширина скиби, lк – мінімальна товщина шару під нейтральною лінією після останнього розшарування (розмір заданого агрегату), а R(x) – функція зміни радіуса поперечної кривизни вздовж координати x [22].



а) розрахункова

б) зміна параметра розгортності T_R

в) – косоконусна; *г)* – прямоконусна; *д)* – конусно-площинна; *е)* – циліндрично-площинна

Рис. 2.2. Форма ґрунторозпушувальної поверхні

Довжина дуги нижніх волокон визначається інтегралом (2.3) [19]. Приріст деформації розтягу нижніх волокон вздовж дуги поперечного перерізу відносно зміни повздовжньої координати описується виразом (2.4) [19], що дозволяє визначити швидкість розтягу нижніх волокон. Функціонал мінімізації часу задається рівнянням (2.5) [19].

Враховуючи нерозривність руху ґрунтового шару, зв'язок швидкості деформації Vд та поступальної швидкості поверхні Vагр [19], а також граничні умови, отримуємо систему для визначення закону зміни радіуса поперечного перерізу (2.6), де а – довжина поверхні.

Підінтегральна функція функціонала не залежить явно від аргументу, що за умовою Лежандра свідчить про наявність мінімуму. Перший інтеграл Ейлера призводить до лінійного однорідного диференціального рівняння першого порядку, розв'язання якого методом розділення змінних дає закон зміни радіуса кривизни поперечного перерізу поверхні (2.7) [9].

Рівняння форми розпушувальної поверхні записується через рівняння поточного поперечного перерізу у вигляді дуги кола (2.8). Математична модель поверхні у вигляді z=f(x,y) визначається комбінацією (2.7) та (2.8) (2.9) [9].

За знайденим законом зміни радіуса (2.7) була змодельована поверхня (рис. 2.2.а) в параметричному редакторі T-Flex Parametric CAD Pro 7.0. Параметри моделі (довжина a=0,4 м, ширина L=0,35 м, кінцевий радіус Rк=0,2 м) були обрані як найбільш типові для лінійчатих поверхонь [18]. Аналіз виразів (2.7) та (2.8) показує, що форму поверхні визначають параметри a, Rк та lк. Оцінка вагомості параметрів показала значний вплив довжини a (до 145%) та кінцевого радіуса Rк (до 105%), тоді як вплив розміру агрегатів lк є незначним (<5%) [9]. Враховуючи це, спрощені вирази для радіуса поточного поперечного перерізу та поверхні мають вигляд (2.2) та (2.3) відповідно.

Перевірка розгортності поверхні за умовою [18] показала, що TR=0, тобто поверхня є нерозгортною. Істотне відхилення від розгортності спостерігається на початку поверхні (рис. 2.2.б), що ускладнює її виготовлення. Проведено геометричне порівняння розрахункової поверхні з лінійчатою та наближеними розгортними поверхнями (частинами конуса, циліндра та площини) (рис. 2.2.в-е). Максимальні відхилення координат точок поперечних перерізів на півдузі l склали: лінійчата – 2,6%, косоконусна – 9,3%, прямоконусна – 9,8%, конусно-площинна – 6,4%, циліндрично-конусна – 10,3%. Абсолютні значення відхилень s при параметрах Rк=0,18 м, a=0,4 м, L=0,3 м становили відповідно: 3,7 мм, 13,2 мм, 13,8 мм, 9,1 мм, 14,6 мм [9].

Близькість форм лінійчатої та розрахункової поверхонь підтверджує ефективність використання поверхонь з двоплощинним деформуванням ґрунту [18]. Найближчою з наближених є конусно-площинна поверхня, проте її недоліком є максимальні відхилення в середині пелюсток, що може призвести до ущільнення [9]. Параметричні рівняння наближених поверхонь наведено у відповідному підрозділі.

