

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра механіки та
інженерії агроecosистем

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ХМІЛЕВСЬКИЙ РУСЛАН ВІКТОРОВИЧ

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти)

УДК 662.636.3

(індекс)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Дослідження впливу конструктивних параметрів на енергоємність
оборотного плуга та ефективність оранки**

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело _____ Р.В. ХМІЛЕВСЬКИЙ

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Н.М. ЦИВЕНКОВА

(прізвище, ім'я, по батькові)

доцент канд. тех. наук

(науковий ступінь, вчене звання)

АНОТАЦІЯ

ХМІЛЕВСЬКИЙ Р.В. Дослідження впливу конструктивних параметрів на енергоємність оборотного плуга та ефективність оранки. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2022.

Проаналізовано методи моделювання конструкційних параметрів оборотного плуга і встановлено, що застосування рівняння Лагранжа 2 роду забезпечує високу ступінь відповідності теоретичних даних експериментальним. Визначено траєкторію руху частинки ґрунту по поверхні оборотного плуга, оснащеного кутознімом. Встановлено залежність кута переміщення частинки ґрунту по поверхні оборотного плуга від конструкційних параметрів плуга та кут між перпендикуляром до напрямку руху частинки ґрунту в момент її сходження та напрямком вектору її колової швидкості. Досліджено ступінь впливу конструкції плугу на віддаль відкидання частинки ґрунту.

Ключові слова: оборотний плуг, кутознім, шар ґрунту, процес оранки.

SUMMARY

KHMILEVSKY R.V. Investigation of the influence of design parameters of the reversible plough on the energy intensity and the efficiency of ploughing. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – agroengineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2022.

Modelling methods of design parameters of the reversible plough are analysed and it is found that the use of an Euler-Lagrange equation provides a high correlation between theoretical and experimental data. A movement trajectory of a soil particle on the surface of a reversible plough with the jointer is defined. A dependence of an angle of movement of the soil particle on the reversible plough surface from plough's design parameters and an angle between the perpendicular to the soil particle's movement direction in the moment of its descending and its circular velocity vector direction are defined. A degree of the plough's design influence on the particle's throw distance is investigated.

Keywords: reversible plough, jointer, soil layer, ploughing process.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1.	МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБОРОТНОГО ПЛУГА	6
1.1.	Методи моделювання конструкційних параметрів оборотного плуга.....	9
1.2.	Висновки до розділу 1.....	
РОЗДІЛ 2.	ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБОРОТНОГО ПЛУГА.....	10
2.1.	Дослідження траєкторії руху частинки ґрунту по поверхні кутозніму оборотного плуга.....	10
2.2.	Встановлення залежності між параметрами кутозніму оборотного плуга та кутом переміщення частинки ґрунту його поверхнею.....	14
2.3.	Визначення кута між перпендикуляром до напрямку руху частинки ґрунту в момент сходження та напрямком вектору її колової швидкості.....	15
2.4.	Вплив параметрів кутозніму оборотного плугу на відстань відкидання частинки ґрунту.....	16
2.5.	Висновки до розділу 2.....	18
РОЗДІЛ 3	МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	19
3.1.	Програма експериментальних досліджень.....	19
3.2.	Методика проведення експериментів.....	19
3.3.	Результати експериментальних досліджень.....	20
3.4.	Висновки до розділу 3.....	27
	ВИСНОВКИ.....	28
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	29

ДОДАТКИ..... 32

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Обробіток ґрунту передбачає процеси зрізання, руйнування, перевертання або переміщення ґрунту, як правило, за один прохід. Він спрямований на створення бажаного кінцевого стану шару ґрунту, відмінного від початкового, шляхом виконання механічних операцій [1]. Згадані механічні операції потребують значної кількості енергії не тільки через значну кількість маси ґрунту, яку потрібно переміщати, але й через вибір інструменту для обробітку ґрунту та через фіксацію його глибини та швидкості роботи [2–4].

Також, незважаючи на те, що в останні роки в сільському господарстві було проведено багато досліджень, енергія, необхідна на процес ґрунтообробки (витрата палива), не знижувалася з 1970-х років і зараз все ще цікавить багатьох дослідників. Враховуючи сучасний стан доходів на аграрних підприємствах існування жорсткої конкуренції і бажання досягти енергетичної безпеки, навіть незначне удосконалення енергетичного балансу процесу ґрунтообробки, мало б значну перевагу для фермерів [1]. Тому, оптимізація енергетичних витрат є доведеною потребою для ґрунтообробних знарядь, які можна класифікувати як інструменти первинної обробки ґрунту (відвальний, оборотний, дисковий плуг тощо) та допоміжні робочі інструменти (борони, культиватори тощо).

Мета роботи – розробити конструкцію і встановити раціональні параметри та режими роботи оборотного плуга. Це підвищить ефективність процесу оранки.

Завдання роботи:

- проаналізувати існуючі методи проектування оборотних плугів з метою зменшення їх енергоємності та підвищення ефективності процесу оранки;
- аналітично обґрунтувати раціональні параметри оборотного плуга виходячи з оптимального методу встановлення плужних корпусів і максимального скорочення відстані між ними, що досягається використанням на корпусах кутознімів замість передплужників;

– експериментально підтвердити високу ефективність процесу оранки оборотним плугом, оснащеним кутознімом.

Предмет дослідження – закономірності взаємодії робочих органів оборотного плуга оснащеного кутознімом з шаром оброблюваного ґрунту.

Об'єкт дослідження – конструктивні та технологічні параметри оборотного плуга оснащеного кутознімом.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базувалися на методах теорії ґрунтообробки, теоретичної механіки, математичного моделювання процесів взаємодії орного агрегату з шаром ґрунту і здійснювалися шляхом застосування основних положень вищої математики. Для виконання експериментальних досліджень спроектовано лабораторну установку оборотного плуга згідно з галузевими стандартами та відомими методиками. Результати експериментальних досліджень оброблені з застосуванням пакету прикладних програм Microsoft Excel 2010 та Statistica 6.0.

Перелік публікацій автора за темою дослідження. Результати кваліфікаційної роботи надруковано в збірниках праць: Матеріали науково-практичної конференції «Студентські читання – 2020». Житомир: Поліський національний університет, 2021, яка проходила 17 листопада 2021 року; збірниках V Міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». Т.2, Т.3. Житомир: Поліський національний університет, 2021, яка проходила 27-28 травня 2021 року.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці конструкції та обґрунтуванні параметрів оборотного плуга оснащеного кутознімом, яка дозволяє зменшити енергоємність та підвищити ефективність процесу оранки ґрунту.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота містить вступ, три розділи, кожен з яких включає підрозділи, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних літературних джерел з 23 найменувань, додатки. Загальний обсяг роботи становить 32 аркуші.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБОРОТНОГО ПЛУГА

1.1. Методи моделювання конструкційних параметрів оборотного плуга

Оборотний плуг є найбільш поширеним інструментом для ґрунтообробки. Проте він характеризується найбільшим енергоспоживанням в процесі роботи. До його механічної функції відноситься розрізання ґрунту і перевертання його на бік. За допомогою плуга можна вносити і змішувати в ґрунті добрива та рослинні рештки. Використання оборотного плугу в вологу пору року дозволяє не лише обробити ґрунт, але й забезпечити його належну вентиляцію, утримувати вологу в ґрунті та створювати борозни, стійкі до ерозії [5].

Сьогодні в світі розроблено декілька підходів до моделювання з метою вивчення взаємодії ґрунт-інструмент та оптимізації всіх параметрів, що впливають на енергоспоживання та якість обробітку ґрунту, а саме: умови експлуатації (швидкість, глибина), кути різання ґрунту, інструмент. Щоб прогнозувати величину сили, необхідної для обробітку ґрунту, існує безліч аналітичних моделей, які побудовані на теорії пасивного руйнування ґрунту [6].

