

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

**П о я с н ю в а л ь н а   з а п и с к а**

до дипломної роботи  
освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**«Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів тягово-  
привідного агрегата для основного обробітку ґрунту»**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МГАІ-1-24  
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

\_\_\_\_\_ Соколов Максим Олександрович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Золотовська Олена Володимирівна

**Рецензент:** \_\_\_\_\_

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: тракторів і сільськогосподарських машин  
Освітній ступінь: "Магістр"  
208 "Агроінженерія"

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри  
**ТСГМ**

(назва кафедри)

**ДОЦЕНТ**

(вчене звання)

**Теслюк Г.В.**

(підпис)

(прізвище, ініціали)

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Соколов Максим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів тягово-привідного агрегата для основного обробітку ґрунту керівник роботи к.т.н., доцент Золотовська Олена Володимирівна

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від  
“24” жовтня 2025 року №3182

**2. Строк подання студентом роботи** 29.11.2025 р

**3. Вихідні дані до роботи** 1. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку органічного землеробства в Україні, аналіз джерел та обґрунтування дослідження з обраної тематики.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** 1. Аналіз сучасного стану органічного землеробства. 2. Теоретичне обґрунтування дипломної роботи. 3. Обґрунтування методики проведення та результатів експериментальних досліджень 4. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 5. Техніко-економічна оцінка ефективності розробленого комбінованого агрегату. Висновок. Список літератури.

**5 Перелік демонстраційного матеріалу**

1. Мета і предмет досліджень. (2 аркуш, А4).

2. Огляд і аналіз конструкцій (1 аркуш, А4). 3. Теоретичні дослідження (2 аркуші, А4). 4. Експериментальні дослідження (2 аркуші А4)  
 5. Економічна частина. (1 аркуш 4А)

### 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ         | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|----------------|---|----------------|------------------|
|                |   | завдання видав | завдання прийняв |
| 1.             | Золотовська О.В., доцент                  |                |                  |
| 2              | Золотовська О.В., доцент                  |                |                  |
| 3              | Золотовська О.В., доцент                  |                |                  |
| 4              | Золотовська О.В. , доцент                 |                |                  |
| 5              | Золотовська О.В., доцент                  |                |                  |
| Нормо-контроль | Теслюк Г.В., завідувач кафедри            |                |                  |

7. Дата видачі завдання 30.03.2025

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломної роботи          | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1.    | Аналіз технічних рішень                | до 27.05.25 р                 |          |
| 2.    | Виконання теоретичних досліджень       | до 30. 06.25 р                |          |
| 3     | Виконання експериментальних досліджень | до 8.09.25 р.                 |          |
| 4     | Охорона праці                          | до 06.11.25 р.                |          |
| 5     | Економічна частина                     | до 20.11.25 р.                |          |
| 6.    | Демонстраційний матеріал               | до 23.11.25 р.                |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |

Студент

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Соколов М. О.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Золотовська О.В.  
(прізвище та ініціали)



## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Вступ  | 7  |
| 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОРГАНІЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА  | 9  |
| 1.1 Аналіз використання прийомів органічного землеробства в Україні                                    | 9  |
| 1.2 Аналіз ефективності та недоліків конструкцій ґрунтообробних машин для альтернативного землеробства | 16 |
| 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ  | 27 |
| 2.1 Вибір конструктивно-технологічних параметрів роторного плуга з ґрунтопоглиблювачами                | 27 |
| 2.1.1 Аналіз впливу частоти обертання ротора на якість обробітку                                       | 27 |
| 2.1.2 Обґрунтування кута атаки ґрунтообробного ротора в технологіях органічного землеробства           | 29 |
| 2.1.3 Обґрунтування конструктивних параметрів ґрунтопоглиблювачів                                      | 32 |
| 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ   | 40 |
| 3.1 Модель роторного плуга для технології органічного землеробства                                     | 40 |
| 3.2 Методика визначення впливу кута атаки ротора на виконання робочого процесу                         | 40 |
| 3.3 Методика визначення кута курсової стійкості  | 43 |
| 3.4 Методика визначення показників якості виконання основного обробітку ґрунту роторним плугом         | 48 |
| 3.5 Результати визначення кута атаки ротора  | 50 |
| 3.6 Результати польових випробувань агрегата з роторним плугом для технології органічного землеробства | 58 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА   | 63 |
| 4.1. Загальні положення  | 63 |
| 4.2. Вимоги безпеки під час експлуатації роторного плуга   | 63 |
| 4.3. Санітарно-гігієнічні умови  | 64 |
| 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ   | 68 |
| ВИСНОВКИ   | 72 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ   | 74 |

## АНОТАЦІЯ

Соколов М.О. Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів тягово-привідного агрегата для основного обробітку ґрунту/ Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025

У дипломній роботі проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку органічного землеробства в Україні. Розглянуто ефективність і недоліки існуючих конструкцій ґрунтообробних машин, що застосовуються у технологіях біологізованого землеробства.

У теоретичній частині роботи обґрунтовано конструктивно-технологічні параметри модернізованого роторного плуга з ґрунтопоглиблювачами, визначено вплив частоти обертання ротора, кута атаки та глибини обробітку на якість виконання технологічного процесу.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованої конструкції. Результати досліджень підтверджують можливість широкого застосування вдосконаленого роторного плуга у технологіях органічного землеробства, що сприяє підвищенню енергоефективності та екологічної стійкості аграрного виробництва.

**Ключові слова:** роторний плуг, ґрунтопоглиблювач, енергоефективність, органічне землеробство, технологічний процес, глибина обробітку ґрунту, кут атаки, частота обертання ротора, тяговий коефіцієнт корисної дії, агротехнічна ефективність.

## ВСТУП

В умовах сучасного розвитку агропромислового комплексу України особливої актуальності набуває органічне землеробство, яке розглядається як перспективний напрям підвищення ефективності виробництва та забезпечення населення екологічно безпечною продукцією. Основна концепція органічного виробництва ґрунтується на відмові від застосування синтетичних мінеральних добрив та пестицидів і передбачає використання природних та біологічних факторів для відновлення та підтримання родючості ґрунту.

До основних заходів органічного землеробства належать: застосування сидеральних культур, повернення в ґрунт соломи та пожнивних решток, використання органічних добрив, упровадження короткоротаційних сівозмін, які сприяють оптимізації поживного режиму ґрунтів і покращують їхню структуру. Однією з ключових проблем, яка потребує вирішення, є зменшення переущільнення ґрунту під впливом робочих органів і ходових систем сільськогосподарських машин, що особливо характерно для важких суглинкових і чорноземних ґрунтів, поширених в Україні.

Кліматичні умови південних і центральних регіонів України є найбільш сприятливими для вирощування зернових, зернобобових, технічних культур та картоплі в системі органічного землеробства. Поєднання високих температур у період вегетації з достатньою кількістю опадів у літній період забезпечує інтенсивний перебіг процесів мінералізації органічної речовини та сприяє ефективному використанню сидератів. Використання сучасних тракторів тягового класу 1,4-2,0 у комплексі з удосконаленими ґрунтообробними агрегатами дозволяє реалізувати технологічні операції із заробки сидеральних культур та органічних решток, що є важливою передумовою підвищення ефективності органічного землеробства в Україні.

Для підвищення експлуатаційно-технологічних показників ґрунтообробного агрегата та зменшення енергетичних витрат на проведення основного обробітку ґрунту в технології біологізованого землеробства доцільним є застосування нового прийому та комбінованої машини, оснащеної

як активними робочими органами – сферичними дисками, так і пасивними – ґрунторозпушувачами.

Встановлення ґрунторозпушувачів на роторному плузі по сліду коліс трактора дає змогу поєднати в технології біологізованого землеробства операції основного обробітку ґрунту із заробкою органічної маси та смуговим розущільненням ґрунту на глибину орного горизонту. Такий підхід дозволяє усунути бокове відведення машинно-тракторного агрегата під час роботи, забезпечує стабільність глибини ходу сферичних робочих органів, а також дає можливість виконувати обробіток у тяговому діапазоні з високим коефіцієнтом корисної дії та підвищеною енергоефективністю.

**Предмет дослідження** – конструктивно-режимні параметри тягово-привідного агрегата, що впливають на експлуатаційно-технологічні показники виконання прийому основного обробітку ґрунту.

**Об’єкт дослідження** – процес основного обробітку ґрунту агрегатом із модернізованим роторним плугом у технології органічного землеробства.

**Мета дослідження** – розробити технічний засіб для реалізації комбінованого основного обробітку ґрунту в умовах органічного землеробства.

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОРГАНІЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

## 1.1 Аналіз використання прийомів органічного землеробства в Україні

За останні два-три десятиліття спостерігається суттєве зростання техногенного навантаження рухомих сільськогосподарських агрегатів на ґрунт. Це призводить до зниження його родючості та щорічних втрат урожаю зернових культур у межах 20–30 млн тонн. Водночас витрати пального при традиційних способах обробітку перевищують 3 млн тонн на рік (Авдєєнко, 2018; Кириленко, 2019). Подальший розвиток рослинництва неможливий без упровадження ресурсозберігаючих технологій, ефективного використання природного потенціалу агробіоценозів та зменшення механічного навантаження на ґрунт. Саме тому актуальним стає застосування альтернативних систем землеробства з агротехнічними прийомами, які відновлюють і підвищують родючість ґрунту, зводячи до мінімуму негативний вплив машинно-тракторних агрегатів (Довбан, 2020).

Наукові дослідження українських і зарубіжних учених (Авдєєнко, Камбулов, Кириленко, Щегорець та ін.) спрямовані на пошук шляхів підвищення урожайності культур при одночасному зменшенні витрат, відновленні екологічної рівноваги та одержанні якісної екологічно чистої продукції. Зокрема, С. Камбулов довів доцільність застосування послойного безвідвального обробітку ґрунту комбінованими робочими органами, які поєднують глибоке (0,25–0,35 м) та поверхнєве (0,12–0,16 м) розпушування. Це дозволяє знизити енергоємність технологічних процесів, зменшити трудові витрати та водночас зберегти структуру ґрунту (Камбулов, 2017).

Досвід румунських науковців підтверджує ефективність мінімального обробітку ґрунту із заорюванням органічної маси у чотирипільній сівозміні (кукурудза – соя – пшениця – картопля). Така система сприяє відновленню

структури ґрунту, поліпшенню водного режиму, підвищенню його родючості та зменшенню ризику ерозії (Popescu et al., 2016).

Особливої уваги заслуговують праці Є. Камчадалова, у яких уперше розроблено концепцію техногенно-нормованої експлуатації машинно-тракторного парку. Він спільно з колегами (Рубан, Липкань) запропонував принципи так званого "повернено-екологічного" землеробства, спрямованого на усунення переущільнення ґрунту, уповільнення дегуміфікації, зменшення ерозійних процесів та зниження впливу кліматичних стресів (Камчадалов, Рубан, 2015).

Система органічного землеробства передбачає поступову заміну хімічних засобів захисту рослин на природні біологічні фактори. Це забезпечує збільшення урожайності, підвищення вмісту гумусу, зменшення техногенного навантаження та скорочення виробничих витрат (Орешкін, 2021). Одним із найефективніших заходів є впровадження науково обґрунтованих сівозмін. Раціональне чергування культур не лише запобігає накопиченню шкідників і збудників хвороб, але й сприяє рівномірному використанню поживних елементів ґрунту та його відновленню. Як наслідок – підвищується якість продукції, зменшується забур'яненість полів, а економічний ефект від валового збору врожаю зростає (Щегорець, 2019).

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що біологізація землеробства в Україні й у світі є стратегічним напрямом розвитку аграрного виробництва. Вона дозволяє поєднати економічну ефективність із відновленням природної родючості ґрунтів та забезпеченням екологічної безпеки сільського господарства.

В умовах сучасного землеробства України значну увагу приділяють органічним технологіям, які вже успішно використовуються у вирощуванні сої, зернових культур та картоплі. Культури, що вирощуються у сівозмінах органічного землеробства, відрізняються між собою за вимогами до глибини коренеобитаємого шару ґрунту. Так, зернові культури з мичкуватою кореневою системою потребують обробітку ґрунту на глибину близько 0,15 м,

тоді як соя, що має стрижневий тип кореневої системи, формує корені за межами орного горизонту, тому для неї потрібна глибина основного обробітку 0,18–0,25 м. Картопля ж вимагає пухкого родючого шару ґрунту не менше ніж 0,30 м, що забезпечує оптимальні умови для формування бульб (Кириленко, 2019; Щегорець, 2019).

Дослідження вітчизняних і зарубіжних учених доводять, що у системах органічного землеробства можна відмовитися від традиційних прийомів основного обробітку, які створюють плужну підшову, насамперед глибокої оранки. Використання дискових робочих органів для основного обробітку на глибину до 0,15 м виявляється достатнім для формування родючого шару за умови застосування додаткових агроприйомів, спрямованих на зменшення впливу літньо-осіннього перезволоження (наприклад, ґрунтопоглиблення до меж орного горизонту, нарізка гребенів чи гряд). Найвищої ефективності органічне землеробство досягає у науково обґрунтованих три- і чотиріпільних сівозмінах, оскільки повне розкладання органічної маси сидератів відбувається протягом трьох років (Орешкін, 2021; Popescu et al., 2016).

Важливим елементом органічного землеробства є використання сидеральних парів. Найчастіше застосовуються посіви злаково-бобових сумішок або культур, що формують значну біомасу. За продуктивністю сидеральні пари з дикорослої рослинності у два рази перевищують посіви сої на зелене добриво. Заділена у ґрунт сидеральна маса в умовах достатнього зволоження й підвищених літніх температур активно мінералізується, стимулюючи розвиток ґрунтової мікрофлори та підвищуючи вміст органічної речовини (Щегорець, 2019; Lal, 2020) (рис. 1.1)

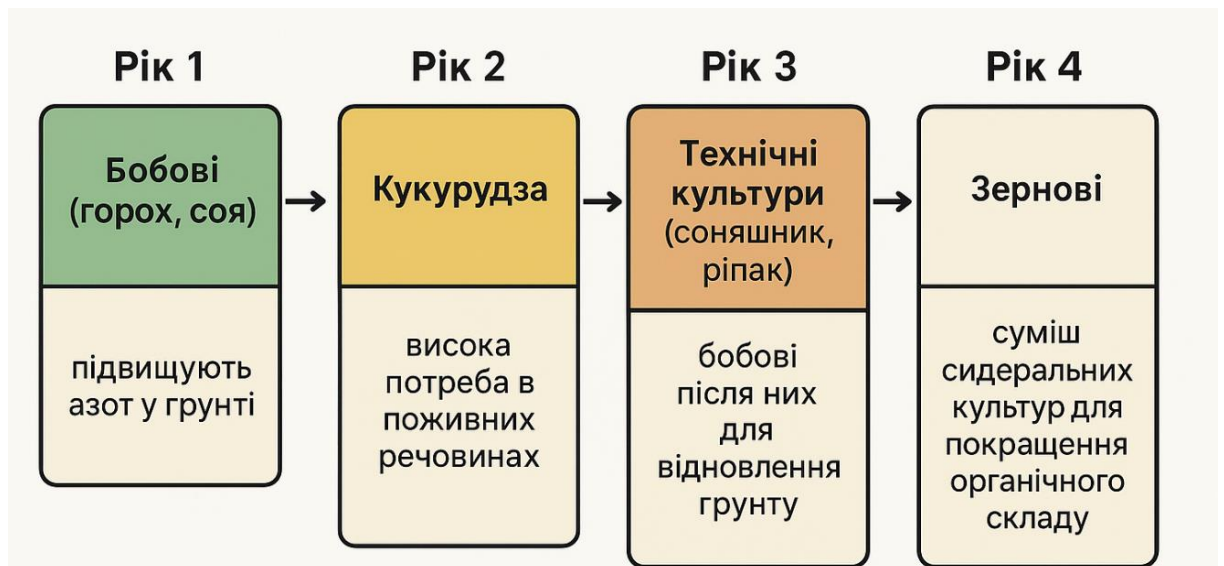


Рисунок 1.1 – Схема органічного землеробства

За даними вітчизняних досліджень, заорювання зеленої маси сидератів може бути еквівалентним внесенню 40–100 т/га органічних добрив, що забезпечує отримання врожайності картоплі понад 30 т/га (Щегорець, 2019). Протягом 3–9 років, показали, що системне впровадження органічних технологій сприяє зростанню вмісту гумусу на 0,4-1,2 %, що свідчить про відновлення родючості ґрунтів та підвищення їхньої екологічної стійкості (Сюмак, Кириленко, Русаков, 2018).

Таким чином, досвід застосування органічних технологій у землеробстві України та світу доводить їх ефективність у поєднанні з науково обґрунтованими сівозмінами, сидеральними парами та мінімізацією механічного навантаження на ґрунт. Це забезпечує не лише підвищення урожайності культур, але й сприяє збереженню довготривалої родючості ґрунтів та формуванню сталих агроecosystem (рис.1.2):

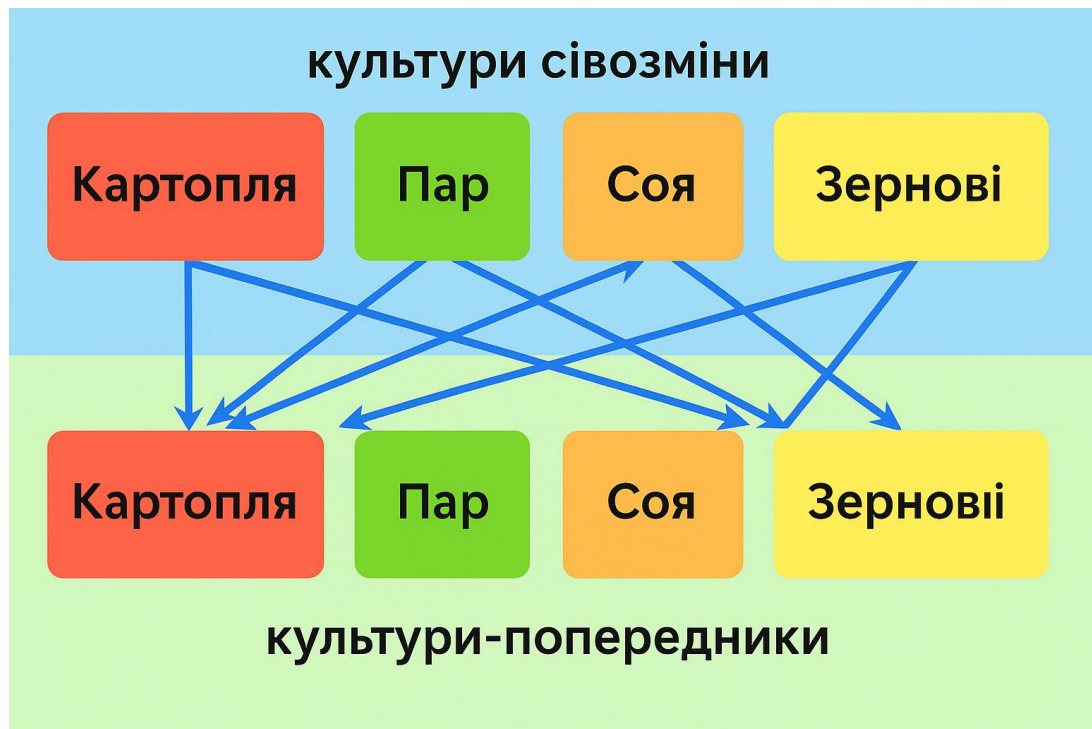


Рисунок 1.2 – Схема культур сівозміни

- осінньо–весняний продуктовий цикл;
- літньо–весняний продуктовий цикл;
- парово–продуктовий цикл;
- літній паровий цикл;
- осінній паровий цикл.