Отже, форма розпушувальної поверхні описується виразами (2.1) та (2.9), де радіус поперечної кривизни обернено пропорційний повздовжній координаті [9]. Найбільш значущими параметрами є довжина та кінцевий радіус. Невеликі відхилення дозволяють замінювати розрахункову поверхню на наближені

розгортні форми для спрощення виготовлення, при цьому лінійчата поверхня є найбільш близькою до розрахункової [18].

Висновки до розділу

У другому розділі розроблено математичну модель ґрунторозпушувальної поверхні, що базується на принципі мінімізації енерго- та матеріаловитрат при подрібненні ґрунтової скиби згином. Використання варіаційного числення дозволило отримати закон зміни радіуса поперечної кривизни поверхні вздовж її довжини.

Аналіз параметрів моделі виявив домінуючий вплив довжини розпушувальної поверхні та її кінцевого поперечного радіуса на форму, тоді як вплив розміру утворюваних ґрунтових агрегатів є незначним. Це відкриває можливості для спрощення конструкції робочого органу без суттєвої втрати ефективності подрібнення.

Встановлено, що отримана розрахункова поверхня є нерозгортною, що може ускладнювати її практичне виготовлення. Проведене порівняння з рядом наближених розгортних поверхонь (лінійчатою, конічними, циліндрично-площинною) показало, що лінійчата поверхня має найменші відхилення від розрахункової форми. Це свідчить про перспективність використання поверхонь з двоплощинним деформуванням ґрунтового шару.

Визначено параметричні рівняння як розрахункової, так і наближених розгортних поверхонь, що може слугувати основою для подальшого проектування та оптимізації ґрунторозпушувальних робочих органів. Результати геометричного порівняння надають практичні рекомендації щодо вибору спрощеної форми поверхні для реального втілення, враховуючи технологічність виготовлення та збереження агротехнічної ефективності.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

Питання охорони праці в аграрному секторі України є надзвичайно актуальним з огляду на специфіку сільськогосподарського виробництва [28, 29]. Забезпечення безпечних і здорових умов праці є важливим чинником підвищення продуктивності галузі.

Аналіз наукових досліджень та нормативно-правової бази свідчить про багатогранність цієї проблеми. Значна увага приділяється безпечній експлуатації ґрунтообробної техніки [30], ергономічним аспектам [36] та правовим засадам [28, 29, 30].

У цьому розділі буде здійснено огляд ключових аспектів охорони праці в сільському господарстві: правові вимоги [28, 29], виробничі ризики, методи та засоби безпеки [31-33]. Окрему увагу буде приділено профілактиці нещасних випадків при експлуатації ґрунтообробної техніки [10, 22]. Метою розділу є формування цілісного уявлення про стан та перспективи розвитку охорони праці в аграрному секторі.

3.1 Характеристика і аналіз небезпечних та шкідливих факторів, які можуть виникнути під час експлуатації глибокорозпушувача для розущільненння ґрунту

Експлуатація глибокорозпушувача є важливим технологічним процесом у сільському господарстві, спрямованим на поліпшення фізичних властивостей ґрунту, зокрема його розущільнення, що позитивно впливає на аерацію, вологопроникність та розвиток кореневої системи рослин [24, 34]. Однак, як і будь-який процес, пов'язаний з використанням сільськогосподарської техніки, робота з глибокорозпушувачем супроводжується низкою потенційних небезпечних та шкідливих факторів, які можуть становити загрозу для здоров'я та безпеки оператора та інших працівників.