Як правило, відомі 2D і 3D моделі представлені із суттєвими спрощеннями, виходячи з припущення, що ґрунти є однорідними, ізотропними та ідеально пластичними [7]. Ці дослідження обмежуються простою геометрією інструменту та спрощеними моделями руйнування ґрунту. Хоча аналітичні моделі, представлені в [7] передбачали більш складну геометрію інструментів, таких як дисковий і оборотний плуг, однак припущення про характер руйнування ґрунту все ще має певні обмеження.

Чисельні методи, такі як метод дискретних елементів (МДЕ), метод гідродинамічного моделювання (МГД) та метод кінцевих елементів (МКЕ) також були розроблені для моделювання взаємодії між ґрунтом і ґрунтообробними знаряддями складної форми [8]. Зазначено, що за допомогою

вказаних чисельних методів можна не лише розрахувати зусилля, необхідне на обробіток ґрунту, але й моделювати процес самого обробітку ґрунту.

МКЕ багаторазово моделювали поведінку ґрунту в процесі обробітку. Ґрунт розглядався як пружно-ідеальний пластичний матеріал. У той час як інші дослідники розглядали ґрунт як матеріал з нелінійною пружністю та як пружно-пластичний матеріал із здатністю твердіти. Цим методом також досліджували взаємодію ґрунт-відвал. Вивчено розподіл напруги по поверхні корпусів, вплив робочих параметрів плуга (швидкість, глибину обробки) та досліджено кути піднімання та сили обробітку. Загалом, автори [8] свідчать про зростання тягової сили із зростанням швидкості, глибини, кута різання та піднімання.

Автори [9] встановили, що використання плуга з кутом піднімання (26°) і кутом різання ($28^\circ \dots 43^\circ$) із середньою швидкістю руху 8...12 км/год та глибиною занурення корпусів в ґрунт 420...500 мм забезпечує гарну якість обробітку (інверсії ґрунту) та мінімальне споживання енергії.

Метод чисельного моделювання також дозволяє описати процес взаємодії ґрунт↔ґрунтообробний інструмент (Г-ГІ) під час виконання ґрунтообробних робіт [7, 10]. Ретельно та вдало змодельований ґрунтообробний процес дозволяє суттєво зменшити витрати на трудомісткі та вартісні експериментальні роботи, пов'язані з розробкою та випробовуванням експериментального зразка.

Проте виконати точне моделювання взаємодії Г-ГІ є складним технічним завданням, яке пов'язане зі складністю врахування значних деформацій ґрунту, що мають місце на робочих поверхнях інструменту, складною деформацією вільної поверхні ґрунту та високою поведінковою динамікою взаємодії Г-ГІ на межі їх розподілу [10].

Для моделювання взаємодії Г-ГІ науковцями застосовуються три методи чисельного моделювання: метод дискретних елементів (МДЕ), метод обчислювальної гідродинаміки (МОГ) та метод скінченних елементів (МСЕ).

МСЕ Лагранжа найбільш широко використовується для дослідження процесу взаємодії Г-ГІ [7]. Цей метод є відносно простим у формулюванні та

реалізації та є найбільш природнім методом аналізу механіки твердого тіла. За МСЕ Лагранжа точки фіксуються всередині матеріалу, а елементи деформуються залежно від ступеню деформації розглядуваного матеріалу. Вказаний метод має високу ефективність якщо розглядається питання безумовної деформації матеріалу, коли границі сітки співпадають з границями матеріалу. Проте, МСЕ Лагранжа є чутливим до якості сітки. Також, значні деформації матеріалу зазвичай призводять до суттєвих викривлень сітки, які чинять істотний вплив на точність розв'язку і, навіть, можуть бути причиною неможливості здійснювати подальші розрахунки даним методом.

Проблеми спотворення сітки до певної міри усуваються шляхом видалення елементів. Однак, видалення елементів впливає на точність імітаційної моделі, оскільки елементи поверхні контакту частково видаляються. Автори [10] показали нове застосування МСЕ для моделювання взаємодії Г-ГІ без видалення елементів, але роздільні поверхні ґрунту мають бути визначені.

Автори праці [9] для складання моделі взаємодії Г-ГІ застосовували МОГ. Для здійснення аналізу такого виду використано метод Ейлера, що дозволило нехтувати деформаціями сітки, оскільки область, яка підлягає обчисленню, фіксується у просторі, а процес різання моделюється як потік частинок ґрунту, які омивають нерухомий ґрунтообробний інструмент. Отже, це дозволило легко змодельовати значні деформації шарів оброблюваного ґрунту. Проте, використання МОГ не придатне для випадків, коли має місце деформація по границям досліджуваного шару матеріалу через накладену умову просторової фіксації цього шару. Тобто, МОГ складно адаптувати до моделювання безумовної деформації вільної поверхні ґрунту, яка виникає в процесі різання.

На відміну від континуальних чисельних методів, таких як МСЕ та МОГ, МДЕ є безсітковим чисельним методом моделювання процесів руйнування [13]. Тривалий час даний метод широко використовувався в механіці гірських порід. В дослідженні [11] вперше цим методом змодельована взаємодія Г-ГІ. Основною складністю застосування МДЕ є калібрування мікропараметрів моделі, які наближені до реальних властивостей ґрунту і, в сукупності,

представляють макровластивості оброблюваного матеріалу. Ці параметри суттєво впливають на точність результатів моделювання, оскільки їх точне калібрування все ще залишається невирішеною науковою проблемою. Оскільки стандартизовані методи калібрування і методики вимірювання відсутні, науковці, зазвичай, для встановлення потрібного значення параметра застосовують різні підходи.

В роботі [12] представлено інший прогресивний підхід – поєднання скінченних елементів Ейлера-Лагранжа (МСЕ-ЕЛ). Цей метод є більш зручним для здійснення тривимірного чисельного моделювання взаємодії Г-ГІ. Застосуванням МСЕ-ЕЛ дозволяє моделювати достатньо значні деформації ґрунту без спотворення сітки, оскільки матеріал ґрунту описується методом Ейлера, а сітка Ейлера є просторово фіксованою. Необмежена деформація вільної поверхні ґрунту також може бути змодельована за допомогою алгоритмів методу Ейлера. Крім того, моделювання МСЕ-ЕЛ передбачає зручне калібрування параметрів, пов'язаних з властивостями матеріалу, оскільки застосування традиційних законів механіки ґрунту в деяких випадках може бути лише безпосереднім. Представлені переваги вказують на перспективність застосування МСЕ-ЕЛ для моделювання взаємодії Г-ГІ.

1.2. Висновки до розділу 1

1. Виконаний аналіз методів моделювання взаємодії ґрунту та ґрунтообробного інструменту свідчить, що є потреба дослідити вплив геометричних параметрів оборотного плуга на якість обробітку ґрунту та ефективність процесу оранки. Для моделювання параметрів оборотного плугу та з метою дослідження руху частинки шару ґрунту по кутозніму найбільш ефективно застосовувати рівняння Лагранжа 2 роду.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБОРОТНОГО ПЛУГА

Теоретичне обґрунтування конструкційних параметрів оборотного плуга включає визначення аналітичних залежностей, які пов'язують параметри його складових деталей та вузлів з параметрами руху частинки ґрунту. Встановлення параметрів кутозніму до корпусу оборотного плуга включає виведення аналітичних рівнянь, які пов'язують геометрію кутозніму з дальністю відкидання частинок ґрунту від стінки борозни. З цією метою слід скласти диференційне рівняння руху частинки ґрунту по кутозніму та, розв'язуючи це рівняння, встановити напрямок та швидкість руху частинки після її сходження з кутозніму.

2.1. Дослідження траєкторії руху частинки ґрунту по поверхні кутозніму оборотного плуга

За [14] найкращі техніко-експлуатаційні показники має кутознім з циліндричною поверхнею. Для порівняння аналітичних залежностей руху частинок ґрунту вибираємо циліндр, який нахилений в напрямку руху агрегату на кут χ і поперек руху – на кут α (Додаток Б, рис. 1). Як допущення приймаємо зрізану кутознімом частину шару ґрунту за матеріальну точку, яка рухається по поверхні кутозніму без підпору зі сторони основного шару під дією кінетичної енергії, яка накопичилася в результаті попереднього руху вздовж відвалу корпусу плуга. Друга частина припущення має місце, оскільки шар ґрунту на корпусі плуга на рівні кутозніму є частково стиснутим і тому його руйнування протікає з наданням зрізаній кутознімом частині шару ґрунту кінетичної енергії.

