

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра механіки та інженерії агроєкосистем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**СОЛОМ'ЯНИЙ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 631.51

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Дослідження взаємодії ґрунту із зубцями автоматизованої  
прополювальної машини**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Солом'яний Олександр Сергійович

**Керівник роботи**

Грабар І.Г.

Доктор технічних наук, професор

**Житомир – 2020**

## АНОТАЦІЯ

**Солом'яний Олександр Сергійович. Дослідження взаємодії ґрунту із зубцями автоматизованої прополювальної машини. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

В ході дослідження вивчалася взаємодія між ґрунтом і механізмом з обертовими зубами для вивчення впливу різних робочих параметрів і налаштувань на розпушування ґрунту. Експерименти проводилися в контрольованих умовах в приміщенні.

В ході дослідження було вивчено питання використання вертикально обертового механізму зубів для внутрішньорядного прополювання бур'янів, яке досі не вивчалось достатньо широко.

Вивчено вплив поздовжньої швидкості і частоти обертання обертового зубчастого механізму на тягову силу, крутний момент і потужність при обробітку ґрунту. Експерименти показали, що в цілому тягові сили зменшуються, а крутний момент збільшується зі збільшенням коефіцієнтів співвідношення швидкостей для різних поздовжніх швидкостей.

*Ключові слова: прополювання бур'янів, прополювальний культиватор, внутрішньорядне прополювання, необхідна потужність, глибина обробітку*

## ANNOTATION

**Solomianyi Oleksandr Serhiiovych. Research of interaction of soil with teeth of the automated weeding machine.** - *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

The study examined the interaction between the soil and the mechanism with rotating teeth to study the effect of different operating parameters and settings on soil loosening. The experiments were performed under controlled conditions indoors.

The study examined the use of the vertically rotating mechanism of the teeth for inter-row weeding, which has not yet been studied extensively enough.

The influence of the longitudinal speed and frequency of rotation of the rotating gear mechanism on the traction force, torque and power during tillage has been studied. Experiments have shown that in general the traction forces decrease and the torque increases with increasing velocity ratios for different longitudinal speeds.

*Keywords: weeding, weeding cultivator, in-row weeding, required power, depth of cultivation*

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	6
Висновки до розділу.....	11
Розділ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....	12
2.1. Експеримент з лінійним рухом одного зуба.....	13
2.2. Експеримент з обертанням зубів .....	14
2.3. Методика дослідження взаємодії ґрунту із зубами прополювальної машини .....	15
Висновки до розділу.....	20
Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	20
3.1. Траєкторії зубів обертового механізму.....	20
3.2. Вплив діаметра зубів і глибини обробки на ширину розпушування ґрунту.....	21
3.3. Взаємодія обертових ножів із ґрунтом.....	21
3.4. Результати визначення силових характеристик взаємодії обертових зубів із ґрунтом.....	24
Висновки до розділу.....	27
ВИСНОВКИ.....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	30
ДОДАТОК А.....	33

## Вступ

Механічне культивування - поширений метод боротьби з бур'янами в органічному землеробстві.

Існує велика різноманітність конструкцій механічних інструментів, які можна застосовувати для міжрядного і внутрішньорядного прополювання бур'янів. Конструкції деяких інструментів для прополювання всередині ряду вимагають активного контролю в ряду, а іноді і між рядами. Для таких інструментів знання про розпушування ґрунту при різних робочих умовах можуть допомогти досягти бажаних характеристик прополювання. Інформація про розпушування ґрунту може допомогти при прийнятті оперативних рішень, спрямованих на пошкодження бур'янів без нанесення шкоди посівам. Розпушування ґрунту – це важливий аспект, який необхідно вивчити за допомогою дослідження взаємодії ґрунту та інструменту для оптимізації налаштувань і розробки конструкції механізму для прополювання та досягнення більш ефективного контролю над бур'янами.

У цьому дослідженні ефективності прополювання вивчалася взаємодія між ґрунтом і зубами прототипу внутрішньорядної прополювальної машини. Прототип складався з вертикальних обертових зубців, які були призначені для руху в ряду культур і виходу з нього за допомогою виконавчого механізму.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження – дослідити взаємодію ґрунту із зубцями прототипу автоматизованої прополювальної машини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- дослідити взаємодію одного необертового ножа прополювального механізму із ґрунтом при імітації процесу прополювання бур'янів;
- вивчити ефективність прополювання бур'янів обертовим зубчастим механізмом здійснюючи імітацію бур'янів дерев'яними циліндрами при різних робочих параметрах процесу;

– дослідити вплив поздовжньої швидкості і швидкості обертання зубців на тягову силу, крутний момент і потужність механізму з обертовими зубами при обробці суглинку;

– визначити раціональні співвідношення швидкості обертання зубців і лінійної швидкості переміщення для підвищення ефективності внутрішньорядного прополювання бур'янів.

**Об'єкт дослідження:** прототип обертової зубчастої внутрішньорядної прополювальної машини.

**Предмет дослідження:** взаємозв'язок робочих умов процесу внутрішньорядного прополювання бур'янів, характеристик необхідної потужності обертової зубчастої внутрішньорядної прополювальної машини, а також ефективності обробітку.

**Методи дослідження:** дослідження виконано з використанням методів механіки та дисперсійного аналізу. Експериментальні дослідження проведено із застосуванням методів теорії імовірності, математичної статистики, математичного моделювання.

## Розділ 1

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Бур'яни, що ростуть поруч з сільськогосподарськими культурами, знижують їх врожайність і якість через конкуренцію за доступні ресурси, такі як поживні речовини, воду і сонячне світло [1, 2]. Тому боротьба з бур'янами – дуже важливий вид діяльності в сільському господарстві. Існує кілька методів боротьби з бур'янами, таких як ручне прополювання, а також хімічні, біологічні, термічні і механічні методи боротьби з бур'янами.

Серед цих методів в даний час в традиційних системах землеробства найбільш широко використовуються хімічне і механічне прополювання [3]. Хімічне прополювання, яке включає використання гербіцидів для знищення бур'янів, може бути найбільш економічно і біологічно ефективним способом боротьби з бур'янами. Однак зростаюче занепокоєння з приводу його впливу на навколишнє середовище і зростання споживчого попиту на органічні продукти харчування привели до повернення уваги до механічної боротьби з бур'янами [4, 5].

Механічне прополювання розділене на дві стратегії за просторовим розташуванням культур і бур'янів: міжрядне і внутрішньорядне [6].

Міжрядне прополювання – це метод прополювання, що виконується між рядами культур в той час як прополювання всередині ряду виконується між рослинами в межах ряду культур. Внутрішньорядне прополювання проводити важче ніж міжрядне, тому що воно вимагає боротьби з бур'янами, що ростуть близько до посівів в одному ряді [7, 8]. Відомі дослідження, які присвячені розробці автоматичних або роботизованих прополювальних машин всередині ряду [9, 10].

Автори роботи [11] провели дослідження автоматизованого прополювання за чотирма основними напрямками: керування транспортними засобами; виявлення та ідентифікація рослин; точна боротьба з бур'янами в

ряду; відображення. Відомі також дослідження з використанням технологій механічного прополювання [12, 13].

Механічне прополювання – це діяльність, яка включає в себе пряму фізичну взаємодію між прополювальним інструментом і ґрунтом. Більша частина досліджень по механічному прополюванню була зосереджена на розвитку механічних систем прополювання за рахунок удосконалення технології обробітку. Ці дослідження, в основному, вивчають продуктивність ґрунтообробних знарядь, яка визначається із необхідної тяги або споживаної енергії [14].

Для деяких активних систем прополювання всередині рядів може знадобитися активне переміщення інструменту для прополювання по складних траєкторіях з точним контролем. Управління знаряддям вимагає знання сили тяги, а також забезпечення оптимального розпушування ґрунту для підвищення ефективності прополювання. Однак при взаємодії ґрунту і машини в основному здійснюється лише контроль глибини [15].

Знаряддя для прополювання всередині ряду можуть боротися з бур'янами, використовуючи два різних підходи, які залежать від щільності посівів. Перший підхід передбачає використання селективних машин або додаткових інструментів, які не вимагають бокового спрацьовування для боротьби з бур'янами всередині ряду. У другому підході можна використовувати машини з інструментами для прополювання, які переміщуються убік від рослини для боротьби з бур'янами.