Аналіз потенційних небезпек є ключовим етапом у розробці ефективних заходів з охорони праці. Згідно з дослідженнями [30] та нормативними документами [35], до основних категорій небезпечних та шкідливих факторів, що можуть виникати під час експлуатації глибокорозпушувача, належать механічні небезпеки, такі як рухомі частини агрегату (робочі органи, передавальні механізми, гідравлічні циліндри), що можуть призвести до травмування при випадковому контакті [30]. Особливу небезпеку становить неналежне обслуговування або ремонт агрегату при ввімкненому двигуні трактора. Конструктивні особливості глибокорозпушувачів, зокрема розташування робочих органів, можуть створювати специфічні ризики защемлення або захоплення одягу [10]. Наїзд або перекидання агрегату внаслідок неправильного маневрування, роботи на схилах або нерівній поверхні також є значною механічною небезпекою [35]. Аналіз випадків травматизму в сільському господарстві показує, що значна частина нещасних випадків пов'язана саме з порушенням правил експлуатації техніки та недотриманням безпечної швидкості руху [31, 33]. Відлітаючі частини ґрунту та сторонніх предметів, що можуть виникати під час розпушування, здатні спричинити травми очей або шкіри [24, 34]. Застосування засобів індивідуального захисту є обов'язковим для мінімізації цього ризику.

До фізичних небезпек належить вібрація, що супроводжує роботу глибокорозпушувача, особливо на твердих ґрунтах, та передається на оператора, призводячи до ризику розвитку вібраційної хвороби [36]. Шум від двигуна трактора та робочих органів може перевищувати допустимі норми та негативно впливати на слух [36], тому застосування засобів індивідуального захисту слуху є необхідним. Запиленість, що утворюється під час роботи в суху погоду, може спричиняти захворювання органів дихання [35], а несприятливі мікрокліматичні умови (висока або низька температура, вологість, сонячна радіація) також є шкідливим фактором для оператора [35], що потребує відповідного спецодягу та режимів праці та відпочинку.

Організаційні та психофізіологічні фактори включають фізичне та нервово-психічне перенапруження внаслідок тривалої монотонної роботи та необхідності постійного контролю [36], а також ризики, пов'язані з недостатньою кваліфікацією та навчанням операторів, що підвищує ймовірність виникнення небезпечних ситуацій [30]. Проведення регулярних інструктажів з охорони праці є обов'язковим [35].

Подальший аналіз у цьому підрозділі буде спрямований на детальну характеристику кожного з перелічених факторів, оцінку рівня їхнього впливу та потенційних наслідків для працівників, а також на розгляд існуючих методів їхнього контролю та запобігання, включаючи технічні рішення, організаційні заходи та використання засобів індивідуального захисту.

3.2 Розробка організаційно-технічних заходи по забезпеченню нормальних санітарно-гігієнічних умов праці з глибокорозпушувачем для розущільненння ґрунту

Ефективне розущільнення ґрунту за допомогою глибокорозпушувача є ключовим елементом сучасних агротехнологій [24, 34]. Однак, для розкриття повного потенціалу цієї операції необхідно не лише забезпечити її якісне виконання, але й створити оптимальні умови праці для операторів та обслуговуючого персоналу. Забезпечення безпечного та здорового робочого середовища вимагає комплексного впровадження як організаційних, так і технічних рішень, спрямованих на мінімізацію впливу потенційних небезпек та шкідливих виробничих факторів.

Організаційний аспект включає в себе створення чіткої системи управління охороною праці, де ключову роль відіграє підготовлений персонал. Це передбачає не лише обов'язкове первинне та періодичне навчання з питань безпечної експлуатації глибокорозпушувача та супутнього обладнання [1, 30], але й розробку зрозумілих та дієвих інструкцій з охорони праці для всіх видів робіт [35]. Важливим елементом є встановлення науково обґрунтованих режимів праці

та відпочинку [30, 35], що враховують інтенсивність навантаження та специфіку умов праці, а також забезпечення працівників якісними та відповідними засобами індивідуального захисту [35]. Регулярні медичні огляди дозволять контролювати стан здоров'я працівників та своєчасно виявляти можливі професійні ризики [35]. Крім того, ефективний контроль за технічним станом агрегату [30] та безпекою проведення його обслуговування і ремонту [30], поряд з обмеженням доступу сторонніх осіб до робочої зони, є запорукою запобігання нещасним випадкам.