Розглянемо рух поверхнею кутозніму елементарної частинки шару ґрунту, а саме випадок, коли на поверхню циліндра кинуто частинку ґрунту, яку позначимо літерою K . Вона рухається поверхнею циліндра і її початкові

швидкості становлять: перпендикулярно твірним – $\psi' = \omega_0$; по осі циліндра – $Y' = V_{oy}$. На елементарну частинку шару ґрунту від її руху шорсткою поверхнею циліндра діють сила тяжіння F та сила тертя $F_{\text{тертя}}$. Слід записати закони руху частинки $Y(t)$ та $\psi(t)$ поверхнею циліндра.

Використаємо рівняння Лагранжа 2-го роду [15–18].

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_{\text{кінет}}}{\partial j_1'} \right) - \frac{\partial E_{\text{кінет}}}{\partial j_1} = J_1 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_{\text{кінет}}}{\partial j_2'} \right) - \frac{\partial E_{\text{кінет}}}{\partial j_2} = J_2 \end{cases}, \quad (2.1)$$

де j_1 та j_2 – узагальнені координати; $E_{\text{кінет}}$ – кінетична енергія руху елементарної частинки шару ґрунту; J_1 та J_2 – узагальнені сили, що рухаються в напрямку узагальнених координат.

Оскільки матеріальна точка має два ступеня свободи, введемо дві узагальнені координати: $j_1 = \psi$ – кут переміщення елементарної частинки шару ґрунту під час її руху поверхнею циліндра (від'ємний напрямок – за годинниковою стрілкою); $j_2 = Y$ – переміщення елементарної частинки шару ґрунту по осі циліндру у вертикальному напрямку.

Для запису рівнянь Лагранжа слід визначити кінетичну енергію та узагальнені сили, що діють на елементарну частинку шару ґрунту вздовж узагальнених координат [18]. Якщо спостерігаємо кутове зміщення елементарної частинки шару ґрунту, то має місце момент від проекції сили тяжіння $(F)\psi$ та момент від проекції сили тертя $F_{\psi\text{тертя}}$, рівні:

$$F_{\psi\text{тертя}} = F_{\text{тертя}} \cdot \cos \xi. \quad (2.2)$$

$$(F)\psi = C^{-1} F \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.3)$$

$$C = (\operatorname{tg}^2 \chi + \operatorname{tg}^2 \alpha + 1)^{-0.5}. \quad (2.4)$$

Прийmemo:

$$F_{\text{тертя}} = f \cdot N = f(F_{\text{від}} - (F)_r) = f(m\omega^2 r - C^{-1} F \cdot \operatorname{tg} \chi), \quad (2.5)$$

де $F_{\text{від}}$ – відцентрова сила; $(F)_r$ – проекції сили тяжіння на радіальний напрямок.

Напишемо рівняння визначення узагальненої сили J_1 :

$$J_1 = -f \cdot r \cdot (m\omega^2 r - C \cdot F \cdot tg\chi) \cdot \cos\xi - rCF \cdot tg\alpha. \quad (2.6)$$

Під час руху частинки по осі Y узагальнена сила J_2 становить:

$$J_2 = \left(-(F_{\text{тертя}})_y - (F)_y \right), \quad (2.7)$$

або

$$J_2 = -f(m\omega^2 r - C \cdot F \cdot tg\chi) \sin\xi - C \cdot F. \quad (2.8)$$

Кінетична енергія матеріальної точки за [16, 17] рівна:

$$E = E_\psi + E_y, \quad (2.9)$$

де кінетична енергія поступального руху твердого тіла:

$$E_y = (my'^2)/2, \quad (2.10)$$

а кінетична енергія обертання тіла навколо нерухомої осі:

$$E_\psi = (\psi'^2 \cdot m \cdot r^2)/2. \quad (2.11)$$

Виконаємо підстановку рівнянь (2.6), (2.8) та (2.9) в рівняння (2.1) та розв'яжемо це рівняння з врахуванням наступного:

$$\sin\xi = y' \cdot ((r \cdot \psi')^2 + (y')^2)^{-0,5}. \quad (2.12)$$

$$\cos\xi = \psi' \cdot r \cdot ((r \cdot \psi')^2 + (y')^2)^{-0,5}. \quad (2.13)$$

Остаточно, здійснивши деякі перетворення, виразимо диференціальне рівняння руху елементарної частинки шару ґрунту поверхнею кутозніму:

$$\begin{cases} \psi'' = -g \cdot C \cdot tg\alpha \cdot r^{-1} - f \cdot \psi' (\psi'^2 r - tg\chi \cdot C \cdot g) \cdot ((r \cdot \psi')^2 + (y')^2)^{-0,5} \\ y'' = -g \cdot C - f \cdot y' (\psi'^2 r - tg\chi \cdot C \cdot g) \cdot ((r \cdot \psi')^2 + (y')^2)^{-0,5}. \end{cases} \quad (2.14)$$

Отримана система є задачею Коші. Оскільки аналітично розв'язати систему (2.14) дуже складно, тоді для її розв'язку використаємо чисельний метод розв'язку систем диференціальних рівнянь [19], який полягає в знаходженні функцій $Y(t)$ та $\psi(t)$, які задовольняють системі (2.14) та початковим умовам: $\psi=0, t_0=0, Y=0, \psi'=w_0, Y'=V_{oy}$.

Оскільки наближений розв'язок диференціального рівняння можна отримати числовим методом, використаємо метод послідовного диференціювання [19]. Як результат отримаємо аналітичний вираз, який забезпечує потрібну точність розв'язку.

Метод полягає в розкладанні шуканих часткових розв'язків $\psi = \psi(t)$ та $Y(t)$ в ряд Тейлора по ступеням різниці $(t-t_0)$:

$$\begin{cases} \psi(t) = \psi(t_0) + \frac{\psi'(t_0)}{1!} (t - t_0) + \frac{\psi''(t_0)}{2!} (t - t_0)^2 + \dots + \frac{\psi^n(t_0)}{n!} (t - t_0)^n + \dots \\ Y(t) = Y(t_0) + \frac{Y'(t_0)}{1!} (t - t_0) + \frac{Y''(t_0)}{2!} (t - t_0)^2 + \dots + \frac{Y^n(t_0)}{n!} (t - t_0)^n + \dots \end{cases} \quad (2.15)$$

Початкові умови безпосередньо дають нам значення $\psi=0$, $Y=0$, $\psi'=\omega_0$, $Y'=V_{oy}$. Значення $\psi''(0)$ та $Y''(0)$ отримаємо підставляючи $\psi'(0)$ та $Y'(0)$ в рівняння системи (2.14). Значення $\psi'''(0)$, $\psi''''(0)$ та $\psi^n(0)$ послідовно визначаються диференціюванням рівнянь системи (2.14) з підстановкою в них $\psi'(0)$, $Y'(0)$, $\psi''(0)$, $Y''(0)$ тощо, тобто $Z^{(m)}(t_0) = Z_{om}^{(m=0, 1, 2, \dots, n)}$. Доказано, що при значеннях t , достатньо близьких до t_0 , існує єдиний розв'язок системи Коші (системи 2.14), який розкладається в ряд Тейлора. Тоді часткова сума даного ряду буде наближенням рішенням зазначеного завдання. Знайдемо $\psi'''(t_0)$ та $Y'''(t_0)$.

