

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ»  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін**

# **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**НА ТЕМУ:**

## **«ОБГРУНТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛУГА ДЛЯ ВИКОПУВАННЯ САДЖАНЦІВ ПЛОДОВИХ КУЛЬТУР»**

**Виконав:**

здобувач освітнього ступеня «Магістр»  
освітньо-професійної програми  
«Агроінженерія» спеціальності  
208 «Агроінженерія»  
денної форми навчання

**КАМБУР Роман Вікторович**

**Керівник:**

к.т.н., доцент

**ДУГАНЕЦЬ Василь Іванович**

**Оцінка захисту:**

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів \_\_\_\_\_

Шкала ECTS \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025р.

**Допускається до захисту:**

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025р.

Гарант освітньо-професійної програми «Агроінженерія»  
спеціальності 208 «Агроінженерія», к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ **ДУГАНЕЦЬ Василь Іванович**

м. Кам'янець-Подільський, 2025

## ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ .....	4
АНОТАЦІЯ.....	5
РЕФЕРАТ.....	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ПЛУГІВ ДЛЯ ВИКОПУВАННЯ САДЖАНЦІВ	10
1.1. Технологія для підготовки саджанців плодкових культур	10
1.2. Функціональний аналіз конструкцій плугів для викопування саджанців	11
1.3. Дослідження операцій підкопування і збору саджанців плодкових рослин	22
Висновки до розділу	28
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗПУШУВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА РОБОЧОЇ ЧАСТИНИ ВИКОПУВАЛЬНОГО ПЛУГА	30
2.1. Морфометричні показники молодих рослин	30
2.2. Обґрунтування конструктивної побудови робочого елемента	32
2.2.1 Створення конструктивної моделі робочого елемента	32
2.2.2 Формування ключових критеріїв для модернізації робочого елемента	34
2.3. Кінематичний аналіз коливань розпушувача	39
2.4. Аналіз руху ґрунтової скиби зі саджанцем по розпушувачу з різними конфігураціями робочої поверхні	41
2.4.1 Рух частки ґрунту по розпушувачу з прямолінійною робочою поверхнею	42
2.4.2 Рух частки ґрунту по розпушувачу з опуклою робочою поверхнею	44
2.4.3 Рух частки ґрунту по розпушувачу з ввігнуто-опуклою робочою поверхнею	45

2.5. Розрахунок роботи сили, що забезпечує переміщення ґрунтової частки	49
2.5.1 Розрахунок роботи рухомої сили та оптимальний вибір форми поверхні розпушувача	49
2.6. Розрахунок режиму коливальних рухів розпушувача	50
Висновки до розділу	51
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ</b>	<b>52</b>
3.1. Лабораторно-польові випробування викопувального плуга з новою конструкцією робочого органу	52
3.1.1 План та методика проведення лабораторно-польових випробувань	52
3.1.2 Математичне планування дослідів	53
Висновки до розділу	65
<b>РОЗДІЛ 4. НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ПЕРЕВІРКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВИКОПУВАЛЬНОГО ПЛУГА ВПН-2М</b>	<b>66</b>
4.1 План і методологія науково-виробничих випробувань плуга ВПН-2М	66
4.2 Агротехнічний аналіз ефективності роботи викопувального плуга	66
4.3 Аналіз економічної ефективності роботи викопувального плуга	71
Висновки до розділу	73
<b>РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....</b>	<b>74</b>
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....</b>	<b>77</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>79</b>

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін

Освітній ступінь «Магістр»

Спеціальність 208 - «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри,

доцент \_\_\_\_\_ Василь ДУГАНЕЦЬ

„04” квітня 2025 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
Здобувачу КАМБУРУ Роману Вікторовичу**

**1. Тема роботи:** «ОБГРУНТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛУГА ДЛЯ ВИКОПУВАННЯ САДЖАНЦІВ ПЛОДОВИХ КУЛЬТУР»

**2. Керівник роботи:** ДУГАНЕЦЬ Василь Іванович, доцент

**Затверджено наказом** Закладу вищої освіти «Подільський державний університет» від «04» квітня 2025 року № 355с.

**Термін подання** здобувачем закінченої роботи 24 листопада 2025 р.

**3. Вихідні дані до роботи:**

1. Матеріали з дослідження підкопувальних машин і агрегатів.
2. Науково-технічна література.
3. Результати досліджень плугів для викопування саджанців плодкових культур.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:**

Вступ

1. Аналіз та оцінка конструктивних рішень плугів для викопування саджанців.
  2. Теоретичний аналіз характеристик розпушувального елемента робочої частини викопувального плуга.
  3. Результати експериментальних досліджень.
  4. Науково-технічна перевірка ефективності роботи викопувального плуга ВПН-2М.
  5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.
- Загальні висновки по роботі.  
Список використаних джерел.  
Додатки.

## 5. Перелік ілюстративного матеріалу:

1. Титульний аркуш.
  2. Мета і завдання досліджень.
  3. Функціональний аналіз конструкцій плугів для викопування саджанців.
  4. Конструктивна схема плуга ПВС - 1.
  5. Огляд конструкцій плугів для викопування саджанців.
  6. Обґрунтування конструктивної схеми робочого органу.
  7. Конструктивно-технологічна схема викопування саджанців робочим органом викопувального плуга.
  8. Кінематичні дослідження качання розпушувача.
  9. Переміщення частки ґрунту по поверхні розпушувача з ввігнуто-опуклою напрямною.
  10. Експериментальні дослідження.
  11. Математичне планування дослідів.
  12. Параметр оцінювання якості кореневої системи.
  13. Характеристика умов надання агротехнічної оцінки.
  14. Виробничі випробування викопувального плуга .
  15. Показники якості агротехнічної оцінки викопувального плуга
- ВПН - 2 з експериментальним зразком робочого.
16. Техніко-економічні показники впровадження викопувального плуга ВПН - 2М.
  17. Загальні висновки по роботі.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Консультант з нормоконтролю	ДЕВІН В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 24 лютого 2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділів кваліфікаційної роботи	Термін виконання розділів роботи		Примітка
		планово	фактично	
	Вступ	21.04.2025 р.	21.04.2025 р.	
1.	Аналіз та оцінка конструктивних рішень плугів для викопування саджанців.	27.05.2025 р.	27.05.2025 р.	
2.	Теоретичний аналіз характеристик розпушувального елемента робочої частини викопувального плуга.	03.06.2025 р.	03.06.2025 р.	
3.	Результати експериментальних досліджень.	20.07.2025 р.	20.07.2025 р.	
4.	Науково-технічна перевірка ефективності роботи викопувального плуга ВПН-2М.	12.09.2025 р.	12.09.2025 р.	
6.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.	10.10.2025 р.	10.10.2025 р.	
	Загальні висновки по розділу.	20.10.2025 р.	20.10.2025 р.	
	Список використаних джерел.	10.11.2025 р.	10.11.2025 р.	
	Додатки.	24.11.2025 р.	24.11.2025 р.	

Здобувач  
Керівник

**Роман КАМБУР**  
**Василь ДУГАНЕЦЬ**

## АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній роботі магістра представлена можливість покращення умов праці працівників при вибиранні саджанців з підкопаного ґрунту з одночасним збереженням якості їх кореневої системи шляхом забезпечення зусилля на витягування саджанців, яке повинне бути не більше 70 Н за рахунок застосування активного розпушувача викопувального плуга.

За результатами агротехнічної оцінки викопувального плуга ВПН-2М з розробленим розпушувачем при середній глибині підкопування 0,33 м встановлено, що збереження кореневої системи саджанців за її довжиною перевищувало нормативне значення на 12%; зусилля на витягання саджанців працівниками з ґрунту склало 42 Н, що на 40% менше нормативного значення, 95 % викопаних саджанців відповідали першому сорту. Застосування модернізованого плугу ВПН – 2М з розпушувачем запропонованої конструкції дозволило знизити витрати праці робітників при вибірці саджанців на 187 люд. · год. / га, що на 23% менше у порівнянні з ВСН – 1, при цьому річна економія коштів склала 12081 грн.

## SUMMARY

The master's qualification work presents the possibility of improving the working conditions of workers when selecting seedlings from dug-up soil while simultaneously preserving the quality of their root system by ensuring the effort to pull out seedlings, which should not exceed 70 N, through the use of an active cultivator of a digging plow.

According to the results of the agrotechnical assessment of the VPN-2M digging plow with the developed cultivator at an average digging depth of 0.33 m, it was found that the preservation of the root system of seedlings along its length exceeded the standard value by 12%; the effort to extract seedlings from the soil by workers was 42 N, which is 40% less than the standard value, 95% of the dug seedlings corresponded to the first grade. The use of the modernized VPN-2M plow with a cultivator of the proposed design allowed to reduce the labor costs of workers when selecting seedlings by 187 man. • hours / ha, which is 23% less than in comparison with VSN-1, while the annual cost savings amounted to 12081 UAH.

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки, виконаної машинописним способом на 80 аркушах формату А4, яка вміщує 5 розділів 9 таблиць, 48 рисунків, 40 найменувань використаних джерел і презентаційного матеріалу на 17 аркушах.

Метою кваліфікаційної роботи є поліпшення умов праці працівників при вибиранні саджанців з підкопаного ґрунту з одночасним збереженням якості їх кореневої системи шляхом забезпечення зусилля на витягування саджанців, яке повинне бути не більше 70 Н за рахунок застосування активного розпушувача викопувального плуга.

В процесі виконання кваліфікаційної роботи використовувались положення теоретичної механіки і методи диференційного та інтегрального числення, а оптимізацію його параметрів проведено за методикою математичного планування екстремального експерименту.

Експериментальні дослідження проводились у польових умовах відповідно до прийнятих методик та галузевих стандартів. Обробка результатів досліджень здійснювалася методами математичної статистики за допомогою ЕОМ з використанням програмного середовища пакетів «Maple» та «MathCad».

В результаті проведення досліджень встановлено, що режим коливань з відривом частки ґрунту на запропонованій поверхні розпушувача досягається у третьому квадранті обертання приводного валу ексцентрика з кількістю качань  $n=4$ , частотою обертання  $6 \text{ с}^{-1}$  при швидкості руху агрегату 1,45 м/с, величині ексцентриситету  $e = 0,02 \text{ м}$ . Інтенсивність розпушення ґрунтової скиби доцільно змінювати амплітудою коливань розпушувача за рахунок регулювання довжини важеля. Також встановлено, що довжина важеля має бути в межах від 0,35 м до 0,45 м.