Кількість операцій з основної обробки ґрунту, коли закладають стерню та сидерати, у різних циклах становить від 3 до 9. Для цього використовують відповідні машини та їхні робочі органи (табл.1.1)

Таблиця 1.1

Цикли та способи основної обробки ґрунту в сівозмінах

| Цикл             | Культура та попередник                       | Технологічні операції  |
|------------------|--|--|
| Осінньо–весняний | Зернові по сої; Зернові по пізньому картоплі | Осіннє та весняне дискування (у два сліди); поглиблення ґрунту; обробка вторинного сидерату дисками або ротором (під картоплю) |
| Літньо–весняний  | Картопля по ранньому картоплі; Соя по        | Дискування (або обробка ротором) стерні; дискування вторинного   |

|                    |   |  |
|--------------------|---|--|
|                    | ранньому картоплі;<br>Зернові по ранньому картоплі; Соя по зернових; Картопля по зернових | сидерату у два сліди або обробка ротором вторинного сидерату і дрібна плугова оранка; поглиблення ґрунту   |
| Парово–продуктовий | Соя по пару; Зернові по пару; Картопля по пару  | Подрібнення сидерату ротором або укладання катком; дрібна плугова оранка або обробка дисками чи ротором; одне–два осінніх дискування; весняна обробка вторинного сидерату (соя, картопля) дисками або ротором  |
| Літній паровий     | Пар по ранньому картоплі; Пар по зернових   | Дискування (або обробка ротором) стерні; дискування вторинного сидерату у два сліди або обробка ротором вторинного сидерату і дрібна плугова оранка; подрібнення сидерату ротором або укладання катком; одне–два осінніх дискування; весняна обробка вторинного сидерату (соя, картопля) дисками або ротором; поглиблення ґрунту |
| Осінній паровий    | Пар по пізньому картоплі; Пар по сої  | Осіннє дискування у два сліди; поглиблення ґрунту; подрібнення сидерату ротором або укладання катком; дрібна плугова оранка або обробка дисками чи ротором; одне–два осінніх дискування; весняна обробка вторинного сидерату (соя, картопля) дисками або ротором   |

Вибір способу основної обробки ґрунту в технології біологізованого землеробства з закладенням сидератів у верхній шар ґрунту та підбір сільськогосподарських агрегатів для виконання цих операцій залежать від організації сівозміни та уподобань розробників біологічного землеробства. Здебільшого обробка проводиться за схемами, показаними на рисунку 1.3.

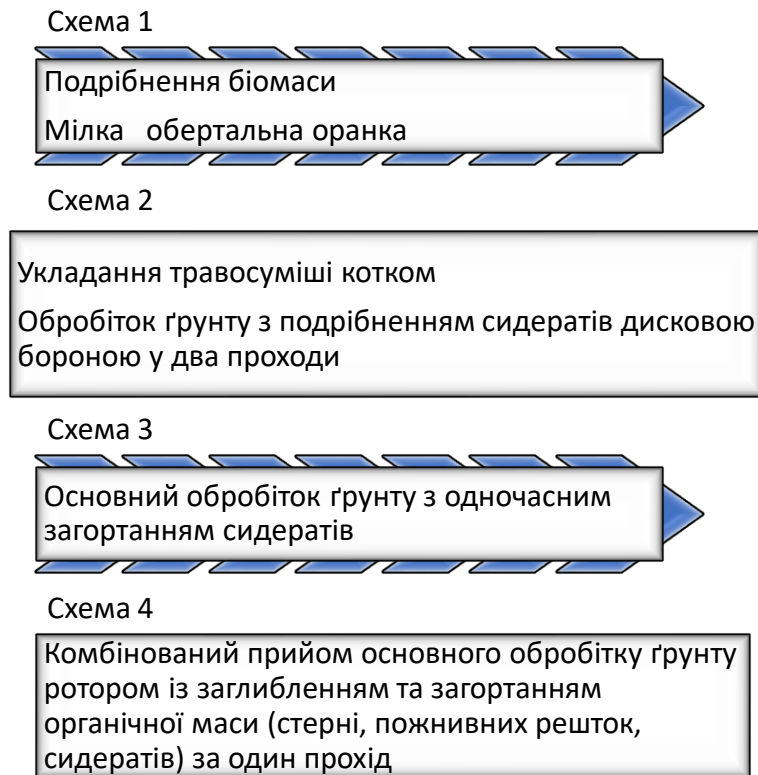


Рисунок 1.3 – Схема обробки ґрунту в органічному землеробстві

Зменшення кількості технологічних операцій у процесі обробітку ґрунту безпосередньо сприяє зниженню виробничих витрат та собівартості продукції. У контексті органічного землеробства доцільним є впровадження нового прийому та агрегата для основного обробітку ґрунту (рис. 1.3, схема 4), який дозволяє ефективно поєднувати одночасно закладку сидератів, обробіток стерні та пожнивних залишків, а також здійснювати основний обробіток ґрунту без формування плужної підшви на глибину до 0,15 м. Крім того, агрегат забезпечує смугове заглиблення ґрунту на глибину орного горизонту – від 0,2 до 0,25 м, що запобігає надмірному зволоженню ґрунту у другій половині літа та восени (Hobbs et al., 2008; Lal, 2015).

Поєднання дрібного основного обробітку та смугового заглиблення ґрунту позитивно впливає на формування рослинної маси [4] і покращує динаміку переносу вологи в ґрунті [3-6], що є важливим для підтримання продуктивності культур в умовах органічного землеробства.

Для забезпечення високої ефективності розроблюваний технічний засіб повинен відповідати наступним вимогам:

- універсальність – агрегат має бути адаптованим до сівозміни та придатним для використання на всіх етапах технологічного процесу основного обробітку ґрунту;
- комбінованість – поєднання кількох технологічних операцій, зокрема одночасна обробка сидератів та ґрунту, стерні та ґрунту, із заглибленням на глибину орного горизонту відповідно до умов роботи;
- раціональна компоновка – застосування активних та пасивних робочих органів для ефективної обробки сидератів, стерні та ґрунту;
- агроекологічна сумісність – дотримання допустимого тиску на ґрунт, мінімізація буксування, оптимальний тяговий режим та робочі швидкості;
- енергетична ефективність – мінімізація витрат пального та енергії на одиницю продуктивності, що особливо важливо в умовах органічного землеробства.

Таким чином, застосування комбінованого агрегата у технологіях органічного землеробства сприяє одночасному поліпшенню продуктивності культур, економії ресурсів і підвищенню агроекологічної стійкості ґрунтового покриву.

## **1.2 Аналіз ефективності та недоліків конструкцій ґрунтообробних машин для альтернативного землеробства**

Дискові борони та дискатори виготовляються у причіпному та навісному виконанні з робочою шириною захвату від 3 до 8 м. Їх застосовують для основного й передпосівного обробітку ґрунту, а також для заробки пожнивних решток. Робочими органами цих машин слугують сферичні диски, які забезпечують якісне перевертання та подрібнення ґрунту.

Аналіз наукових досліджень в Україні свідчить, що удосконалення обробітку ґрунту пасивними дисковими робочими органами здебільшого зводиться до змін у конструкції дискових борін та дискаторів, а саме до вдосконалення їхнього розташування та способів навішування. Лише незначна частина наукових робіт присвячена проблемі забезпечення стійкості агрегатів із дисковими роторними робочими органами. Так, для підвищення курсової та поздовжньої стійкості агрегата з навісною дисковою бороною пропонується з'єднувати її секції між собою за допомогою пружних елементів, що забезпечують можливість їх взаємного повороту та регулювання кута атаки. У конструкціях причіпних дискових борін для підвищення курсової і поздовжньої стійкості застосовують причіпний пристрій, обладнаний шарнірно-важільним механізмом, який дозволяє регулювати положення борони як у поздовжній, так і в поперечній площині.

До основних недоліків використання дискових борін та дискаторів на полях із важкими за гранулометричним складом ґрунтами можна віднести: недостатнє подрібнення оброблюваного шару; невисоку якість вирівнювання поверхні; неповну заробку сидератів та високих пожнивних решток за один прохід; забивання робочих органів органічними залишками й ґрунтом за підвищеної вологості та липкості; а також значні енергетичні витрати під час роботи агрегата [8].

Активні ротаційні робочі органи встановлюють на рамі машини; вони здійснюють обертальний рух завдяки приводу від вала відбору потужності трактора, гідросистеми або автономного двигуна, змонтованого безпосередньо на агрегаті [12]. Такі ґрунтообробні агрегати, окрім виконання технологічних операцій, можуть також реалізовувати функцію рушіїв, і в цьому випадку вони отримали назву «робочі органи-рушії» [8-13]. Дослідження та розробка агрегатів із такими робочими органами є актуальним напрямом сучасного машинобудування.

Активні ротаційні робочі органи набули широкого поширення у конструюванні ґрунтообробних машин. До них належать різноманітні

просапні фрези та ротаційні плуги, які забезпечують обробіток ґрунту на глибину від 10 до 45 см (табл. 1.2)

Таблиця 1.2

Порівняння переваг та недоліків пасивних і активних робочих органів ґрунтообробних машин у технологіях альтернативного землеробства

| <b>Тип робочих органів</b>   | <b>Переваги</b>   | <b>Недоліки</b>   |
|--|---|---|
| <b>Пасивні дискові (борони, дискатори)</b>                             | простота конструкції та відносно невисока вартість; можливість одночасного обробітку та часткової заробки поживних решток; добре розпушують і кришать верхній шар ґрунту; ефективні на легких і середніх ґрунтах.                                     | недостатнє подрібнення важких ґрунтів; незадовільна якість вирівнювання поверхні поля; погана заробка сидератів і високої стерні за один прохід; забивання органічними рештками у вологих умовах; високі витрати енергії на важких ґрунтах.           |
| <b>Активні ротаційні (фрези, ротаційні плуги, робочі органи-рушії)</b> | висока якість подрібнення ґрунту; можливість регулювання глибини (10–45 см); краще перемішування ґрунту з органічними рештками; можуть виконувати функцію рушіїв (покращення прохідності агрегата); висока продуктивність у передпосівному обробітку. | висока вартість та складність конструкції; потребують потужного трактора та додаткової енергії; складність технічного обслуговування і ремонту; швидкий знос робочих органів при роботі на твердих і кам'янистих ґрунтах; великі енергетичні витрати. |

Фрезерування позитивно впливає на фізичні властивості ґрунту, а також на водний та поживний режими росту рослин. Завдяки інтенсивному

перемішуванню ґрунтової маси підвищується активність ґрунтової біоти по всій товщі оброблюваного шару [9]. Одним із провідних виробників роторних та фрезерних плугів є компанія FALC. Їхня техніка відзначається високою експлуатаційною надійністю та забезпечує якісне оброблення ґрунту на глибину 35–45 см (рисунок 1.4).



а) Роторный плуг Free Land 3000



б) Роторный Falc Falcland

Рисунок 1.4 – Плуги компанії FALC

Використання ротаційних плугів під час основного обробітку ґрунту дозволяє підвищити продуктивність приблизно на третину у порівнянні з традиційними лемішними плугами. Проте такі машини мають і певні недоліки. Зокрема, вони відзначаються значною матеріаломісткістю, потребують тракторів високого тягового класу, не забезпечують повного обороту пласта та працюють на невисоких швидкостях — до 6 км/год. За результатами закордонних досліджень встановлено, що під час роботи ротаційні робочі органи зазнають ударних навантажень у процесі взаємодії з ґрунтом. Це спричиняє появу неврівноважених моментів на роторі та зменшує надійність їх експлуатації.

Перспективним напрямом розвитку є застосування ротаційних ґрунтообробних машин із двопотоковим використанням потужності. Такий підхід дозволяє підвищити якість обробітку ґрунту, скоротити кількість операцій з його підготовки до посіву та ефективніше використовувати потужність двигуна.

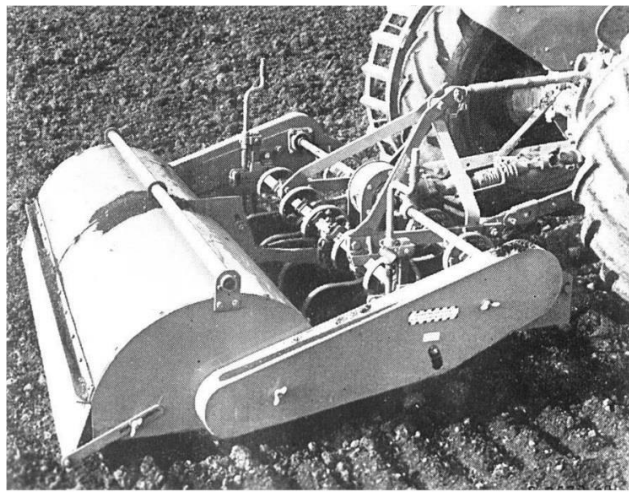
Прикладом ґрунтообробних машин із двопотоковим використанням потужності є комбіноване знаряддя «Вібро-тіллер» (виробництва компанії *Standen*, Велика Британія). Конструктивно воно складається з культиватора з пружинними лапами та легкої фрези й використовується для передпосівного обробітку ґрунту після оранки плугом. За один прохід «Вібро-тіллер» виконує роботу одразу трьох агрегатів: лапами розпушує ґрунт, фрезою подрібнює грудки, а відкидний щиток із регулюванням по висоті вирівнює поверхню поля.

Сучасним прикладом двопотокових машин є також комбінована фреза з розпушувальними стійками. Використання таких стійок забезпечує рівномірність глибини обробітку та поздовжню стійкість машини. Водночас при роботі на глинистих і суглинкових ґрунтах лапи цих стійок можуть сприяти утворенню «плужної підшви».

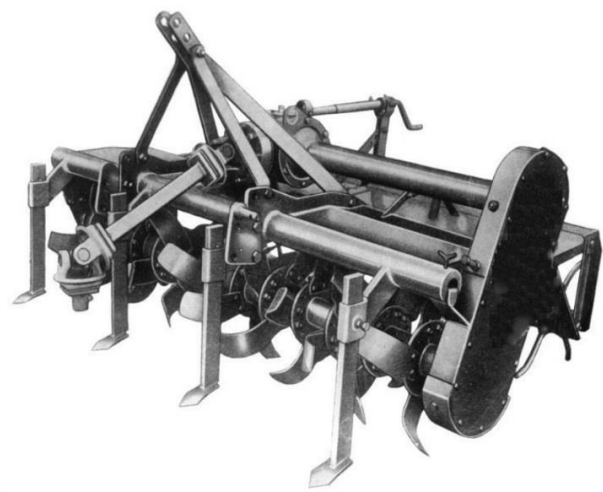
Аналіз літературних джерел показав, що момент, необхідний для приводу фрези у попередньо розпушеному ґрунті, у три рази менший, а при

поєднанні з лемішем — у п'ять разів менший, ніж під час роботи фрези в монолітному ґрунті. Разом з тим комбіноване знаряддя потребує значно більшого тягового зусилля, яке лише частково компенсується підштовхувальною дією активного роторного органа.

Застосування машин із двопотоковим використанням потужності дозволяє підвищити ефективність використання енергії двигуна. Проте на важких ґрунтах комбіновані знаряддя менш інтенсивно кришать ґрунтові грудки, ніж окрема фреза.



a)



б)

Рисунок 1.8 – Приклади конструкцій комбінованих тягово-привідних фрезерних машин [16]: а) комбінована фреза «Вібро-тіллер»; б) комбінована фреза з розпушувальними стійками

Суттєвим недоліком фрезерних машин є те, що за певних умов горизонтальна складова реакції ґрунту на ротаційні робочі органи, спрямована вперед за ходом руху машинно-тракторного агрегату, може досягати значних величин, що призводить до втрати керованості трактора. Вертикальна ж складова здатна піднімати фрезу з ґрунту. У багатьох господарствах такі агрегати не набули поширення через високу енергоємність, нижчу, ніж у лемішних плугів, продуктивність, а також надмірно інтенсивне кришення ґрунту. Це, у свою чергу, спричиняє швидке ущільнення важких суглинкових і глинистих ґрунтів, погіршення їх водно-повітряного режиму та зниження

активності ґрунтової біоти. Одним із перспективних напрямів удосконалення технологій обробітку ґрунту в системі біологізованого землеробства може стати застосування плугів із ротаційними активними сферичними дисками. У цьому контексті особливий інтерес становлять дослідження інженерів Південної Азії, присвячені оцінюванню енерговитрат ґрунтообробних машин з дисковими та фрезерними робочими органами. Запропонована ними модель дає можливість визначати ефективність дискових органів у порівнянні з фрезою залежно від конкретних умов роботи. У процесі впровадження елементів біологічного відтворення родючості ґрунту [12] дальньосхідними вченими проводилися дослідження з розробки ґрунтообробного агрегата для нової технології. Результатом стало створення ротаційних плугів для основного обробітку ґрунту та заробки рослинних решток на поверхні поля. Робоча ширина захвату таких плугів становила від 1,3 до 2,4 м. Привід агрегатів здійснювався від ВОМ трактора. Однією з перспективних моделей навісного ротаційного плуга є ПРН-1,8 для тракторів класу 1,4. Цей плуг пройшов багаторічну виробничу перевірку у технології органічного землеробства. Конструктивно-технологічні особливості плуга проявлялися під час його роботи. Задана глибина обробітку ґрунту (15–20 см) підтримувалася за допомогою копіювальних коліс. Вирівнювання поверхні здійснювалося завдяки кришенню ґрунту зубцями вирівнювального пристрою, а стабілізація курсової стійкості забезпечувалася дисковим стабілізатором із регулюванням кута установки. Ротаційний плуг обробляв ґрунт якісно та зберігав прямолінійність руху на другій і третій передачах. Серед недоліків конструкції відзначали нерівномірність обробітку ґрунту по глибині, порушення курсової стійкості при підвищених швидкостях руху агрегата, самовикопування при роботі на твердих ґрунтах та порівняно низьку експлуатаційну надійність.



Рисунок 1.9 – Навісний ротаційний плуг марки 1LYQD

До переваг ротаційних плугів марки 1LYQD у системі органічного землеробства можна віднести їх невелику масу та простоту конструкції (рис. 1.9). Водночас цей плуг зберіг і певні недоліки: виглиблення ротора під час обробітку важких суглинкових ґрунтів, потребу в додатковому баластуванні та відносно низьку надійність у роботі. Серед новітніх знарядь для органічного землеробства слід відзначити РП-2,4 (рис. 1.10).