$$\psi''' = -f \left(\frac{\frac{(3\psi^2 r - tg\chi \cdot C \cdot g) \cdot \psi''}{((r \cdot \psi')^2 + (y')^2)^{-0,5}} - \frac{(\psi^3 r - tg\chi \cdot C \cdot g \cdot \psi') \cdot (y' y'' + \psi' \psi'')}{((r \cdot \psi')^2 + (y')^2)^{-0,5}}}{((r \cdot \psi')^2 + (y')^2)^{-0,5}} \right). \quad (2.16)$$

$$Y''' = -f \left(\frac{\frac{(\psi^2 r - tg\chi \cdot C \cdot g) \cdot Y'' + 2\psi r \psi' Y'}{((r \cdot \psi')^2 + (y')^2)^{-0,5}} - \frac{(\psi^2 r Y' - tg\chi \cdot C \cdot g \cdot Y') \cdot (y' y'' + r^2 \psi' \psi'')}{((r \cdot \psi')^2 + (y')^2)^{-0,5}}}{((r \cdot \psi')^2 + (y')^2)^{-0,5}} \right). \quad (2.17)$$

Обмежуючись цими похідними та підставляючи їх значення в систему (2.15) зобразимо її наступним чином:

$$\begin{cases} \psi(t) = \psi(t_0) + \omega_0(t - t_0) + \frac{\psi''(t_0)}{2!} (t - t_0)^2 + \\ \quad + \frac{\psi'''(t_0)}{3!} (t - t_0)^3 + \frac{\psi^{1V}(t_0)}{4!} (t - t_0)^4 \\ Y(t) = Y(t_0) + V_{oy}(t - t_0) + \frac{Y''(t_0)}{2!} (t - t_0)^2 + \\ \quad + \frac{Y'''(t_0)}{3!} (t - t_0)^3 + \frac{\psi^{1V}(t_0)}{4!} (t - t_0)^4. \end{cases} \quad (2.18)$$

Рівняння системи (2.18) є залежністю значень узагальнених координат ψ та Y від часу t . Швидкість частинки знайдемо взявши похідну $\psi'(t)$ та $Y'(t)$ за t рівнянь системи (2.18):

$$\begin{cases} \psi^{1V}(t) = \omega_0 + \psi''(t_0) \cdot (t - t_0) + \frac{\psi'''(t_0)}{2!} (t - t_0)^2 + \frac{\psi^{1V}(t_0)}{3!} (t - t_0)^3 \\ Y'(t) = V_{0y} + Y''(t_0)(t - t_0) + \frac{Y'''(t_0)}{2!} (t - t_0)^2 + \frac{Y^{1V}(t_0)}{3!} (t - t_0)^3. \end{cases} \quad (2.19)$$

Метою більш точного визначення залежності $\psi(t)$ та $Y(t)$, отже і більш точного визначення швидкості частинки, розв'язок систем (2.18) та (2.19) підставляємо в якості початкових умов в рівняння системи (2.15) і розв'язуємо послідовно кілька разів з кроком $t-t_0=0,01$ с, визначаючи $\psi''(t_0)$, $\psi'''(t_0)$, $Y''(t_0)$, $Y'''(t_0)$ за рівняннями системи (2.14), (2.16) та (2.17). Похибка розв'язку Δ буде рівна сумі останніх членів рівнянь системи (2.15) впродовж усього розрахунку:

$$\Delta_{\psi} = \sum_{t_0}^{t_m} 41,7 \cdot 10^5 \cdot \psi^{1V}(t - t_0). \quad (2.20)$$

$$\Delta_y = \sum_{t_0}^{t_m} 41,7 \cdot 10^5 \cdot Y^{1V}(t - t_0). \quad (2.21)$$

Абсолютна швидкість V_a частинки в момент часу t_m визначається як:

$$V_a = \left((\psi'(t_m) \cdot r)^2 + (Y'(t_m))^2 \right)^{0,5}. \quad (2.21)$$

2.2. Встановлення залежності між параметрами кутозніму оборотного плуга та кутом переміщення частинки ґрунту його поверхнею

Оскільки кутознім є циліндром, тому кут ψ , на який просунеться частинка шару ґрунту K обмежено шириною кутозніму b (Додаток Б, рис. 2). Виходячи з зазначеного введемо значення b для визначення кута ψ . Отже кут ψ становитиме:

$$\psi = \arccos(1 - 0,5(b/r)^2) \quad (2.23)$$

Знайдений кут ψ є остаточною, на який просунеться частинка шару ґрунту поверхнею кутозніму. Підставляючи перше рівняння системи (2.15) визначимо координати частинки шару ґрунту та час t_m , за який частинка покине кутознім.

Підставляючи t_m в рівняння системи (2.19) знайдемо напрямок та швидкість руху частинки шару ґрунту за умови її сходження з поверхні кутозніму. Для визначення відстані, на яку віддаляться частинка K після сходження з кутозніму знайдемо кут ζ між напрямком вектору колової швидкості V_0 частинки в момент сходження та перпендикуляром до напрямку руху.

2.3. Визначення кута між перпендикуляром до напрямку руху частинки ґрунту в момент сходження та напрямком вектору її колової швидкості

З метою визначення кута ζ , для початку, слід визначити кут $\angle MRO$ між напрямками дотичних до циліндру, які проведено через точки S та M (Додаток Б, рис. 3). Оскільки кути $\angle NMR$ та $\angle NSR$ є прямокутними, то чотирикутнику NMRS можна визначити $\angle MRS$. Дійсно, сума кутів в чотирикутнику рівна 360° , $\angle NMR = \angle NSR = 90^\circ$, а $\angle MNS = \psi$, то $\angle MRS = 360^\circ - 90^\circ - 90^\circ - \psi = 180^\circ - \psi$. $\angle MRO$ доповнює $\angle MRS$ до 180° , отже, є рівним ψ . За додаток Б, рис. 3 визначимо:

$$\angle \zeta = \angle MRO + \angle ORH - 90^\circ = \psi + \beta_0 - 90^\circ \quad (2.24)$$

Підставляючи в (2.24) значення кута ψ з рівняння (2.23) отримаємо:

$$\zeta = \arccos(1 - 0,5(b/r)^2) + \beta_0 - 90 \quad (2.25)$$

Кут $\angle \zeta$ може бути додатнім за умови $(\angle \psi + \angle \beta_0) > 90^\circ$ та від'ємним за умови $(\angle \psi + \angle \beta_0) < 90^\circ$. За умови $\zeta > 0$ частинка шару ґрунту під цим кутом буде летіти вперед, за напрямком руху плуга, а при $\zeta < 0$ – у протилежному напрямку. Кут β_0 залежить від висоти встановлення кутозніму на відвалі корпусу та приймає значення кута нахилу твірної корпусу до стінки борозни на цій висоті. Знаючи для корпусу плугу залежність зміни $\angle \beta$ за висотою $\beta = \beta(l)$ та знаючи l можна знайти β_0 встановлення кутозніму на корпусі.

2.4. Вплив параметрів кутозніму оборотного плугу на відстань відкидання частинки ґрунту

За схемою перевертання шару ґрунту (Додаток Б, рис. 4) визначимо ширину відкритої борозни $b_{\text{борозни}}$. Виведемо формулу її розрахунку:

$$b_{\text{борозни}} = 2b + c - a/\text{tg } 40^\circ \quad (2.26)$$

За умови $b=48$ см та $c=29$ см, $b_{\text{борозни}}=85$ см. Щоб шар ґрунту, зрізаний кутознімом, потрапив на дно борозни відстань L відкидання шару ґрунту кутознімом має бути меншою за ширину відкритої борозни $b_{\text{борозни}}$: $L = b_{\text{борозни}}$.

На рис. 5 додатку Б зазначено на різних швидкостях залежності відстані L та $b_{\text{борозни}}$ відкидання частинок шару ґрунту кутознімом від радіуса r кутозніму. L_1 – відстань, на яку відлітають частинки зрізаного шару ґрунту, з моменту точки сходження з поверхні кутозніму до найглибшої точки борозни в напрямку їх руху в момент сходження, отже – по дотичній до кутозніму. L – відстань відкидання частинка ґрунту від стінки борозни в напрямку, поперечному руху плуга.