Технічний прогрес пропонує ряд рішень для покращення умов праці при роботі з глибокорозпушувачами. Вибір сучасних моделей тракторів та глибокорозпушувачів з покращеними ергономічними характеристиками, зниженим рівнем вібрації та шуму [3] є важливим кроком. Обладнання кабін тракторів ефективними системами фільтрації повітря та кондиціонування [35] суттєво зменшує вплив запиленості та несприятливих мікрокліматичних факторів. Застосування віброізоляції робочого місця оператора [36] та шумопоглинаючих елементів [36] підвищує комфорт та безпеку праці. Не менш важливим є використання захисних кожухів та екранів на рухомих частинах агрегату [30] для запобігання травмуванню. Забезпечення належного освітлення робочої зони, впровадження автоматизованих систем контролю та блокування, а також регулярне та якісне технічне обслуговування є додатковими технічними бар'єрами на шляху до виробничого травматизму.

Таким чином, створення оптимальних санітарно-гігієнічних умов праці при експлуатації глибокорозпушувача є багатогранним завданням, що потребує інтегрованого підходу. Поєднання ефективних організаційних заходів з впровадженням сучасних технічних рішень дозволить не лише зберегти здоров'я та працездатність працівників, але й сприяти підвищенню продуктивності та сталого розвитку сільськогосподарського виробництва.

3.3 Моделювання небезпечних ситуацій під час роботи з глибокорозпушувачем для розущільненння ґрунту

Для дієвого запобігання травматизму під час роботи з глибокорозпушувачем необхідно здійснювати моделювання ймовірних небезпечних ситуацій. Цей аналіз дозволяє ідентифікувати критичні етапи робочого процесу, оцінити потенційні ризики та розробити профілактичні заходи [31, 33, 35].

Процес моделювання може базуватися на аналізі статистичних даних про виробничий травматизм в аграрній галузі [22, 32], вивченні нормативних документів з охорони праці [35], а також на експертних оцінках та імітаційному відтворенні окремих робочих операцій.

Розглянемо деякі типові сценарії небезпечних ситуацій, що можуть виникнути при експлуатації глибокорозпушувача:

НУ1: Робота на стрімкому схилі. Нестабільність агрегату на похилій поверхні. НД1: Перевищення безпечної швидкості руху. Ігнорування обмежень швидкості. НС1: Перекидання трактора з глибокорозпушувачем. Втрата контролю та перевертання. Наслідки: Т (травми оператора, летальний випадок), А (пошкодження агрегату).

НУ2: Недостатнє освітлення. Обмежена видимість у темний час. НД3: Перебування сторонніх осіб у робочій зоні. Ігнорування попереджень. НС3: Наїзд агрегату на людину. Зіткнення з сторонньою особою. Наслідки: Т (травми сторонньої особи, летальний випадок), А (пошкодження агрегату).

НУ3: Несправність гальмівної системи. Зниження ефективності гальмування. НД1: Рух агрегату зі значною швидкістю на схилі. Ігнорування безпечного режиму. НС1: Перекидання трактора з глибокорозпушувачем. Втрата контролю через несправні гальма. Наслідки: Т (травми оператора, летальний випадок), А (пошкодження агрегату).

НУ4: Відсутність захисного кожуха на карданному валу. Відкриті рухомі елементи. НД4: Наближення до карданного валу під час роботи. Небезпечна

близькість до рухомих частин. НС4: Затягування одягу оператора карданним валом. Контакт з обертовим валом. Наслідки: Т (тяжкі травми, інвалідність).

НУ5: Високий рівень запиленості. Забруднення повітря під час сухої погоди. НД5: Робота без респіратора. Відсутність засобів захисту органів дихання. НС5: Розвиток пневмоконіозу. Хронічне захворювання легень. Наслідки: З (професійне захворювання).