Існують різні конструкції просапних культиваторів, які виявилися ефективними для боротьби з бур'янами. Пальцевий культиватор, наприклад, складається з двох комплектів сталевих коліс з гумовими пальцями, розташованими під кутом (рис. 1.1, а). Гумові пальці проникають під поверхню ґрунту і найбільш ефективно борються з молодими бур'янами. Культиватор найкраще працює на пухкому ґрунті і погано – на сильно пухких і ущільнених ґрунтах або при наявності важких поживних залишків.



Торсіонний культиватор – це ще одна машина для прополювання всередині ряду, в якій використовується жорстка рама з пружинними зубами, з'єднаними і вигнутими паралельно поверхні ґрунту, які проходять повз ряд сільськогосподарських культур (рис. 1.1, б). Зубчасті пружинні стійки дозволяють кінчикам згинатися відповідно до контурів ґрунту і навколо культур. Як для пальцевих, так і для торсіонних прополювальних культиваторів, щоб ефективно пошкодити бур'яни поруч з рядами культур, трактор повинен бути дуже точно направленим [16–17].

Щітковий культиватор - це внутрішньорядна прополювальна машина, в якій використовуються гнучкі щітки зі скловолокна або нейлону, які обертаються навколо вертикальної або горизонтальної осей для пошкодження бур'янів (рис. 1.1, в). При прополюванні, в основному, викопуються корені, але також можуть зариватися і розриватися стебла бур'янів. Для точного управління щітками при прополюванні необхідний оператор [18].

ЕСО-культиватор – це прополювальний культиватор, що встановлюється на триточкову підвіску і проходить позаду трактора (рис. 1.1, г). Прополювання виконується за рахунок переміщення зубів двох обертових дисків всередину і назовні посівного ряду [19].

Отже, існують різні конструкції прополювальних культиваторів для боротьби з бур'янами всередині ряду. Ефективність конструкції залежить від її здатності пошкодити бур'яни через прямий контакт або побічно, порушивши ґрунт. Якщо прополювання здійснюється шляхом розпушування ґрунту, то розпушування не повинне зашкодити рослині.

Розпушування ґрунту залежить від взаємодії між ґрунтом і інструментом, що контактує з ґрунтом. Ґрунтові умови залежать від погоди, а отже, дуже мінливі. Таким чином, навіть якщо для прополювального культиватора визначені оптимальні робочі параметри, продуктивність може змінитися і, можливо, погіршитися при різних ґрунтових умовах. На ефективність також можуть впливати види бур'янів і сільськогосподарських

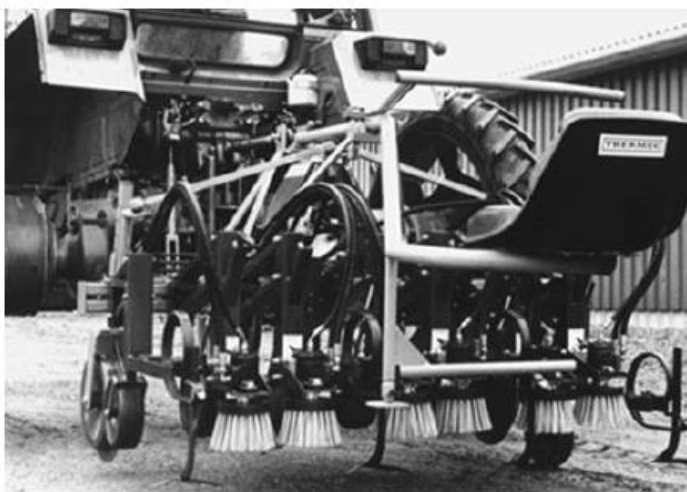
культур, а також час прополювання, оскільки при зміні цих умов можуть знадобитися різні ступені розпушування ґрунтового покриву для досягнення високої ефективності боротьби з бур'янами і низького пошкодження сільськогосподарських культур.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.1. Культиватори прополювальні внутрішньорядні:

а) пальчиковий, б) торсіонний, в) щітковий, г) ЕСО

Один з підходів до вдосконалення конструкції прополювального культиватора всередині ряду полягає у вивченні взаємодії між ґрунтом і знаряддями прополювання. Розуміючи характер взаємодії при різних

ґрунтових умовах і конструкціях інструментів, можна домогтися бажаного розпушування ґрунту, необхідного для поліпшення якості прополювання.

Сили реакції ґрунту, що діють на інструмент для прополювання, є ще одним аспектом, який визначає, наскільки близько можна посувати культиватор до посівів. Оскільки сила опору ґрунту залежить від властивостей ґрунту, параметрів інструменту і робочих параметрів, вивчення взаємодії між ґрунтом і інструментом може допомогти прийняти більш обґрунтовані рішення для досягнення оптимальної продуктивності.

Таким чином, розпушування ґрунту і сили, що виникають на межі розділу ґрунту і інструменту, є двома важливими аспектами взаємодії ґрунту і інструменту.

Ґрунт може руйнуватися з різних причин в залежності від стану ґрунту і умов експлуатації зубів. Робочі умови, які можуть вплинути на руйнування ґрунту (рис. 1.2), включають передній кут  $\alpha$ , глибину обробітку  $d$  і швидкість руху зубів.

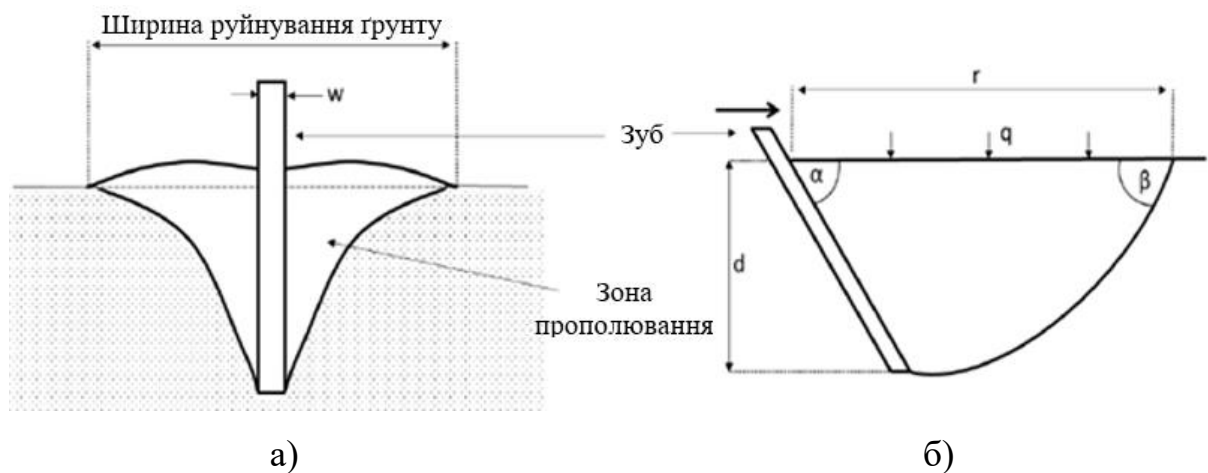


Рис. 2.2. Схема руйнування ґрунту:

а) поперечний перетин, б) поздовжній перетин, де  $d$  – глибина обробітку,  $w$  – ширина зуба,  $r$  – відстань розриву,  $q$  – вага,  $\alpha$  – передній кут,  $\beta$  – кут площини зсуву

При зсуві (рис. 1.2, б) ґрунт піддається стискним напруженням і руйнується із-за руху зуба під певним переднім кутом  $\alpha$ , коли прикладене навантаження стає достатнім для подолання міцності ґрунту на зрушення. Зруйнований ґрунтовий блок з певною передньою довжиною розриву  $r$  перед зубом і кутом зрізу  $\beta$  відділяється і рухається попереду зуба.

### **Висновки до розділу**

Дослідження взаємодії ґрунтів і знарядь повинні допомогти в розробці оптимальних механізмів для обробки ґрунту надавши інформацію про тягові зусилля розпушування ґрунту, які пов'язані з конструкцією.

Вивчення управління наземними інструментами є недостатнім, ймовірно, тому що точне управління цими інструментами є складним через складну природу взаємодії ґрунтових інструментів, що додатково ускладнюється високою мінливістю екологічних і географічних умов. Отже, багато методів ведення сільського господарства зосереджені на простому застосуванні інструментів не вимагаючи точного контролю і тому дослідження на цю тему не були широкими та системними.