З додатку Б, рис. 5 видно, що із збільшенням радіусу r кутозніму відстані L_1 та L відкидання частинок шару ґрунту збільшуються. Це пояснюється тим, що із збільшенням радіусу r опір кутозніму руху шару ґрунту зменшується за рахунок зменшення сили тертя. Дещо більше зростання дальності L_1 пояснюється тим, що вона залежить лише від швидкості та вертикального кута скидання, а дальність L за формулою (2.41) залежить також від кута ξ та координати Z_0 . Координата Z_0 дещо зменшується (≈ 5 см), а $\cos\xi$ хоча і збільшується, проте, через невелике значення кута ξ (близько $2\dots 10^\circ$) не впливає на відстань відкидання L . Із графічної залежності також впливає, що із збільшенням швидкості V оборотного плуга відстань, на яку відкидається частинка ґрунту, зростає. Зазначене пояснюється тим, що із збільшенням швидкості V початкова швидкість потрапляння частинки ґрунту на кутознім зростає і тому за однакових значеннях радіусу r частинка ґрунту швидше рухається кутознімом, а її швидкість в момент відривання від кутозніму є вищою.

З додатку Б, рис. 5 також видно, що при швидкості оранки 7 км/год за будь-якого значення радіуса відстань відкидання частинки шару ґрунту L знаходиться в межах 53...56 см. Отже, ґрунт буде падати на внутрішню поверхню шару, який перегортається, що збільшує вірогідність звалювання ґрунту перед кутознімом. Зазначене погіршує роботу плуга. За швидкості оранки рівній 9 км/год, відстань відкидання L збільшується. Проте, оскільки розрахунки здійснювалися без врахування явища підпирання пласта (II припущення), тобто ймовірність скидання шару ґрунту не на дно, а на відкіс

раніше відваленого шару, що значно погіршує заробляння рослинних залишків плугом. Зазначене стосується і швидкості руху оборотного плуга рівній 8 км/год за радіусів $r < 47$ см.

Зазначене свідчить, що для потрапляння частини шару ґрунту, яка зрізана кутознімом, на дно борозни, отже для якісного заробляння рослинних залишків в ґрунт, радіус r кутозніму повинен бути в межах 40...42 см за швидкості оранки рівній 7,8...8,2 км/год. На рис. 6 додатку Б зображено залежності відкидання L , L_1 частинок шару ґрунту від ширини середньої лінії b при різній висоті l його встановлення на відвалі корпусу. З графічної залежності випливає:

- із збільшенням ширини кутозніму b дальність відкидання L_1 зменшується на 12...28 см, що пояснюється збільшенням відстані, яку частинка шару ґрунту повинна пройти по кутозніму. Незначне збільшення відстані L на 2...4 см за умови збільшення b та за умови зменшення L_1 пояснюється тим, що із збільшенням b різко зростає координата Z_0 сходження частинок з поверхні кутозніму (від 23 до 47 см). Тому збільшення координати сходження компенсує зменшення відстані L_1 і кінцева відстань L практично не змінюється;

- із збільшенням висоти встановлення l кутозніму на відвалі з 20 до 40 см значення L_1 збільшується з 5 до 17 см, а L зменшується на 5 см. Збільшення L_1 пояснюється більшою висотою скидання частинки з поверхні кутозніму. Зменшення L пояснюється тим, що кут ζ між напрямками L_1 та L залежить від кута β_0 встановлення кутозніму на корпусі, який, в свою чергу, залежить від висоти l . При збільшенні l кут ζ зростає, що зменшує відстань L .

При $b=29...36$ см кінцева відстань відкидання L є меншою за 60 см, а при $b=46$ см величина L_1 зменшується до 0. Це збільшує ймовірність вивантаження шару ґрунту. Тому ширину b кутозніму беремо в межах 38...45 см. Висоту l встановлення кутозніму на відвалі обираємо з умови забезпечення повного обертання шару ґрунту під час оранки і вона повинна бути не меншою за 32 см.

На рис. 7 додатку Б зображено залежності дальності відкидання L_1 та L частинок шару ґрунту кутознімом при зміні кута χ його нахилу в поперечно-вертикальній площині. З графічних залежностей випливає, що із збільшенням χ

значення L_1 та L зменшуються. При чому, при χ рівних 17° та 24° та кутах α більше відповідно 19° та 23° значення $L_1=0$, а L є координатою Z_0 , на яку просунеться частинка шару ґрунту під час руху по кутозніму. Це пояснюється тим, що із збільшенням кута χ збільшується шлях, який проходить частинка шару ґрунту по кутозніму. Збільшення значень L_1 та L при збільшенні кута χ пояснюється тим, що збільшується складова від сили тяжіння.

Для забезпечення під час оранки повного обороту шару ґрунту відстань між крайніми точками борозни лез кутозніму та лемішу повинна відповідати ширині захвату b корпусу. Отже, при b , яка дорівнює 38...45 см та висоті h встановлення його на відвалі, яка є більшою за 32 см кут α нахилу його в поперечно-вертикальній площині повинен бути в межах $12...22^\circ$. Із збільшенням кута α висота h зменшується, а ширина b , навпаки, збільшується. Для забезпечення скидання зрізаної кутознімом частини шару ґрунту на дно борозни кут χ нахилу його в поздовжньо-вертикальній площині повинен бути в межах $16...26^\circ$.

2.5. Висновки до розділу 2

1. Представлено аналітичні залежності для визначення: траєкторії руху частинки ґрунту по поверхні кутозніму оборотного плуга; залежність між параметрами кутозніму плуга та кутом переміщення частинки ґрунту його поверхнею; кута між перпендикуляром до напрямку руху частинки ґрунту в момент сходження та напрямком вектору її колової швидкості; ступенем впливу параметрів кутозніму оборотного плуга на відстань відкидання частинки ґрунту.

2. За умови збільшення ширини кутозніму дальність відкидання частинки шару ґрунту від місця її сходження до найглибшої точки борозни зменшується, а дальність відкидання від стінки борозни збільшується.

3. З метою забезпечення падіння зрізаної кутознімом частини шару ґрунту на дно борозни, а також повного обороту пласта під час оранки корпусом оборотного плуга з кутознімом на глибину 32 см в ґрунтових умовах

зони Полісся радіус кутозніму повинен складати 40...42 см, ширина – 38...45 см, кут нахилу його в поздовжньо-вертикальному напрямку – 16...26 град., а кут нахилу його в поперечно-вертикальній площині – 12...22 градусів, висота встановлення на відвалі корпусу – менша за 32 см, швидкість оранки – 7,8...8,2 км/год.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень.

З метою перевірки результатів аналітичних досліджень і визначення раціональних параметрів кутозніму до корпусу плуга було заплановано дослідити вплив раціональних параметрів кутозніму на якість заробляння рослинних решток в ґрунт та тяговий опір кутозніму та корпусу.

3.2. Методика проведення експериментів

Якісні та енергетичні показники роботи корпусу оборотного плуга, оснащеного кутознімом, залежно від конструкційних і встановлюваних параметрів кутозніму та швидкості оранки досліджувалися в лабораторних умовах на базі Поліського національного університету.

Дослідження виконувалися у відповідності до ДСТУ 3978-2000 «Машини та обладнання сільськогосподарські для глибокої оранки». Програма та методи досліджень також виконувалися відповідно до [20].

Для проведення досліджень сконструйовано спеціальну установку (Додаток В, рис. 1), на якій зазначено тарування тензоланки корпусу плуга.

Глибину заробляння рослинних залишків визначали відкопуванням їх та вимірюванням глибини залягання від поверхні поля. Дальність відкидання шару ґрунту визначали закопуванням міток на поверхні поля і вимірюванням дальності їх відкидання після проходження установкою.

Ступінь гребінчастості зораного поля, кут, на який перевертається пласт, та інші агротехнічні показники визначали за методикою згідно ДСТУ 7859:2015 «Якість ґрунту. Оцінювання якості проведення меліоративної плантажної оранки». Твердість та вологість ґрунту на полі, характеристику рослинного покриву на полях визначали за стандартними методиками. Встановлена глибина оранки під час усіх досліджень була однаковою та становила 32 см.