Ключові слова: ПЛОДОВІ КУЛЬТУРИ, ЩІЛЬНІСТЬ ҐРУНТІВ, САДЖАНЦІ, КОНСТРУКЦІЇ ПЛУГІВ, КОРЕНЕВА СИСТЕМА, ВИКОПУВАННЯ, ПАРАМЕТРИ РОЗПУШУВАЧА.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В Україні садивний матеріал плодкових культур виробляється в багатьох спеціалізованих розсадницьких господарствах. Проте його обсяги залишаються недостатніми для заміни старих малопродуктивних садів та не завжди відповідають сучасним вимогам щодо якості.

Викопування саджанців переважно здійснюється в листопаді, коли ґрунт має підвищену вологість і високу щільність, особливо на важких чорноземах. Коренева система дворічних саджанців кісточкових культур добре розвинена і розгалужена, що вимагає підкопування на глибину не менше 0,35 м. Процес витягування саджанців після підкопування наявними плугами потребує значних зусиль працівників і за класифікацією важкості трудового процесу відноситься до шкідливих умов праці. При цьому часто руйнуються найбільш цінні частини кореневої системи, що негативно впливає на сортність саджанців.

Причиною проблеми є те, що робочі органи існуючих плугів для викопування саджанців не забезпечують достатнього розпушування ґрунтової скиби та відокремлення ґрунту від коренів без їх пошкодження. Крім того, під час розпушування ґрунтова скиба зі саджанцем рухається по великій поверхні розпушувача, що збільшує обсяг виконаної роботи. Конструкції традиційних плугів не дозволяють регулювати режими роботи з урахуванням конкретних умов викопування.

Розв'язання цієї проблеми дозволить підвищити якість садивного матеріалу, поліпшити умови праці працівників розсадників та є актуальним завданням науково-технічного характеру.

**Мета і завдання дослідження.** Метою кваліфікаційної роботи є удосконалення умов праці працівників під час вибирання саджанців із підкопаного ґрунту та забезпечення збереження їх кореневої системи. Це планується досягти шляхом отримання зусилля на витягування саджанців, що не перевищує 70 Н, завдяки використанню активного розпушувача викопувального плуга.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити функції розпушувача, що істотно впливають на ефективне відокремлення кореневої системи саджанця від ґрунту, запропонувати відповідні

технічні рішення та створити конструктивно-технологічну схему робочого органу викопувального плуга;

- виконати теоретичні дослідження процесу переміщення ґрунтової скиби разом із саджанцем по поверхні розпушувача, обґрунтувати тип його поверхні та визначити геометричні параметри за критерієм мінімізації витраченої роботи;

- з'ясувати залежність між амплітудою коливань розпушувача та інтенсивністю розпушення ґрунтової скиби із саджанцем, а також розробити конструкцію важеля, що дозволяє регулювати величину цієї амплітуди;

- експериментально встановити оптимальні параметри розпушувача викопувального плуга, за яких забезпечуються покращені умови праці робітників і зберігається якість кореневої системи саджанців;

- здійснити агротехнічну оцінку роботи плуга ВПН-2М із запропонованим розпушувачем у реальних виробничих умовах викопування саджанців;

- провести економічний аналіз ефективності застосування модернізованого плуга ВПН-2М у виробництві розсадника.

**Об'єкт дослідження** – процес механізованого викопування саджанців плодових культур в умовах зрошення.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу параметрів та режимів роботи розпушувача викопувального плуга на поведінку ґрунтової скиби із саджанцем.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження, спрямовані на обґрунтування параметрів розпушувача, проводилися на основі положень теоретичної механіки з використанням методів диференціального та інтегрального числення. Оптимізацію параметрів виконано за методиками математичного планування екстремального експерименту. Польові експериментальні дослідження виконувалися відповідно до чинних методик і галузевих стандартів. Обробку експериментальних даних здійснювали методами математичної статистики за допомогою комп'ютерних програмних комплексів «Maple» та «MathCad».

**Практичне значення отриманих результатів.** У ході виконання роботи проведено теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на оптимізацію параметрів і режимів роботи робочого органу викопувального плуга, які можуть бути використані під час формування технічних завдань на нові або модернізовані машини. Створено дослідний зразок робочого органу для плуга ВПН-2, який

успішно пройшов випробування в Аграрній компанії «VITAGRO» (м. Волочиськ, Хмельницька область).

Розроблено методику вибору форми поверхні розпушувача, визначено його основні параметри та режими коливань. Побудовано математичну модель, що дає змогу оптимізувати параметри розпушувача з метою зменшення зусиль на витягування саджанців. Створено експериментальний зразок робочого органу та виконано агротехнічну оцінку показників роботи викопувального плуга, а також здійснено статистичну обробку й аналіз отриманих даних.

***Апробація результатів роботи.*** Основні положення та результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи доповідалися, обговорювалися на Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих науковців "Перші наукові кроки – 2025"», а також розглянуті на засіданні кафедри під час попереднього захисту кваліфікаційної роботи.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ПЛУГІВ ДЛЯ ВИКОПУВАННЯ САДЖАНЦІВ

#### 1.1. Технологія для підготовки саджанців плодових культур

Садивний матеріал для плодових культур вирощується в розсадниках із застосуванням різних технологій, які залежать від ґрунтово-кліматичних умов, сортової специфіки, схем розташування сіянців і відводків, строків проведення окулірування та щеплення, використання механізованих засобів, а також вимог до якості саджанців.

Виробничий процес у розсаднику включає закладку і догляд за маточними насадженнями в маточно-насінневому та маточно-живцевому садах, формування щеплених саджанців, розмноження клонових підщеп і проводиться на спеціально відведених ділянках [1]. Необхідною частиною плодових розсадників є ділянки для тимчасової та постійної прикопки садивного матеріалу на зимовий період.

Щеплені саджанці вирощують на ділянках формування: перше поле - для однорічних саджанців, друге - для дворічних. Ці ділянки є основою розсадницької сівозміни і можуть займати до половини площі розсадника [2]. Закладка першого поля здійснюється двома основними способами: висадкою однорічних підщеп (сіянців або відводків) та посадкою щеплених рослин (зимові щеплення). Ширше поширення здобув перший метод. Підщепи, підготовлені в маточнику клонових підщеп, висаджують у перше поле для подальшого окулірування. На наступний рік це поле стає другим для однорічних саджанців, а для отримання дворічних саджанців їх залишають ще на рік, утворюючи третє поле розсадника.

Вирощування саджанців передбачає відстань між рядами від 0,7 до 1 м [3–5]. Для підвищення механізації та ефективності використання енергетичних засобів у розсадниках застосовують міжряддя 0,7–0,9 м. Відстань між рослинами в ряду визначається сортопідщепними комбінаціями та технологічними вимогами [3, 6, 7]. При однаковій кількості рослин для однорічних і дворічних саджанців часто виникає недобір садивного матеріалу [8]. Для однорічних саджанців оптимальна відстань між рослинами в ряду — до 0,2 м, для дворічних — до 0,15 м. У розсадниках найчастіше застосовують рядне розташування рослин з міжряддям 0,7–0,9 м та відстанню між рослинами 0,15–0,25 м.

Технологічні операції в розсадниках є трудомісткими. Наприклад, на вирощування 45 тис. однорічних саджанців зерняткових культур (1 га) витрачається 5642,3 люд. год., що становить 125,4 люд. год. на тисячу саджанців [9]. Найбільш трудомісткими є окулірування і ревізія - 1840,5 люд. год. (32,6%), видалення дикої порослі - 758,1 люд. год. (13,4%), викопування саджанців - 396,7 люд. год. (7%). Механізовано виконують лише 241,3 люд. год., що відповідає рівню механізації 4,3%.

На зрошуваних та зв'язних ґрунтах застосовують плуг із подвійною тягою (два трактори та один викопувальний плуг), використовуючи трактори з тяговим зусиллям до 30 кН. Для оцінки енергоємності технології вирощування саджанців кісточкових культур проведено енергетичний аналіз машинних операцій відповідно до технологічних карт [9]. За методикою ДСТУ 3682-98 визначено витрати ресурсів на один гектар другого поля розсадника, що склали 30,8 ГДж, перевищуючи допустиме річне навантаження 15 ГДж/га [10, 11].

Найбільше трудових ресурсів (70% усіх витрат) потребують садіння підщеп у перше поле, обробіток ґрунту в міжряддях, внесення добрив, захист від шкідників і хвороб, а також викопування саджанців.

## **1.2. Функціональний аналіз конструкцій плугів для викопування саджанців**

Розробка механізованих засобів для викопування та відбору саджанців зумовлена особливостями технологічного процесу вирощування посадкового матеріалу. Викопування та відбору є заключними у циклі виробництва і визначають якість кінцевої продукції.

Існуючі машини та знаряддя для викопування саджанців відрізняються конструктивними рішеннями, проте складаються з набору елементів, що утворюють технічну систему (ТС) із певним функціональним призначенням. Функціональний аналіз дозволяє всебічно вивчити структуру ТС та визначити напрями її вдосконалення [12].

Під час такого аналізу уточнюються завдання:

а) визначення функцій кожного структурного елемента ТС та встановлення взаємозв'язків між ними;

б) визначення фізичних операцій, які здійснює кожен елемент, та їх взаємозалежності у межах системи.

Методика передбачає виділення структурних елементів у двох рівнях ієрархії: верхній рівень - ТС, нижній - неподільні елементи, кожен із яких виконує принаймні одну функцію щодо забезпечення роботи системи. Також виділяють об'єкти навколишнього середовища, які взаємодіють із ТС і впливають на її конструкцію. Головними елементами є ті, що безпосередньо контактують із предметами обробки та зовнішніми об'єктами; їхні функції збігаються з функцією ТС, а об'єкти середовища сприймають дію цих елементів.

Вирощування плодкових саджанців зумовлює потребу у ТС, що реалізує функцію викопування та вибірки рослин із збереженням кореневої системи. Конструктивне виконання ТС визначає рівень функціональності, який оцінюється за вимогами якості продукції та раціональними показниками.

Для зниження тягового опору при викопуванні на важких ґрунтах і забезпечення повного звільнення коренів від ґрунту, що зменшує трудові витрати, С. Г. Фрішев в Інституті садівництва УААН розробив макетний плуг [13]. На його основі створено викопувальний плуг ВСН-1, який пройшов державні приймальні випробування та рекомендований до серійного виробництва. Плуг ВСН-1 має раму з труби і навісним пристроєм. З правого боку трактора до рами приєднана викопувальна скоба, а зліва - ніж стійкості. На виході робочої поверхні скоби розташовані пальці-розпушувачі з поздовжньою увігнутістю. До скоби шарнірно приєднана розпушувально-сепарувальна решітка, що складається з трьох опуклих коромисел, які утворюють робочу поверхню і з'єднані між собою віссю коливань. Задня частина решітки через шатун зв'язана з кривошипно-шатунним механізмом.