## Рисунок 1.10 - Роторний плуг під час обробітку сидеральних культур

Він спеціально розроблений для поверхневого та основного обробітку ґрунту з одночасною заробкою біомаси сидеральних культур, що є важливим елементом органічних технологій підтримання та відновлення родючості. Особливістю цієї конструкції є цікаве інженерне рішення проблеми курсової стійкості [11]: використання оптимального кута атаки  $18^\circ$  та від'ємних задніх кутів різання дисків  $-12^\circ$ . Завдяки цьому досягається урівноваження поперечних сил, які виникають у процесі роботи, що особливо важливо для енергозберігаючих і ґрунтозахисних технологій органічного виробництва. Разом із тим, результати випробувань показали, що за високих швидкостей через встановлення дисків із від'ємним заднім кутом різання спостерігається виглиблення робочих органів, що може знижувати якість обробітку ґрунту. Під час випробувань встановлено, що при роботі агрегату на підвищених швидкостях виникали проблеми з курсовою стійкістю. У окремі моменти руху відзначалося пробуксовування коліс трактора. Відомо з теорії тракторів, що у такій ситуації в машинно-тракторному агрегаті (МТА) формується паразитна потужність, яка циркулює в системі. Вона створюється від'ємною дотичною силою, що додатково навантажує трансмісію трактора та призводить до механічних втрат (Білецький, 2019; Wong, 2010). Аналіз сучасних тенденцій розвитку ґрунтообробної техніки показує, що роторні плуги є одними з найбільш ефективних і перспективних знарядь у технологіях органічного (біологізованого) землеробства (Кириченко, 2020; Patel et al., 2018). Вони здатні забезпечити якісне проведення основного обробітку у встановлені агротехнічні строки, мають задовільні енергетичні та експлуатаційні показники, а також сприяють відтворенню родючості ґрунту завдяки рівномірному загортанню органічних решток і сидератів. Особливістю застосування активних сферичних дисків у складі роторних плугів є те, що вони не формують плужної підшви. За один прохід агрегат може виконати повноцінний основний обробіток із загортанням сидератів або стерні у верхній

шар ґрунту (Демиденко, 2021; Lal, 2015). Така технологія покращує структуру орного шару, створює умови для активних обмінних процесів і мінералізації органіки, що позитивно впливає на врожайність культур. Дослідження зарубіжних авторів (Kerper et al., 2013; Godwin, 2007) підтверджують, що роторні плуги в порівнянні з пасивними знаряддями характеризуються нижчими енерговитратами при виконанні аналогічних операцій. Разом із тим, було виявлено ряд суттєвих недоліків існуючих конструкцій роторних плугів (Кириченко, 2020; Kushwaha & Zhang, 2008):

- обертальний момент ротора за певних умов створює додаткові навантаження на трансмісію трактора, що спричиняє підвищені механічні втрати;
- вертикальна складова реакції ґрунту може призвести до самовиглиблення робочих органів;
- встановлення ротора під кутом атаки викликає бічний зсув МТА, що знижує його курсову стійкість та керованість;
- для усунення цього недоліку в окремих моделях застосовують дискові стабілізатори або стабілізатори у вигляді польової дошки;
- недостатнє заглиблення робочих органів у щільні ґрунти, що вимагає використання баластних вантажів;
- нерівномірність обробітку, низька надійність у роботі, а також обмеження за швидкістю руху - не більше 6-7 км/год.

Таким чином, удосконалення роторних плугів є перспективним напрямком розвитку ґрунтообробних машин в органічному землеробстві, адже їх ефективне застосування дозволяє поєднувати якісний обробіток ґрунту з відновленням його родючості.

### **Висновки**

1. Аналіз існуючих конструкцій роторних плугів із активними сферичними дисками показав їхні переваги для технологій органічного землеробства: відсутність утворення плужної підшви, формування оптимальної структури

ґрунту, ефективно заробляння сидератів та пожнивних решток, а також зниження енергозатрат завдяки використанню ротора як допоміжного рушія.

2. Основними недоліками є: додаткове навантаження на трансмісію трактора, боковий увод агрегата через кут атаки ротора, самовиглиблення робочих органів на твердих ґрунтах, необхідність баластування, нерівномірність обробітку за глибиною, обмеження робочої швидкості (до 7 км/год) і зниження надійності.

3. На якість роботи та енергоефективність агрегату найбільше впливають такі фактори: тяговий опір, ширина захвату, робоча швидкість, маса трактора й плуга, траєкторія руху та енергетичні витрати на виконання технологічного процесу.

## **2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ**

### **2.1 Вибір конструктивно-технологічних параметрів роторного плуга з ґрунтопоглиблювачами**

#### **2.1.1 Аналіз впливу частоти обертання ротора на якість обробітку**

Робота роторного плуга визначається насамперед процесом подачі ґрунтового пласта на робочу поверхню ротаційного органа. Цей процес залежить від агрофону, типу та фізико-механічних властивостей ґрунту, зокрема його твердості. Величина подачі пласта ґрунту є одним із ключових технологічних показників ротаційних машин, оскільки саме вона визначає ступінь подрібнення та якість обробітку (Гур'єв, 2018; Heege, 2013).

Згідно з теорією ротаційних ґрунтообробних машин [Іваненко, 2019; Погорілий, 2017], подача ґрунту на ніж визначається кінематичним показником режиму роботи  $\lambda$ , що виражається співвідношенням окружної швидкості робочого органа до поступальної швидкості руху агрегату. При зменшенні  $\lambda$  відбувається збільшення подачі ґрунтового пласта, однак якість крошення знижується. Вибір оптимального значення  $\lambda$  тісно пов'язаний із властивостями ґрунту: чим більша його твердість та міцність на стиск, тим більше енергії потрібно на руйнування ґрунтової маси, відповідно подача пласта повинна зменшуватися, а значення  $\lambda$  – зростати (McKeye, 1985; Гур'єв, 2018).

За експериментальними даними (Іваненко, 2019; Heege, 2013), для ефективної роботи роторного плуга на суглинкових ґрунтах із твердістю понад 1,2 МПа, що характерні, наприклад, для північних і східних регіонів України, значення кінематичного показника необхідно приймати не менше ніж  $\lambda \geq 4$ . Це забезпечує оптимальне поєднання якісного подрібнення ґрунту, зниження енергоспоживання та агротехнічних вимог до основного обробітку.

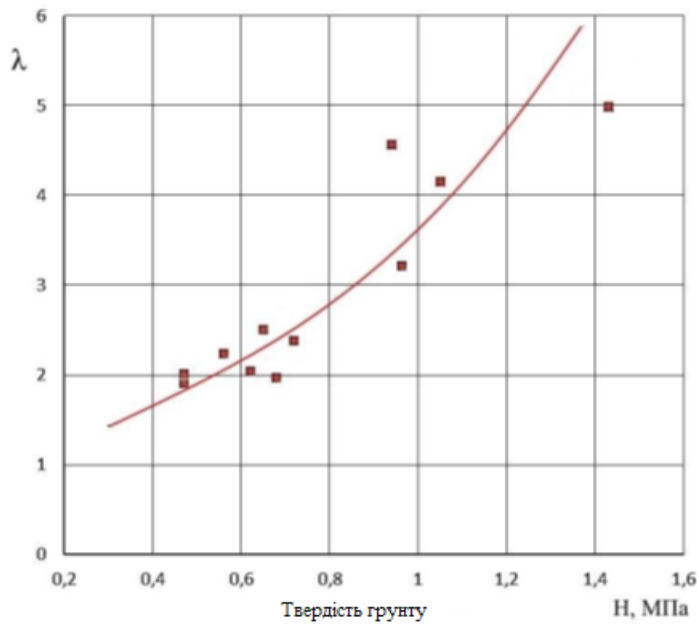


Рисунок 2.1 – Залежність кінематичного показника від твердості ґрунту

Визначимо показник кінематичного режиму через параметри обертання ротора:

$$\lambda = \frac{\pi n D}{60 v_p}, \quad (2.1)$$

$n$  – число обертів ротора, об/хв;

$D$  – діаметр сферичного диска, м;

$v_p$  – робоча швидкість агрегату, м/с.

Звідси

$$n = \frac{60 \lambda v_p}{\pi D}. \quad (2.2)$$

Прийнято  $\lambda = 5$  та діапазон робочих швидкостей 2,4–3,3 м/с. При рекомендованому для ґрунтообробних машин у технологіях органічного землеробства діаметрі сферичного диска  $D = 0,66$  м отримаємо діапазон обертів ротора від 347 до 478 об/хв.

У разі роботи від ВОМ трактора з числом обертів 540 об/хв приймаємо передаточне число 1,4, що відповідає зміні показника кінематичного режиму  $\lambda$  від 4 до 5,5 у діапазоні робочих швидкостей  $v_p = 3,3$ – $2,2$  м/с (при цьому число обертів ротора складає 385 об/хв).

## 2.1.2 Обґрунтування кута атаки ґрунтообробного ротора в технологіях органічного землеробства

При розробці конструкції роторного плуга необхідно орієнтуватися на параметри робочого органа (рис. 2.2), які забезпечують дотримання агротехнічних вимог щодо гребнистості дна борозни – не більше 0,02 м.

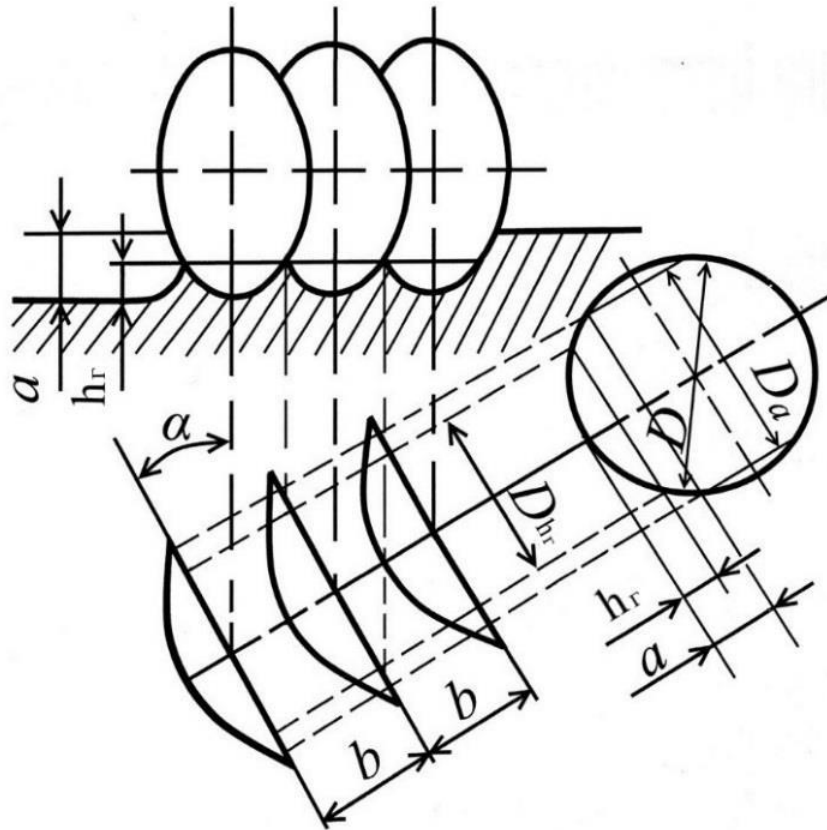


Рисунок 2.2 - Графічна схема оцінки рівномірності дна борозни

З теорії та розрахунків конструкцій сільськогосподарських машин висота гребенів дна борозни  $h_r$ , м, визначається за формулою:

$$h_g = 0,5D_p - 0,5\sqrt{D_p^2 - b^2 \cdot \text{ctg}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2.3)$$

$D_p$  – діаметр сферичного диска ротора, м;

$b$  – відстань між дисками, м;

$\alpha$  – кут атаки ротора, град.

Дослідженнями встановлено, що питомий опір роторного плуга зі сферичними дисками залежить від кута атаки ротора. Мінімальні значення питомого опору спостерігаються при куті атаки  $\alpha = 25\text{--}35^\circ$ . Також, при глибині обробітку 0,15–0,20 м гребистість дна борозни  $h_r$  у зазначеному діапазоні зміни кута атаки коливається від 0,02 до 0,09 м, залежно від відстані між дисками  $b$ .

Відстань між дисками є важливим технологічним параметром, який визначає якість та надійність роботи роторного плуга. Щоб уникнути порушення технологічного процесу через заклинювання ґрунту між дисками, відстань між дисками  $b$  рекомендується вибирати з умови:

$$b \geq 1,5a \quad (2.4)$$

Таким чином, при прийнятій глибині обробітку відстань між дисками повинна бути  $b \geq 0,225$  м.

Для перевірки аналітичних розрахунків за формулою (2.3) побудовано графік залежності гребистості дна борозни від кута атаки ротора та рекомендованого діапазону відстані між дисками (рис. 2.3).

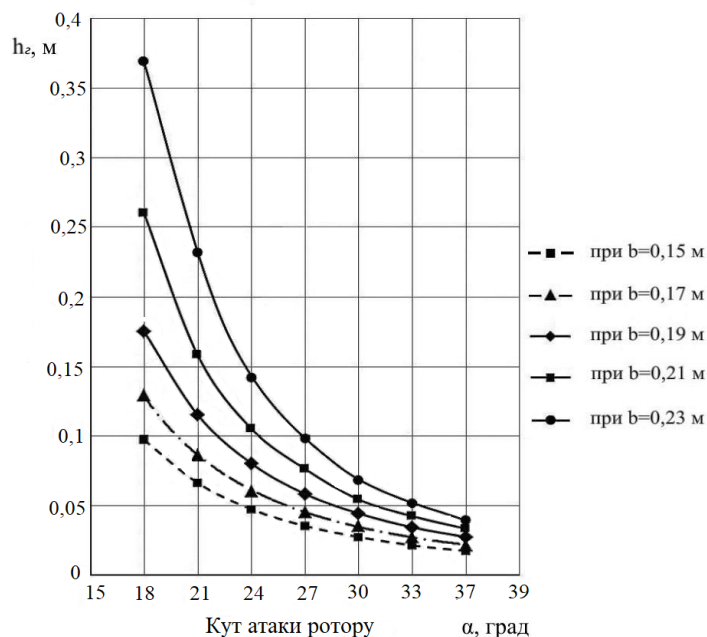


Рисунок 2.3 – Залежність гребистості дна борозни від кута атаки і міждискового проміжку

Залежність між глибиною обробітку ґрунту та діаметром диска:

$$a \leq D_p/k \quad (2.4)$$

Значення коефіцієнта  $k$  для плугів приймається в межах 3–4. Зважаючи на те, що роторний плуг призначений для обробітку ґрунту на сидеральному та стерновому фонах, приймаємо  $k = 4$ . При обраному діаметрі сферичного диска глибина обробітку становить  $a \leq 0,165$  м (в технології приймається  $a = 0,15$  м).

Таким чином, при відстані між дисками  $b = 0,23$  м, глибині обробітку  $a = 0,15$  м, кут атаки робочих органів роторного плуга повинен бути не менше  $23^\circ$ , приймаємо  $\alpha = 24^\circ$  (табл.2.1)

Таблиця 2.1

Основні параметри

| Параметр                            | Позначення | Значення |
|-------------------------------------|------------|----------|
| Коефіцієнт для плуга                | $k$        | 4        |
| Діаметр сферичного диска, м         | $D$        | 0,66     |
| Глибина обробітку, м                | $a$        | 0,15     |
| Відстань між дисками, м             | $b$        | 0,23     |
| Мінімальний кут атаки, градуси      | $\alpha$   | 24       |
| Діапазон робочих швидкостей, м/с    | $v_p$      | 2,4–3,3  |
| Діапазон обертів ротора, об/хв      | $n$        | 347–478  |
| Передаточне число при ВОМ 540 об/хв | $i$        | 1,4      |
| Показник кінематичного режиму       | $\lambda$  | 4–5,5    |

### 2.1.3 Обґрунтування конструктивних параметрів ґрунтопоглиблювачів

Основними показниками якості технологічної операції ґрунтопоглиблення є: рівномірність заглиблення робочих органів під час руху агрегату та рівномірність розподілу утворених борозен по обробленій площі.

Для розрахунку конструктивних параметрів ґрунтопоглиблювачів приймаємо початкові умови графоаналітичного методу визначення тягового діапазону та чистої продуктивності агрегату.

У тягово-приводному агрегаті потужність витрачається на привід робочих органів від ВОМ трактора та безпосередньо на подолання тягового опору робочої машини.

Знаходимо тяговий опір:

$$K_v = \alpha_N v_p + k_0 [1 + \Delta k (v_p^2 - v_0^2)] \quad (2.5)$$

Використовуючи розрахункові значення ширини захвату робочої машини  $B_p = 2,4$  м, робочої швидкості  $v_p = 2,4$  м/с ( $v = 1$ ) та критичної тяги  $P_{кр} = 10,8$  кН (або 4,5 кН/м) при номінальному буксуванні (рис 2.4), а також прийняті для аналітичних розрахунків усереднені значення питомого тягового опору для аналога конструкції роторного плуга – дискової борони ( $k_0 = 1,6-2,2$  кН/м), швидкісного коефіцієнта ( $\Delta k = 0,144$  с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>) та питомої потужності на одиницю подачі ( $\alpha_n = 2,5$  кВт/(м<sup>2</sup>·с)) [120], при глибині обробітку ґрунту сферичними дисками 0,15 м, отримаємо питомий тяговий опір ґрунтопоглиблювачів  $K_{пу} = 1,1$  кН/м (або  $P_{кр} = 2,63$  кН).

Глибина заглиблення ґрунтопоглиблювачів з урахуванням потужності орного горизонту та глибини залягання постилкового шару приймається рівною 0,25 м.