3.3. Результати експериментальних досліджень

Ґрунтуючись на результатах аналітичних досліджень для здійснення експериментів відібрано наступні параметри кутозніму: радіус кутозніму $r=420$ мм, кут встановлення кутозніму відносно вертикального положення в поздовжньо-вертикальній площині становить від 0 до 26 градусів, швидкість оранки – 7,8...8,2 км/год, ширина кутозніму – 400 мм, кут встановлення до горизонту у вертикально-поперечній площині – 18 градусів.

3.3.1. Вплив висоти встановлення кутозніму на відвалі на тяговий опір

З метою визначення впливу висота встановлення h змінювалася в межах 26...34 см з кроком 4 см.

Результати дослідження впливу висоти встановлення кутозніму на відвалі h на тяговий опір $F_{тяг.оп.}$ корпусу з встановленим кутознімом, глибину заробляння рослинних залишків, дальність відкидання L кутознімом частинок шару ґрунту від стінки борозни представлені в (Додаток Г, рис. 1).

Аналіз результатів експериментальних досліджень свідчить, що із збільшенням висоти h встановлення кутозніму на відвалі корпусу плуга дальність L відкидання кутознімом середньої частини спочатку зростає в незначній мірі (на 1,8...3,2 см), потім зменшується (на 11...15 см). Відповідно спочатку зменшується (на 3,2 см), а потім зростає (на 6,8 см) глибина l заробляння рослинних залишків в ґрунт. Зазначене пояснюється тим, що із зменшенням дальності L відкидання зрізаний кутознімом шар ґрунту падає на дно борозни, а не на її відкіс чи бічну частину. Різниця в 11...15 см між аналітичними і експериментальними значеннями дальності L пояснюється наявністю в експериментах такого явища як підпирання «шару ґрунту», яке збільшує значення аналітичної дальності відкидання L , що в якості припущення не було враховано в аналітичних розрахунках. З зазначених досліджень випливає, що із збільшенням висоти встановлення кутозніму на відвалі, тяговий опір корпусу з кутознімом зменшується на 7%. Це пояснюється тим, що кутознім при цьому зрізає меншу частину шару ґрунту, крім того, не заважає

шару ґрунту здійснювати оберт, тобто менше з ним взаємодіє та має меншу енергоємність.

3.3.2. Дослідження впливу швидкості плугу на параметри оранки

З метою визначення впливу швидкості V оранки змінювалася з 12 до 6 км/год з кроком 2 км/год.

Результати досліджень з вивчення впливу V на L , глибину заробляння рослинних залишків, тяговий опір представлені в (Додаток Г, рис. 2).

Кутознім встановлюється на висоті 32 см. За даними експериментальних робіт за умови збільшення швидкості V оранки дальність відкидання L шару ґрунту зростає. За умови, що $V < 7,5$ км/год, кутознім не відкидає шар ґрунту в сторону відкритої борозни, а звалює його на шар ґрунту, який в цей момент перевертається, і який під час свого перевертання захоплює останній та за інерцією відкидає його на відкід раніше відкинутого шару ґрунту. Глибина заробляння l не перевищує 12 см. За умови $7,5 < V < 9$ км/год кутознім відкидає рослинну масу у бік відкритої борозни і лише недостатній оборот пласта ($\approx 150^\circ$) не дозволяє глибині l досягти значень більших 18 см, хоча l і збільшується.

За умови $V > 9$ км/год кутознім відкидає рослинні залишки на відкід раніше відваленого шару ґрунту і заробляння їх корпусом плуга значно погіршується.

Із графічних залежностей у (Додаток Г, рис. 2) були отримані емпіричні формули, які відображають залежність зміни абсолютного ΔL та відносного k_n коефіцієнтів, які враховують «підпирання пласта», від швидкості оранки:

$$\Delta L = L_{\text{дослід}} - L_{\text{теор}} = 0,0989 \cdot V^2 - 0,597 \cdot V + 6,12 \quad (3.1)$$

$$k_n = L_{\text{дослід}} / L_{\text{теор}} = 3,013 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 - 5,021 \cdot 10^{-2} \cdot V + 1,5047 \quad (3.2)$$

Тягове зусилля $F_{\text{тяг.оп.}}$ корпусу з кутознімом за умови $7,5 < V < 13$ км/год збільшується на 33%, так як зростає швидкісна складова формули Горячкіна В.П.

3.3.3. Дослідження впливу кута нахилу кутозніму на параметри процесу оранки

Для визначення впливу кут χ змінювався з 0 до 30° з інтервалом 10°. Результати експериментів з питання вивчення впливу кута нахилу кутозніму до вертикалі в вертикально-поздовжній площині на дальність відкидання зрізаної кутознімом частини шару ґрунту, глибину заробляння рослинних залишків, тяговий опір корпусу з кутознімом представлені в (Додаток Г, рис. 3).

Швидкість оранки приймалася 9 км/год.

Аналіз результатів дослідів свідчить, що із збільшенням кута нахилу кутозніму до вертикалі в вертикально-поздовжній площині відстань L відкидання кутознімом зрізаного шару ґрунту збільшується на 24 см, а глибина заробляння рослинних залишків спочатку дещо зростає (на 6 см), а потім зменшується (на 9 см). Незначна відстань L при малих значеннях кута χ пояснюється тим, що кутознім працює як звичайна ґрунтозсувна пластина. При чому шар ґрунту розрізається лезом кутозніму по усій його довжині і контакт пласта з задньою поверхнею кутозніму створює додаткове зусилля тертя, яке перешкоджає руху ґрунту. За умови збільшення χ кутознім починає спрямовувати шар ґрунту в сторону відкритої борозни, віддаль L зростає і тому глибина l зростає. За умови $L > 70$ см шар ґрунту з кутозніму відкидається на укіс раніше відваленого шару ґрунту і глибина l дещо зменшується.

Оптимальне розташування кутозніму до шару ґрунту, що обертається, при збільшенні χ обумовлює зниження тягового опору корпусу з кутознімом на 7%.

Загальний вигляд лабораторної установки представлено на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Загальний вигляд лабораторної установки

Для побудови графічних залежностей було використано аналітичні залежності визначені за методикою [21]

$$F_{\text{тяг.оп.}} = 0,0031 \cdot h^2 - 0,216 \cdot h + 16,98$$

$$L = -0,134 \cdot h^2 + 7,43 \cdot h - 29,97$$

$$l = 0,12 \cdot h^2 - 6,01 \cdot h + 88,73$$

$$F_{\text{тяг.оп.}} = 0,02215 \cdot V^2 + 0,198 \cdot V + 9,12$$

$$L = -0,734 \cdot V^2 + 17,963 \cdot V - 33,03$$

$$l = -0,61 \cdot V^2 + 10,05 \cdot V - 27,4$$

$$F_{\text{тяг.оп.}} = 0,0014 \cdot \chi^2 - 0,0597 \cdot \chi + 13,04$$

$$L = -0,0132 \cdot \chi^2 + 0,63 \cdot \chi + 56,18$$

$$l = -0,033 \cdot \chi^2 + 0,881 \cdot \chi + 13,24$$

3.3.4. Визначення раціональних параметрів кутозніму

Обробка ґрунту оборотним плугом, оснащеним кутознімом, повинна здійснюватися з такими параметрами кутозніму, за яких забезпечується висока якість заробляння рослинних залишків в шари ґрунту, що відповідає сучасним агротехнічним вимогам. При цьому тяговий опір корпусу плуга з кутознімом повинен бути за можливості мінімальним.

Для визначення оптимальних значень конструктивних та установчих параметрів кутозніму, а також швидкості оранки використали метод математичного планування багатофакторних експериментів [20–23].

Перевага зазначеного метода полягає в тому, що при одночасній зміні кількох змінних x_0, \dots, x_1 , які чинять вплив на функцію відгуку, є можливість вивчити процес $F=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ за меншої кількості варіантів дослідів.

Результати дослідження з обмеженою кількістю дослідних точок дозволить отримати вибірккову оцінку для функції аналітично вираженої у вигляді поліному [20–23]:

$$Y_0 = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=j}^n b_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \dots, \quad (3.3)$$

де x_j, x_i – незалежні фактори; b_i – коефіцієнт регресії; b_0 – вільний член.