Однак коли попит на повністю автономні сільськогосподарські машини буде рости, розуміння взаємодії ґрунту і інструменту та їх впливу на деякі види сільськогосподарської діяльності може стати більш важливим.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Механічне автоматизоване прополювання повинне бути забезпечене високоефективними системами прополювання. Однак взаємозв'язок між конструкцією механізмів прополювання, характеристиками ґрунту і ефективністю прополювання ще недостатньо вивчений. Основна мета цього дослідження полягала у вивченні впливу механічної взаємодії інструменту і ґрунту на ефективність прополювання для різних робочих умов в контрольованому середовищі. Експерименти проводилися в закритому бункері з ґрунтом, а ефективність прополювання вивчалася з використанням невеликих дерев'яних циліндрів для імітації бур'янів. У дослідженнях використовувався одиночний циліндричний зубець і механізм з вертикальною віссю обертання зубів.

Два експерименти були проведені в круглому бункері із ґрунтом діаметром 2,44 м (рис. 2.1). Гідравлічний силовий агрегат обертав бункер з різними швидкостями.

Ґрунт мав такий склад: 32% піску, 43% мулу і 25% глини. Ґрунт просівали до максимального розміру частинок 5 мм. Використовувалася програма кондиціонування ґрунту, яка включала обприскування ґрунту водою щовечора, щоб підтримувати постійне утримання вологи в ґрунті перед випробуваннями. Ґрунт перемішувався культиватором на глибину 150 мм і вирівнювався. Цей процес підготовки ґрунту виконувався перед кожним випробуванням, щоб домогтися однакових умов для всіх випробувань. Густина ґрунту становила  $1,27 \text{ г/см}^3$ , а середній вміст вологи становив 17%.



Рис. 2.1. Круглий обертовий бункер із ґрунтом

## 2.1. Експеримент з лінійним рухом одного зуба

Перший експеримент був проведений для вивчення того, як один зуб розпушує ґрунт при лінійному русі і як три робочих фактори впливають на розпушування ґрунту і ефективність прополювання. Факторами були: 1) діаметр зубів, 2) глибина обробітку ґрунту, 3) швидкість зубів.

Для випробування використовувалися циліндричні зуби діаметром 6,35, 7,94 і 9,53 мм. Глибина обробітку ґрунту становила 25,4, 50,8 і 76,2 мм. Швидкість руху ножів становила 0,23 і 0,45 м/с. Ці швидкості були досягнуті за рахунок того, що зубці залишалися нерухомими при обертанні бункера із ґрунтом. Експеримент складався з 18 (3x3x2) процедур, що виникають в результаті комбінації різних рівнів трьох факторів. Кожна процедура повторювалася три рази і таким чином, всього було проведено 54 випробування (18x3).



## 2.2. Експеримент з обертанням зубів

У другому експерименті використовувався механізм з обертанням зубів. Ефективність прополювання була досліджена за двома робочими факторами: 1) глибина обробітку ґрунту, 2) частота обертання (об/хв) механізму.

Механізм має вигляд сталюого диску з чотирма циліндричними зубами (рис. 2.2, а). Механізм з обертовими зубами був спроектований і розроблений як частина внутрішньорядної механічної прополювальної машини (культиватора). Механізм впливає на бур'яни всередині ряду, розпушуючи ґрунт за рахунок обертання навколо вертикальної осі чотирьох вертикальних зубів, які знаходяться в безпосередньому контакті з ґрунтом. Диск механізму має діаметр 152,4 мм і чотири зубці діаметром 7,94 мм, рівномірно розташовані по діаметру 127 мм. Рівні глибини обробітку ґрунту становили 25,4 і 76,2 мм, а частоти обертання механізму становили 25, 50 і 100 об/хв. В цьому експерименті бункер із ґрунтом обертася з певною рівномірною швидкістю, так що ґрунт переміщався повз центр механізму з постійною лінійною швидкістю 0,45 м/с. Цей експеримент мав план із 6 (2x3) процедур. Для кожної процедури проводилося три повтори, в результаті чого було проведено 18 експериментальних випробувань.

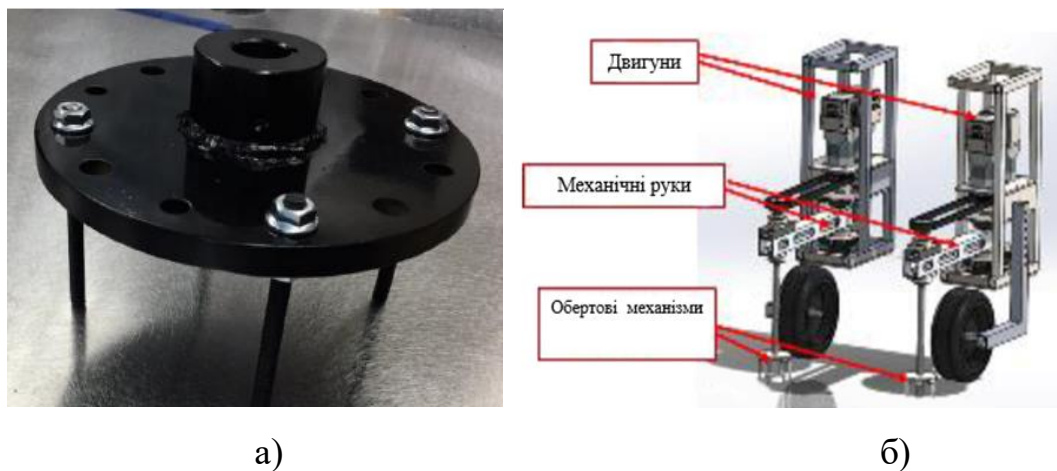


Рис. 2.2. Внутрішньорядна механічна прополювальна машина:  
а) обертовий механізм прополювання, б) прототип машини

### **2.3. Методика дослідження взаємодії ґрунту із зубами прополовальної машини**

Циліндричні зуби, використані в цьому дослідженні, були віднесені до категорії вузьких і типова картина руйнування ґрунту для таких зубців показана на рисунку 2.3. Профілі і ступінь руйнування або розпушування ґрунту можуть широко варіюватися в залежності від експлуатаційних факторів, що використовуються в цьому дослідженні.

Для вивчення впливу робочих факторів на руйнування ґрунту і на бур'яни, для імітації невеликих молодих бур'янів використовувалися тонкі дерев'яні циліндри. Імітація бур'янів використовувалася для розуміння того, як локальне розпушування ґрунту впливає на розпушування рослин.

Дерев'яні циліндри, використані в дослідженні, не відображають всіх біологічних характеристик, пов'язаних з різними видами бур'янів. Тим не менш, ця робота зосереджена на дуже ранніх стадіях росту бур'янів, коли їх коренева структура відносно слабка і може бути легко порушена або пошкоджена прополованням. Це припущення також полегшує оцінку пошкодження бур'янів одним зубом, тому що один зуб з більшою ймовірністю зашкодить молодим бур'янам, насамперед викорчовуючи, а іноді і обрізаючи їх. Щоб врахувати різні біологічні варіації бур'янів, можна розробити і використовувати фізичні моделі з більш високою точністю для моделювання, або можна використовувати конкретні рослини в якості бур'янів.

Дерев'яні циліндри використовувалися як для експериментів з одним зубцем, так і з обертовим механізмом. Кожен циліндр мав довжину 70 мм і діаметр 2 мм. Розташування цих циліндрів було однаковим в обох експериментах. При експериментальних випробуваннях п'ять рядів дерев'яних циліндрів оберталося разом з ґрунтовим бункером (рис. 2.4, а).