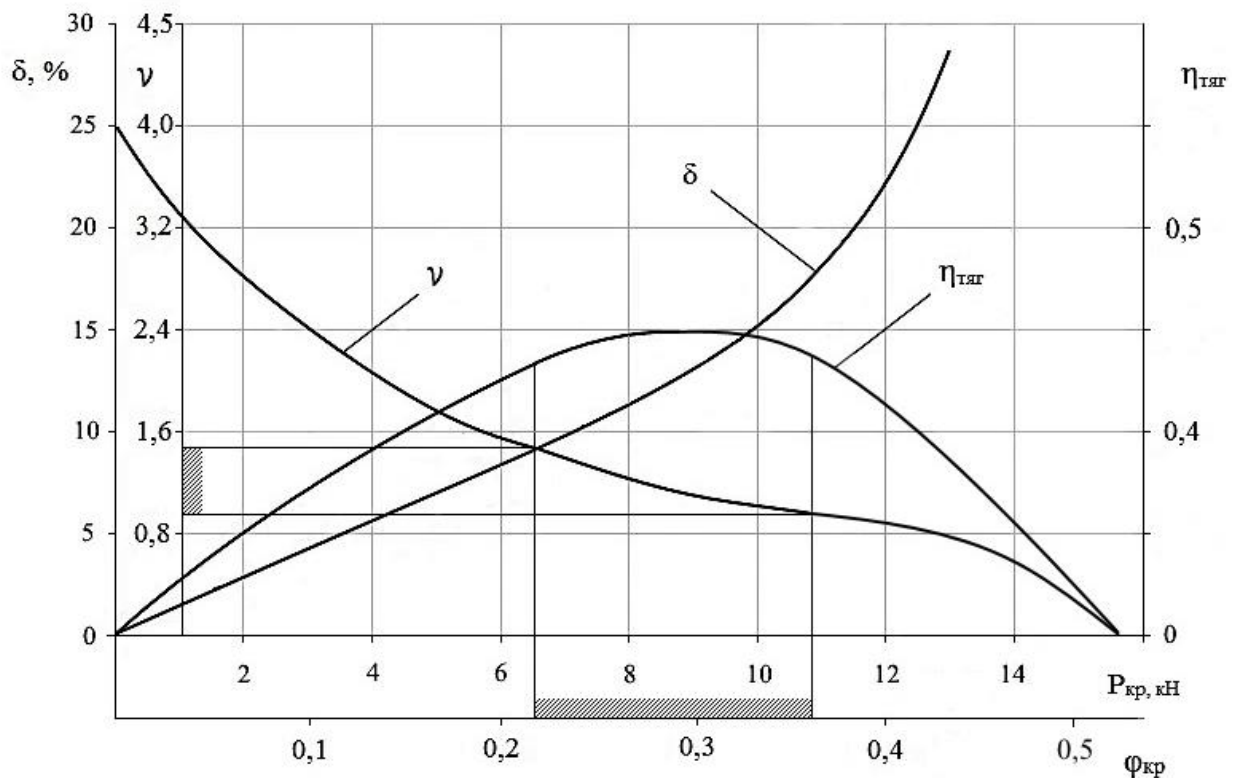


Рисунок 2.4 - Вплив коефіцієнта використання ваги на буксування, відносну робочу швидкість та тяговий ККД

$$K_{пу} = P_{кр} V a \quad (2.6)$$

З урахуванням цього робоча ширина ґрунтопоглиблення складе  $V_{пу} = 0,14$  м, що відповідає двом стандартним долоподібним стоякам для глибокого розпушення з робочою шириною леза  $V_p = 0,075$  м. Розрахункова довжина ротора робочої машини при прийнятому розрахунковому куті атаки  $\alpha = 24^\circ$  становить 2,63 м. З урахуванням розрахованої відстані між сферичними дисками ( $b = 0,23$  м) конструктивна довжина ротора складе 2,76 м, відповідно, кількість сферичних дисків на батареї ротора – 12 штук.

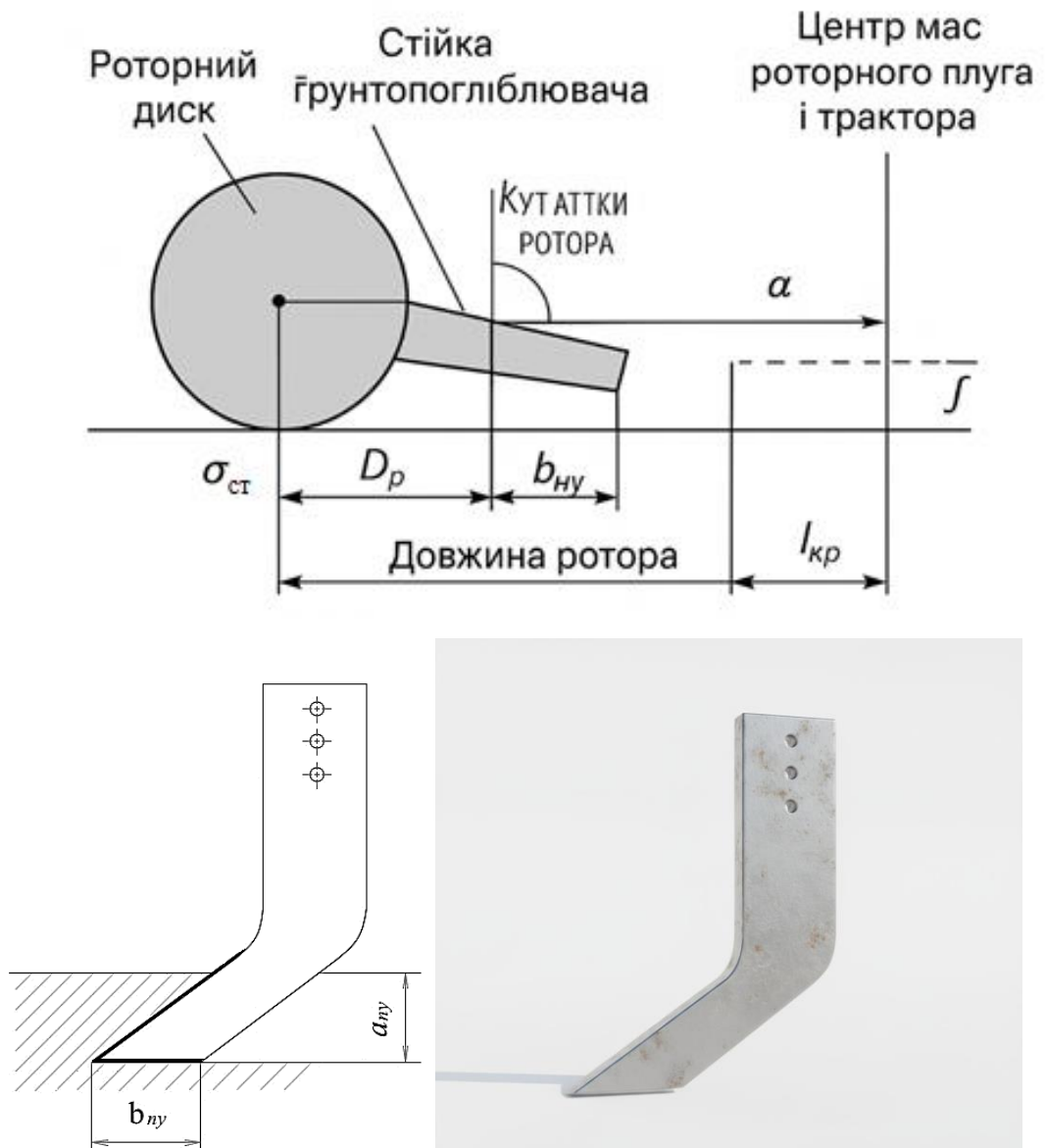
Для визначення місця встановлення ґрунтопоглиблювачів на робочій машині приймаємо порядок роботи агрегату на загоні у вигляді чергування комбінованого та челночного способів руху. Для збереження якості обробітку

ротором перекриття краю оброблюваних смуг приймається рівним  $b \cdot \cos \alpha = 0,21$  м.

При консолі роторного розташування 0,9 м ширина між сусідніми щілинами від ґрунтопоглиблювачів становитиме 1,4 м, що відповідає місцю встановлення ґрунтопоглиблювачів по центрах слідів ведучих коліс трактора.

Таке розташування ґрунтопоглиблювачів дозволяє запобігти ущільненню ґрунту рухомими елементами трактора та забезпечити відповідно до агротехнічних вимог смугове розпушення важких ґрунтів на глибину 0,2 – 0,4 м, при розташуванні ґрунтопоглиблювачів 1,4 – 2,0 м.

Розглянемо схему стійки ґрунтопоглиблювача (рис.2.5).



## Рисунок 2.5 – Схема стійки ґрунтопоглиблювача

Опір ґрунту деформації бічною поверхнею стійки ґрунтопоглиблювача визначається за формулою:

$$R = \sigma_{ct} \cdot S \quad (2.7)$$

де:

$\sigma_{ct}$  – напруження стискання ґрунту, Н/м<sup>2</sup>;

$S$  – площа контакту бічної поверхні стійки з ґрунтом, м<sup>2</sup>.

Оскільки бічна поверхня ґрунтопоглиблювача, що взаємодіє з ґрунтом, має форму паралелограма, площу контакту  $S$  можна визначити за формулою:

де:

$$S = b_{ny} \cdot a_{ny} \quad (2.8)$$

$b_{ny}$  – ширина стійки ґрунтопоглиблювача, м;

$a_{ny}$  – глибина обробітку ґрунту, м.

Тоді значення стабілізуючої реакції ґрунту визначається як:

$$R_{ПУ} = \sigma_{ct} b_{ny} a_{ny} \quad (2.9)$$

Для визначення ширини стійки ґрунтопоглиблювача розглянемо схему сил та реакцій, що діють на агрегат під час робочого ходу (рис. 2.6).

До коліс трактора прикладено дотичну тягову силу  $P_k$  та силу опору руху  $F_f$ . На роторний плуг передається крутний момент  $M_{кр}$ , який надходить від ВОМ трактора.

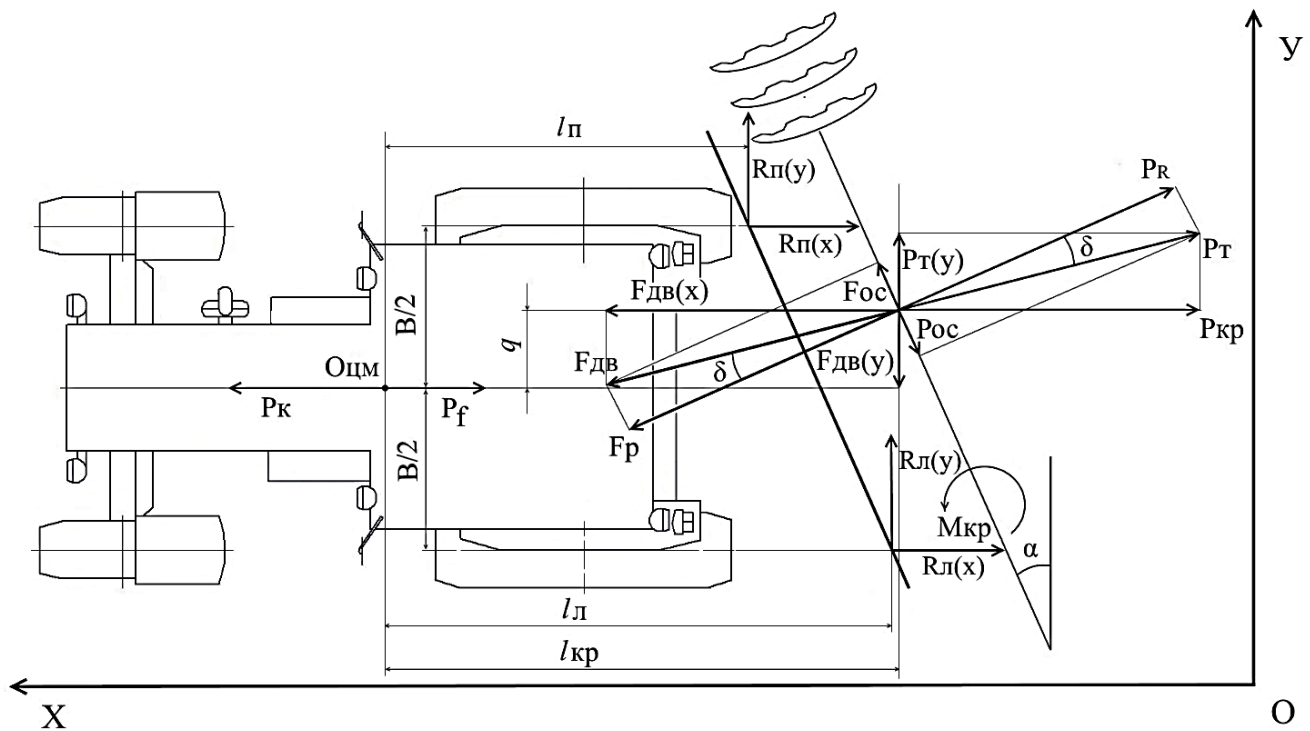


Рисунок 2.6 – Схема сил та реакцій, що діють на агрегат під час робочого ходу

При взаємодії обертових сферичних дисків з ґрунтом виникають радіальна сила  $F_r$  та сила, спрямована вздовж осі ротора,  $F_{ос}$ , геометрична сума яких утворює рушійну силу ротора  $F_{дв}$ .

Реакції ґрунту  $P_p$  та  $P_{ос}$  формують тяговий опір ротора робочої машини  $P_t$ . Під час руху трактора на встановлених правому та лівому ґрунтопоглиблювачах виникають реакції тягового опору  $R_{п(x)}$  та  $R_{л(x)}$ , а реакції ґрунту  $R_{п(y)}$  та  $R_{л(y)}$  перешкоджають повороту трактора.

Для забезпечення курсової стійкості агрегату повинна виконуватися умова:

Сумарний момент сил для забезпечення курсової стійкості агрегату визначається рівнянням:

$$\sum M=0 \quad (2.10)$$

$$F_{дв(x)} \cdot q - F_{дв(y)} \cdot l_{кр} + P_t(y) \cdot l_{кр} - P_{кр} \cdot q + R_l(y) \cdot 2B + R_l(x) \cdot 2B + R_n(y) \cdot l_n - R_n(x) \cdot 2B = 0 \quad (2.11)$$

$F_{дв(x)}, F_{дв(y)}$  – проєкції рушійної сили на осі координат;

$P_{кр}, P_t(y)$  – проекції тягового опору на осі координат.

Оскільки ґрунтопоглиблювачі встановлені на однакову глибину обробітку, їхній тяговий опір однаковий:

$$R_{л}(x) = R_n(x), R_{л}(y) = R_n(y) = R_{ПУ} \quad (2.12)$$

$$(F_{ог}(x) - P_{кр}) \cdot q - (F_{ог}(y) - P_t(y)) \cdot l_{кр} + R_{ПУ} l_n + R_{ПУ} l_{л} = 0$$

$$F_{дв} = F_{дв}(x) \cdot \cos(\alpha - \delta), \quad P_t = P_{кр} \cdot \cos(\alpha - \delta)$$

$$(P_{кр} - F_{дв}(x)) \cdot q - (P_{кр} - F_{дв}(x)) \cdot \tan(\alpha - \delta) \cos(\alpha - \delta) l_{кр} = R_{ПУ} (2l_n + B \tan \alpha)$$

Де

$$\Delta F = P_{кр} - F_{дв}(x)$$

$$R_{ПУ} = \frac{q \Delta F (2l_n + B \tan \alpha)}{l_{кр} \tan(\alpha - \delta) \cos(\alpha - \delta)} \quad (2.13)$$

Курсову стійкість агрегату можна підвищити зміщенням центру мас або точки причепу на величину  $q=B/4$

Враховуючи, що  $R_{ПУ}$  визначається формулою (2.11), ширина стійки ґрунтопоглиблювача визначається як:

$$b_{ну} = \frac{\Delta F}{\sigma_{см} a_{ну} (2l_n + B \tan \alpha)} \left( l_{кр} \tan(\alpha - \delta) \cos(\alpha - \delta) - \frac{B}{4} \right) \quad (2.14)$$

З геометричних співвідношень:

$$l_{кр} = l_n + \frac{B}{4} \tan \alpha, \quad l_{л} = l_n + B \tan \alpha \quad (2.15)$$

Отже, ширина стійки можна записати у вигляді:

$$b_{ny} = \frac{\Delta F}{\sigma_{ст} a_{ny} (2l_{кр} + \frac{B}{4} \tan \alpha)} \left( l_{кр} \tan(\alpha - \delta) \cos(\alpha - \delta) - \frac{B}{4} \right) \quad (2.16)$$

Таким чином, ширина стійки ґрунтопоглиблювача визначається величиною рушійної сили, що розвивається роторним плугом, глибиною ходу ґрунтопоглиблювачів ( $a_{ny}$ ), фізико-механічними властивостями ґрунту ( $\sigma_{ст}$ ) та конструктивними параметрами роторного плуга: кутом атаки ротора ( $\alpha$ ) та взаємним розташуванням центру мас роторного плуга і трактора ( $q$  та  $l_{кр}$ ).

Використовуючи розрахункові значення ширини захвату робочої машини  $B_p=2,4$  м, робочу швидкість  $v_p=2,4$  м/с ( $v=1$ ) та критичну тягу  $P_{кр}=10,8$  кН (або 4,5 кН/м) при номінальному буксуванні, а також розрахункові дані питомого тягового опору ротора ( $K_{рот \cdot v}$ ), за формулою (2.5) визначаємо рушійну силу ротора:

$$F_{дв} = K_{рот \cdot v} \cdot B_p \quad (2.17)$$

Напруження стиснення ґрунту приймаємо  $\sigma_{ст}=19,5$  кН/м<sup>2</sup>.

Для малих кутів  $\delta$  справедливо:

$$\frac{\tan(\alpha - \delta)}{\cos(\alpha - \delta)} \approx 0,5 \quad (2.18)$$

Приймаємо, що величина  $B/4 \tan \alpha$  у порівнянні з  $2l_{кр}$  незначна (похибка близько 10%). Тоді ширина стійки визначається формулою:

$$b_{\text{ну}} = \frac{\Delta F}{2\sigma_{\text{ст}} a_{\text{ну}} l_{\text{кр}}} \left( 0,5l_{\text{кр}} - \frac{B}{4} \right) \quad (2.19)$$

Розв'язавши рівняння, отримуємо мінімальне розрахункове значення ширини стійки ґрунтопоглиблювача:  $b_{\text{ну}}=0,154$  м. З урахуванням прийнятих наближень для конструкції роторного плуга обираємо стандартну стійку культиватора конструкції шириною 0,16 м.

## Висновки

1. На основі методики та графоаналітичного підходу, що враховує баланс потужності тягово-приводного агрегату, встановлено розрахунковий тяговий діапазон  $\varphi_{\text{кр}} = 0,22 \dots 0,36$  та інтервал робочих швидкостей 2,4 – 3,6 м/с, у межах яких забезпечуються максимальні значення тягового ККД та питомої продуктивності.
2. Теоретичні дослідження та аналітичні розрахунки дозволили визначити оптимальні геометричні та технологічні параметри модернізованого роторного плуга для умов біологізованого землеробства, а саме:
  - діаметр сферичного диска - 0,66 м;
  - відстань між дисками ротора - 0,23 м;
  - кут атаки ротора -  $24^\circ$ ;
  - частота обертання ротора - 385 об/хв;
  - ширина стійки ґрунтопоглиблювача - 0,16 м;
  - робоча ширина леза долота - 0,075 м;
  - глибина встановлення ґрунтопоглиблювачів - 0,25 м;
  - відстань між ґрунтопоглиблювачами на рамі машини - 1,4 м.
3. Отримані результати підтверджують можливість ефективного використання модернізованого роторного плуга в технологіях біологізованого землеробства, забезпечуючи поєднання високої енергоефективності з підвищенням агротехнічної якості обробітку ґрунту.

### 3 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Модель роторного плуга для технології органічного землеробства

Модернізований роторний плуг складається з рами 1, на якій встановлені: батарея з активними сферичними дисками 6, циліндричний редуктор 4, проміжна опора 8 із карданними передачами 2 і 3, захищеними кожухом 5, опорне колесо 9 та ґрунтоуглибники 7. Крутний момент від ВОМ трактора передається на циліндричний редуктор 4 через проміжну опору 8 за допомогою карданних передач 2 і 3.