Апріорний аналіз та результати попередніх досліджень свідчать, що кутознім під час роботи виконує дві функції: забезпечує повний оберт шару ґрунту та скидає зрізаний шар ґрунту на дно борозни.

Тому експериментальні дослідження в напрямку оптимізації його основних параметрів згідно [20–23] здійснювалися в два етапи:

1) оптимізація радіусу середньої лінії кутозніму r , висоти встановлення на відвалі h , кута встановлення кутозніму до вертикалі в поздовжньо-вертикальній площині β , швидкості оранки V ;

2) оптимізація радіусу леза кутозніму в плані r_1 , кута встановлення його до горизонту в поперечно-вертикальній площині χ , ширини кутозніму b .

Як функцію відгука було обрано глибину заробляння рослинних відходів та тяговий опір корпусу з кутознімом. Для зменшення впливу зовнішніх неконтрольованих факторів послідовність виконання варіантів дослідів рандомізувалася шляхом використання випадкових чисел.

З метою опису розглядуваного процесу на початку виконання дослідів (перший етап) обрано план багатофакторного експерименту Хартлі з варіюванням чотирьох змінних на трьох рівнях, який містив сімнадцять дослідів. Другий етап плану багатофакторного експерименту передбачав

напіврепліку та варіювання трьох змінних на трьох рівнях, який містив одинадцять дослідів.

Після реалізації матриць планів багатофакторних експериментів Хартлі було виконано обробку результатів експерименту, здійснено розрахунок коефіцієнтів регресії, перевірку відтворюваності процесу та гіпотезу отриманого рівняння з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel та Statistica.

Рівні факторів та інтервали їх варіювання наведено в Додатку Д.

Перевірку гіпотези однорідності дисперсії за умови однакової кількості повторень дослідів здійснювали за критерієм Кохрена, значимість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Ст'юдента [20–23].

Адекватність моделі процесу перевіряли за критерієм Фішера [20–23].

В результаті обробки результатів експериментів і оцінки значимості коефіцієнтів регресії отримано наступні рівняння регресії:

1) за планом Хартлі з варіюванням чотирьох змінних на трьох рівнях

- тяговий опір корпусу плуга:

$$Y_1 = 12,15 - 0,134 \cdot X_1 - 0,139 \cdot X_2 + 0,998 \cdot X_4 - 0,402 \cdot X_1^2 + 0,31 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,21 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,705 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,198 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,524 \cdot X_3^2 + 0,395 \cdot X_4^2, \text{ кН} \quad (3.4)$$

- тяговий опір кутозніму:

$$Y_2 = 468,77 - 58,26 \cdot X_1 - 122,74 \cdot X_2 - 77,6 \cdot X_3 + 48,2 \cdot X_4 + 93,1 \cdot X_1^2 + 22,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 48,6 \cdot X_1 \cdot X_4 + 65,4 \cdot X_2^2 + 38,1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 28,9 \cdot X_2 \cdot X_4 + 99,8 \cdot X_3^2 - 41,3 \cdot X_4^2, \text{ Н} \quad (3.5)$$

- глибину заробляння рослинних залишків в ґрунт:

$$Y_3 = 13,27 - 0,42 \cdot X_1 - 3,22 \cdot X_2 - 0,83 \cdot X_3 + 2,4 \cdot X_4 - 2,17 \cdot X_1^2 + 0,63 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,69 \cdot X_2 \cdot X_3 - 2,36 \cdot X_2^2 + 1,51 \cdot X_2 \cdot X_4 + 3,4 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,18 \cdot X_3^2 - 4,3 \cdot X_4^2, \text{ Н} \quad (3.6)$$

2) за планом Хартлі з варіюванням трьох змінних на трьох рівнях

- тяговий опір корпусу плуга:

$$Y_4 = 12,01 - 0,21 \cdot X_1 - 0,32 \cdot X_2 + 0,156 \cdot X_3 + 0,43 \cdot X_1^2 - 0,28 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,34 \cdot X_2^2 + 0,45 \cdot X_3^2, \text{ кН} \quad (3.7)$$

- тяговий опір кутозніму:

$$Y_5 = 398,99 - 29,26 \cdot X_1 - 49,63 \cdot X_2 + 31,06 \cdot X_3 + 112,71 \cdot X_1^2 + 128,6 \cdot X_3^2, \text{ Н} \quad (3.8)$$

- глибину заробляння рослинних залишків в ґрунт:

$$Y_6 = 19,07 + 0,712 \cdot X_1 - 0,987 \cdot X_2 + 0,713 \cdot X_3 - 0,82 \cdot X_1 \cdot X_2 - 4,26 \cdot X_2^2 - 0,94 \cdot X_2 X_3 - 1,68 \cdot X_3^2, \text{ Н} \quad (3.9)$$

Аналіз рівнянь регресії свідчить, що тяговий опір корпусу плуга та кутозніму, глибина заробляння рослинних залишків в ґрунт знаходяться в складній залежності від змінних факторів. Результати статистичного аналізу та перевірка адекватності рівнянь свідчать, що процес є відтворюваним.

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.2.

Перевірка за критерієм Фішера свідчить, що математичні залежності (3.4 – 3.9) адекватно описують процес з довірчою ймовірністю 97%, оскільки фактичне значення коефіцієнтів є меншим за табличне:

$$F = 1,98 < F_{\text{таб}} = 2,65 \text{ (рівняння 3.2); } F = 1,63 < F_{\text{таб}} = 2,38 \text{ (рівняння 3.5)}$$

$$F = 2,03 < F_{\text{таб}} = 2,38 \text{ (рівняння 3.4); } F = 2,33 < F_{\text{таб}} = 3,05 \text{ (рівняння 3.7),}$$

$$F = 1,99 < F_{\text{таб}} = 2,49 \text{ (рівняння 3.6); } F = 1,64 < F_{\text{таб}} = 2,49 \text{ (рівняння 3.9).}$$

Результати оптимізації математичних моделей

№	Значення факторів	Фактори натуральні
1	Ширина кутозніму b (X_7), мм	400
2	Кут встановлення кутозніму до горизонту β (X_6), град	15
3	Радіус леза кутозніму в плані r_l (X_5), мм	460
4	Швидкість оранки V (X_4), км/год	9
5	Кут встановлення кутозніму до вертикалі χ (X_3), град	16
6	Висота встановлення кутозніму на відвалі h (X_2), мм	330
7	Радіус середньої лінії кутозніму r (X_1), мм	400

За умови спільного розв'язку рівнянь регресії (3.4–3.9) на $Y_5 \rightarrow \min$, $16 < Y_3 < 22$ см та рівняння регресії $Y_2 \rightarrow \min$, $12 < Y_3 < 17$ см методом накладання штрафних функцій було отримано оптимальні значення факторів, які забезпечують потрібну глибину заробляння рослинних залишків в ґрунт при мінімальному значенні тягового опору кутозніму.

Таким чином, раціональне значення параметрів кутозніму до корпусу оборотного плуга можна вважати наступні: $r=400$ мм; $h=330$ мм; $\chi=16$ град; $V=9$ км/год; $r_l=460$ мм; $\beta=15$ град; $b=400$ мм.

3.4. Висновки до розділу 3

1. Із збільшенням висоти встановлення кутозніму на відвалі корпусу плуга з 28 до 32 дальність відкидання кутознімом зрізаної частини шару ґрунту спочатку зростає, а при значеннях висоти понад 32 см – відповідно, зменшується. Глибина заробляння рослинних відходів в ґрунт відповідно спочатку зменшується на 3,2 см, а потім зростає на 6,8 см.

Тяговий опір корпусу з кутознімом із збільшенням висоти встановлення кутозніму на відвалі зменшується на 7%.

2. Із зростанням швидкості оранки дальність відкидання ґрунту кутознімом зростає. Якщо швидкість оранки складає від 7,5 до 9 км/год глибина заробляння рослинних залишків становить 14...17 см. Тягове зусилля $F_{тяг.оп.}$ корпусу з кутознімом за умови збільшення швидкості з 8 до 13 км/год збільшується на 33%.