Приведення механізму в дію здійснюється від валу відбору потужності трактора через карданну передачу, редуктор та приводний вал. Глибину занурення скоби налаштовують шляхом зміщення стійки опорного колеса. Конструкція плуга дозволяє виконувати викопування сіяньців і саджанців з кореневою системою на глибину до 0,4 м.

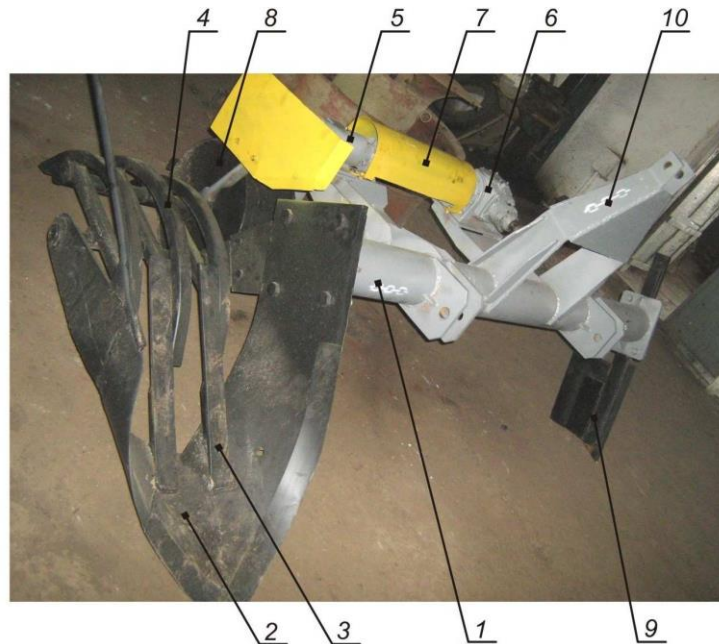


Рис. 1.1. Конструкція викопувального плуга ВСН-1.

Аналіз функціонального призначення складових робочого органу плуга подано в таблиці 1.1. У ній основні елементи позначено як  $E_0, E_{01} \dots E_{0n}$ , допоміжні - як  $E_1 \dots E_n$ , а зовнішні об'єкти, з якими взаємодіють елементи технічної системи, позначено символами  $V_1 \dots V_n$ . Відповідно, функції основних елементів визначено як  $F_0, F_{01} \dots F_{0n}$ , а функції допоміжних - як  $F_1 \dots F_n$ .

Таблиця 1.1

*Функціональний аналіз елементів робочого органу викопувального плуга ВСН-1*

Елемент		Функція	
Позна – чення	Найменування	Позна – чення	Опис
1	2	3	4
$E_0$	Викопувальна скоба	$F_0^1$	Вирізає ґрунтову скибу ( $V_{1.1}$ ) і кореневу систему саджанця (КСС) ( $V_{2.2}$ ) з ґрунтового масиву ( $V_1$ ) поля розсадника.
		$F_0^2$	Переміщує ґрунтову скибу ( $V_{1.1}$ ) з КСС ( $V_{2.2}$ ) до розпушувача $E_{01}$ .
$E_{01}$	Розпушувач	$F_{01}^1$	Руйнує ґрунтову скибу ( $V_{1.1}$ ) з КСС ( $V_{2.2}$ )
		$F_{01}^2$	Переміщує ґрунтову скибу ( $V_{1.1}$ ) з КСС ( $V_{2.2}$ ) до РСР ( $E_{02}$ )

E <sub>02</sub>	Розпушувально - сепарувальна решітка (РСР)	F <sub>02</sub> <sup>1</sup>	Руйнує ґрунтову скибу(V <sub>1.1</sub> ) з КСС (V <sub>2.2</sub> )
		F <sub>02</sub> <sup>2</sup>	Переміщує ґрунтову скибу(V <sub>1.1</sub> ) з КСС (V <sub>2.2</sub> )
		F <sub>02</sub> <sup>3</sup>	Сепарує ґрунтові агрегати (V <sub>1.1.1</sub> )
		F <sub>02</sub> <sup>4</sup>	Скидає саджанець (V <sub>2</sub> ) на поверхню ґрунтового масиву (V <sub>1</sub> ), утворену ґрунтовими агрегатами (V <sub>1.1.1</sub> )

Для плуга ВСН-1 побудовано конструктивно-функціональну структуру (рис. 1.2) на основі його аналізу його (див. таблиці 1.1).

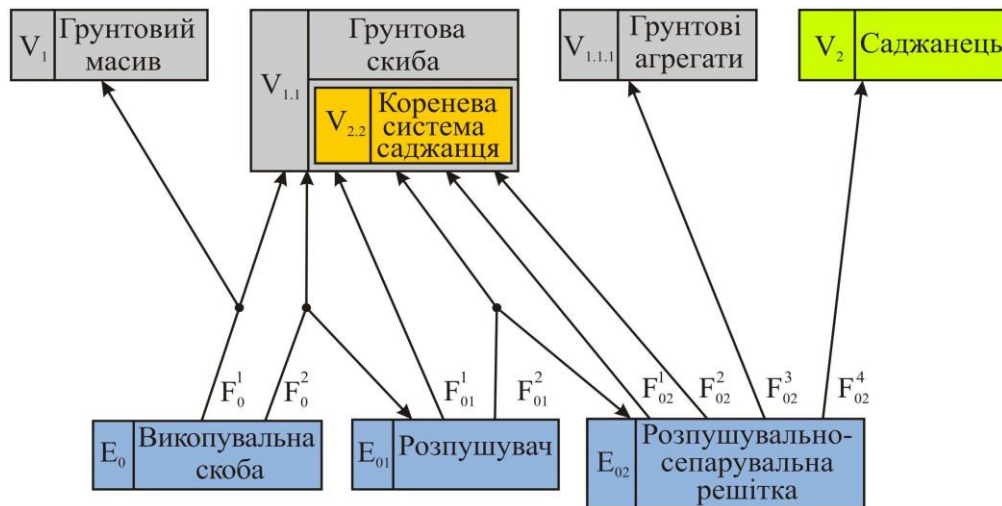


Рис. 1.2. Конструктивно-функціональна схема робочого органу плуга ВСН-1

Основною метою розробки було зменшення тягового опору плуга завдяки використанню коливального лемеша та руйнування ґрунтового блоку з кореневою системою саджанця до такого ступеня, щоб спростити процес його вибірки. Кінематичні параметри коливань лемеша становлять: амплітуда – 14 мм, частота – від 6 до 9 с<sup>-1</sup>. Технологічна швидкість руху викопувального агрегату перебуває в межах 0,8–0,9 м/с.

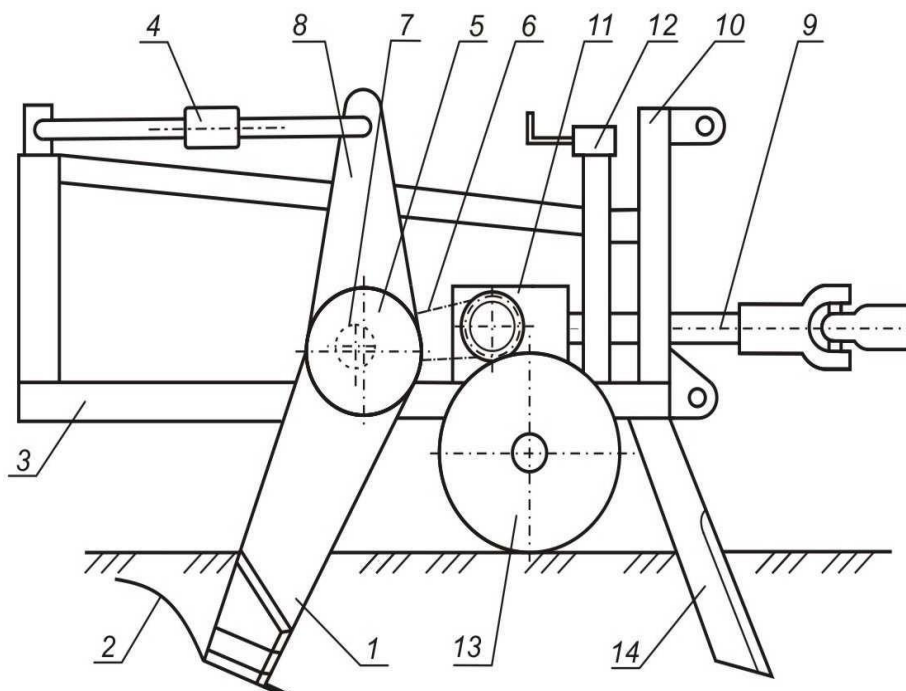


Рис. 1.3. Схема конструкції плуга ПВС-1 (ВП-1).

Конструкція плуга ПВС-1 (рис. 1.3) відрізняється від моделі ВСН-1 застосуванням просторової рами, ексцентрикового механізму для забезпечення коливальних рухів підкопувального лемеша та пристрою для регулювання кута його установки щодо дна борозни. До основних складових плуга належать викопувальна скоба 1 з подовжувачами 2, рама 3, коромисло 4, ексцентриковий механізм 5, ланцюгова передача 6, приводний вал 7, важіль 8, карданний вал 9, редуктор 11, опорні колеса 13 з гвинтовим механізмом 12 та реактивний ніж 14. Стійка скоби і важіль 8 закріплені на корпусі ексцентрикового механізму, який змонтований на приводному валу 7. Привід ексцентрикового механізму здійснюється від валу відбору потужності трактора через карданний вал 9, редуктор 11 і ланцюгову передачу 6. Плуг забезпечує підкопування саджанців на глибину до 0,4 м та ширину робочого захвату 0,55 м. Під час випробувань його продуктивність склала 0,39 га/год.

Були сформульовані вихідні технічні вимоги та виготовлено експериментальний зразок плуга ПВС-1 із зміненими кінематичними параметрами: амплітуда коливань – 7 мм, частота –  $9 \text{ с}^{-1}$ . Скоба складалася з шести нерухомо з'єднаних сегментів, а її профільна проекція виконана у вигляді ламаної кривої.

Виробничі випробування макетного зразка плуга ПВС-1 у державному підприємстві дослідного господарства «Мелітопольське» інституту зрошувального садівництва УААН при викопуванні дворічних саджанців зерняткових культур у

закінчилися відмовою плуга першої групи складності (злам приводного валу робочого органу) вже через чверть години роботи, що зробило його подальшу експлуатацію неможливою.