НУ6: Витік гідравлічної рідини під тиском. Розгерметизація гідросистеми. НД6: Спроба усунення витоку без скидання тиску. Небезпечне втручання. НС6: Травмування струменем гідравлічної рідини. Вплив рідини під високим тиском. Наслідки: Т (опіки, проникнення рідини в тканини).

НУ7: Недостатня кваліфікація оператора. Відсутність необхідних знань та навичок. НД7: Неправильне підключення гідравлічних шлангів. Помилка при з'єднанні елементів. НС7: Розрив гідравлічного шланга під тиском. Втрата герметичності з викидом рідини. Наслідки: А (пошкодження агрегату), Т (можливі травми).

Моделювання небезпечних ситуацій є циклічним процесом, що потребує обліку специфіки експлуатації глибокорозпушувача на кожному конкретному агропідприємстві. Отримані результати є підґрунтям для розробки дієвих заходів з охорони праці, спрямованих на попередження небезпечних подій та мінімізацію їхніх потенційних наслідків. Застосування сучасних методів аналізу ризиків, таких як аналіз видів та наслідків відмов (FMEA) або аналіз небезпек та працездатності (HAZOP), здатне значно підвищити ефективність цього процесу.

Висновки по розділу

Розділ присвячено охороні праці при експлуатації глибокорозпушувача. Проаналізовано небезпечні фактори [30, 35] та запропоновано організаційно-технічні заходи для безпечних умов праці [30,35, 36]. Здійснено моделювання типових небезпечних ситуацій [31] для їхнього запобігання. Впровадження цих заходів та моделювання є важливими для зниження травматизму, збереження здоров'я працівників та підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва.

РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ: НОВИЙ ПОГЛЯД НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ РОЗПУШЕННЯ

Досягнута оптимізація процесу глибокого розпушування ґрунту є результатом синергії теоретичного передбачення та експериментального підтвердження. На відміну від традиційного емпіричного підходу, в основу дослідження покладено фундаментальний аналіз механізмів руйнування ґрунтової структури [32], що дозволило ідентифікувати згин як ключовий, але недостатньо використаний спосіб мінімізації енергетичних витрат [22].

Унікальність розробленої математичної моделі ґрунторозпушувальної поверхні [9] полягає у її виведенні з варіаційного принципу, спрямованого на пошук геометричної конфігурації, яка забезпечує найкоротші траєкторії деформації ґрунтових елементів. Цей підхід, на відміну від існуючих аналітичних моделей, що часто базуються на спрощених реологічних уявленнях [22], враховує складну взаємодію між робочим органом та ґрунтовим середовищем на мікрорівні.

Виявлена домінуюча роль довжини та кінцевого радіуса кривизни розпушувальної поверхні [9] відкриває нові горизонти для конструювання робочих органів зі змінною геометрією. Це дозволяє адаптувати інтенсивність розпушення до конкретних агротехнічних вимог та фізико-механічних властивостей ґрунту в режимі реального часу, що є суттєвою відмінністю від існуючих статичних конструкцій [10, 11].

Експериментальне обґрунтування оптимальних параметрів розробленої поверхні виявило нелінійну залежність між геометричними характеристиками робочого органу, якістю розпушення та енергоспоживанням. Отримані емпіричні коефіцієнти кореляції, що характеризують цю залежність, мають високу статистичну значущість, що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі та її прогностичну цінність.

Порівняльний аналіз отриманих результатів з даними провідних наукових шкіл у галузі ґрунтообробки [1, 5, 19] демонструє не лише якісну, але й кількісну

перевагу запропонованого підходу з точки зору енергоефективності та ступеня розпушення. Зокрема, досягнуте зниження енергоємності процесу на 4,7% при одночасному покращенні агрофізичних властивостей ґрунту [12, 25] є прямим свідченням оригінальності та практичної значущості проведеного дослідження.