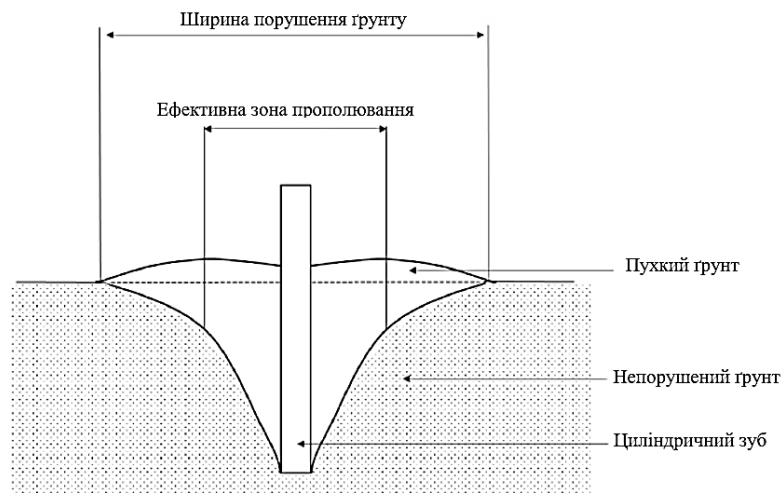


Рис. 2.3. Поперечний переріз типового профілю руйнування ґрунту при прополюванні

Циліндри були розміщені перпендикулярно до траєкторії руху зубців і розташовані так, щоб центральний циліндр в ряді знаходився на одній лінії з центром механізму обертання зубів і лінією дії зуба (рис. 2.4, б). У всіх дослідах циліндри занурювалися в ґрунт на 50,8 мм. Для експерименту з одним зубцем в кожному ряду було 15 дерев'яних циліндрів, вставлених в ґрунт на однаковій відстані 6,35 мм (рис. 2.4, б). В експерименті з механізмом з обертовими зубами кожен ряд складався з 21 дерев'яного циліндра, рівномірно рознесених на відстані 12,7 мм один від одного. В експерименті з обертовими зубами використовувалося більше циліндрів, щоб вловлювати більш широке розпушування ґрунту через більший діаметра зубчастого механізму.

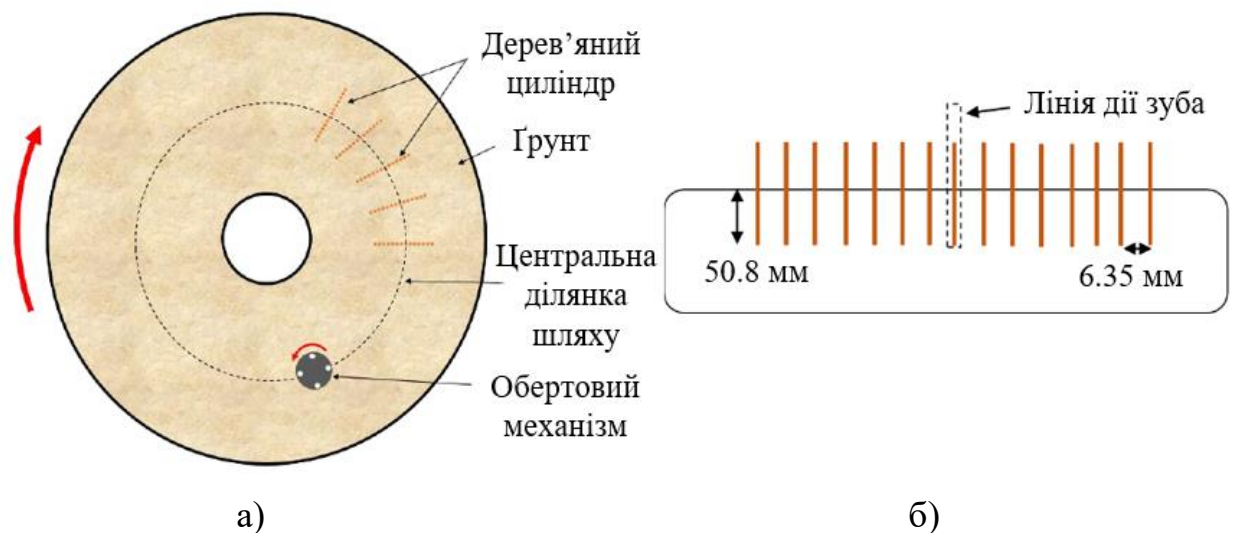


Рис. 2.4. Розташування дерев'яних циліндрів в бункері із ґрунтом:  
а) вид зверху, б) для експерименту з одним зубцем

Спостерігався вплив зубів на дерев'яні циліндри і цей вплив на кожен циліндр було розділено на п'ять рівнів відповідно до орієнтації циліндра і зміщення від початкового положення. Циліндри, які були повністю вибиті з ґрунту, класифікувалися як рівень 5. Ті, які були зміщені зі свого вихідного місця розташування і нахилені, були класифіковані як рівень 4. Рівень 3 включав циліндри, які були зміщені зі свого вихідного місця розташування, але все ще були орієнтовані вертикально. Нерухомі, але нахилені циліндри були класифіковані як рівень 2. Нарешті, циліндри на які не впливав зубчастий механізм, були класифіковані як рівень 1.

Механізм зубців обертався за допомогою двигуна постійного струму. Коробка передач 20:1 була встановлена між двигуном постійного струму та обертовим механізмом зубців, щоб збільшити крутний момент системи та подолати можливий великий опір ґрунту. Механізм обертався з бажаною швидкістю обертання, за рахунок керування двигуном постійного струму за допомогою регулятора.

Для вимірювання крутного моменту та швидкості обертання механізму використовували поворотний перетворювач крутного моменту із вбудованим поворотним кодером. Змонтована конструкція експериментального стенду

наведена на рис. 2.5. Каретка інструментів кріпилася на ґрунтовому баку, її переміщували поздовжньо за допомогою стрічкової лебідки, прикріпленої до мотор-редуктора. Три тривісні перетворювачі сили на каретці інструменту використовувались для вимірювання сил реакції ґрунту на механізм зубців під час переміщення через ґрунт. Дані отримували за допомогою реєстратора даних, а вибірки кожного каналу отримували з частотою дискретизації 100 Гц.



Рис. 2.5. Експериментальний стенд

Глибина обробітку ґрунту для зубців обертового механізму становила 70 мм. В експерименті досліджували силу та крутний момент горизонтальної тяги при різних поздовжніх швидкостях та співвідношенні швидкостей. Три рівні поздовжньої швидкості становили 0,09, 0,29 та 0,5 м/с. Поздовжня швидкість 0,5 м/с була найвищою швидкістю, яку можна було досягти за допомогою мотор-редуктора, що використовується в ґрунтовому бункері.

Співвідношення швидкостей  $\lambda$ , що визначається як відношення швидкості периферійних зубців за рахунок обертання до поздовжньої швидкості обертового механізму зубців, визначало швидкості обертання механізму для випробувань. Чотири рівні коефіцієнта швидкості, використані в експериментах, були 0, 1, 1,5 і 2.

При співвідношенні швидкості 0 механізм витягували поздовжньо вздовж бункера з нульовою швидкістю обертання. Щоб досягти будь-якого відношення постійних швидкостей 1, 1,5 або 2, механізм потрібно було обертати з трьома окремими швидкостями обертання для трьох різних рівнів поздовжніх швидкостей, використовуваних в експериментах. В результаті було встановлено дев'ять різних швидкостей обертання механізму, по три для кожного ненульового налаштування коефіцієнта, від 14 до 149 об/хв (1,47 до 15,6 рад/с). При постійному співвідношенні швидкостей зубці механізму проходять чітку траєкторію по ґрунту незалежно від поздовжньої швидкості. Тому коефіцієнт швидкостей був обраний для дослідження сил опору ґрунту та потужності по траєкторіях зубців, що може бути досягнуто за допомогою різної комбінації налаштувань поздовжньої та обертової швидкості.

Співвідношення швидкостей більше 1 може бути вигіднішим для механічного прополювання, оскільки більш високі коефіцієнти швидкостей можуть пошкодити більшу кількість бур'янів через більшу швидкість обертання. В ході досліджень співвідношення швидкостей 1, 1,5 та 2 було обрано, щоб уловити можливі тенденції зміни сили тяги та крутного моменту на нижчих рівнях коефіцієнтів швидкості, сприятливих для боротьби з бур'янами.

Було досліджено 12 комбінацій факторів та рівнів. З кожною обробкою, повтореною п'ять разів, було проведено в цілому 60 (12x5) експериментів із ґрунтовим баком. Зразки ґрунту були зібрані з шести випадково відібраних випробувань для визначення вмісту вологи в ґрунті та насипної щільності ґрунту. Вміст вологи у ґрунті вимірювали за допомогою промислової печі. За результатами випробувань середній вміст вологи в ґрунті та насипна щільність ґрунту становили 10,5% та 1202 кг/м<sup>3</sup> відповідно.