Функціональний аналіз був проведений для нових елементів робочого органу плуга, враховуючи вже розглянуті раніше елементи. Метою технічного рішення [17] є підвищення ефективності технологічного процесу викопування коренів рослин. Викопані корені на поверхні поля повинні відділятися від ґрунту з мінімальними пошкодженнями. У запропонованій конструкції покращення якості досягається за рахунок руйнування ґрунту різальними діями похилих елементів скоби. Пристрій для викопування коренів (рис. 1.4) складається з рами 1, на якій закріплена викопувальна скоба 2 у вигляді рівносторонньої трапеції із співвідношенням основ 1:2, де верхня основа відкрита, а нижня виконує роль лемеша.

Вздовж осі нижньої основи трапецієподібного лемеша 5 закріплена напрямна 3, по обидва боки якої симетрично встановлені ножі 4 з ріжучими лезами, розташованими під кутом до горизонтальної площини лемеша. Поверхні ножів вигнуті в сторони від осі симетрії. Крім того, на лемеші розміщений зуб 6. Перед викопувальною скобою на рамі змонтовані віддільники 7, розташовані симетрично відносно осі скоби. Положення опорних коліс 8 щодо лемеша регулюється за допомогою гвинтових механізмів 9, що забезпечують встановлення потрібної глибини викопування рослин.

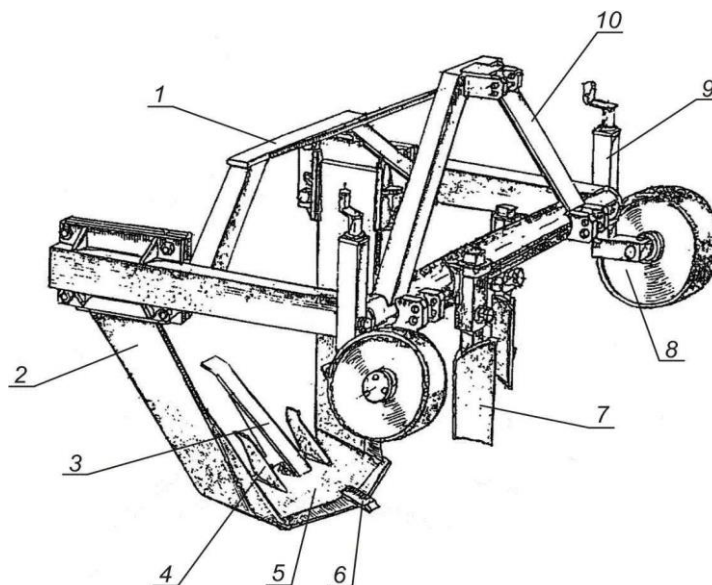


Рис. 1.4. Пристрій для підкопування та виймання коренів.

Одеський Завод «Полігон» виготовляє корчувач КВ-3 для розкорчування виноградників (рис. 1.5). Робоча глибина корчування становить 0,2–0,4 м, а ширина захвату - 0,6 м.



Рис. 1.5. Машина КВ-3 для викорчування виноградних кущів.

Викорчувач виноградних кущів містить функціонально схожі елементи з викопувальним плугом ВПН-2, але відрізняється окремими конструктивними рішеннями. Регулювання глибини викопування здійснюється зміною положення котка, а кут нахилу лемеша до дна борозни можна змінювати, підключаючи центральну тягу навіски трактора до одного або трьох отворів стійки навісного пристрою, що спрощує переналадку для різних умов роботи.

Сучасні технології вирощування садивного матеріалу вимагають застосування комплексу взаємопов'язаних машин і механізмів. Існуючі машини в плодкових розсадниках частково не відповідають цим вимогам через конструктивну недосконалість, а технологічні параметри окремих машин не узгоджені між собою, оскільки вони виробляються різними підприємствами, а деякі необхідні машини взагалі не випускаються.

З урахуванням актуальних технологічних стандартів і порад спеціалістів підприємство-розробник «Новатор» створило комплекс взаємопов'язаного обладнання. До цього комплексу входить викопувальний плуг ВПН-1 (рис. 1.6), який призначений для добування садивного матеріалу в плодово-ягідних і лісових розсадниках. Конструкція плуга ВПН-1 подібна до схеми ВПН-2, проте використано нові елементи базових деталей та робочих органів, а також змінено розташування

опорного колеса. Плуг містить раму 4, на ній по ходу руху розташована викопувальна скоба 2 зі знімним лемешем 1 та розпушувачами 6, а з протилежного боку – ніж стояка 5. Опорне колесо 3 закріплене на стояку скоби, що дозволяє регулювати його положення, переміщуючи по отворах. Навісний пристрій 7 забезпечує кріплення плуга до тракторів з тяговим зусиллям 30 або 50 кН. За технічними характеристиками, плуг ВПН-1 може викопувати саджанці на глибині до 0,4 м з робочою шириною 0,5 м.



Рис. 1.6. Плуг ВПН-1 для викопування садивного матеріалу.

Призначення складових частин робочого органу плуга ВПН-1 відповідає функціям аналогічних елементів плуга ВСН-1. Дослідження в цій сфері спрямовані на вирішення науково-технічних завдань, пов'язаних із розробкою та виготовленням нових сільськогосподарських машин для садівництва та розсадництва. Одним із результатів таких розробок є вібраційний копач саджанців ВКС-2, що призначений для механізації робіт у розсадниках.

Копач ВКС-2 адаптований для роботи за схемами посадки 0,7; 0,8 та 0,9 м і здатний одночасно обробляти два рядки сіянців плодівих культур, смородини, обліпихи, а також одно- та дворічні саджанці заввишки до 0,9 м. Серед його переваг - висока продуктивність і використання активного розпушення ґрунту, яке зменшує зусилля під час вилучення рослин та забезпечує краще очищення кореневої системи від частинок ґрунту.

Конструктивно копач (рис. 1.7) складається з рами 1, на якій розташовані основні елементи – викопувальні скоби 2, що приводяться в коливальний рух від ексцентрикового механізму 3, встановленого на приводному валу. Передача крутного моменту від ВВП трактора здійснюється через карданний вал, редуктор та ланцюгову передачу.

Під час пересування в роботі рама опирається на три опорні колеса 8, стан яких визначає глибину викопування коренів саджанців і регулюється гвинтовим механізмом 5. Навісний пристрій 7 виконаний за триточковою схемою. Коромисло 6 забезпечує зміну кута різання ґрунту, що дозволяє регулювати тиск робочої частини скоби на ґрунт. Поверхня скоби виконана у вигляді циліндра діаметрального перерізу, встановленого вздовж напрямку руху під заданим кутом до горизонту.

Викопувальна скоба копача ВКС-2 має ширину захвату 0,4 м, а глибина її роботи становить 0,3 м. Машина агрегатується з тракторами тягового класу до 30 кН, забезпечує робочу швидкість 3,2 км/год і може досягати продуктивності до 0,5 га/год.

Конструкція копача ВКС-2 включає аналогічний набір елементів, як у плуга ПВС-1, за винятком відсутності ножа стійкості та дещо іншої форми викопувальної скоби, при цьому функції елементів залишаються подібними.

Італійська фірма «Ditta – Berto Guerrino» виготовляє викопувальний плуг (рис. 1.8), конструкція якого включає стояк 5 із приєднаною викопувальною секцією. До неї входить леміш 1, розташований під кутом до напрямку руху, та коливальна розпушувально-сепарувальна решітка 3, сформована з поздовжніх пластин. Робочий орган оснащено гідроприводом: коливання решітки забезпечує ексцентрикова тяга 4, що приводиться в дію маніпулятором 6, з'єднаним із гідромотором.

Для регулювання передбачена можливість зміни положення робочого органу в горизонтальній і вертикальній площині за допомогою гвинтового механізму 7, а також переміщення всієї машини відносно поздовжньої осі трактора.

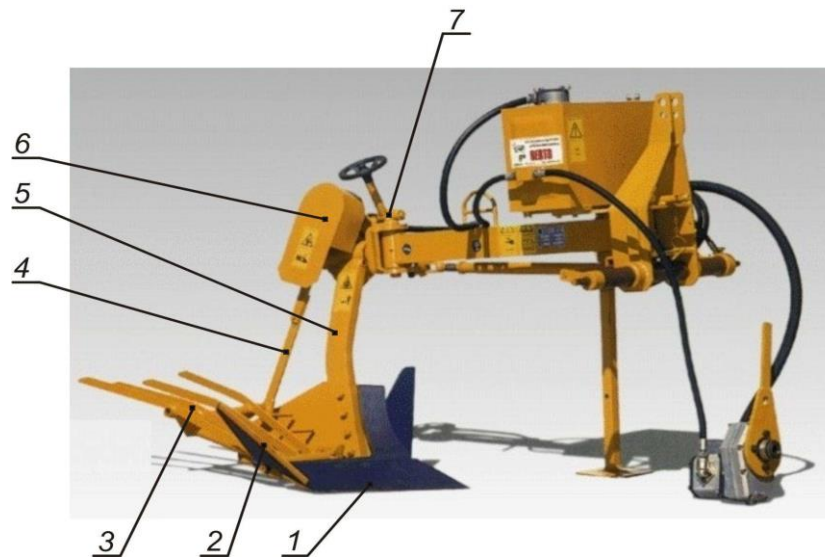


Рис. 1.8. Плуг для викопування, виробництва компанії «Ditta – Berto Guerrino».

Робочий орган, окрім лемеша, оснащений двома вертикальними ножами, що нахилені до заду, і забезпечують відокремлення коренів саджанця у площині по вертикалі. Для технологічного процесу під час викопування саджанців, руйнування ґрунтового шару сприяє зменшенню зусиль, що необхідні для вибирання рослин із ґрунту. Метою винаходу, що описаний для викопувальної машини, є підвищення продуктивності праці і зниження трудових витрат за рахунок поєднання операції ошмигування рослин і їх викопуванням.

Викопувальна машина (рис. 1.9) оснащена взаємопов'язаними рухомою 1 та нерухомою 2 скобами. Верхні частини рухомої скоби через тягу і шарнір з'єднані зі стійкою 4, яка може переміщатися в напрямній 3, закріпленій на нерухомій скобі. На стійці 4 встановлено пальцевий щит 5 механізму для видалення листя.

Пальцевий щит складається з рамки та ряду порожнистих горизонтальних перекладин. В пазах кожної перекладини на осях закріплені утримувачі за допомогою штифтів і пружин, що взаємодіють із внутрішньою поверхнею перекладин. До кінцевих частин утримувачів прикріплені гумові пальці. Пальці на щиті розташовані в шахматному порядку, механізм видалення листків розташований над гирлом брального апарату.