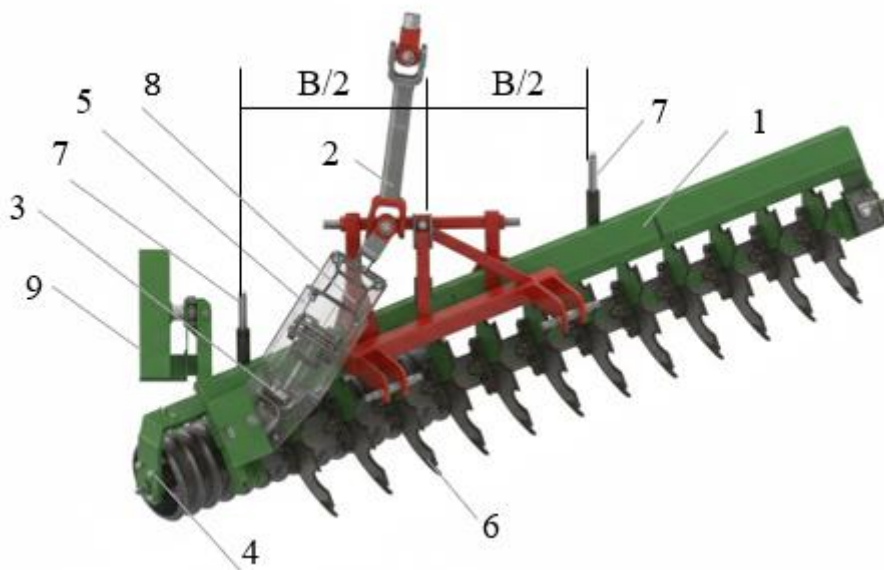


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд модернізованого роторного плуга

#### 3.2 Методика визначення впливу кута атаки ротора на виконання робочого процесу

Зміна напрямку руху агрегату під дією збурюючих сил ротора призводить до зміни кута атаки  $\alpha$  (рис. 3.2), від якого залежить якість обробітку ґрунту.

Величина зміни напрямку руху оцінюється за допомогою кута курсової стійкості  $\gamma$  (рисунок 3.3).

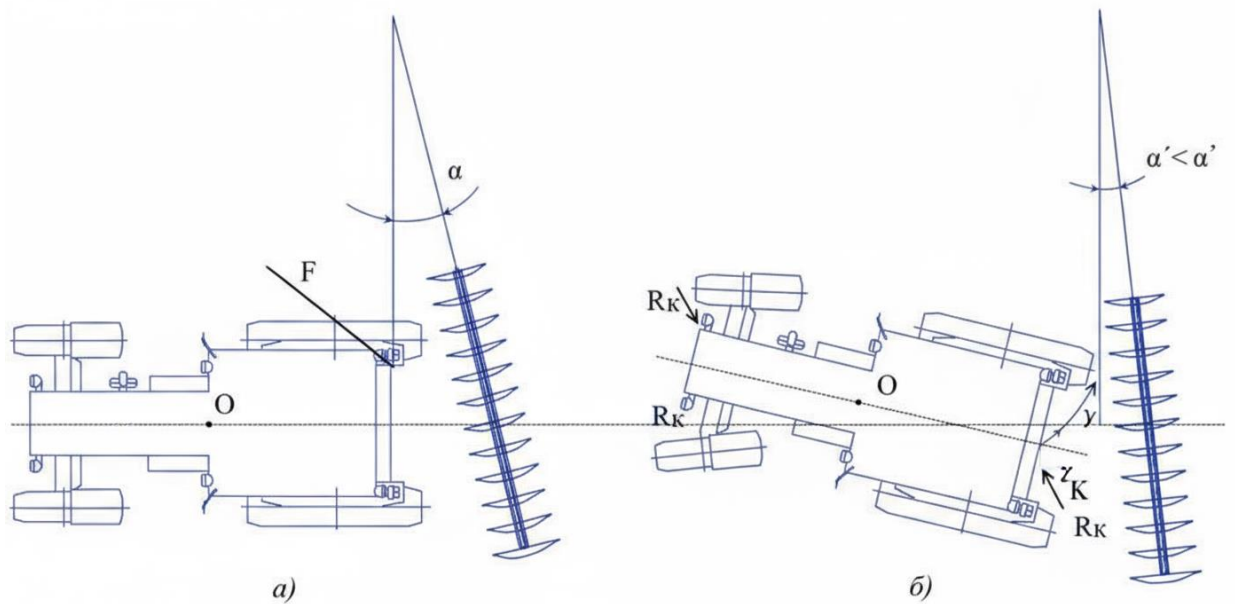


Рисунок 3.2 – Відхилення МТА від прямолінійного руху:  
 а) положення МТА до початку руху;  
 б) положення МТА на початку руху

Оцінка точності руху машинно-тракторного агрегату під час виконання вдосконаленого способу основної обробки ґрунту проводилася шляхом вимірювання кута відхилення агрегату  $\gamma$ . Випробування виконували при глибині обробки ґрунту від 0,05 до 0,15 м, робочій швидкості 1,38–2,5 м/с та куті атаки ротора 18°, 24° і 30°.



Рисунок 3.3 - Варіанти кута атаки роторного плуга: 30°, 24°, 18°

Для перевірки теоретичних розрахунків конструктивно-режимних параметрів роторного плуга перед ротором 6 на рамі 1 встановлювали два регульовані ґрунтоуглибники 3 (ширина стійки  $b_{ny}=0,16$  м, рис. 3.4, рис.3.5). Їхня глибина обробітку регулювалася від 0 до 0,25 м із кроком 0,05 м. Експеримент проводили при куті атаки ротора  $24^\circ$  і зміні глибини ґрунтоуглибників, що забезпечувало робочі швидкості 2,4–3,3 м/с при глибині обробітку сферичними дисками 0,15 м. Ефективність роботи агрегату оцінювали за рівномірністю глибини ходу ротора та ґрунтоуглибників та збереженням курсової стійкості агрегату.

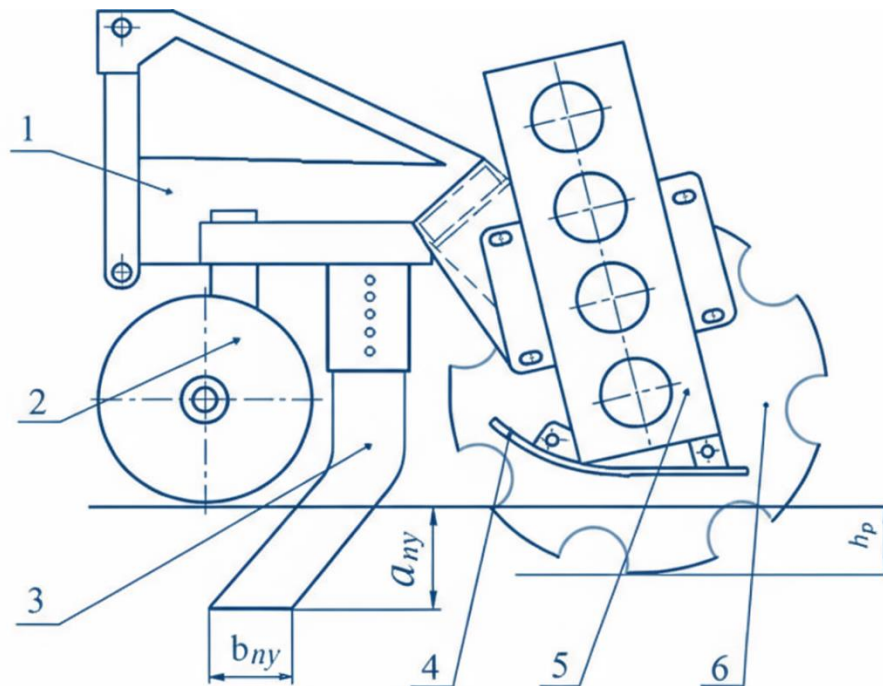


Рисунок 3.4 - Конструктивна схема встановлення ґрунтоуглибників і регулювання їх глибини

1 – рама; 2 – польове колесо; 3 – ґрунтоуглибники; 4 – опорний лист; 5 – редуктор; 6 – ротор;  $h_p$  – глибина обробітку ґрунту сферичними дисками;  $a_{ny}$  – глибина обробітку ґрунту ґрунтоуглибниками;  $b_{ny}$  – ширина стійки ґрунтоуглибника.



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд дослідного стенду

1 – правий ґрунтоуглибник; 2 – лівий ґрунтоуглибник; 3 – ротор.

### 3.3 Методика визначення кута курсової стійкості

Безпосереднє вимірювання малих кутів відхилення агрегату від заданого напрямку руху за допомогою градусних засобів є утрудненим, тому для визначення кута курсової стійкості застосовувалася реєструюча апаратура на основі ефекту гіроскопічності.

Дослідження проводилися за такою схемою: агрегат на вибраній передачі проходив відрізок 10–15 м до досягнення сталої швидкості. У цей період оператор утримував прямолінійний напрямок руху, впливаючи на керовані колеса. Далі, за сигналом, вплив на рульове керування припинявся, і агрегат здійснював рух по криволінійній траєкторії до зупинки. Під час експерименту фіксували тривалість руху та радіус кривизни траєкторії.

За умови, що проміжок часу  $t_t$  руху від точки  $A_0$  до точки  $A_1$  є незначним, приймалося, що агрегат переміщувався по дузі кола радіусом  $R$  з кутом відхилення  $\Delta\gamma'$  (рис. 3.6).

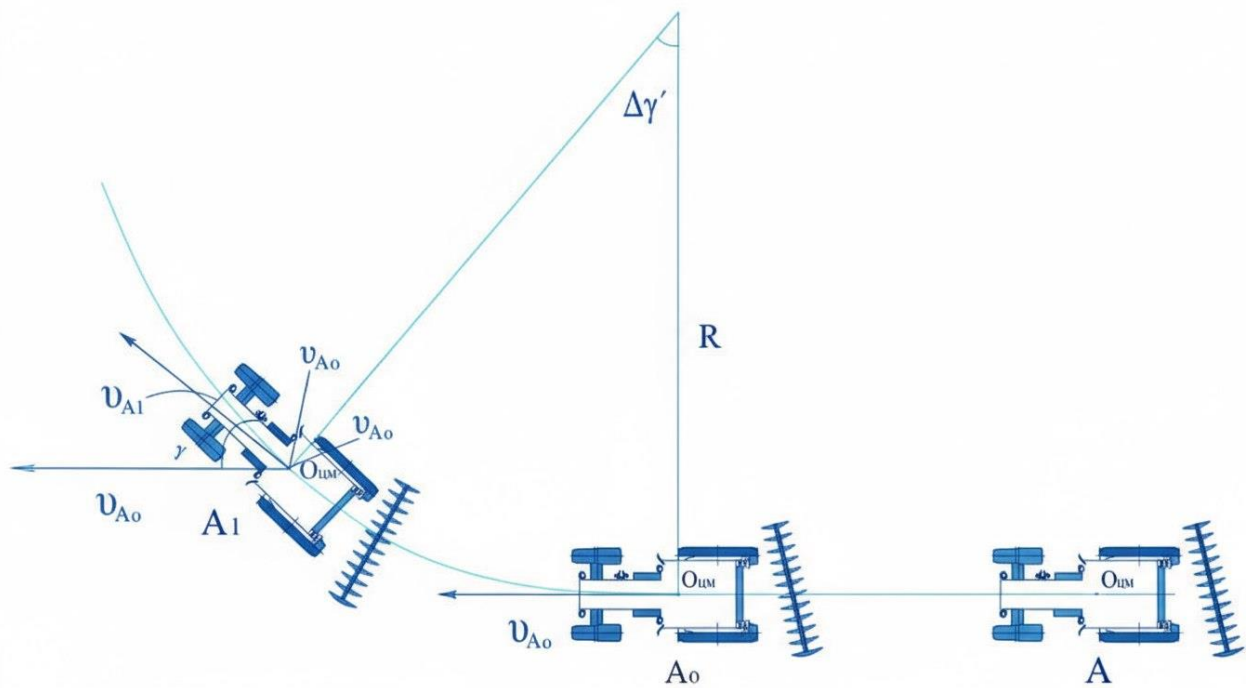


Рисунок 3.6 – Визначення кута відхилення від прямолінійного руху

Для визначення кута відхилення  $\Delta\gamma'$  було використано гірополукомпас, живлення якого здійснювалося від додаткової акумуляторної батареї через перетворювач напруги бортової мережі.

Вимірювання кутів виконувалося у поділках кутоміра (тисячних), після чого значення переводили у градусну систему для подальших розрахунків.

При визначенні кута курсової стійкості приймалося, що коло радіуса  $R$ , по якому рухається машинно-тракторний агрегат, поділене на 6000 рівних частин. Якщо з'єднати точки поділу з центром кола, утворюється 6000 рівних центральних кутів, кожен з яких приймається за умовну одиницю вимірювання (рисунок 3.11).

Таким чином, центральний кут, довжина дуги якого дорівнює  $1/6000$  довжини кола, відповідає одній поділці кутоміра. Довжина дуги  $l$ , що відповідає цій одиниці, визначається як частка від радіуса  $R$ :

$$l = \frac{2\pi R}{6000} \quad (3.1)$$

Підставивши числове значення  $\pi$ , отримаємо:

$$l = \frac{R}{955} \approx 0,00105R \quad (3.2)$$

Прийнятність такого припущення зумовлена математичними особливостями малих кутів. Для невеликих значень кута  $\alpha$  (у радіанах) виконується наближена рівність:

$$\sin\alpha \approx \tan\alpha \approx \alpha$$

Це означає, що при малих кутах довжина дуги кола практично збігається з відрізком, що відтинається хордою, а тому поділка кутоміра може бути безпосередньо прирівняна до «натуральної тисячної». Похибка від такого спрощення стає настільки малою, що не має суттєвого впливу на результати експериментальних вимірювань.

Саме тому під час дослідження курсової стійкості машинно-тракторного агрегату було обґрунтовано використання даного наближення, що дозволило спростити розрахунки та забезпечити їх практичну точність (табл. 3.1)

Таблиця 3.1

Співвідношення між градусною системою вимірювання кутів та тисячною

| Углова міра в градусах | Углова міра в тисячних |
|------------------------|------------------------|
| 360°                   | 60-00                  |
| 180°                   | 30-00                  |
| 90°                    | 15-00                  |
| 45°                    | 7-50                   |
| 6°                     | 1-00                   |
| 1°                     | 0-16,7                 |

Для практичних цілей, особливо під час роботи з малими величинами кутів, доцільніше використовувати єдине позначення «тисячна», що суттєво спрощує обчислення та інтерпретацію результатів.

Таблиця 3.2

### Співвідношення малих кутових величин

| Величини кутів | У градусах | У поділках кутоміра | У тисячних | У натуральних тисячних |
|----------------|------------|---------------------|------------|------------------------|
| 0°30'          | 0-08,3     | 0-08,7              | 0-08,7     | 0-08,7                 |
| 1°             | 0-16,7     | 0-17,5              | 0-17,5     | 0-17,5                 |
| 2°             | 0-33,3     | 0-34,9              | 0-34,9     | 0-34,9                 |
| 3°             | 0-50,0     | 0-52,4              | 0-52,4     | 0-52,4                 |
| 6°             | 1-00,0     | 1-04,7              | 1-05,1     | 1-05,1                 |
| 15°            | 2-50,0     | 2-61,8              | 2-67,9     | 2-67,9                 |
| 30°            | 5-00,0     | 5-23,6              | 5-77,4     | 5-77,4                 |

З таблиці видно, що для малих значень кутів величини, виражені в тисячних і в «натуральних тисячних», практично збігаються, що підтверджує можливість застосування зазначеного наближення без значних похибок. Однак при зростанні кутів різниця між градусною системою та тисячною стає суттєвою, і тому для великих кутів використання такої методики вже є некоректним.

Припустимо, що рух машинно-тракторного агрегату (МТА) здійснюється по коловій траєкторії з постійним кутовим відхиленням, тобто  $\gamma = \text{const}$ . У цьому випадку рух вважається рівномірним, а швидкості окремих точок траєкторії збігаються:

$$v_p = v_{A_0} = v_{A_1}$$

Центральний кут, що відповідає дузі траєкторії, дорівнює

$$\Delta\gamma' = \Delta\gamma = \gamma,$$

оскільки йдеться про суміжні кути. Для малих значень кута  $\gamma$  довжина дуги  $A_0A_1$  визначається виразом:

$$A_0A_1 = v_p \cdot t$$

Таким чином, встановлений зв'язок між величиною кута (у тисячних), довжиною дуги та радіусом кола, за яким рухається МТА, дозволяє визначити значення радіуса:

$$R = A_0 A_1 \gamma.$$

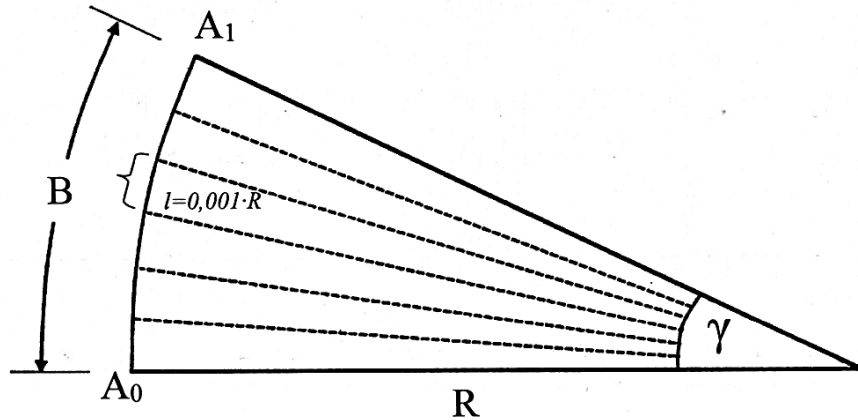


Рисунок 3.7 – Визначення радіуса

Відомо, що довжина однієї поділки кутоміра дорівнює

$$l = 0,001 \cdot R$$

Якщо центральний кут між рівновіддаленими точками  $A_0$  і  $A_1$  у  $\gamma$  разів більший за одну «тисячну», то відповідно й довжина дуги  $B \approx A_0 A_1$ , тобто пройдений шлях МТА  $S_{\text{МТА}}$ , пропорційно збільшується у  $\gamma$  разів порівняно з  $l$ . Отже, отримуємо вираз:

$$B = l \cdot \gamma = 0,001 \cdot R \cdot \gamma.$$

Звідси радіус кола траєкторії МТА визначається за формулою:

$$R = \frac{B \cdot 1000}{\gamma}.$$

Ця залежність дозволяє оцінити радіус кривизни траєкторії на основі вимірюного пройденого шляху агрегату та величини кута відхилення у тисячних. Приклад роботи МТА в агрегаті з роторним плугом із встановленими почвоуглибниками та без них наведено на рисунку 3.8.



а)

б)

Рисунок 3.8 - Траєкторії руху МТА при основному обробітку ґрунту роторним плугом: а) із застосуванням ґрунтоуглибників (прямолінійний рух); б) без ґрунтоуглибників (криволінійна траєкторія).

### **3.4 Методика визначення показників якості виконання основного обробітку ґрунту роторним плугом**

Після проходу ґрунтообробного агрегату оцінювали наступні показники:

1. Гребистість поверхні поля – визначали на вершини гребенів у випадково обраних точках накладали рейку та вимірювали відстань від нижньої грані рейки до дна борозни, що дозволяло оцінити нерівномірність поверхні після проходу агрегату.
2. Фракційний склад ґрунту – визначали шляхом відбору проб із верхнього шару ґрунту після проходу агрегату. Проби просіювали через ситову систему для поділу ґрунту на фракції за розміром часток. Це дозволяло оцінити ступінь подрібнення ґрунту та якість обробітку.
3. Рівномірність глибини ходу робочих органів – вимірювали шляхом контролю глибини обробітку ґрунту сферичними дисками по довжині

робочої смуги. Вимірювання проводили у кількох точках, рівномірно розташованих по ширині захвату агрегату.