## **Висновки до розділу**

Була розроблена методика дослідження взаємодії одного необертового зуба та 4 обертових зубів прополувальної машини із ґрунтом в контрольованому середовищі, а також оцінки ефективності прополювання. Ця методика передбачає застосування спеціального експериментального та вимірювального обладнання, а також дисперсійного аналізу для обробки отриманих даних.

## Розділ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Траєкторії зубів обертового механізму

Проведено моделювання з використанням моделі кінематики обертального та лінійного руху зубчастого механізму. Була розроблена та реалізована у Matlab модель руху кожного з чотирьох зубців у механізмі для розрахунку траєкторій зубців для різних швидкостей обертання.

Відсоток площі порушеного ґрунту над максимально можливою ефективною площею порушеного ґрунту для всіх обробок порівнювали з відсотком кількості вражених імітованих бур'янів з експерименту над кількістю змодельованих бур'янів (12), які знаходились в межах максимально можливої ефективною ширини. Максимально можливою ефективною площею порушень ґрунту був добуток довжини в поздовжньому напрямку, що відповідає довжині вікна (рис. 3.1), вибраного для просторового аналізу, та максимально можливої ефективною ширини.

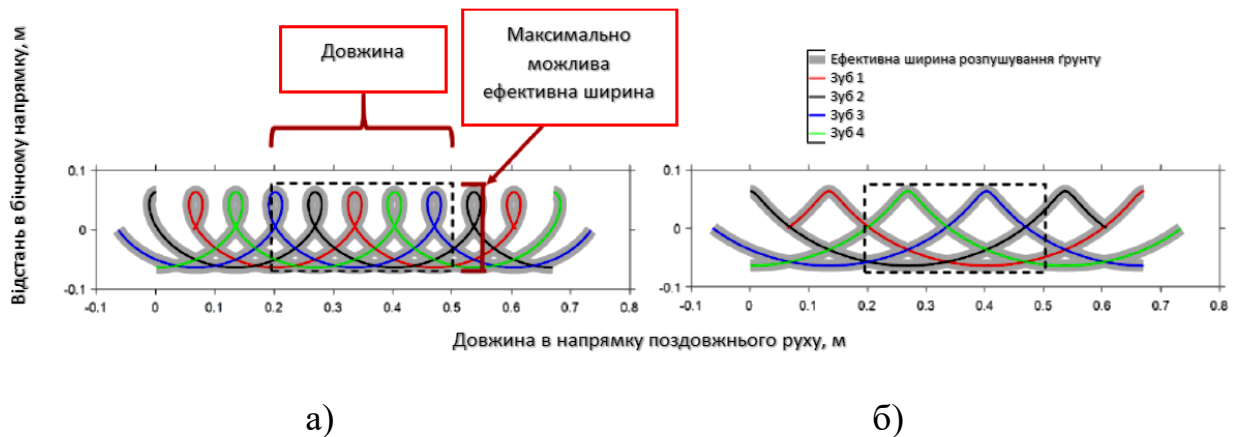


Рис. 3.1. Вид зверху траєкторій чотирьох зубців обертового механізму, що рухаються лінійно зі швидкістю 0,45 м/с та обертаються з частотою 100 об/хв (а) та 50 об/хв (б)

### 3.2. Вплив діаметра зубів і глибини обробки на ширину розпушування ґрунту

Визначений вплив глибини обробки і діаметра зуба на ширину розпушування ґрунту представлений на рис. 3.2. Отже, результати показали, що середня ширина розпушування ґрунту збільшувалася зі збільшенням діаметра зубів на всіх трьох глибинах обробки ґрунту, використаних в експериментах.

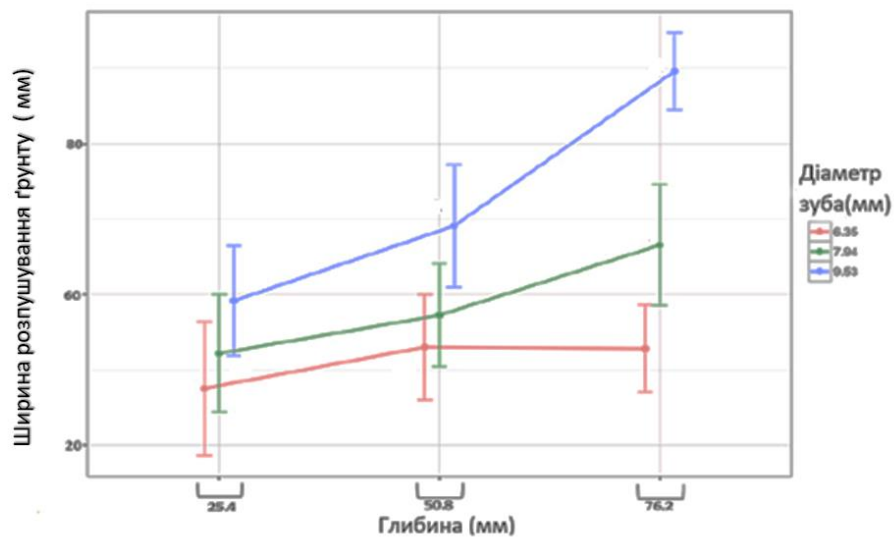


Рис. 3.2. Вплив діаметра зубів і глибини обробки на ширину розпушування ґрунту

### 3.3. Взаємодія обертових ножів із ґрунтом

В результаті експериментів встановлено, що кількість сильно уражених імітованих бур'янів зростає із збільшенням глибини обробки та швидкості обертання зубчастого механізму (рис. 3.3).

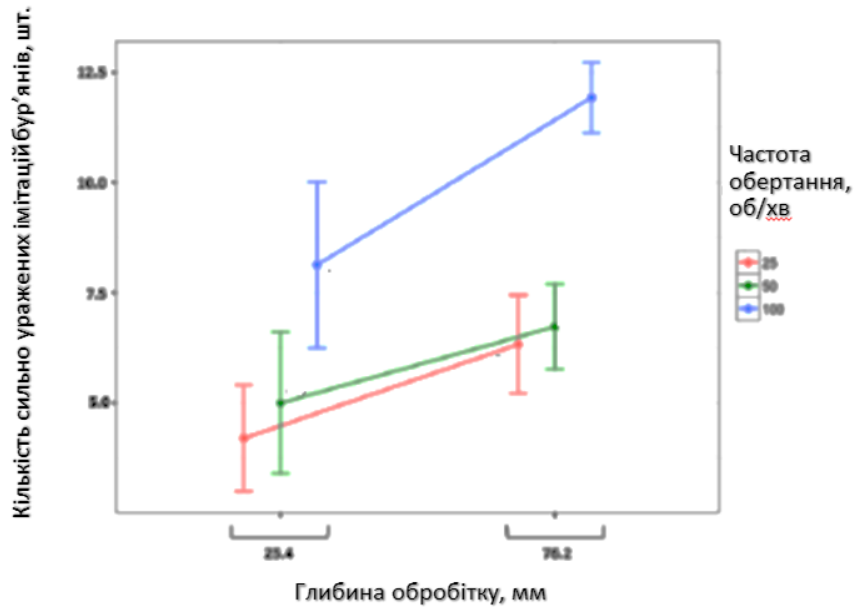


Рис. 3.3. Вплив глибини обробітку та швидкості обертання зубців на кількість сильно вражених імітацій бур'янів

Оскільки ефективна ширина прополювання також збільшується зі збільшенням ширини порушень ґрунту, була виявлена більша кількість змодельованих вражених бур'янів при більшій глибині обробітку ґрунту для всіх трьох швидкостей обертання (рис. 3.4).