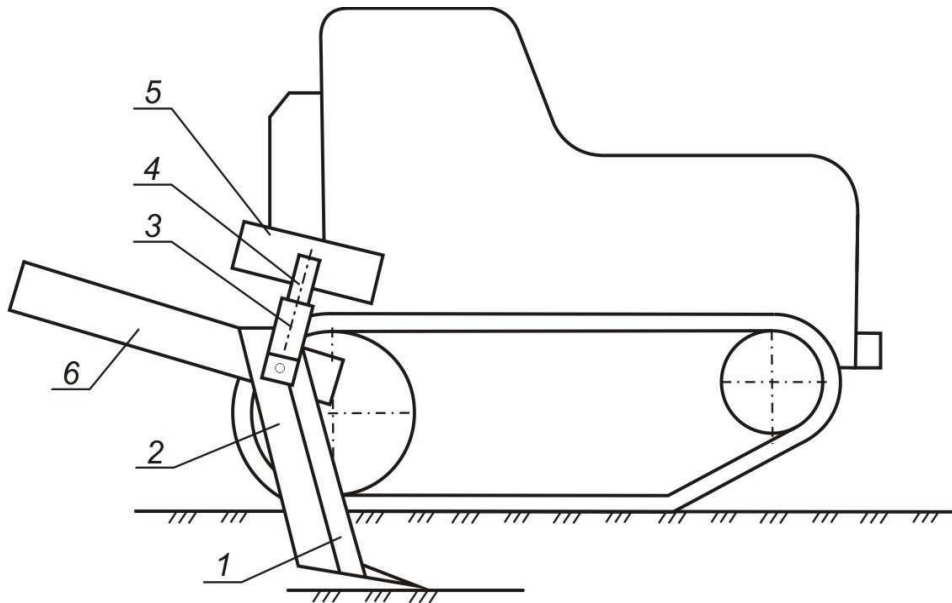


Рис. 1.9. Агрегат для виконання викопувальних робіт.

Технічне рішення, описане в патенті, спрямоване на інтенсифікацію процесу руйнування ґрунтових зв'язків із розміщеною в ньому кореневою системою. Викопувальна машина, реалізована за цим рішенням, показана на рис. 1.10.

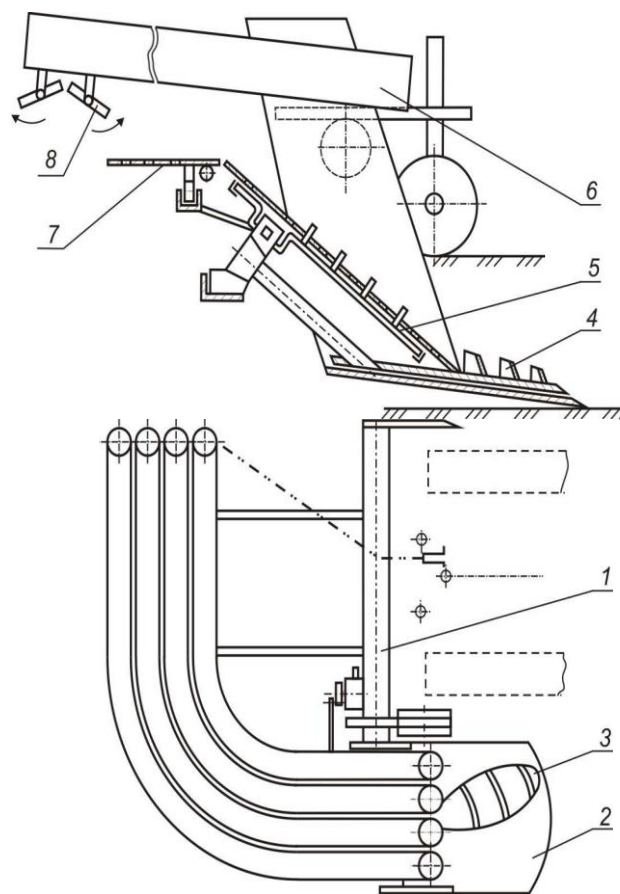


Рис. 1.10. Викопувальна машина

Викопувальна машина складається з рами 1, на якій монтується підкопувальну скобу 2 та розташовані пристрої для активного впливу на ґрунт. Першим є - коливальним підрізальним ножем 3 з клиноподібним розпушувачем 4 різної висоти. Другим - пальцевий оббивач ґрунтових решток з коренів рослин 5, який встановлений під нахилом до скоби та має отвори для сепарації ґрунтових агрегатів. Третій - коливний подовжувач 7, що впливає на ґрунтові агрегати, утримувані бральним апаратом 6. На бральному апараті змонтовані бітери 8, які забезпечують остаточне очищення коренів від ґрунту.

Саджанці, вилучені з ґрунту, ремені брального механізму транспортують у зону роботи бітерів, де рештки ґрунту повністю струшуються. Після цього саджанці укладаються на очищену ділянку поля або в накопичувач.. Функціональний аналіз дозволив визначити функції кожного структурного елемента, їх взаємозв'язок між собою та взаємодію з об'єктами навколишнього середовища в процесі роботи викопувальної машини.

### **1.3. Дослідження операцій підкопування і збору саджанців плодкових рослин**

Операції викопування та вибірки саджанців плодкових культур є заключними етапами технологічного процесу їх вирощування. При викопуванні саджанців за допомогою спеціалізованих знарядь можна виділити такі основні дії: різання ґрунту разом із кореневою системою саджанця, відділення коренів від ґрунтових агрегатів та транспортування саджанця на поверхню борозни або скидання на поле. Кожна з цих дій є функцією відповідних елементів робочих органів застосовуваних машин і знарядь.

Вибірка саджанців проводиться вручну після підкопування плугами або механізовано за допомогою викопувальних машин. Особливістю процесу є необхідність розглядати взаємодію робочих органів із системою «ґрунтова скиба - коренева система саджанця». Ця взаємодія базується на принципах різання клином, при якому визначаються умови та фактори, що впливають на ефективність процесу з мінімальними зусиллями на розрізання ґрунту та відокремлення кореневої системи від ґрунту.

За результатами теоретичних досліджень встановлено, що кінематичний режим роботи брального апарату залежить від співвідношення поступальної швидкості машини та швидкості бральних ременів і повинен знаходитися в межах 0,7–1,05. Затягування саджанців у бральний апарат визначається кутом  $\alpha$  між ременями, який повинен задовольняти умову  $\alpha \leq 2\varphi$ , де  $\varphi$  - кут зовнішнього динамічного тертя саджанця по гумі. Ефективність брання саджанців обумовлена тим, що сили тертя між рослинами і ременями перевищують опір саджанців вилученню з ґрунтової скиби. Корисна потужність, що витрачається на процес брання, визначається зусиллям на витягування саджанців, швидкістю руху бральних пасів та швидкістю трактора.

Для підвищення ефективності руйнування ґрунтового шару було запропоновано застосування коливальної рамки, що приєднується до задньої частини лемеша плуга ВПН-2 (рис. 1.11).

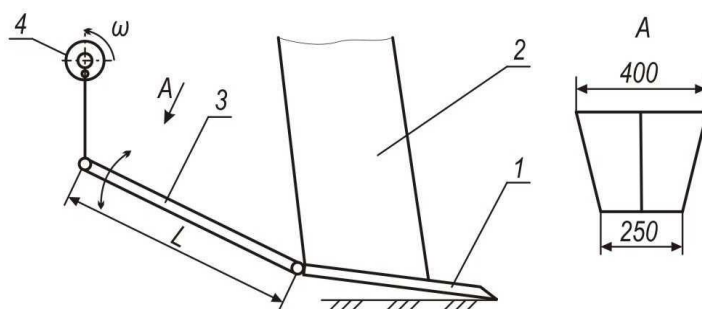


Рис. 1.11. Схема робочого вузла плуга ВПН-2 з коливальною рамкою.

Запропоновано методику визначення геометричних параметрів коливальної рамки 3 та її розташування щодо задньої кромки лемеша 1 робочого органу 2, виходячи з їх сумісної дії на ґрунт. Привід рамки здійснюється від кривошипно-шатунного механізму 4. Ключовою умовою ефективної взаємодії рамки з ґрунтом, який містить коріння, є забезпечення достатнього руйнування ґрунтового шару без його нагромадження під час руху, що дозволяє значно зменшити зусилля на вибірку саджанців.

Аналітично обґрунтована довжина рамки становить  $L = 0,73$  м. Поперечні розміри рамки визначені таким чином: більша основа трапеції (кінець рамки по ходу руху) – 0,4 м, менша основа (початок рамки) – 0,25 м. Кут різання лемешем прийнято в межах  $100\text{--}120^\circ$ . Згідно з дослідженнями [26], при цих значеннях на переміщення ґрунтового пласта двограним клином припадає до 14,3 % тягового опору.

Результати випробувань агрегату при швидкості руху 0,7 м/с, амплітуді коливань рамки  $A = 0,067-0,082$  м та частоті обертання кривошипу 6,0–8,5 с<sup>-1</sup> показали, що зусилля на витягання саджанців з ґрунту, залежно від сортового складу, зменшуються від 1,7 до 2,5 разів у порівнянні з плугом ВПН-2. Водночас у дослідженнях не наводяться докладні обґрунтування запропонованих робочих режимів та параметрів коливальної рамки.

Також було розглянуто технологію викопування та пересадки великих дерев із грудкою ґрунту. У процесі розробки конструкції викопувальної машини обґрунтовано оптимальні форму та параметри викопувальної скоби для ефективного розрізання ґрунту разом із корінням. Активна частина скоби представлена у вигляді сукупності прямолінійних лез (рис. 1.12), розташованих під певними кутами до вертикалі. Для визначення чинників, що впливають на опірні зусилля при різанні середовища «ґрунт – корінь», проведено аналіз сил, що діють на фаски ріжучого периметра скоби. Аналітично встановлено, що зусилля, необхідне для розширення щілини та розсовування коренів, можна зменшити за рахунок зміни форми заточки фасок ріжучого периметра (асиметрична зовнішня заточка), зниження кута заточування та зменшення тертя ковзання ґрунту по внутрішній поверхні леза, що створює умови мінімального стискання ґрунту.

До проєктування викопувальної скоби висунуті такі вимоги: при мінімально можливій довжині скоби (по ходу руху) довжина її леза має бути максимальною; забезпечення похилого різання з ковзанням лез бічних стінок скоби; лінія леза бічних стінок повинна бути нахилена у напрямку руху; геометричні параметри скоби та ріжучого профілю повинні гарантувати мінімальне зусилля різання системи «ґрунт – корінь» та зменшення тертя при переміщенні відокремленого кома з кореневою системою по внутрішній поверхні скоби.