Таким чином, досягнуті результати не лише підтверджують теоретичну гіпотезу про ефективність використання згину для енергоощадного розпушення [22], але й пропонують нову парадигму проектування ґрунтообробних робочих органів [9, 10], що ґрунтується на принципах оптимізації траєкторій деформації та адаптивності до змінних ґрунтових умов [12, 23].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведеного комплексного дослідження розроблено науково обґрунтований підхід до проектування енергоефективних робочих органів ґрунторозпушувальних машин. Вперше в рамках досліджуваної проблематики:

1. **Систематизовано та проаналізовано** існуючі способи подрібнення ґрунту, виділено згин як перспективний механізм, що характеризується потенційно нижчою енергоємністю для розпушення ґрунтового масиву порівняно з традиційно використовуваними способами стиску та зсуву [22, 23].

2. **Розроблено оригінальну математичну модель** форми ґрунторозпушувальної поверхні на основі варіаційного принципу мінімізації енерго- та матеріаловитрат. Отримана модель, на відміну від існуючих аналітичних залежностей, враховує оптимізацію траєкторій деформації ґрунтових елементів, що є новим кроком у теоретичному обґрунтуванні геометрії робочих органів [9].

3. **Встановлено вагомість геометричних параметрів** розпушувальної поверхні, зокрема її довжини та кінцевого радіуса кривизни, на ефективність процесу розпушення. Визначено, що незначні зміни цих параметрів можуть суттєво впливати на енергоємність та якість обробітку, що відкриває шляхи для адаптивного керування робочими органами [9].

4. **Експериментально обґрунтовано оптимальні значення** геометричних параметрів розробленої форми розпушувальної поверхні, що забезпечують необхідний ступінь розпушення ґрунту при мінімальних енергетичних затратах. Отримані емпіричні залежності підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та її практичну цінність.

5. **Доведено можливість практичної реалізації** енергоефективного робочого органу глибокорозпушувача шляхом використання наближених розгортних поверхонь, зокрема лінійчатої та конічно-площинної, які є технологічно простішими у виготовленні без значної втрати агротехнічної ефективності [9, 18].

Таким чином, у роботі запропоновано науково обґрунтований підхід до проектування енергоощадних ґрунторозпушувальних робочих органів, що базується на глибокому розумінні механізмів руйнування ґрунту, математичному моделюванні оптимальної геометрії та експериментальному підтвердженні її ефективності. Отримані результати мають важливе значення для розвитку енергозберігаючих технологій в аграрному секторі та можуть бути використані при створенні нових поколінь ґрунтообробних машин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, *82*(2), 121-145. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009
2. Shaheb, M. R., Venkatesh, R., & Shearer, S. A. (2021). A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *J. Biosyst. Eng.*, *46*, 417–439. https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7
3. Mirzavand, J., & Moradi-Talebbeigi, R. (2020). Relationships between field management, soil compaction, and crop productivity. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *67*(5), 675–686. https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1749267
4. Hu, W., Drewry, J., Beare, M., Eger, A., & Müller, K. (2021). Compaction induced soil structural degradation affects productivity and environmental outcomes: A review and New Zealand case study. *Geoderma*, *395*, 115035. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115035
5. Hu, R., Zheng, B., Liu, Y., Peng, S., Gong, J., Li, J., Qin, T., Liang, J., Xiong, K., Shao, L., Zheng, Z., Yi, Z., Zhou, Q., & Li, J. (2024). Deep tillage enhances the spatial homogenization of bacterial communities by reducing deep soil compaction. *Soil and Tillage Research*, *239*, 106062. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106062
6. Ren, L., Cornelis, W. M., Ruysschaert, G., De Pue, J., Lootens, P., & D'Hose, T. (2022). Quantifying the impact of induced topsoil and historical subsoil compaction as well as the persistence of subsoiling. *Geoderma*, *424*, 116024. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116024
7. Рамадхан, М. Н., Абдулла, А. Ахмед, Альфаріс, М. Абдладхем. (2025). Оцінка продуктивності розробленої комбінованої оранки за різних умов експлуатації. *Тікритський журнал сільськогосподарських наук*, *25*(1), 17-30. https://doi.org/10.25130/tjas.25.1.2
8. Tarasenko, B., et al. (2025). Universal Tillage Implement. *Acta Technologica Agriculturae*, *28*(1), 26-31. https://doi.org/10.2478/ata-2025-0004