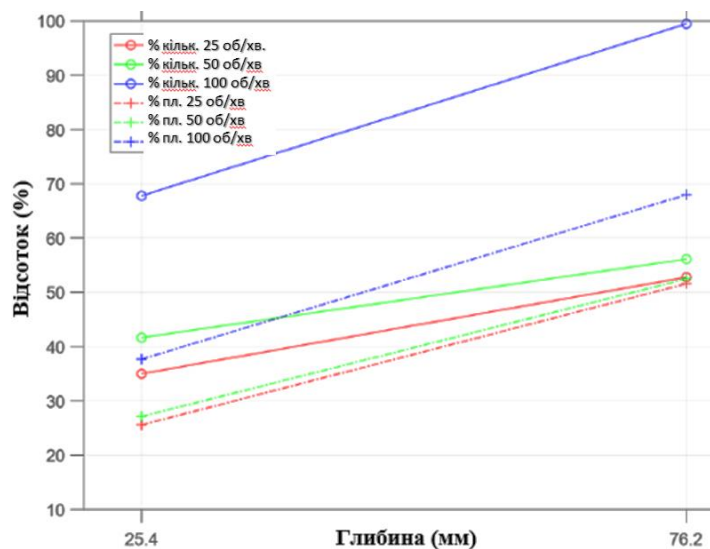


Рис. 3.4. Процентна доля площі порушень на максимально можливій площі (пунктирні лінії) порівняно із процентним співвідношенням можливих сильно уражених імітованих бур'янів (суцільні лінії)



Для механізму з обертовими зубами більший відсоток бур'янів буде пошкоджений в даній області при більшій глибині обробки ґрунту і швидкості обертання.

Коефіцієнти швидкості  $\lambda$ , рівні 1, 1,5 та 2 були обрані на основі наступних міркувань. Коефіцієнти швидкості 1 і більше є вигідними для механічного прополювання. При співвідношенні швидкостей 1 кожен зуб зупиняється в крайній лівій точці на своїй траєкторії руху, тоді сила реакції ґрунту рівна нулю (рис. 3.5, 3.6). Для коефіцієнтів швидкості більше 1 траєкторія зубців має петлі від сил реакції ґрунту, що мають напрямок поздовжнього руху. Таким чином, при співвідношенні швидкостей більше 1, зубчастий механізм може полегшувати прополювання через більші порушення ґрунту в цій частині траєкторії. Крім того, через напрямок сили реакції загальна сила тяги буде нижчою, тоді як крутний момент збільшуватиметься.

Профілі результуючої швидкості подібні для різних поздовжніх швидкостей, але з різними значеннями. Профілі кута спрямованості  $\theta$  (кут, що визначає положення зуба на дуговій траєкторії) однакові для будь-якої поздовжньої швидкості з однаковим співвідношенням швидкостей.

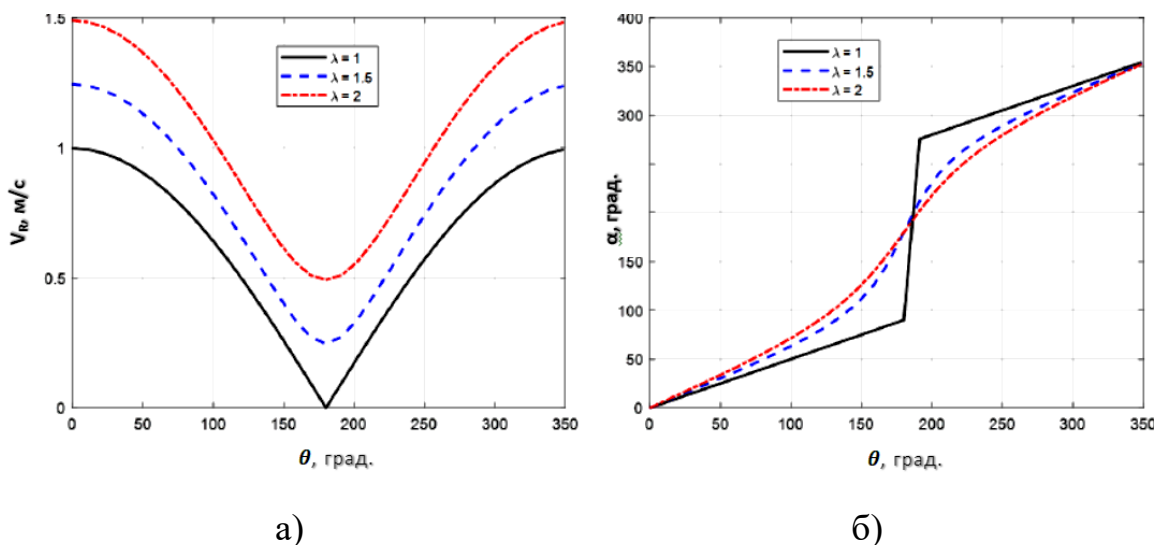


Рис. 3.5. Результуюча швидкість зубців (а) та кут спрямованості (б) за час одного оберту ножа при співвідношенні швидкостей 1, 1,5 та 2 для поздовжньої швидкості 0,5 м/с

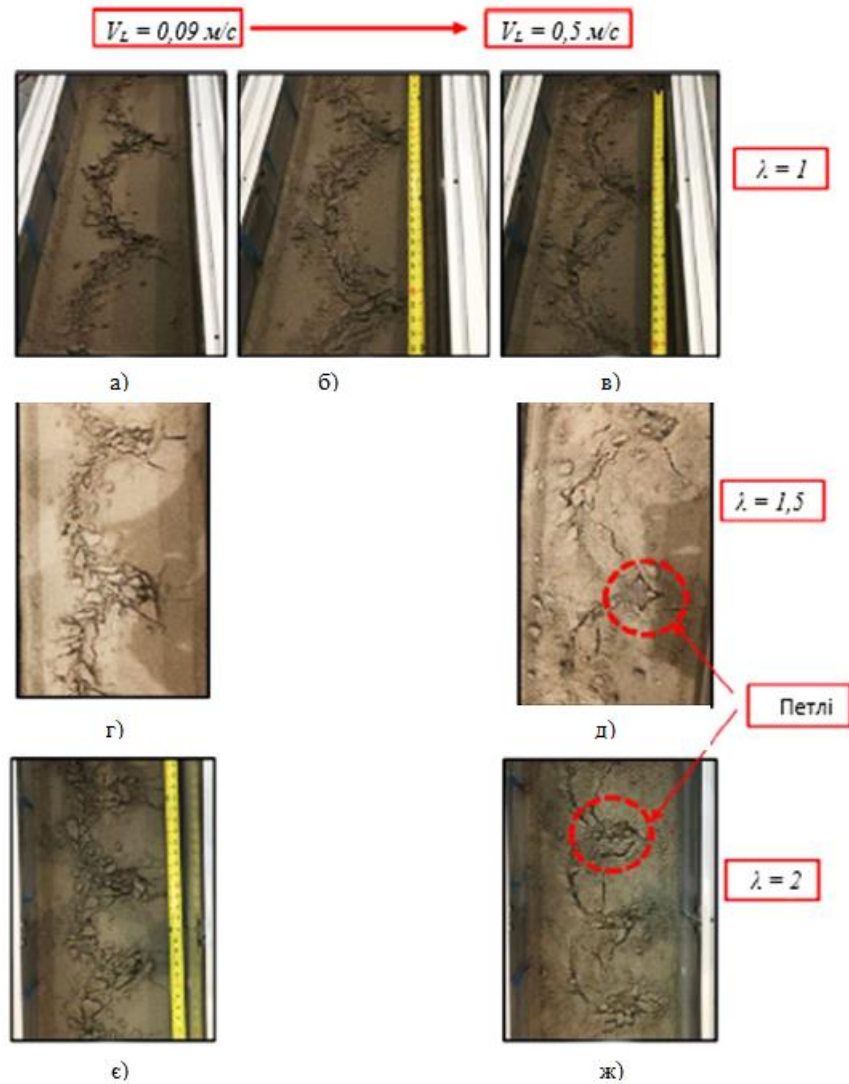


Рис. 3.6. Розпушування ґрунту при русі одного зуба в штучному ґрунті:

а)  $V_L = 0,09$  м/с, б)  $V_L = 0,29$  м/с, в)  $V_L = 0,5$  м/с,

г)  $V_L = 0,09$  м/с, д)  $V_L = 0,5$  м/с,

е)  $V_L = 0,09$  м/с, ж)  $V_L = 0,5$  м/с

### 3.4. Результати визначення силових характеристик взаємодії обертових зубів із ґрунтом

Експериментальними дослідженнями був встановлений взаємний вплив поздовжньої швидкості та коефіцієнту швидкостей на силу тяги (рис. 3.7) та

крутний момент процесу прополювання обертовим зубчастим механізмом (рис. 3.8).