Для визначення оптимальної форми та параметрів ріжучого профілю досліджувались п'ять масштабних моделей (рис. 1.13). Критерієм раціональності конструкції прийнято питомі зусилля різання. Найменші питомі зусилля спостерігалися для моделей 1 та 5. Для моделі 5 питомий опір зменшувався при кутах нахилу днища від 40° до 50°, а потім збільшувався по пологій кривизні.

Сумарне бічне стиснення ґрунту разом із кореневою системою дерев, визначене шляхом вимірювання тиску ґрунту на різних глибинах (120 мм, 210 мм та 290 мм від дна викопування), виявилось найменшим у випадку моделей 3 та 4.

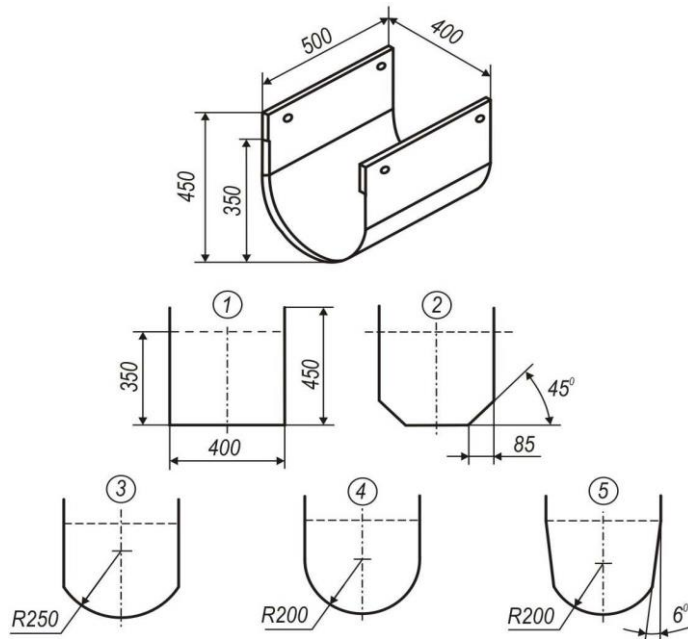


Рис. 1.13. Масштабні зразки викопувальних скоб.

Серед основних напрямів наукових досліджень у сфері машинного викопування саджанців виділяються задачі обґрунтування: технологічних схем роботи викопувальних машин; оптимальних параметрів робочих органів з метою інтенсифікації впливу на відокремлений ґрунт з кореневою системою саджанця.

Це дозволяє забезпечити ефективне руйнування ґрунту, подальше відділення його від коренів саджанця та зменшення енергоємності процесу.

Для вирішення зазначених завдань запропонована конструктивна схема викопувального плуга (рис. 1.14), яка включає скобу 1 напівкруглого поперечного перерізу; пластинчасті розпушувачі 2, встановлені на скобі; розпушувально-сепарувальну решітку 3, що разом із скобою та розпушувачами формує робочу поверхню з подовжнім профілем у вигляді увігнуто-опуклої кривої.

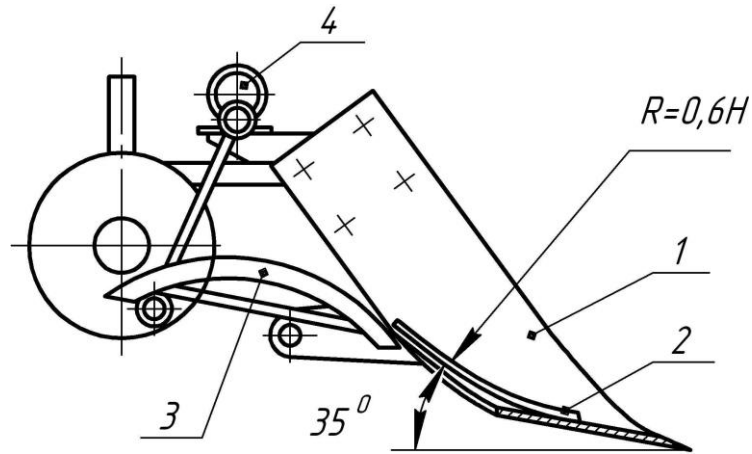


Рис. 1.14. Схема конструкції викопувального плуга ВСН-1

Для робочого органу обрано скобу з напівкруглим профілем, радіус якої дорівнює половині робочої ширини захвату. Радіус увігнутої частини поздовжнього профілю скоби прийнято не менше 0,6 глибини викопування ( $H$ ), при цьому центр кривизни розташовується вище нейтральної осі опору поздовжнього перерізу пласта вигину.

У рослинництві найбільш енергозатратним процесом є основна обробка ґрунту, яку можна виконувати як відвальними, так і безвідвальними способами. Безвідвальна обробка характеризується нижчими енерговитратами і спрямована на розпушення ґрунту та покращення його водного й повітряного режиму. Крім того, цей метод застосовується для захисту ґрунтів від водної та вітрової ерозії.

Безвідвальні операції здійснюють за допомогою розпушувальних, щілинорізальних та чизельних знарядь, що працюють у режимі глибокого розпушування. Ефективність таких технологічних процесів визначається формою та розташуванням елементів робочих органів. У даній роботі розглянуто задачу обґрунтування застосування малоенергоємних поверхонь зі змінним впливом на ґрунт. Запропонований принцип роботи полягає у встановленні відповідності між основними технологічними функціями робочого органу (різання, кришення, розпушування) та його конструктивними елементами. Досягнення цієї відповідності забезпечується аналітичним визначенням форми поздовжнього профілю робочого органу з регульованим впливом на оброблюваний ґрунт.

$$ax = 5,3tg \frac{\pi(by - 4,25)}{13,6} - 13,56, \quad (1.3)$$

де а й b - коефіцієнти масштабу.

Як показано на рис. 1.15, крива графіка функції поступово змінює увігнуту форму профілю на опуклу, забезпечуючи безперервну зміну кривизни. Це спричиняє перехід від деформації ґрунту різальним впливом до руйнування. Завдяки зміні кривизни поверхні сповільнюється поширення деформації в ґрунті, що дозволяє знизити енерговитрати процесу.

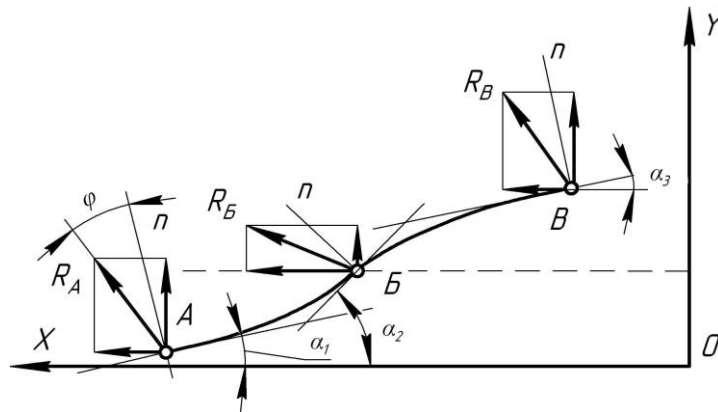


Рис. 1.15. Крива робочого органу з профілем із змінною кривизною.

Поверхні зі знакозмінним впливом використовуються в конструкціях знарядь типу скоби та півскоби (рис. 1.16)..

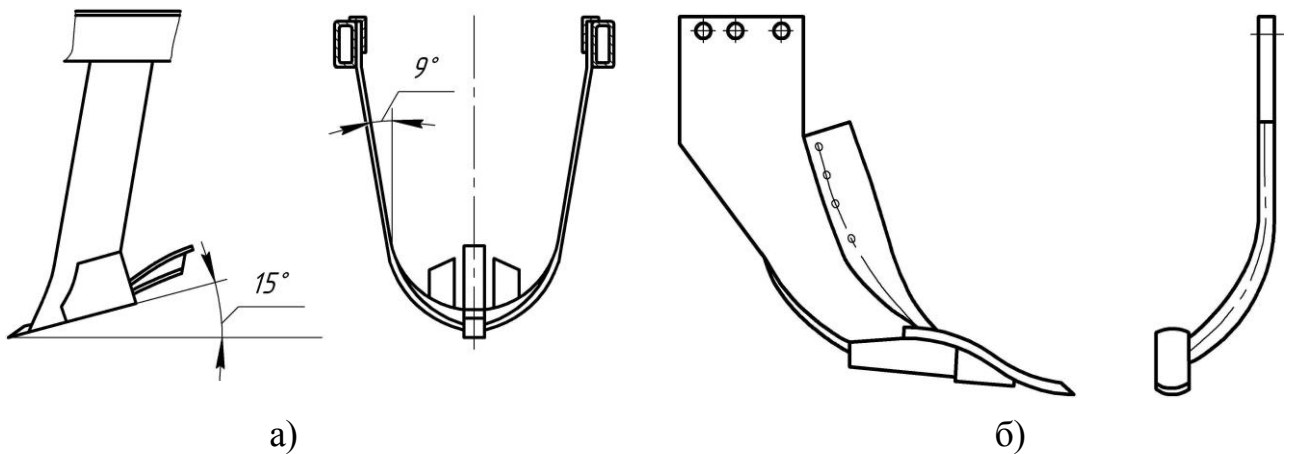


Рис. 1.16. Викопувальна скоба (а) та півскоба (б) зі знакозмінною кривизною.

У проведених дослідженнях розглянуто форми та параметри робочих поверхонь розпушувальних органів і їхній вплив на енерговитрати. Конфігурація та розташування робочої поверхні визначають характер взаємодії з ґрунтом, що змінює типи деформацій. Було запропоновано поздовжній профіль робочої поверхні у вигляді кривої, яка забезпечує рівномірний тиск на ґрунтовий пласт. Для визначення цього профілю ґрунт розглядається як консольна балка, що зазнає рівномірно розподіленого навантаження. У такому випадку форма профілю описується

рівнянням зігнутої осі пласта.

$$y = p(x^4 - 4l^3 \cdot x + 3l^4) / 24E \cdot J ,_z \quad (1.2)$$

де  $p$  - розподілена сила;

$l$  - довжина шару;

$E$  - модуль деформації;

$J$  - момент опору поперечного перерізу шару.

Рівняння представляє увігнуту криву, кривизна якої поступово зменшується від початкової до кінцевої точки. При безперервній зміні кривизни лінія профілю плавно переходить від увігнутої до опуклої, змінюючи знак кривизни. Робоча поверхня клиновидного профілю забезпечує деформацію ґрунту: на увігнутій ділянці відбувається стиснення з зсувом, а на опуклій - розтягування. Це дозволяє зменшити енерговитрати на кришення ґрунту завдяки уповільненню розповсюдження деформації та реалізувати ефект Баушінгера.