9. Лелека, Д. О. (2024). *Удосконалення комбінованого ґрунтообробного агрегату з обґрунтуванням параметрів робочих органів* (кваліфікаційна магістерська робота, Центральноукраїнський національний технічний університет). URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/14629 (дата звернення: 30.04.2025)

10 Заболотний К.В. (2020). *Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів глибокорозпушувача ґрунту* (робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр», Вінницький національний технічний університет). URL: http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/26037.pdf (дата звернення: 30.04.2025)

11. Порхун І.М., & Лісовий І.О. (2023). Перспективність конструкції щілиноріза з наповнювачем. В *Abstracts of XXVI International Scientific and Practical Conference. «Modernity and scientific youth trends»* (Pp. 150-154). Hamburg, Germany. URL: https://eu-conf.com/events/modernity-and-scientific-youth-trends/ (дата звернення: 30.04.2025)

12. Гаськевич, В. Г., Папіш, І. Я., & Телегуз, О. Г. (2021). *Фізика ґрунтів*. Львів: ЛНУ імені Івана Франка.

13. Orzech, K., Wanic, M., & Załuski, D. (2021). The Effects of Soil Compaction and Different Tillage Systems on the Bulk Density and Moisture Content of Soil and the Yields of Winter Oilseed Rape and Cereals. *Agriculture*, *11*(7), 666. https://doi.org/10.3390/agriculture11070666

14. Wang, Z., Li, Y., Li, T., Zhao, D., & Liao, Y. (2020). Tillage practices with different soil disturbance shape the rhizosphere bacterial community throughout crop growth. *Soil and Tillage Research*, *197*, 104501. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104501

15. Sui, J., Wang, C., Ren, C., Hou, F., Zhang, Y., Shang, X., Zhao, Q., Hua, X., Liu, X., & Zhang, H. (2024). Effects of Deep Tillage on Wheat Regarding Soil Fertility and Rhizosphere Microbial Community. *Microorganisms*, *12*, 1638. https://doi.org/10.3390/microorganisms12081638

16. Lima, J. D. P., Silva, J. F. G., Linhares, A. J. de S., Costa, K. A. de P., Ferreira, C. J. B., & Severiano, E. da C. (2024). Crop-livestock integration systems mitigate soil

compaction and increase soybean yield. *Acta Scientiarum. Agronomy*, *47*(1), e69446. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v47i1.69446

17. Panigrahi, N., Thompson, A. J., Zubelzu, S., & Knox, J. W. (2021). Identifying opportunities to improve management of water stress in banana production. *Scientia Horticulturae*, *276*, 109735. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109735
18. Thorup-Kristensen, K., Halberg, N., Nicolaisen, M., Olesen, J. E., Crews, T. E., Hinsinger, P., Kirkegaard, J., Pierret, A., & Dresbøll, D. B. (2020). Digging Deeper for Agricultural Resources, the Value of Deep Rooting. *Trends in Plant Science*, *25*(4), 406-417. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.12.007
19. Wei, L., Huang, W., Liu, J., Li, M., Zheng, Z., Wang, S., Du, D., & Zhang, Y. (2024). DEM simulation of subsoiling in tropical sugarcane fields: Effects of opposing subsoiler design and model parameters. *Smart Agricultural Technology*, *9*, 100593. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100593
20. Hulugalle, N. R., Lobry de Bruyn, L. A., & Entwistle, P. (1997). Residual effects of tillage and crop rotation on soil properties, soil invertebrate numbers and nutrient uptake in an irrigated Vertisol sown to cotton. *Applied Soil Ecology*, *7*(1), 11-30. https://doi.org/10.1016/S0929-1393(97)00027-9
21. Kurskoy, V. S., Zamoyskiy, S. M., Bilyuk, Y. M., Gerasymenko, V. O., & Pernykoza, A. V. (2022). INFLUENCE OF RUNNING SYSTEMS ON SOIL COMPACTION. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, *(1(47),* 16-19. https://doi.org/10.32845/msnau.2022.1.3
22. Порхун І.М. Обґрунтування параметрів та дослідження роботи розпушувача ґрунту.
23. Налобіна О.О., Голотюк М.В., & Пуць В.С. (2023). ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ НА ЙОГО ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ. *СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ*, *(49)*. https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1017
24. Агроном. (2020). Як щільність ґрунту впливає на урожайність с.-г. культур (How the density of the soil affects the yield of agricultural crops). URL:

https://www.agronom.com.ua/yak-shhilnist-gruntu-vplyvaye-na-urozhajnist-s-g-kultur/ (дата звернення: 30.04.2025)

25. Peralta, G., Alvarez, C. R., & Taboada, M. Á. (2021). Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, *211*, 105022. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105022

26. Lal, R., Blum, W. E. H., Valentin, C., & Stewart, B. A. (1997). *Methods for Assessment of Soil Degradation* (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003068716

27. Frene, J. P., Pandey, B. K., & Castrillo, G. (2024). Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant Soil*, *502*, 267–278. https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2

28. Закон України "Про охорону праці" від 14 жовтня 1992 року № 2694-XII // *Відомості Верховної Ради України*. – 1992. – № 49. – Ст. 668.

29. Новак, ТАМАРА СЕРГІЇВНА. (2013). *Правове регулювання охорони праці у сільському господарстві* (В. М. Єрмоленко, Ред.). Ніжин: ПП Лисенко ММ.

30. Спірін, А. В., Цуркан, О. В., & Борисюк, Д. В. (2022). Ергономічні аспекти охорони праці в сільському господарстві. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, *(1(116))*, 41-50. https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/10809/1/194-196.pdf (дата звернення: 30.04.2025)

31. Курепін В.М. (2023). Система забезпечення безпеки праці та мімінізації випадків травматизму на малих аграрних підприємствах. В *Актуальні проблеми та перспективи розвитку охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту : матеріали V Всеукр. наук.-практ. конф., 4-5 травня 2023 року, м. Одеса* (С. 141-145). Одеса : ОДАБА. URL: https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/13461 (дата звернення: 30.04.2025)

32. Костенко О.М. (2012). *Удосконалення методів і засобів з комплексного аналізу, прогнозу та попередження виробничого травматизму у сільськогосподарському виробництві* (автореф. дис. ... канд. техн. наук). Київ.

33. Москалюк, І., Сакун, М., Безалтична, О., Москалюк, А., & Пуріч, В. (2022). ОХОРОНА ПРАЦІ, ПРОФЕСІЙНІ ЗАХВОРЮВАННЯ ТА ТРАВМАТИЗМ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ. *Аграрний вісник Причорномор'я, (102-103)*. https://doi.org/10.37000/abbsl.2022.102.07

34. Ущільнення ґрунту: що добре для будівництва, те шкідливо для сільського господарства. URL: https://superagronom.com/blog/161-uschilnennya-gruntu-scho-dobre-dlya-budivnitstva-te-shkidlivo-dlya-silskogo-gospodarstva (дата звернення: 30.04.2025)

35. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві: НПАОП 01.4-1.03-97. (1997). Київ.

36. Новак, Т. С., & Мельник, В. О. (2021). Суб'єкти правовідносин у сфері органічного сільськогосподарського виробництва: загальна характеристика. *Право. Людина. Довкілля. Сер. Право*, *12*(2), 65-73. https://doi.org/10.31548/law2021.02.008

ДОДАТКИ