4. Рівномірність глибини ходу ґрунтоуглибників – оцінювали аналогічно до робочих органів, контролюючи глибину проникнення ґрунтоуглибників у ґрунт по всій ширині агрегату.

Вимірювання проводили на ділянках розміром 25 м по довжині та шириною, що дорівнює ширині захвату агрегату, із п'ятикратним повторенням для підвищення точності результатів. Такий підхід дозволяв комплексно оцінити ефективність роботи агрегату та якість виконаного основного обробітку ґрунту



Рисунок 3.7 – Визначення гребнистості поверхні ґрунту

Подрібненість (фракційний склад) ґрунту визначали для кожного дослідження з площі 0,25 м<sup>2</sup> на глибину обробітку. Відібрані зразки розділяли на фракції за допомогою комплекту сит (рисунок 3.15), які розташовували у порядку зменшення розміру отворів. Під час аналізу спершу вручну відбирали з верхнього сита найбільші грудки, після чого легкими струшуваннями просіювали ґрунт крізь сита з отворами відповідного діаметра для поділу на фракції. Масову частку кожної фракції визначали за формулою:

$$P(\%) = \frac{M_i}{M} \cdot 100\%,$$

де  $M_i$  – маса  $i$ -ї фракції грудок ґрунту в пробі, кг;

$M$  – загальна маса проби, кг.



Рисунок 3.8 – Комплект сит для визначення фракційного складу ґрунту

Глибину обробітку ґрунту визначали лінійкою (щупом) до необробленого шару, з рівномірним інтервалом по ходу машини для кожного робочого органу. Рівномірність заглиблення дисків і заглиблювачів оцінювали за методиками [129, 130].

Засмічення та налипання робочих органів оцінювали візуально за трьохбальною шкалою:

- 0 балів – унеможливиює обробіток;
- 1 бал – знижує якість обробітку;
- 2 бали – відсутнє або не впливає на якість.

### 3.5 Результати визначення кута атаки ротора

З метою визначення спільного впливу різних факторів на рівномірність глибини обробітку ґрунтообробним ротором та стійкість прямолінійного руху машинно-тракторного агрегату (МТА) був проведений трифакторний експеримент.

Як параметри оптимізації було прийнято:

$Y_{\gamma}$  – курсова стійкість агрегату;

$U_p$  – рівномірність глибини ходу роторного плуга, що забезпечує якісне загортання органічної маси, розташованої на поверхні поля.

Результати експерименту наведено у матриці (табл. 3.1).

| № дослідю | Фактори та числові характеристики | Значення відгуку             |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------|
|           | Кут атаки, $\alpha$ (x1), град    | Глибина обробітку, h (x2), м |
| 1         | - 18                              | - 0,05                       |
| 2         | + 30                              | - 0,05                       |

|   |      |        |
|---|------|--------|
| 3 | - 18 | + 0,15 |
| 4 | + 30 | + 0,15 |
| 5 | - 18 | - 0,05 |
| 6 | + 30 | - 0,05 |
| 7 | - 18 | + 0,15 |
| 8 | + 30 | + 0,15 |

На основі отриманих даних було проведено їх обробку та складено статистичні моделі (рівняння регресії).

Кодований вигляд:

$$Y_{\gamma} = 34,90 + 11,13x_1 + 1,90x_2 + 1,90x_3; \quad (3.1)$$

$$Y_{Up} = 50,30 + 9,01x_1 - 18,50x_2 - 4,75x_1x_3 \quad (3.2)$$

Натуральний вигляд:

$$\gamma = -18,23 + 1,85\alpha + 0,37h + 0,69v; \quad (3.3)$$

$$Up = -14,27 + 4,23\alpha - 3,70h + 9,36v - 0,39\alpha v. \quad (3.4)$$

Побудовані регресійні моделі (3.1–3.4) дозволяють оцінити вплив основних факторів – кута атаки ротора ( $\alpha$ ), глибини обробітку ( $h$ ) та робочої швидкості руху агрегату ( $v$ ) – на курсову стійкість МТА ( $\gamma$ ) та рівномірність глибини ходу роторного плуга ( $Up$ ).

1. Вплив кута атаки  $\alpha$ . Згідно з рівняннями (3.3) та (3.4), збільшення кута атаки ротора позитивно впливає як на курсову стійкість агрегату, так і на рівномірність обробітку ґрунту. Це пояснюється тим, що при більшому куті атаки підвищується ефективність занурення робочих органів у ґрунт і зменшується бокове відхилення агрегату.

2. Вплив глибини обробітку  $h$ . Глибина обробітку має суперечливий ефект: у рівнянні (3.3) вона незначно підвищує курсову стійкість агрегату, проте за рівнянням (3.4) істотно зменшує рівномірність глибини ходу плуга. Це свідчить, що надмірне заглиблення ротора може призводити до нестабільності технологічного процесу.

3. Вплив робочої швидкості  $v$ . Зі зростанням швидкості руху МТА підвищується курсова стійкість агрегату (3.3), однак рівномірність глибини

(3.4) змінюється нелінійно: при оптимальних швидкостях спостерігається стабільний хід, тоді як надмірне збільшення швидкості може спричинити коливання глибини.

4. Взаємодія факторів. Значущим виявився комбінований вплив кута атаки  $\alpha$  та швидкості  $v$  на рівномірність ходу ротора (член  $-0,39\alpha v$  у рівнянні 4.4). Це означає, що одночасне збільшення кута атаки та швидкості може мати як позитивний, так і негативний ефект, залежно від робочих умов.

Таким чином, експериментально підтверджено, що для забезпечення високої курсової стійкості МТА та якісного загортання органічної маси необхідно вибирати оптимальне поєднання кута атаки ротора, глибини обробітку та робочої швидкості.

Гіпотезу щодо значущості коефіцієнтів рівнянь регресії перевіряли за критерієм Стьюдента, а адекватність рівнянь – за критерієм Фішера.

Рівняння перерізів поверхні відгуку були отримані на основі побудованих регресійних моделей.

За величиною курсового кута  $\gamma$  у кодованому вигляді:

$$Y_{\gamma} = 37,80 + 6,75x_3 \text{ (при обмеженні } x_1);$$

$$Y_{\gamma} = 37,80 + 15,5x_1 + 6,75x_3 + 2,50x_1x_3 \text{ (при обмеженні } x_2);$$

$$Y_{\gamma} = 37,80 + 15,50x_1 \text{ (при обмеженні } x_3).$$

$$\gamma = 26,30 + 0,40h + 0,69v \text{ (при } \alpha=24^\circ);$$

$$\gamma = -14,50 + 1,85\alpha + 0,69v \text{ (при } h=0,1\text{м});$$

$$\gamma = -13,40 + 1,85\alpha + 0,40h \text{ (при } v=1,94\text{м/с}).$$

По рівномірності глибини обробітку,  $U_p$  (у кодованому вигляді) були отримані такі залежності:

$$Y_{U_p} = 50,25 - 18,50x_2 \text{ (при обмеженні } x_1);$$

$$Y_{U_p} = 50,25 + 9,05x_1 - 4,77x_1x_3 \text{ (при обмеженні } x_2);$$

$$Y_{U_p} = 50,25 + 9,05x_1 - 18,50x_2 \text{ (при обмеженні } x_3).$$

У натуральному вигляді рівняння мають такий вигляд:

$$U_p = 87,25 - 3,70h \text{ (при обмеженні } \alpha = 24^\circ \text{);}$$

$$U_p = -51,27 + 4,27\alpha + 9,36v - 0,39\alpha v \text{ (при обмеженні } h = 0,1 \text{ м);}$$

$$U_p = 51,27 + 1,50\alpha - 3,70h \text{ (при обмеженні } v = 1,94 \text{ м/с).}$$

Для проведення розрахунків та побудови поверхонь відгуку (рисунки 3.6 – 3.11) була використана спеціалізована комп'ютерна програма. Аналіз отриманих поверхонь відгуку та регресійних рівнянь, побудованих за результатами експериментів, дав можливість сформулювати низку узагальнених висновків

У всіх польових дослідженнях спостерігалось відхилення машинно-тракторного агрегату (МТА) від прямолінійного руху під час роботи ротора без використання ґрунтопоглиблювачів. У прийнятному діапазоні зміни кута атаки та робочої швидкості МТА (від 1,38 до 2,50 м/с) курсова стійкість агрегату коливалася від 20 до 48 градусів. Встановлено, що зі зменшенням кута атаки стійкість агрегату покращується (кут курсової стійкості зменшується), проте при цьому рослини підрізаються неповністю, що знижує якість виконання технологічного процесу.

Крім того, результати показали, що глибина обробітку є одним із найбільш критичних параметрів, адже при її збільшенні зростає нерівномірність ходу ротора, що негативно впливає на якість загортання органічної маси. Оптимальна робоча швидкість дозволяє частково компенсувати цей ефект, однак надмірне збільшення швидкості спричиняє коливання глибини та може призвести до втрати стійкості агрегату.

Загалом проведені дослідження підтвердили, що забезпечення якісного обробітку ґрунту можливе лише за умови оптимального поєднання кута атаки ротора, глибини обробітку та робочої швидкості агрегату. Це дозволяє одночасно досягти високої курсової стійкості та рівномірності глибини, що є необхідною умовою для якісного підрізання та загортання рослинних решток.

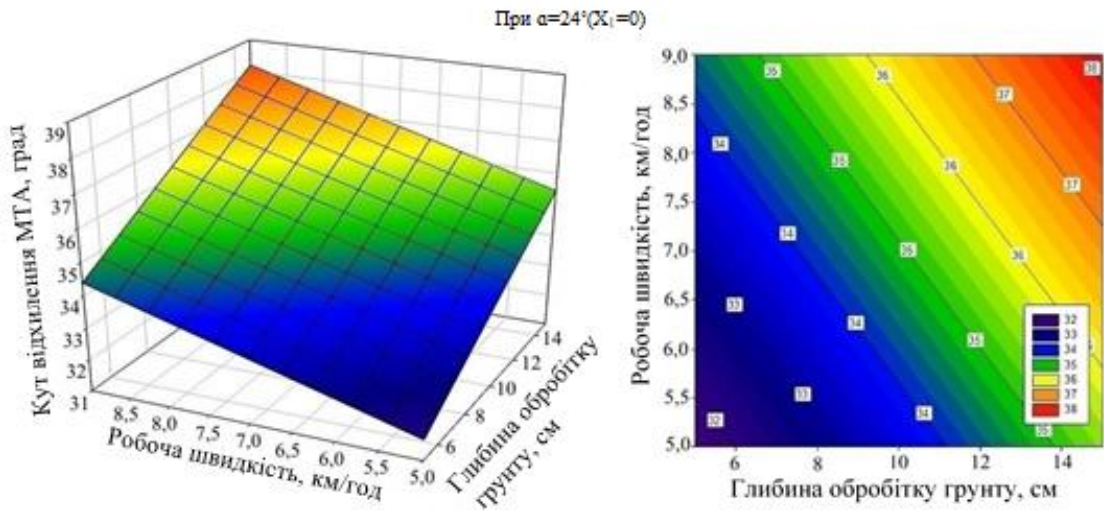


Рисунок 3.6 - Поверхні відгуку та графічне відображення зміни курсової стійкості при куті встановлення ротора  $24^\circ$

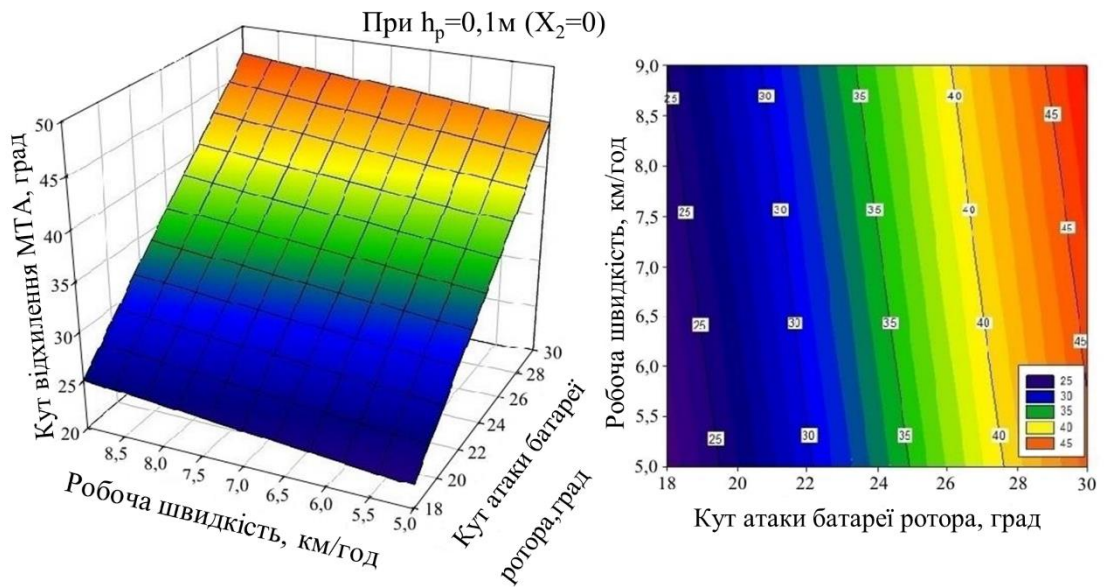


Рисунок 3.7 - Поверхня відгуку та переріз зміни курсової стійкості за глибини обробітку ґрунту 10 см

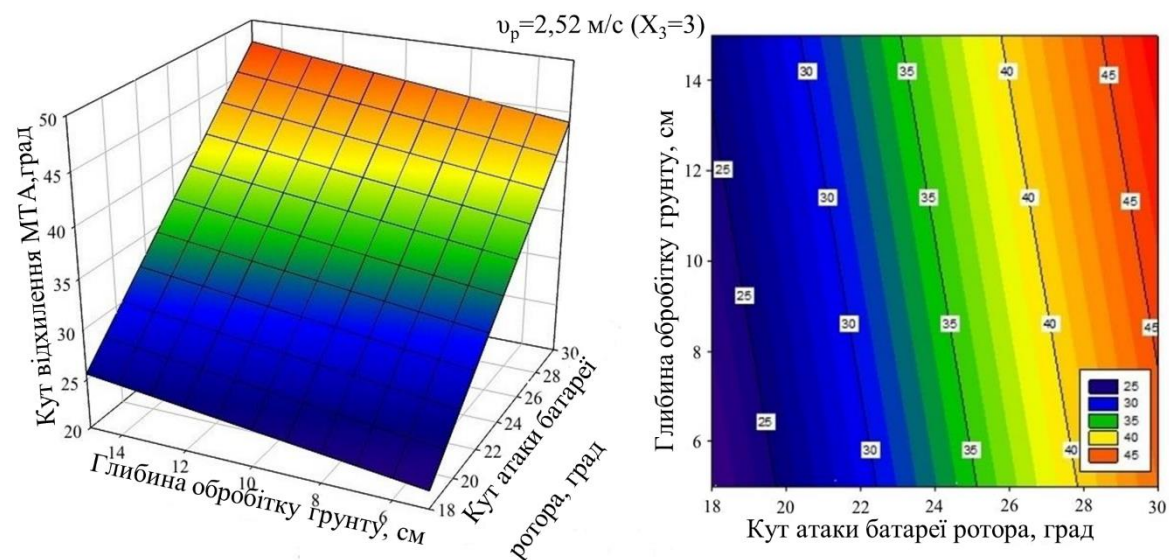


Рисунок 3.8 – Поверхня відгуку та переріз зміни курсової стійкості за робочої швидкості 1,94 м/с

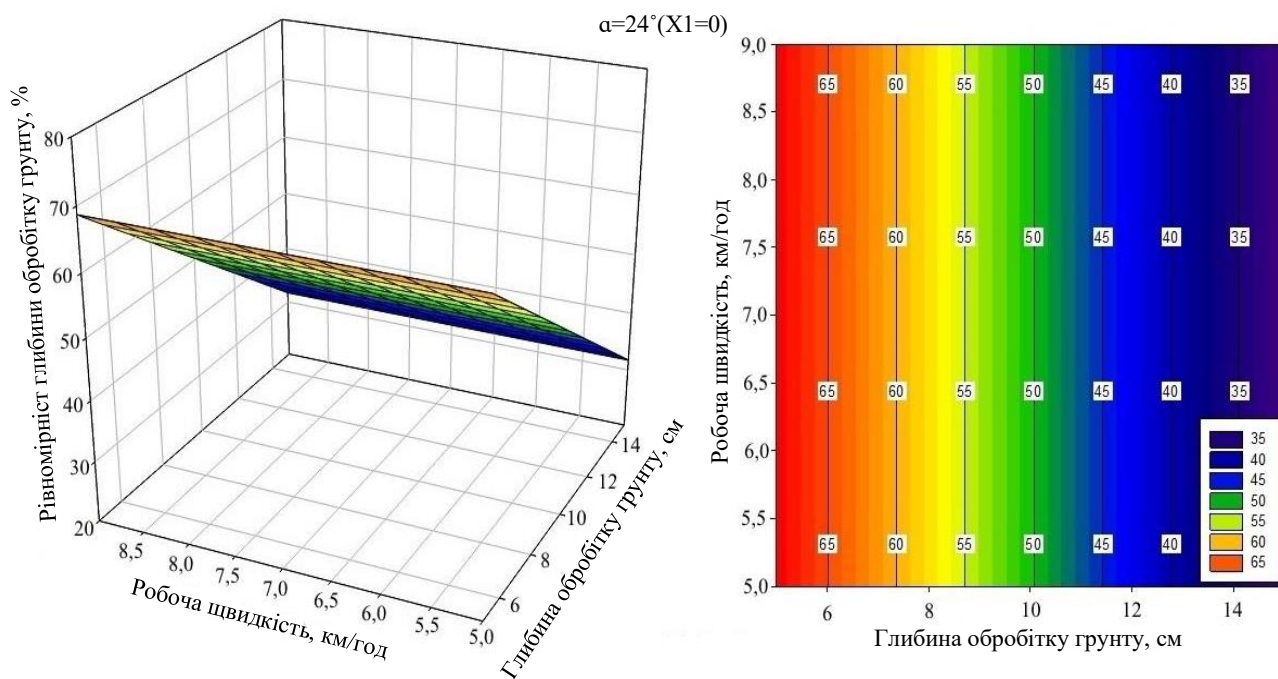


Рисунок 3.9 – Поверхні відгуку та переріз зміни показника рівномірності глибини обробітку ґрунту при куті встановлення ротора 24°