За результатами досліджень встановлено, що процес взаємодії робочого органу з ґрунтом визначають такі основні фактори: призначення робочого органу та його конструктивні характеристики (форма і розташування ріжучих елементів); кінематичні параметри роботи машини (траєкторія руху, кути різання); геометрія зрізаного шару ґрунту (ширина, товщина, площа поперечного перерізу); схема контакту робочого органу з ґрунтом (кількість відкритих поверхонь в оброблюваному масиві); фізичні властивості ґрунту (щільність, вологість, твердість, прилипання); механічні властивості (опір стиску, зсуву, розриву, відриву, вигину); фрикційні характеристики (кут внутрішнього та зовнішнього тертя, коефіцієнти тертя).

Ці фактори визначають ефективність роботи робочого органу та енерговитрати на обробку ґрунту.

### **Висновки до розділу**

Дослідження показали, що серед усіх технологічних операцій у розсадниках плодових саджанців найбільш трудомісткою є викопування саджанців із подальшою ручною вибіркою. Наявні конструкції робочих органів викопувальних

плугів не створюють оптимальних умов праці для робітників під час витягування саджанців із ґрунту.

На основі функціонального аналізу викопувальних плугів визначено, що ключовою операцією для зниження зусиль на витягування саджанців є розпушення ґрунтової скиби з кореневою системою. При цьому розпушення повинно супроводжуватися відділенням часток ґрунту від коренів із можливістю їх переміщення на дно борозни.

Для забезпечення ефективного розпушення та відділення ґрунту від кореневої системи саджанця розпушувач має бути активним. На його роботу суттєво впливають такі параметри: режим коливань із відривом ґрунтової скиби від поверхні розпушувача; кут нахилу поверхні розпушувача щодо горизонту; відстань між розпушниками; тривалість контакту поверхні розпушувача з ґрунтовою скибою.

Форма поверхні розпушувача повинна забезпечувати переміщення ґрунтової скиби з саджанцем із мінімальними витратами енергії.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗПУШУВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА РОБОЧОЇ ЧАСТИНИ ВИКОПУВАЛЬНОГО ПЛУГА

#### **2.1. Морфометричні показники молодих рослин**

Основними параметрами кореневої системи саджанців є діаметр і довжина коренів, а також кількість коренів горизонтального та вертикального напрямку. Значний вплив на утримуючу функцію коренів має їх архітектоніка та глибина залягання в ґрунті.

За даними Мережка І. І., від 90 до 95 % коренів саджанців яблуні (сортів Джанотан, Макінтош, Уманське зимове, зимове Плесецького) розташовані на глибині до 0,4 м. Було досліджено вплив глибини викопування саджанців (0,25 м, 0,4 м та 1 м) на їх приживання в саду в умовах різних ґрунтів та вологості. На основі отриманих результатів рекомендовано здійснювати викопування саджанців на глибині не менше 0,4 м. Ці дослідження проводились за умов вирощування без використання систем стаціонарного зрошення.

Для уточнення розмірних параметрів кореневої системи саджанців у ґрунтово-кліматичних умовах південного Степу було проведено власні дослідження щодо особливостей розташування коренів у ґрунті. Вивчення здійснювалося за методом «скелету», який дозволяє ретельно відтворити структуру кореневої системи, відкопуючи корені по їх природному розташуванню в ґрунті. Під час досліджень визначались довжина коренів відносно ряду (вздовж і поперек) та глибина їх залягання.

Для саджанців кісточкових культур було виділено три умовні зони росту коренів:

перша зона – 0,05–0,1 м;

друга зона – 0,2–0,25 м;

третья зона – 0,3 м.

Основна кількість коренів кореневої системи кісточкових саджанців знаходилась у другій зоні, у середньому до 15 штук.

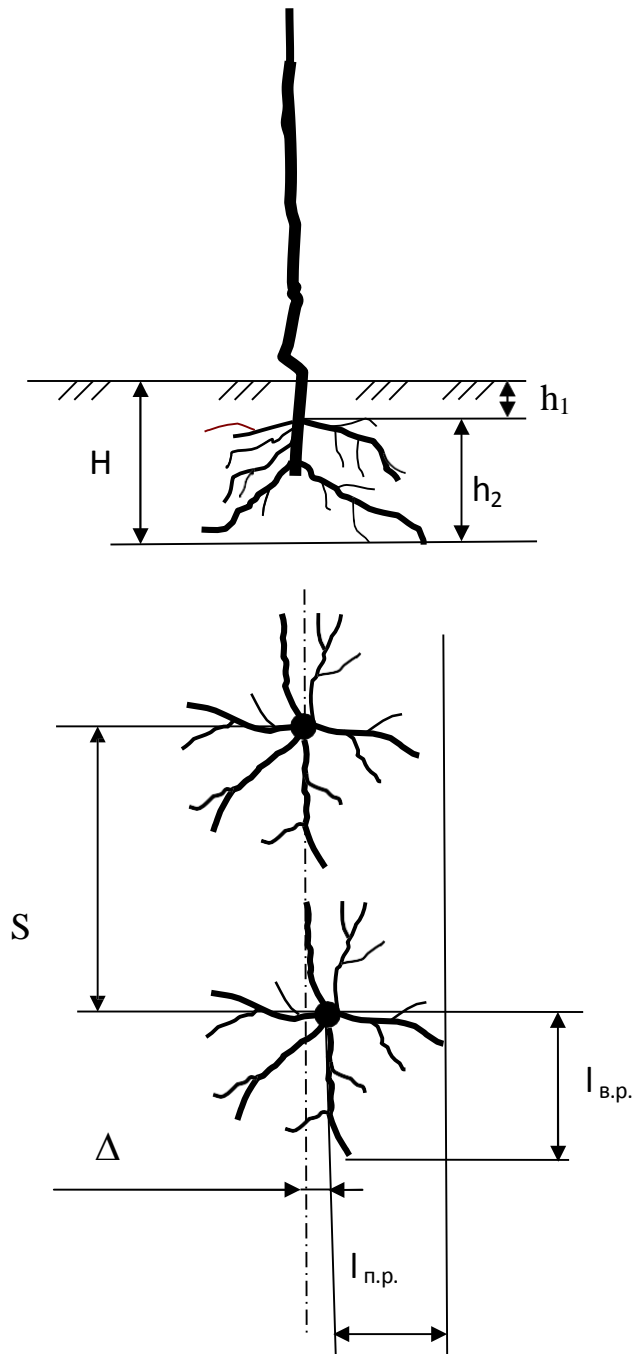


Рис. 2.1. Схема визначення параметрів кореневої системи саджанців:

$H$  – глибина залягання найнижчих коренів;  $h_1$  – рівень розташування верхніх коренів;  $h_2$  – інтервал, у межах якого зосереджена основна частина коренів;  $l_{в.р.}$  – довжина поширення коренів уздовж рядка;  $l_{п.р.}$  – ширина поширення коренів у поперечному напрямку;  $\Delta$  – зміщення саджанця відносно умовної осі рядка;  $S$  – дистанція між саджанцями в рядку.

За результатами статистичної обробки параметрів кореневої системи саджанців встановлено, що оптимальна ширина розпушувача повинна перебувати в межах 0,38–0,44 м. У цьому діапазоні знаходиться від 70 до 80 % маси кореневої системи саджанців. Вказані параметри ширини розпушувача узгоджуються з робочою шириною викопувальної скоби плуга ВСН-1, яка становить 0,55 м. Така ширина прийнята з урахуванням технологічних особливостей роботи плуга, зокрема забезпечення відділення до 90 % коренів саджанців від ґрунтового масиву, можливих відхилень саджанців від осі ряду та допустимого відхилення трактора від напрямку руху, що повинен співпадати з віссю ряду.

## **2.2 Обґрунтування конструктивної побудови робочого елемента**

### **2.2.1 Створення конструктивної моделі робочого елемента**

Садивний матеріал отримують під час викопування саджанців у другому або третьому полі розсадника. Викопування проводиться восени, починаючи з другої декади жовтня, на зрошуваних ґрунтах із підвищеною вологістю та щільністю, що характерно для чорноземів південного Степу важкосуглинистого гранулометричного складу.

Коренева система дворічних саджанців кісточкових культур розвинена та сильно розгалужена, що зумовлює необхідність викопування на глибину не менше 0,4 м. За таких умов застосування існуючих викопувальних плугів вимагає тягового зусилля понад 30 кН, що перевищує потужність найбільш розповсюдженого універсального трактора. Для забезпечення роботи одного плуга на глибині 0,4 м необхідне одночасне використання двох тракторів даного класу.

Вибірка саджанців вручну після підкопування пов'язана з високими трудовими затратами: одноразове піднімання та переміщення вантажів протягом робочої зміни до 300 Н для чоловіків і до 100 Н для жінок відноситься до шкідливих умов праці.

Застосування двох тракторів не лише ускладнює технічну організацію робіт, але й підвищує енергоємність процесу, знижує продуктивність праці та ефективність використання техніки й трудових ресурсів. Це обумовлює необхідність розробки конструктивно вдосконаленого робочого органу

викопувального плуга, здатного забезпечити ефективне підкопування саджанців за мінімального тягового зусилля.

Існуюча проблемна ситуація у сфері викопування саджанців обумовлена низкою недоліків існуючих конструкцій викопувальних плугів:

1. Пристрої, що призначені для руйнування та переміщення ґрунтової скиби з кореневою системою саджанців, не забезпечують достатнього розпушування та ефективного відділення ґрунтових агрегатів від коренів. Це призводить до того, що зусилля на витягування саджанців перевищують нормативні значення та відносяться до категорії важких умов праці.

2. Витягування саджанців із ґрунту, який не був належним чином розпушений і не забезпечує відокремлення ґрунтових агрегатів від кореневої системи, призводить до часткової втрати саджанців, зокрема обривів коренів.

Для отримання садивного матеріалу високої якості засоби механізації викопування повинні забезпечувати:

- збереження природних розмірних характеристик кореневої системи;
- повноту підкопування саджанців;
- відсутність механічних пошкоджень наземної та підземної частин рослин.

Важливим аспектом при вибірці саджанців є трудовий процес, на який впливають такі фактори, як:

- напруженість трудової діяльності, що визначається рівнем навантаження на нервову систему;

- тяжкість роботи, яка зумовлюється фізичними та динамічними зусиллями - масою вантажів, що підіймаються й переноситься, кількістю однотипних робочих рухів та ступенем нахилу тіла працівника.

Оптимальне поєднання цих чинників формує умови праці, що мають забезпечувати безпеку й комфорт працівників. Експлуатаційні параметри викопувальних машин - такі як енергоощадність, надійність, безпечність та технологічність - повинні відповідати сучасному рівню техніки або перевищувати його.