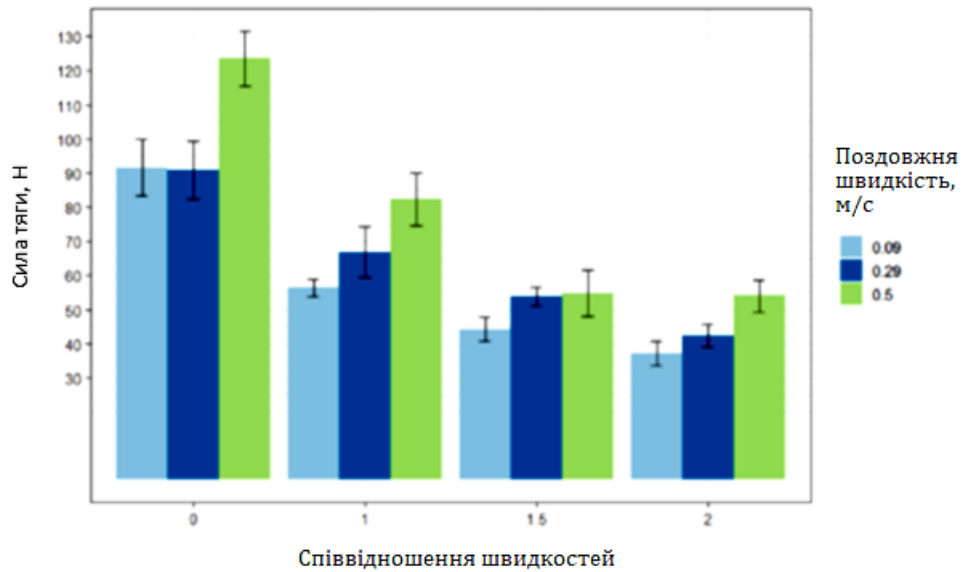


Рис. 3.7. Вплив поздовжньої швидкості та коефіцієнту швидкостей на силу  
ТЯГИ

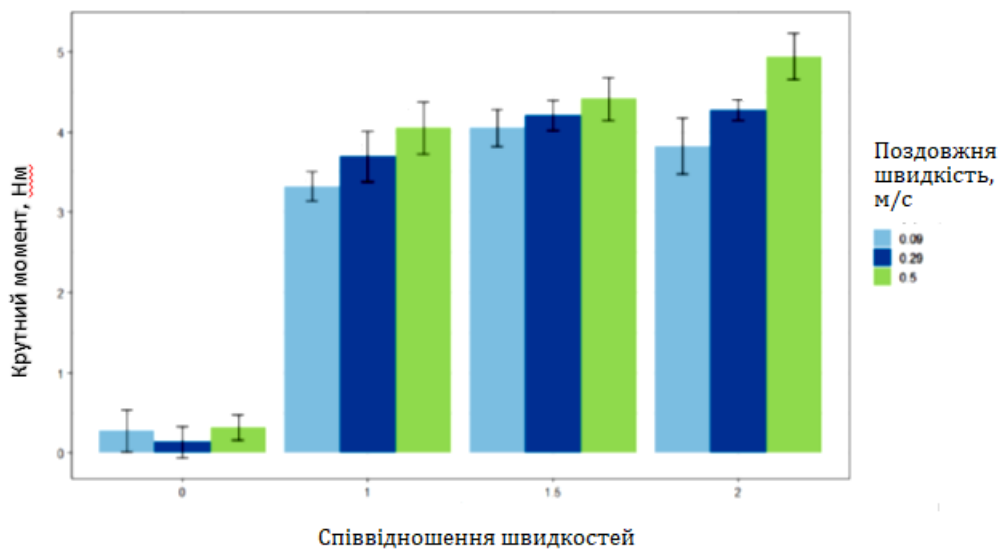


Рис. 3.8. Вплив поздовжньої швидкості та коефіцієнту швидкостей на  
крутний момент

Як видно із графіків горизонтальна сила тяги зменшується, тоді як крутний момент збільшується із збільшенням коефіцієнтів швидкостей в експериментальному діапазоні поздовжніх швидкостей обертового механізму

зубців у суглинистому ґрунті. При кожному співвідношенні швидкостей сила тяги та крутний момент збільшувались із збільшенням поздовжньої швидкості. Вплив співвідношення поздовжньої швидкості та швидкості обертання механізму на силу тяги та крутний момент має нелінійний характер.

На рис. 3.9 наведені отримані залежності необхідної загальної потужності для роботи обертового механізму зубців при різних поздовжніх швидкостях і співвідношеннях швидкостей.

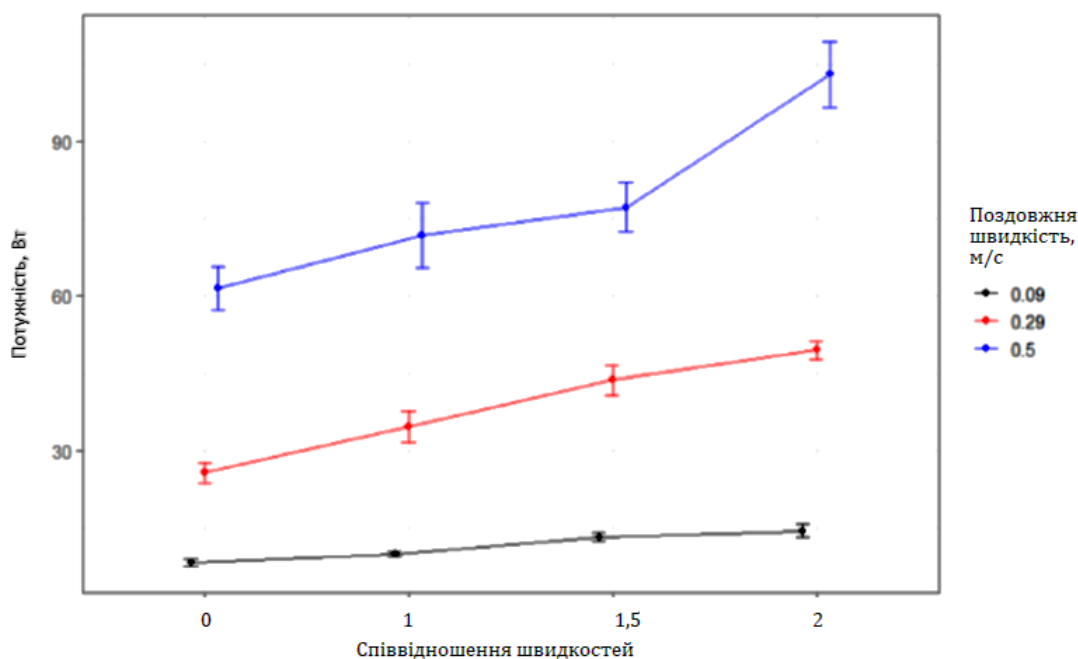


Рис. 3.9. Загальна потреба в потужності для тяги і обертання зубців при різних поздовжніх швидкостях і співвідношеннях швидкостей

З цього можна зробити висновок що загальна потужність також зростала із збільшенням коефіцієнтів швидкості для всіх трьох поздовжніх швидкостей.

Експлуатація обертового механізму зубців зі швидкістю 0,09 м/с призводить до низьких вимог щодо потужності, однак для сучасних механічних операцій прополювання ця швидкість може бути несприятливою. Повідомляється, що щітковий прополювач та ЕСО-прополювач, подібні до

механізму з обертовими зубами, рухаються зі швидкістю, що перевищує 0,22 м/с. Для зменшених вимог до тяги механізму обертових зубців, що рухається з більшими швидкостями, найкращим виходом було б регулювання частоти обертання.

### **Висновки до розділу**

Вибір лінійної швидкості та частоти обертання для операції прополювання повинен бути оптимізований для збільшення продуктивності прополювання без перевищення обмежень потужності джерела живлення. Оскільки більш високі коефіцієнти швидкостей ефективні для пошкодження бур'янів, можливо, доведеться зменшити лінійну швидкість, щоб механізм міг працювати з меншою частотою обертання, не вимагаючи значної потужності.

Виміряні сила тяги та крутний момент та розрахована потужність показують, що лінійні швидкості та частоти обертання механізму обертових зубців можна регулювати для досягнення бажаної ефективності механічного внутрішньорядного прополювання.