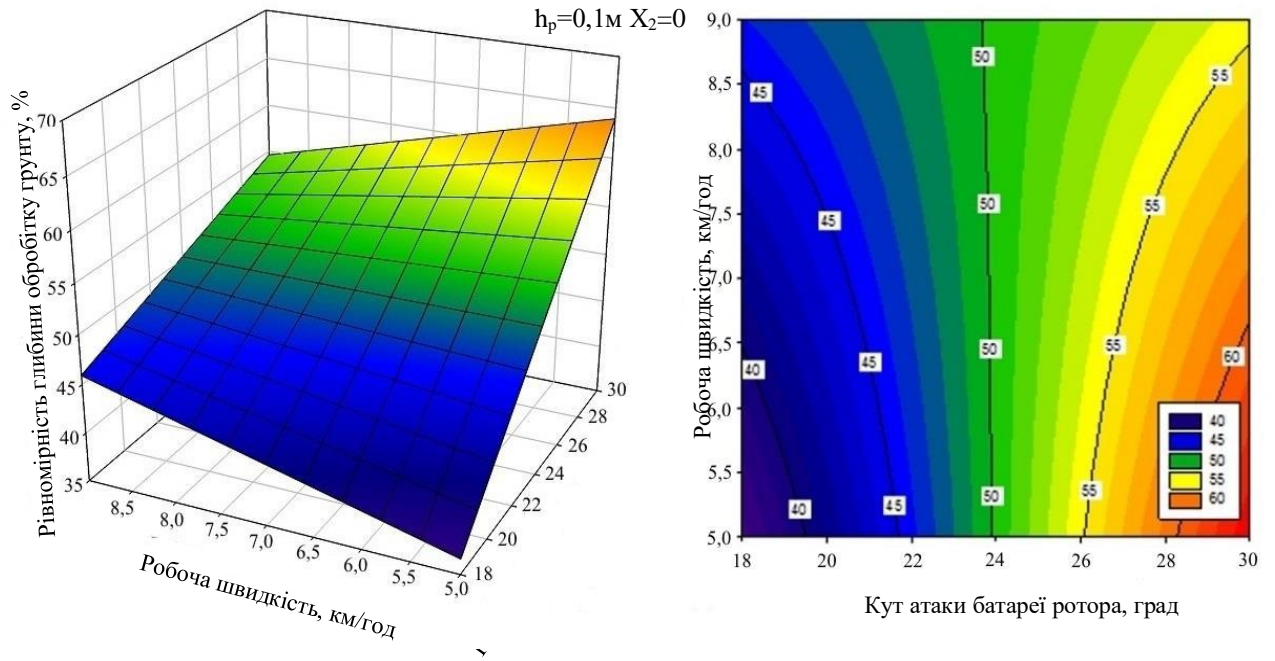


Рисунок 3.10 - Поверхні відгуку та переріз зміни показника рівномірності глибини обробітку ґрунту 10 см

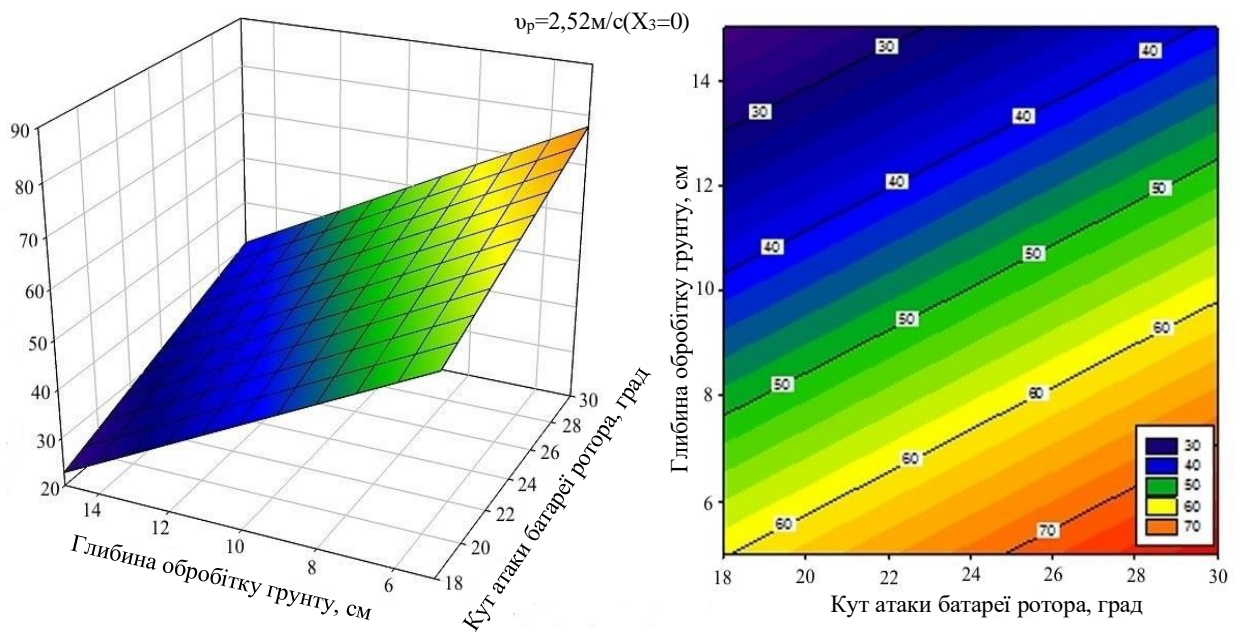


Рисунок 3.11 – Поверхні відгуку та переріз зміни показника рівності глибини обробітку з робочою швидкістю 1,94 м/с

Ступінь рівномірності глибини ходу дискових робочих органів визначається насамперед параметрами глибини обробітку ротором та

величиною кута атаки машини. За умов глибини обробітку  $h = 0,15$  м та кута атаки ротора  $\alpha = 24^\circ$  агрегат здатний забезпечити повне підрізання кореневої системи рослин, однак рівномірність руху робочих органів у цьому випадку залишається недостатньою, що підтверджується кутом курсової стійкості на рівні близько  $35^\circ$ .

Полеві експерименти із застосуванням ґрунтопоглиблювачів, встановлених на роторний плуг (рис. 4.7), показали наявність чіткої залежності між величиною заглиблення робочих органів і кутом відхилення машинно-тракторного агрегата. Це свідчить про суттєвий вплив конструктивно-режимних параметрів на стабільність роботи та якість виконання технологічних операцій.

Вибір параметрів глибини обробітку ґрунту  $h = 0,15$  м та кута атаки ротора  $\alpha = 24^\circ$  здійснено з урахуванням агротехнічних вимог до основного обробітку ґрунту та повного підрізання рослин, що підтверджується результатами багатофакторного експерименту.

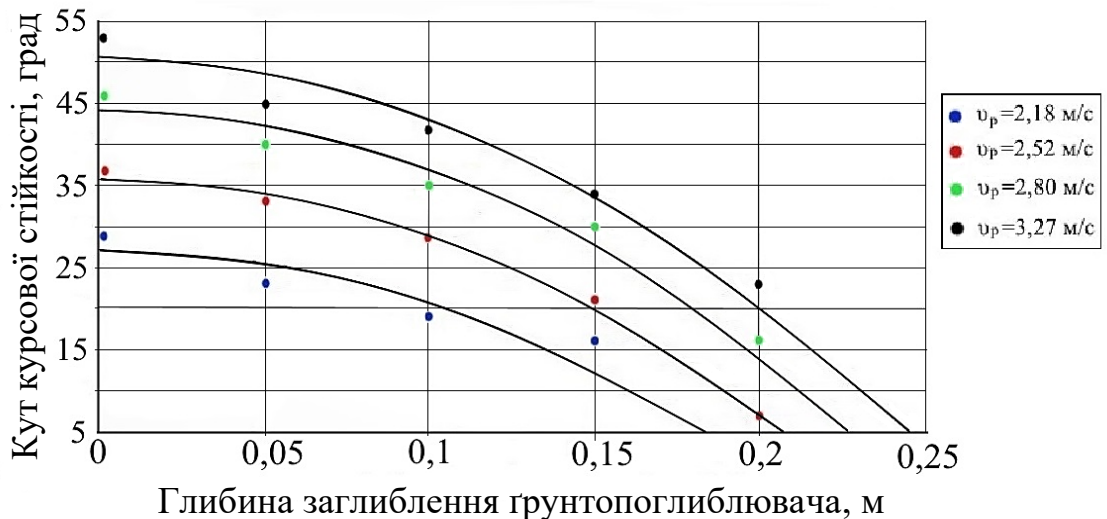


Рисунок 3.12 - Залежність кута курсової стійкості машинно-тракторного агрегата від величини заглиблення ґрунтопоглиблювачів (глибина обробітку ротором –  $0,15$  м, кут атаки ротора  $\alpha = 24^\circ$ )

Дослідження впливу глибини заглиблення ґрунтопоглиблювачів на курсову стійкість машинно-тракторного агрегата виконували із застосуванням

роторного плуга, оснащеного ґрунтопоглиблювачами зі стійкою шириною 0,16 м. За результатами аналізу встановлено, що заглиблення ґрунтопоглиблювачів на 0,25 м забезпечує необхідну стабільність руху МТА на лугово-чорноземовидних ґрунтах. У такому випадку відхилення агрегата (кут курсової стійкості) не перевищує 5° в межах робочих швидкостей, рекомендованих агротехнічними вимогами, а саме від 2,4 до 3,3 м/с.

### **3.6 Результати польових випробувань агрегата з роторним плугом для технології органічного землеробства**

Польові випробування агрегата з роторним плугом, застосованого у технології біологізованого землеробства, показали його здатність забезпечувати якісне виконання основного обробітку ґрунту з урахуванням агротехнічних вимог. В процесі експериментів визначалися показники рівномірності глибини обробітку, ступінь подрібнення та перемішування рослинних решток, а також стабільність руху машинно-тракторного агрегата.

На дослідному полі ділянці шириною 20 м і довжиною 200 м було проведено налаштування та регулювання агрегату, після чого розпочалися польові випробування. Ґрунтообробний агрегат складався з трактора класу 1,4 та навісного роторного плуга. Привід роторного плуга здійснювався від валу відбору потужності трактора. Перед ротором, по слідах ведучих коліс, плуг оснащувався двома ґрунтоуглиблювачами з глибиною обробітку 0,25 м. Ротор плуга був встановлений під кутом атаки 24°, а глибина обробітку ним становила 0,15 м.

Ґрунтообробний агрегат працював на швидкостях від 2,2 до 3,3 м/с. Якість виконання технологічного процесу перевіряли при частоті обертання вала відбору потужності 540 об/хв.



Рисунок 3.13 – Випробування модернізованого РП-2,4

Випробування показали, що встановлені на роторному плузі ґрунтоуглиблювачі сприяють стабільній роботі машинно-тракторного агрегату. Було встановлено, що при швидкості руху до 3,0 м/с агрегат забезпечував якісне виконання технологічного процесу обробітку ґрунту. Робочі органи досягали розпушування ґрунту на глибину 0,149 м, при цьому стандартне відхилення глибини обробітку ротором становило  $\pm 0,01$  м, а коефіцієнт варіації – 13%. Середня гребнистість поверхні дорівнювала 0,042 м, зі стандартним відхиленням 0,015 м та коефіцієнтом варіації 19%. Середня глибина роботи ґрунтоуглиблювачів склала 0,24 м, стандартне відхилення – 0,026 м, а коефіцієнт варіації – 22%.

Активні диски роторного плуга ефективно підрізали стерню, залишаючи після обробітку лише 25–27% пожнивних решток на поверхні поля. Структура ґрунтових фракцій відповідала агротехнічним нормам: комки понад 100 мм не зустрічалися, а подрібнення ґрунту до фракцій 50–100 мм склало 79%. Залипання ґрунту та засмічення дискових робочих органів і ґрунтоуглиблювачів рослинними залишками не спостерігалось (табл.3.1).

Таблиця 3.1

Показники експлуатаційно-технологічної та агротехнічної оцінки агрегатів

| Показник оцінки агрегату                              | Плуг FALC  | Запропонований РП-2,4                                  |
|---|--|--|
| Середня експлуатаційна швидкість на загоні, м/с       | 2,22   | 2,45   |
| Робоча ширина захвату агрегату, м                     | 2,34   | 2,36   |
| Глибина обробітку ротором, м                          | 0,143±0,035  | 0,149±0,010  |
| Середня глибина обробітку ґрунтоуглиблювачами, м      | –  | 0,24±0,026   |
| Подрібнення ґрунту, % (розмір фракцій, мм)            | Менше 1,0: 0<br>1–50: 82<br>50–100: 18<br>Понад 100: 0 | Менше 1,0: 0<br>1–50: 79<br>50–100: 21<br>Понад 100: 0 |
| Гребнистість поверхні ґрунту, м                       | 0,047±0,025  | 0,042±0,015  |
| Підрізання стерні, %                                  | 95   | 100  |
| Залипання сферичних дисків і ґрунтоуглиблювачів       | не спостерігалось                                      | не спостерігалось                                      |
| Витрати палива за основний час роботи, кг/га          | 7,2  | 7,5  |
| Продуктивність за годину основного часу зміни, га/год | 1,85   | 1,99   |
| Експлуатаційна продуктивність, га/год                 | 1,52   | 1,87   |

Модернізований роторний плуг показав суттєві переваги порівняно зі стандартним агрегатом. Він забезпечує вищу середню експлуатаційну швидкість – 2,45 м/с проти 2,22 м/с, що дозволяє швидше виконувати обробіток ґрунту, а також трохи більшу робочу ширину захвату – 2,36 м проти 2,34 м, підвищуючи ефективність роботи на одиницю часу. Глибина обробітку ротором стала більш стабільною, зі стандартним відхиленням  $\pm 0,01$  м проти  $\pm 0,035$  м, що забезпечує рівномірну якість ґрунту. Завдяки наявності ґрунтоуглиблювачів середня глибина обробітку досягла 0,24 м, що покращує розпушування ґрунту та стабілізує хід агрегату. Подрібнення ґрунту також покращилось: частка фракцій 1–50 мм зросла до 79 %, а фракції 50–100 мм становлять 21 %, що відповідає агротехнічним вимогам. Повне підрізання стерні досягає 100 % проти 95 % у стандартного плуга, а залипання робочих органів не спостерігається, що забезпечує безперебійну роботу. Експлуатаційна продуктивність модернізованого плуга становить 1,87 га/год

проти 1,52 га/год, що дозволяє значно економити час і ресурси, при цьому витрати палива зросли лише незначно – до 7,5 кг/га. Загалом модернізований роторний плуг забезпечує більш рівномірний та ефективний обробіток ґрунту, підвищує продуктивність і якість роботи агрегату при мінімальних додаткових витратах.

Зі збільшенням швидкості руху від 3,0 до 3,3 м/с якість виконання технологічного процесу погіршувалась: кількість підрізаних рослин знизилася до 92 %. Таким чином, робочу швидкість ґрунтообробного агрегату слід обмежити межами  $3,0 \pm 0,2$  м/с.

Згідно з Протоколом приймальних випробувань роторний плуг HARD не відповідав агротехнічним вимогам: при швидкості понад 4,2 км/год відбувається заглиблення робочих органів агрегату та нерівномірність обробітку по ширині захвату. Якщо ліва сторона машини забезпечує розпушування ґрунту на 5–6 см, то права залишає необроблені ділянки.

## **Висновки**

1. Проведені експериментальні дослідження наочно продемонстрували комплексний вплив різних факторів на якість обробітку ґрунту та курсову стійкість машинно-тракторного агрегату при зміні кута атаки ротора і глибини встановлення ґрунтоуглиблювачів у всьому діапазоні робочих швидкостей.
2. Основний вплив на рівномірність глибини основного обробітку ґрунту роторним плугом та на курсову стійкість агрегату справляють кут атаки ротора, робоча швидкість руху та глибина установки ґрунтоуглиблювачів.
3. Встановлено оптимальні конструктивні параметри агрегату, за яких забезпечується якісне виконання технологічної операції основного обробітку ґрунту з повним підрізанням сидеральних рослин і стерні попередньої культури у всьому діапазоні робочих швидкостей: глибина обробітку ґрунту ротором – 0,15 м, кут атаки ротора –  $24^\circ$ , глибина встановлення ґрунтоуглиблювачів – 0,25 м.

4. Установка ґрунтоуглиблювачів дозволяє не лише стабілізувати курсову стійкість агрегату, а й переводить його у коректний тяговий режим, що збільшує ресурс трансмісії трактора та покращує його керованість.
5. Запропонована модернізація роторного плуга дозволяє досягати максимального тягового ККД у діапазоні швидкостей від 2,44 до 3,02 м/с при буксуванні трактора від 11 % до 16,5 %.

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

### **4.1. Загальні положення**

Організація безпечних умов праці є одним із ключових завдань агропромислового виробництва, що регламентується Законом України «Про охорону праці» та Кодексом законів про працю України. Під час виконання основного обробітку ґрунту агрегатом із модернізованим роторним плугом у технології біологізованого землеробства виникають потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

- рухомі та обертові частини робочих органів;
- підвищений рівень шуму і вібрації (НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві»);
- запиленість повітря робочої зони (ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми пилу в повітрі робочої зони»);
- фізичні перевантаження під час технічного обслуговування;
- пожежонебезпечність при роботі з паливно-мастильними матеріалами.

Завдання системи охорони праці – створити умови, що гарантують безпеку працівників, збереження їхнього здоров'я, запобігання травмам та аваріям.

### **4.2. Вимоги безпеки під час експлуатації роторного плуга**

Відповідно до НПАОП 01.0-1.01-12 «Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві» до роботи допускаються особи, які:

- пройшли попередній (при прийнятті на роботу) та періодичний медичний огляд згідно з наказом МОЗ №246;
- пройшли вступний та первинний інструктаж з охорони праці;
- мають посвідчення тракториста-машиніста відповідної категорії.

Перед початком роботи тракторист-машиніст зобов'язаний:

- перевірити технічний стан трактора та агрегату (ДСТУ EN ISO 4254-1:2014 «Машини сільськогосподарські. Вимоги безпеки»);
- упевнитися у справності гідросистеми, освітлювальних приладів, звукової сигналізації;
- перевірити кріплення робочих органів та наявність захисних кожухів на роторі й карданному валу;
- очистити агрегат від сторонніх предметів.

Під час роботи:

- забороняється перебування сторонніх осіб у зоні дії робочих органів;
- швидкість руху трактора має відповідати агротехнічним умовам (не більше 8–10 км/год на оранці);
- усі ремонтні та регульовальні роботи дозволено виконувати лише після повної зупинки двигуна і відключення приводу;
- при транспортуванні агрегат піднімають у транспортне положення та фіксують запобіжними пристроями.

### 4.3. Санітарно-гігієнічні умови

Робоче місце тракториста повинно відповідати ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку».

- гранично допустимий рівень шуму в кабіні трактора – не більше 85 дБА.
- рівень вібрації згідно з ДСН 3.3.6.039-99 не повинен перевищувати 126 дБ.
- запиленість робочої зони згідно з ДСН 3.3.6.042-99 не повинна перевищувати 4–10 мг/м<sup>3</sup> (залежно від фракції).

Кабіна трактора повинна бути герметичною, обладнаною системами вентиляції, опалення та кондиціонування. При підвищеній запиленості працівник зобов'язаний користуватися засобами індивідуального захисту органів дихання (респіратори типу РПГ-67 або сучасні аналоги).

Відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 та НПАОП 0.00-5.01-07 «Правила пожежної безпеки для сільськогосподарських підприємств» необхідно:

- забезпечити наявність у кабіні трактора вогнегасника ВП-5 або ВВК-2;
- регулярно перевіряти паливну систему на герметичність;
- не допускати паління та використання відкритого вогню поблизу агрегату;
- очищати трактор і плуг від рослинних решток та мастильних матеріалів, які можуть загорітися.

У разі виникнення несправності (поломки ротора, відмови гідросистеми, сторонніх шумів, перегріву) роботу необхідно негайно припинити, заглушити двигун і вивести трактор у безпечне місце. Подальші дії:

- повідомити керівника робіт;
- зафіксувати випадок у журналі технічного обслуговування;
- виконати ремонт лише спеціалістами з дотриманням вимог безпеки.

Тракторист-машиніст під час роботи повинен бути забезпечений:

- спецодягом (комбінезон із щільної тканини);
- спецвзуттям (черевики на твердій підошві);
- захисними рукавицями;
- захисними окулярами при проведенні ремонтних робіт;
- каскою при виконанні монтажу або ремонту агрегатів.

#### 4.4. Охорона навколишнього середовища

Робота сільськогосподарських агрегатів впливає на природні ресурси, тому необхідно враховувати вимоги екологічної безпеки. Основні напрями (рис.4.1):

Охорона ґрунтів:

- використання роторного плуга у складі комбінованого агрегату сприяє зменшенню кількості проходів по полю, що знижує ризик переущільнення та ерозії ґрунту.

- дотримання оптимальної глибини обробітку (згідно з агротехнічними вимогами) запобігає деградації ґрунтового покриву.
- використання біологізованої технології дозволяє зберігати родючість ґрунту завдяки заорюванню сидератів і зменшенню внесення мінеральних добрив.

#### Зниження викидів в атмосферу:

- викиди від дизельного двигуна трактора регламентуються ДСТУ ISO 8178 «Викиди двигунів внутрішнього згорання»;
- для зменшення шкідливих речовин у повітрі необхідно підтримувати справність паливної системи, використовувати якісне пальне та своєчасно проводити технічне обслуговування.

#### Раціональне використання паливно-мастильних матеріалів:

- забороняється зливати використані масла на ґрунт. Вони повинні збиратися у спеціальні ємності та передаватися на утилізацію відповідно до вимог ДСТУ 4462.3-2006;
- під час заправки необхідно застосовувати спеціальні заправні пункти, щоб уникати розливів дизельного палива.

#### Боротьба із запиленням повітря:

- робота на полях у суху вітряну погоду повинна здійснюватися з урахуванням напрямку вітру для мінімізації розповсюдження пилу;
- використання комбінованого агрегату знижує кількість операцій, що зменшує утворення пилу.

#### Збереження біорізноманіття:

- використання біологізованого обробітку ґрунту сприяє збереженню корисної мікрофлори та мікрофауни;
- зменшення застосування хімічних добрив і пестицидів позитивно впливає на довкілля та якість сільськогосподарської продукції.

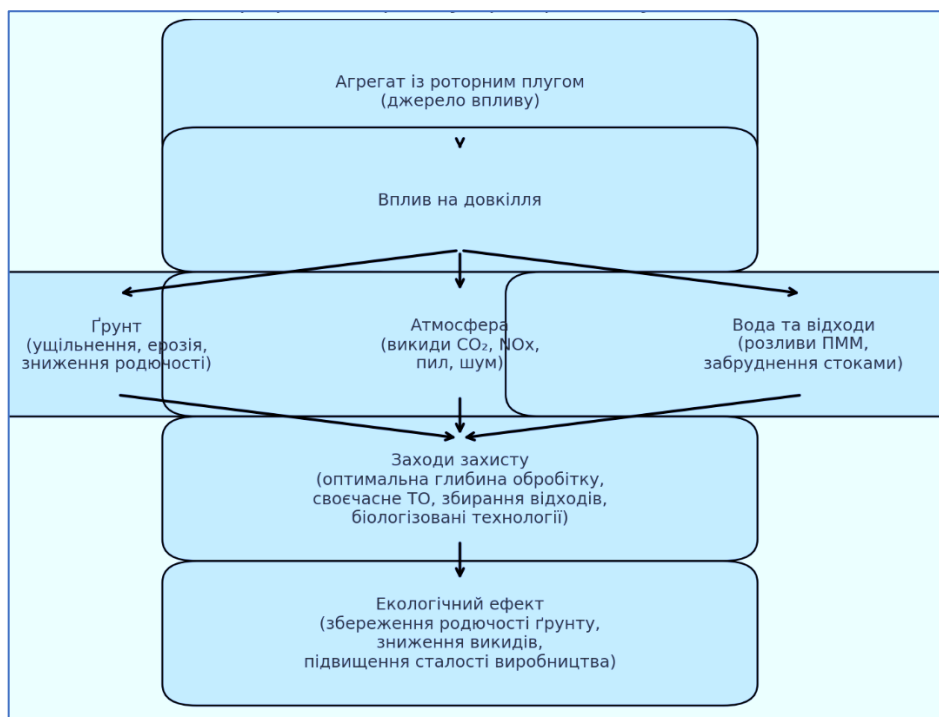


Рисунок 4.1 – Блок-схема екологічного впливу та заходів захисту при роботі агрегату

## Висновки

Комплекс заходів з охорони праці та захисту навколишнього середовища при експлуатації роторного плуга забезпечує:

- безпечні умови праці для персоналу;
- зниження виробничого травматизму;
- раціональне використання природних ресурсів;
- збереження родючості ґрунтів та екологічної рівноваги;
- підвищення ефективності біологізованого землеробства.

## 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Вихідні дані для розрахунку в таблиці 5.1

Таблиця 5.1

Вихідні дані

| Показник                       | Значення                    |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Площа поля                     | $S=10S = 10$ га             |
| Вартість 1 кг пального         | $C_p=60C_p = 60$ грн        |
| Тривалість робочого дня        | 8 год                       |
| Заробітна плата тракториста    | $Z=350Z = 350$ грн/день     |
| Кількість днів на 1 га         | залежить від продуктивності |
| Вартість плуга FALC            | 120 000 грн                 |
| Вартість модернізованого плуга | 180 000 грн                 |
| Норма амортизації              | 10% річних                  |

1. Визначимо витрати часу на 10 га:

$$T = \frac{Q_{\text{експл}}}{S}$$

Плуг FALC

$$T_{\text{HARD}} = \frac{10}{1,52} \approx 6,58 \text{ год}$$

Модернізований плуг РП-2,4

$$T_{\text{модерн}} = \frac{10}{1,87} \approx 5,35 \text{ год}$$

Економія часу

$$\Delta T = 6,58 - 5,35 = 1,23 \text{ год}$$

2. Визначимо витрату пального

$$G_{\text{поля}} = G_{\text{га}} \cdot S$$

Плуг FALC:  $7,2 \cdot 10 = 72$  кг

Модернізований:  $7,5 \cdot 10 = 75$  кг

Вартість пального:

Плуг FALC:  $72 \cdot 60 = 4320$  грн

Модернізований:  $75 \cdot 60 = 4500$  грн

Витрати пального незначно зросли, але за рахунок економії часу ефективність зростає.

3. Визначимо трудові витрати.

$$C_{\text{труд}} = 3 \cdot \frac{T}{8}$$

$$C_{\text{труд, FALC}} = 350 \cdot \frac{6,58}{8} \approx 288 \text{ грн}$$

$$C_{\text{труд, модерн}} = 350 \cdot \frac{5,35}{8} \approx 234 \text{ грн}$$

$$\Delta C_{\text{труд}} = 288 - 234 = 54 \text{ грн}$$

4. Визначимо амортизаційні витрати:

$$C_{\text{амор}} = C_{\text{пл}} \cdot A \cdot \frac{T}{2000 \text{ год} / \text{рік}}$$

Вважаємо, що річний фонд часу – 2000 годин

$$C_{\text{амор, FALC}} = 120000 \cdot 0,1 \cdot 6,58 / 2000 \approx 39,5 \text{ грн}$$

$$C_{\text{амор, модерн}} = 180000 \cdot 0,1 \cdot 5,235 / 2000 \approx 48,2 \text{ грн}$$

5. Загальні витрати на обробіток 10 га.

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{паливо}} + C_{\text{труд}} + C_{\text{амор}}$$

$$\text{Плуг FALC: } 4320 + 288 + 39,5 \approx 4647,5 \text{ грн}$$

$$\text{Модернізований: } 4500 + 234 + 48,2 \approx 4782,2 \text{ грн}$$

Загальні витрати зросли в незначній мірі через вищу вартість пального та амортизації, але продуктивність модернізованого плуга на 23% вища, що зменшує витрати на 1 га:

$$\text{Плуг FALC: } 4647,5 / 10 \approx 464,8 \text{ грн/га}$$

$$\text{Модернізований: } 4782,2 / 10 \approx 478,2 \text{ грн/га}$$

Таким чином економічна ефективність:

Приріст продуктивності:

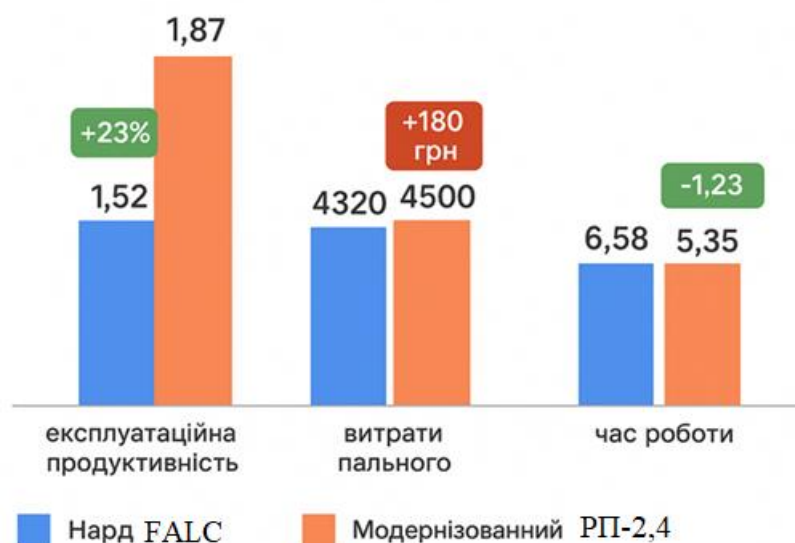
$$\Delta Q_{\text{експл}} = 1,87 - 1,52 = 0,35 \text{ га/год} \approx 23\%$$

Економія часу на 10 га:

$$\Delta T = 1,23 \text{ год}$$

| Показник   | Плуг<br>FALC | Модернізований<br>РП-2,4 | Економія            |
|--|--------------|--------------------------|---------------------|
| Площа обробітку, га                              | 10           | 10                       | –                   |
| Експлуатаційна продуктивність, га/год            | 1,52         | 1,87                     | +0,35 га/год (23%)  |
| Час роботи на 1 га, год                          | 0,658        | 0,535                    | -0,123 год (7,4 хв) |
| Час роботи на 10 га, год                         | 6,58         | 5,35                     | -1,23 год           |
| Витрати пального, кг/га                          | 7,2          | 7,5                      | +0,3 кг/га          |
| Витрати пального на 10 га, кг                    | 72           | 75                       | +3 кг               |
| Вартість пального на 1 га, грн                   | 432          | 450                      | +18 грн/га          |
| Вартість пального на 10 га, грн                  | 4320         | 4500                     | +180 грн            |
| Вартість праці, грн                              | 288          | 234                      | -54 грн             |
| Амортизаційні витрати, грн                       | 39,5         | 48,2                     | +8,7 грн            |
| Загальні витрати на 10 га, грн                   | 4647,5       | 4782,2                   | +134,7 грн          |
| Загальні витрати на 1 га, грн                    | 464,8        | 478,2                    | +13,4 грн           |
| Глибина обробітку ротором, м                     | 0,143        | 0,149                    | +0,006 м            |
| Середня глибина обробітку ґрунтоуглиблювачами, м | –            | 0,24                     | –                   |
| Гребнистість поверхні, м                         | 0,047        | 0,042                    | -0,005 м            |
| Підрізання стерні, %                             | 95           | 100                      | +5 %                |

### Порівняння економічних показників



## Висновки

1. Модернізований роторний плуг дозволяє збільшити продуктивність на 23%, скоротити час роботи на 10 га на 1,23 год, покращити якість обробітку ґрунту (гребнистість, підрізання стерні, глибина обробітку).
2. Незважаючи на трохи більші витрати на паливо та амортизацію, економія робочого часу та підвищення продуктивності робить агрегат економічно ефективним.

## ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз існуючих конструкцій роторних плугів із активними сферичними дисками підтвердив їх ефективність для технологій органічного землеробства завдяки відсутності плужної подошви, якісному зароблянню рослинних решток та зниженню енергозатрат.

2. Водночас встановлено основні недоліки таких агрегатів: підвищене навантаження на трансмісію трактора, можливість бокового уводу через кут атаки ротора, самовиглиблення робочих органів на твердих ґрунтах і обмеження робочої швидкості.

3. Визначено, що на якість обробітку ґрунту та енергоефективність роботи агрегату найбільше впливають тяговий опір, ширина захвату, швидкість руху, маса трактора й плуга, а також енергетичні витрати на технологічний процес.

4. Теоретичні дослідження з використанням графоаналітичного підходу встановили оптимальний тяговий діапазон  $f_{кр} = 0,22-0,36$  та інтервал робочих швидкостей 2,4–3,6 м/с, у межах яких забезпечується максимальний тяговий ККД і питома продуктивність агрегату.

5. Розрахунками обґрунтовано оптимальні конструктивно-технологічні Параметри модернізованого роторного плуга: діаметр сферичного диска – 0,66 м; відстань між дисками ротора – 0,23 м; кут атаки – 24°; частота обертання ротора – 385 об/хв; глибина встановлення ґрунтоуглиблювачів – 0,25 м; відстань між ними – 1,4 м.

6. Експериментальні дослідження підтвердили суттєвий вплив кута атаки ротора, глибини обробітку та робочої швидкості на курсову стійкість і рівномірність глибини оранки.

7. Установка ґрунтоуглиблювачів забезпечує стабілізацію курсової стійкості агрегату, переведення його в оптимальний тяговий режим, зменшення буксування (до 11–16,5 %) і підвищення ресурсу трансмісії трактора.

8. Модернізований РП-2,4 забезпечує глибину обробітку 0,15 м при повному підрізання сидеральних культур і стерні, що дозволяє підвищити

агротехнічну якість оранки та енергоефективність у системах біологізованого землеробства.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авдеєнко А. П. Біологізація землеробства як фактор підвищення ефективності агровиробництва // Вісник аграрної науки. – 2018. – Т. 96, №7. – С. 25–31.
2. Кириленко Ю. П., Русаков В. В. Ресурсозберігаючі технології у системі сучасного землеробства України // Аграрний вісник Причорномор'я. – 2019. – №1. – С. 72–79.
3. Довбан К. І. Біологічні основи сталого землеробства : монографія. – Київ : ННЦ «Інститут землеробства НААН», 2020. – 214 с.
4. Камбулов С. І. Послойний безвідвальний обробіток ґрунту комбінованими робочими органами // Наукові праці Інституту механізації та електрифікації сільського господарства. – 2017. – №5. – С. 15–21.
5. Щегорець О. В. Сівозміна як основа підвищення ефективності біологізованого землеробства // Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2019. – №2. – С. 41–47.
6. Орешкін М. В. Застосування біологічних методів захисту рослин у системі органічного землеробства // Агробіологія. – 2021. – Т. 1, №2. – С. 55–62.
7. Камчадалов Є. П., Рубан Ю. М., Липкань А. В. Концепція техногенно-нормованої експлуатації машинно-тракторного парку // Техніка і технології АПК. – 2015. – №3. – С. 22–29.
8. The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. – Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018. – 224 p.
9. Popescu S., Rusu T., Moraru P. I. Conservation tillage in crop rotation and its effect on soil quality // Romanian Agricultural Research. – 2016. – Vol. 33. – P. 123–130.
10. Lal R. Regenerative agriculture for food and climate // Journal of Soil and Water Conservation. – 2020. – Vol. 75, No. 5. – P. 123–129.
11. Kassam A., Friedrich T., Derpsch R. Global spread of Conservation Agriculture // International Journal of Environmental Studies. – 2019. – Vol. 76, No. 1. – P. 29–51.

12. Gomiero T. Food quality assessment in organic vs. conventional agricultural produce: Findings and issues // *Applied Soil Ecology*. – 2018. – Vol. 123. – P. 714–728.
13. Hobbs, P. R., Sayre, K., & Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 1435–1446. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
14. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
15. Oliveira, E. M., et al. (2024). Effects of conventional, organic and conservation tillage systems on soil structure and microbial biomass in organic farming. *Soil and Tillage Research*, 215, 105232. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105232>
16. Krauss, M., et al. (2017). Impact of reduced tillage on greenhouse gas emissions and soil organic carbon under organic farming. *Soil and Tillage Research*, 165, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>
17. Gadermaier, F., et al. (2012). Impact of reduced tillage on soil organic carbon and nutrient budgets under organic farming. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 27(3), 201–211. <https://doi.org/10.1017/S1742170512000106>
18. Cooper, J., et al. (2016). Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains soil organic carbon and improves soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 223, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.008>
19. Lorenz, K., & Lal, R. (2015). Environmental impact of organic agriculture. *Advances in Agronomy*, 130, 1–63. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.11.001>
20. Palm, C., et al. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>
21. Haddaway, N. R., et al. (2017). How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*, 6(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0108-9>

22. Pearsons, K. A., et al. (2023). A tale of two systems: Does reducing tillage affect soil health in organic systems? *Soil and Tillage Research*, 222, 105396. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105396>
23. Білецький В. С. Теорія та конструкція сільськогосподарських машин. – К.: Аграрна освіта, 2019.
24. Кириченко В. В. Ґрунтообробні машини для органічного землеробства. – Харків: ХНАУ, 2020.
25. Демиденко О. О. Агротехнічні аспекти використання роторних плугів. // Вісник аграрної науки. – 2021.
26. Wong J. Y. *Theory of Ground Vehicles*. – Wiley, 2010.
27. Lal R. *Soil and Sustainable Agriculture*. – Springer, 2015.
28. Godwin R. J. *Tillage for Soil Management*. – Cranfield University Press, 2007.
29. Kepner R. A., Bainer R., Barger E. L. *Principles of Farm Machinery*. – AVI Publishing, 2013.
30. Patel R., Singh S., Kumar A. Performance of rotary tillage implements under organic farming systems. // *Soil & Tillage Research*. – 2018.
31. Kushwaha R. L., Zhang Z. Research trends in tillage machines for energy conservation. // *Renewable Agriculture and Food Systems*. – 2008.
32. Гур'єв С.В. Теорія та практика ротаційних ґрунтообробних машин. – К.: Аграрна наука, 2018.
33. Іваненко О.П. Основи проектування робочих органів роторних плугів. – Харків: ХНАУ, 2019.
34. Погорілий В.І. Сучасні тенденції розвитку ґрунтообробної техніки. // Вісник аграрної науки. – 2017. – №7. – С. 45–51.
35. Heege, H.J. (2013). *Precision in Crop Farming*. Springer, Dordrecht.