3. За умови збільшення кута нахилу кутозніму до вертикалі в поздовжньо-вертикальній площині відстань, на яку відкидається кутознімом зрізана частина шару ґрунту зростає на 24 см, а глибина заробляння рослинних залишків при збільшенні кута нахилу до 20° зростає на 6 см, а потім зменшується на 9 см. Збільшення кута до 30° спричиняє зменшення тягового опору корпусу на 7%.

4. Раціональні параметри кутозніму, який встановлюється на корпусі оборотного плуга наступні: $r=400$ мм; $h=330$ мм; $\chi=16$ град; $V=9$ км/год; $r_l=460$ мм; $\beta=15$ град; $b=400$ мм.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що енергоємність оборотного плуга та ефективність процесу оранки залежить від його конструкційно-технологічних параметрів. Для моделювання параметрів плуга та з метою дослідження руху частинки шару ґрунту по кутозніму найбільш ефективно застосовувати рівняння Лагранжа.

2. Представлено аналітичні залежності для визначення: траєкторії руху частинки ґрунту по поверхні кутозніму оборотного плуга; залежність між параметрами кутозніму оборотного плуга та кутом переміщення частинки ґрунту його поверхнею; кута між перпендикуляром до напрямку руху частинки ґрунту в момент сходження та напрямком вектору її колової швидкості; ступенем впливу параметрів кутозніму плугу на відстань відкидання частинки ґрунту.

3. Із збільшенням висоти встановлення кутозніму на відвалі корпусу плуга з 28 до 32 дальність відкидання кутознімом зрізаної частини шару ґрунту спочатку зростає, а при значеннях висоти понад 32 см – відповідно, зменшується. Глибина заробляння рослинних залишків в ґрунт спочатку зменшується на 3,2 см, а потім зростає на 6,8 см. Тяговий опір корпусу з кутознімом із зростанням висоти його встановлення на відвалі зменшується на 7%.

4. Із зростанням швидкості оранки дальність відкидання ґрунту кутознімом зростає. Якщо швидкість оранки складає від 7,5 до 9 км/год глибина заробляння рослинних залишків становить 14...17 см. Тягове зусилля $F_{тяг.оп.}$ корпусу з кутознімом за умови збільшення швидкості з 8 до 13 км/год збільшується на 33%.

5. За умови збільшення кута нахилу кутозніму до вертикалі в поздовжньо-вертикальній площині відстань, на яку відкидається кутознімом зрізана частина шару ґрунту зростає на 24 см, а глибина заробляння рослинних залишків при

збільшенні кута нахилу до 20° зростає на 6 см, а потім зменшується на 9 см. Збільшення кута до 30° спричиняє зменшення тягового опору корпусу на 7%.

6. Раціональні параметри кутозніму, який встановлюється на корпусі оборотного плуга наступні: $r=400$ мм; $h=330$ мм; $\chi=16$ град; $V=9$ км/год; $r_I=460$ мм; $\beta=15$ град; $b=400$ мм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Єрмаков О.Ю., Чупряк А.В., Сокур Л.В., Нагорний В.В. (2020). Ресурсно-технічний потенціал інноваційно орієнтованих сільськогосподарських підприємств: Монографія. – К.: ФОП Ямчинський О.В., 190 с.
2. Golub, G., Chuba, V., Yarosh, Y., Solarov, O., Tsyvenkova, N. (2021). Experimental studies of the interaction of tractor drive wheels with the soil in the plowed field. *INMATEH – Agricultura Engineering*, 65(3), 430–440.
3. Sheludchenko, B., Šarauskis, E., Kukharets, S., Zabrodskyi, A. (2022). Graphic analytical optimization of design and operating parameters of tires for drive wheels of agricultural machinery. *Soil and Tillage Research*, 215, 105227
4. Zabrodskyi, A., Šarauskis, E., Kukharets, S., ...Vasiliauskas, G., Andriušis, A. (2021). Analysis of the impact of soil compaction on the environment and agricultural economic losses in Lithuania and Ukraine. *Sustainability (Switzerland)*, 13(14), 7762
5. Luo, F., Zhu, L., Wei, M., Zhang, J.-W., Zhu, D.-Q., & Jen, T.-C. (2019). Tillage Condition Effects on Soil/Plow-breast Flow Interaction of a Horizontally Reversible Plow. *Procedia Manufacturing*, 35, 980–985.
6. Пришляк В.М., Ковальчук О.В., Яропуд В.М. Робочі процеси сільськогосподарських машин. Машини для обробітку ґрунту, посіву, догляду за рослинами. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва» денної форми навчання. Вінниця: ВНАУ, 2017. 76 с.
7. Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hamza, E., Maalej, A., & Mouazen, A. M. (2016). 3D finite element simulation of the effect of mouldboard plough's design on both the energy consumption and the tillage quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4), 473–487.

8. Zhang, L., Cai, Z., Wang, L., Zhang, R., & Liu, H. (2018). Coupled Eulerian-Lagrangian finite element method for simulating soil-tool interaction. *Biosystems Engineering*, 175, 96–105.
9. Karmakar, S., Kushwaha, R. L., & Laguë, C. (2007). Numerical modelling of soil stress and pressure distribution on a flat tillage tool using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 97(3), 407–414.
10. Сахаров О.С., Щербина В.Ю., Гондляр О.В., Сівецький В.І. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Механіка суцільних середовищ. 1. Механіка суцільних середовищ в інженерних розрахунках». К. : НТУУ «КПІ», каф. ХПСМ, 2011. 53 с.
11. Coetzee C.J. (2014). Discrete and continuum modelling of soil cutting. *Computational Particle Mechanics*, Vol. 1, 409–423.
12. Zhu, L., Cheng, X., Peng, S.-S., Qi, Y.-Y., Zhang, W.-F., Jiang, R., & Yin, C.-L. (2016). Three dimensional computational fluid dynamic interaction between soil and plowbreast of horizontally reversal plow. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 1–9. doi:10.1016/j.compag.2016.01.034
13. Teng, J.G., Yu, T., Wong, Y.L., Dong, S.L. (2007). Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: concept and behavior. *Construction and Building Materials* 21, 846–854.
14. Сало В.М., Лещенко С.М., Лузан П.Г., Мачок Ю.В., Богатирьов Д.В. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. Х.: Мачулін, 2016. 244 с.
15. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів: підруч. За ред. Г.С. Писаренка, 2-ге вид. К. : Вища школа, 2004. 655 с.
16. Zhang, L. B., Cai, Z. X., & Liu, H. F. (2018). A novel approach for simulation of soil-tool interaction based on an arbitrary Lagrangian–Eulerian description. *Soil and Tillage Research*, 178, 41–49. doi:10.1016/j.still.2017.12.01
17. Ропай В.А., Науменко О.Г., Киба В.Я. Застосування рівнянь Лагранжа II роду до рішення задач динаміки механічних систем. Методичні рекомендації до розділу курсу «Спецрозділи математики, теоретичної

кінематики та аналітичної динаміки» для студентів всіх форм навчання. Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2013. 56 с.

18. Бабенко Д.В., Доценко Н.А., Горбенко О.А. Теорія механізмів і машин: практикум для навчання в умовах інформаційно-освітнього середовища : навчальний посібник. Миколаїв : МНАУ, 2019. 168 с.

19. Гой Т.П., Копач М.І., Федак І.В. Наближені методи розв'язування диференціальних рівнянь. Навч. посіб. для студ. напряму підготовки “математика”. Івано-Франківськ: Видавничо-дизайнерський відділ Центру інформаційних технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2008. 157 с.

20. Підручник дослідника: навч. посіб. для студ. агротех. спец. / О. Васильковський, С. Лещенко, К. Васильковська, Д. Петренко. Кіровоград, 2016. 204 с.

21. Мельников С. В., Ацелкин В. Р., Рошин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Ленинград : Колос, 1980. 168 с.

22. Лапач С.М. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с.

23. Конспект лекцій з курсу «Планування і обробка результатів експерименту». Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Назаренко Л.А. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 163 с.