Зменшити сили опору ґрунту, моменти та потужність на механізмі можна, змінивши конструкцію зубців, використовуючи більшу кількість зубців, і встановивши зубці ближче до центру диска механізму, що обертається. Ці модифікації можуть збільшити здатність механізму працювати при більш високих лінійних та обертових швидкостях у ґрунті. Як результат, може бути вища гнучкість у виборі відповідних лінійних та обертових швидкостей для ефективної боротьби з бур'янами.

## ВИСНОВКИ

У роботі була вивчена взаємодія між ґрунтом і зубами обертового механізму механічної прополювальної машини. Механізм складався з диска з циліндричними вертикальними зубами, які захоплювали ґрунт під час прополювання. Експерименти проводилися в ґрунтових бункерах в контрольованому середовищі з підтриманням постійних ґрунтових умов.

Було вивчено взаємодію зубців з імітаціями бур'янів для дослідження ефективності прополювання в різних умовах. Результати показали, що ширина розпушування ґрунту при обробці одним необертовим зубом збільшується зі збільшенням діаметра зуба і глибини обробітку ґрунту. Також встановлено, що потенційна швидкість прополювання збільшується зі збільшенням діаметра, глибини ґрунту і швидкості руху.

Для механізму з обертовими зубами збільшення глибини обробітку ґрунту і частоти обертання збільшувало потенційну швидкість прополювання механізму.

Вивчено вплив поздовжньої швидкості і частоти обертання обертового зубчастого механізму на горизонтальну (тягову) силу, крутний момент і потужність при обробітку ґрунту. Експерименти, проведені з використанням трьох рівнів поздовжньої швидкості (0,09, 0,29, 0,5 м/с) і чотирьох рівнів співвідношення швидкостей (0, 1, 1,5, 2), показали, що в цілому тягові сили зменшуються, а крутний момент збільшується зі збільшенням коефіцієнтів швидкостей для різних поздовжніх швидкостей.

Потужність, необхідна для здійснення тяги крізь ґрунт, зменшувалася, а потужність обертання збільшувалася при збільшенні співвідношення швидкостей. При цьому загальна потужність приводу збільшувалася. З дослідження можна зробити висновок, що шляхом регулювання лінійної швидкості і швидкості обертання можна оптимізувати продуктивність механізму прополювання при роботі в межах обмеження потужності джерела енергії.

Дослідження взаємодії ґрунту і зубів, проведене в ході дослідження, дає цінну інформацію про те, як можна домогтися більш високих показників прополювання за допомогою механізму обертових зубців. Більш висока швидкість обертання механізму потенційно може пошкодити більше бур'янів через розпушування ґрунту. Однак, якщо лінійна швидкість руху механізму збільшується при збереженні фіксованої швидкості обертання, передавальне число зменшується, що призводить до розпушування ґрунту, яке може пошкодити меншу частину бур'янів під час роботи. Отже, для ефективної боротьби з бур'янами слід вибирати правильні настройки лінійної швидкості і швидкості обертання.

Ґрунтуючись на досвіді, отриманому в результаті цього дослідження, є кілька можливих напрямків для досліджень в майбутньому. Експерименти для цього дослідження проводилися з фіксованими властивостями ґрунту, які можуть варіюватися в залежності від поля. Отже, результати дослідження, можливо, варто перевірити чи вивчити з різними властивостями і умовами ґрунту при різних настройках інструментів.

Швидкість руху, використана в дослідженні, була нижче швидкості руху, необхідної для практичної реалізації. Аналогічним чином варто вивчити розпушування ґрунту для механізму обертових зубців різної кількості та різних конструкцій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чернілевський М. С. Основні бур'яни та заходи боротьби з ними в польових сівозмінах Полісся і Північного Лісостепу України : навч. посібник / М. С. Чернілевський, Ю. А. Білявський. – Житомир : ДАУ, 2007. – 74 с.
2. Шувар І. А. Екологічні основи зниження забур'яненості агрофітоценозів : навч. посібник / І. А. Шувар. – Л. : Новий Світ–2000, 2008. – 494 с.
3. Жеребко В. М. Гербіциди в інтенсивних технологіях. Стан і перспективи використання хімічного методу контролю забур'яненості посівів в інтенсивних технологіях вирощування сільськогосподарських культур / В. М. Жеребко // Насінництво. – 2013. – № 11. – С. 12–14.
4. Трибель С. О. Екологізація захисту рослин (Літературний огляд) / С. О. Трибель // Карантин і захист рослин. – 2010. – № 5. – С. 16–20.
5. Технологія виробництва сільськогосподарської продукції: Навчальний посібник для аграрних вищих навчальних закладів I—II рівнів акредитації / Ярош Ю. М., Трусів Б. А. — К.: Український Центр духовної культури, 2005. — 524 с.
6. Гудзь В.П. та ін. Землеробство: Навч. посібник / В.П. Гудзь, І.Д. Примак, Ю.В. Будьонний; За ред. В.П. Гудзя. — К.: Урожай, 1996. - 384 с.
7. Сільськогосподарські і меліоративні машини: Навчальний посібник / Кошук О. Б., Лузан П. Г., Мося І. А., Герлянд Т. М., Романов Л. А. – К. : ПІТО НАПН України, 2015. – 291 с.
8. Автоматичне керування культиваторами для міжрядного обробітку ґрунту просапних культур / М. Солоха // Пропозиція. — 2016. — № 12. — С. 162-165.
9. Рослинництво: Підручник. О. І. Зінченко, В. Н. Салатенко, М. А. Білоножко — К.: Аграрна освіта, 2001. — 591 с.



10. Механическое регулирование роста сорняков альтернативы в области защиты растений. KEN LIVE — журнал для профессионального растениеводства — выпуск 8 — сентябрь 2018 LE.
11. Нормативно-справочные материалы по планированию механизированных работ в сельскохозяйственном производстве: Сборник. — М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. — 316 с.
12. Пат. 2375860 Российская Федерация, МПК А01В35/12, А01В35/24. Секция многофункционального культиватора / А.Б. Кудзаев, А.Э. Цгоев, И.А. Коробейник, А.Б. Савхалов, Т.А. Уртаев, Д.В. Цгоев; заявитель и патентообладатель Горский государственный аграрный университет (ГГАУ) (RU). - № 2007119216; заявл. 28.07.2008; опубл. 20.12.2009. Бюл. № 35. - 6 с.
13. Кудзаев А.Б. Адаптивный энергосберегающий культиватор для обработки каменистых почв / А.Б. Кудзаев, Т.А. Уртаев // Сельскохозяйственные машины и технологии. - Москва, 2015. - №2. - С. 28-32.
14. Bolenius E., Rogstrand G., Arvidsson J., Strenberg B., Thylen L. On-the-go measurements of soil penetration resistance on a Swedish Eutric Cambisol // International Soil Tillage Research Organization 17 th Triennial Conference. Kiel. Germany, 2006. P.867-870.
15. Культиватор на упругих S-образных стойках. Чаткин М.Н., Федоров С.Е., Жалнин А.А., Жалнин Н.А. Патент на полезную модель RU 179792 U1, 24.05.2018. Заявка № 2018108989 от 14.03.2018.
16. Универсальный рабочий орган культиватора для ухода за посевами (посадками) пропашных и овощных культур. Зайцев В.П., Мурзаев Ф.Ф., Нестеров В.М. В сборнике: Инновационные технологии в аграрном образовании, науке и АПК России. Материалы Всероссийской научно-производственной конференции, 60-летию академии посвящается. 2003. С. 273-276.

17. Оптимизация жесткости упругого элемента в креплении рабочего органа культиватора BOURGAULT 8810 Кузнецов Н.Г., Гапич Д.С., Назаров Е.А. Научное обозрение. 2010. № 6. С. 89-94.
18. Устройство для контроля и регулировки положения рабочих органов культиваторов в полевых условиях. Баширов Р.М., Гафуров И.Д. Авторское свидетельство SU 1813322 A1, 07.05.1993. Заявка № 4925889 от 04.02.1991.
19. Прополочная борона. Мальнев П.П., Мельник Д.К. Авторское свидетельство SU 291663 A1, 06.01.1971. Заявка № 1288208/30-15 от 08.12.1968.