Процес викопування саджанців охоплює три ключові стадії: розрізання ґрунтового шару та відокремлення скиби разом із кореневою системою рослин; переміщення ґрунтової маси й руйнування зв'язків між її структурними агрегатами; розпушування скиби з корінням та подальше виведення її на поверхню поля.

### 2.2.2 Формування ключових критеріїв для модернізації робочого елемента

Аналіз основних вимог до робочого органу здійснюється на підставі вивчення засобів механізації, призначених для викопування саджанців (розділи 1.1–1.2). Для подальших досліджень було обрано викопувальний плуг ВСН-1. На його основі сформульовано ключові технологічні вимоги до робочого елемента, а саме:

1. глибина підкопування - до 40 см;
2. ширина робочого захвату - до 60 см;
3. забезпечення викопування одного рядка саджанців за один прохід агрегату.
4. розміщення саджанців на поверхні поля після викопування без їх пошкодження.

До основних функціональних вимог до розпушувача відносяться:

а) Забезпечення інтенсивного розпушування ґрунтової скиби з одночасним відділенням ґрунту від коренів під час переміщення;

б) Мінімізація площі контакту розпушувача з ґрунтовою скибою та кореневою системою саджанців;

в) Зменшення довжини переміщення ґрунтової скиби із саджанцем для забезпечення правильного розташування саджанців на поверхні поля;

г) Обмеження зусилля на витягування саджанців із підкопаного ґрунту до 70 Н.

На підставі цих вимог проведено оцінку конструкції плуга ВСН-1, що дозволило виявити основні недоліки:

1. Спершу ґрунтова скиба разом із кореневою системою саджанця переміщується та частково руйнується на пасивному розпушувачі, після чого потрапляє на вібраційну розпушувально-сепарувальну решітку. Такий порядок роботи скорочує час активного впливу робочих елементів на ґрунт і коріння, що негативно позначається на повноті розпушування ґрунтової маси.

2. Нерухоме та незмінне положення розпушувальних елементів і розпушувально-сепарувальної решітки не дає змоги коригувати кут їх установа. Це істотно зменшує здатність робочого органу підлаштовуватися під різні типи ґрунтів і варіативні розміри саджанців, які обробляються плугом.

е) Неврегульоване положення розпушувачів щодо горизонталі унеможлиблює врахування таких параметрів ґрунту, як щільність, вологість та кут зовнішнього тертя, а також висоту переміщення ґрунтової скиби при зміні глибини викопування саджанців;

ж) Фіксована відстань між розпушниками обмежує можливість регулювання інтенсивності відокремлення ґрунту від скиби під час її руху та розпушування. Цей показник залежить від параметрів кореневої системи, механічного складу ґрунту та маси ґрунтової скиби.

з) Конфігурація та розташування пластинчастих розпушувачів звужують ефективну робочу зону для сепарації ґрунту та сприяють появі ділянок налипання землі на поверхнях скоби й розпушувача.

На основі проведеного аналізу конструкції викопувального плуга ВСН-1 було сформовано функціональну структуру робочого органу та визначено взаємозв'язки його складових із ґрунтовою скибою та саджанцем (рис. 2.2).

Враховуючи технічні рішення, застосовані в конструкціях робочих органів викопувальних плугів, можна виокремити основні параметри, які безпосередньо впливають на ефективність роботи механізму.

У межах даного дослідження визначено параметри розпушувача робочого органу, що має лінійну поверхню, сформовану окремими розпушувальними елементами. Розпушувач складається з набору таких елементів, які разом утворюють решітчасту поверхню, що забезпечує інтенсивне розпушування ґрунтової скиби та відділення часток ґрунту від кореневої системи саджанців.

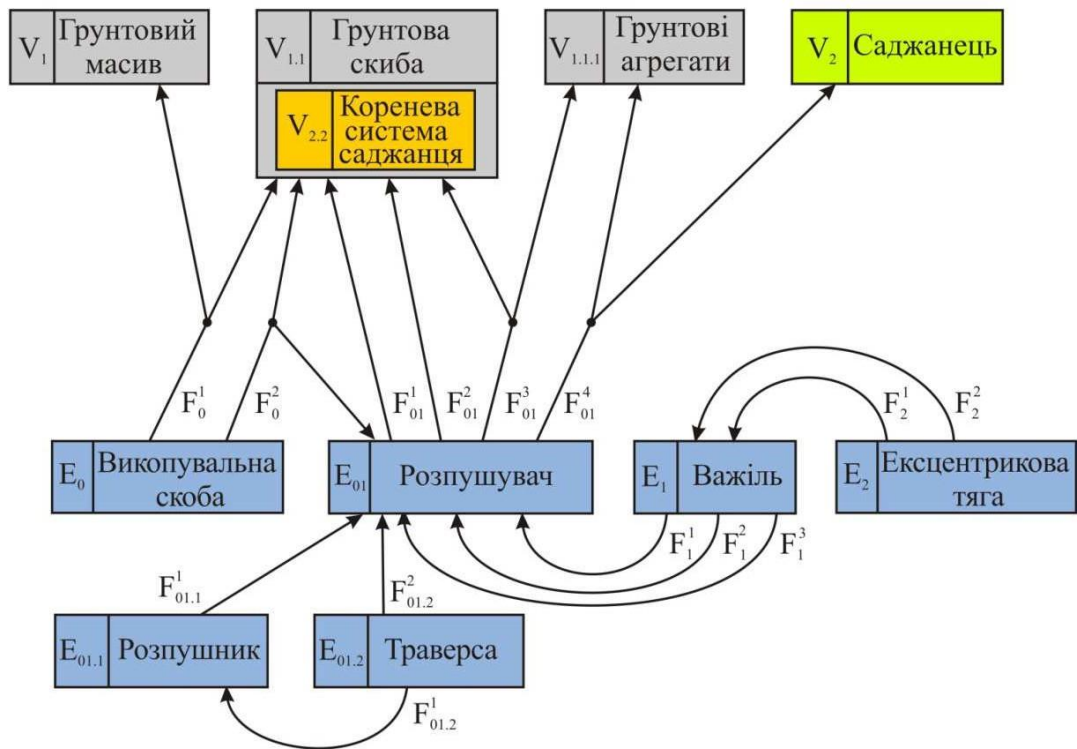


Рис. 2.2. Схема взаємодії конструктивних частин плуга з ґрунтовим шаром і саджанцем

Аналіз функціонального призначення елементів робочого органу викопувального плуга ПВС-1

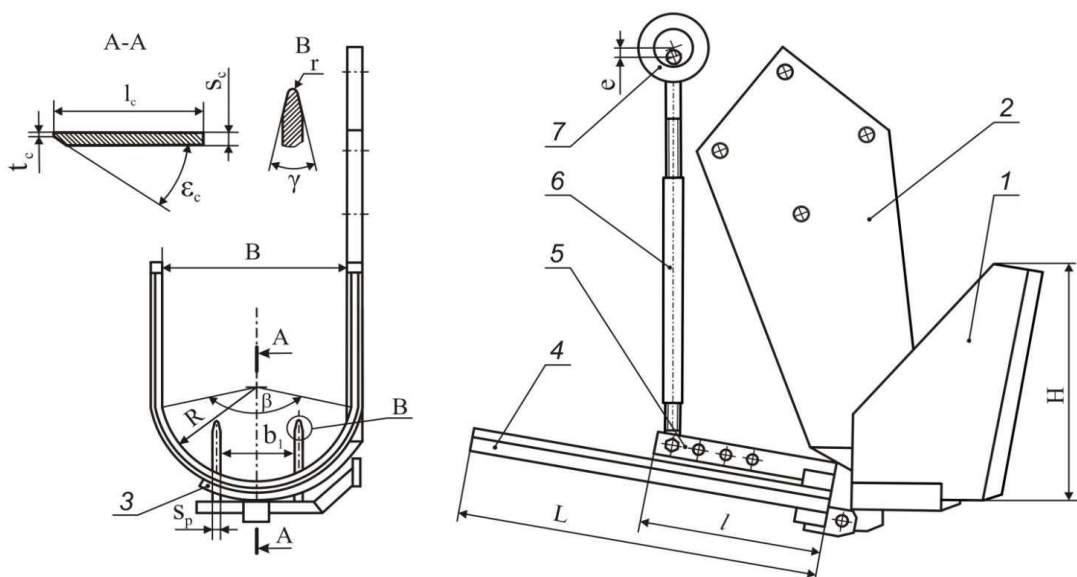


Рис. 2.3. Геометричні характеристики елементів конструкції робочої частини викопувального плуга: 1 – робоча скоба для викопування; 2 – опорна стійка; 3 – башмак-опора; 4 – елемент для розпушування ґрунту; 5 – важільний механізм; 6 – тяга з ексцентриковим приводом; 7 – ексцентриковий вузол.

Робочий орган (рис. 2.3) складається з викопувальної скоби 1, яка кріпиться на башмаку 3, з'єднаному зі стійкою 2. До башмака через шарнір приєднано розпушувач 4, що здійснює коливальні рухи під дією важеля 5 та ексцентрикової тяги 6, які приводяться в дію ексцентриковим механізмом 7.

Поперечний переріз викопувальної скоби поєднує криволінійну ділянку (вигнутий ніж) та прямолінійну частину (вертикальний ніж). Їхні робочі країки загострені, утворюючи ріжучі леза. Криволінійний ніж має циліндричну форму, тоді як вертикальні ножі виконані як плоскі елементи.

До геометричних параметрів викопувальної скоби належать (рис. 2.3):

довжина  $l_c$ ,  
висота  $H$   
ширина  $B$ .

Крім того, викопувальна скоба характеризується такими конструктивними показниками:

$c$  – товщина скоби;  $t_c$  – товщина її леза;  $\epsilon_c$  – кут верхнього (або нижнього, якщо скоба симетрична) загострення леза;  $r$  – радіус кривизни (параметр криволінійності) скоби;  $\beta$  – кут сектору криволінійної ділянки скоби.

До геометричних параметрів розпушувача (рис. 2.3) належать:

- довжина розпушувача  $L$ ;
- довжина важеля  $l$ ;
- висота розпушувача  $h_p$ ;
- міжосьова відстань між прутковими елементами  $b_1$ ;
- товщина пруткового елемента  $s_p$ ;
- загальна ширина розпушувача  $2b$ ;
- радіус заокруглення поверхні прутка  $r$ ;
- кут розходження робочих поверхонь розпушувача  $\gamma$ .

Положення розпушувача у просторі визначається такими величинами (рис. 2.4):

- кут нахилу його робочої поверхні відносно горизонту  $\alpha_p$ ;
- кут нахилу леза вертикальної частини скоби до горизонталі  $\delta_c$ ;
- задній кут нахилу фаски скоби щодо горизонтальної площини  $\psi_c$ .

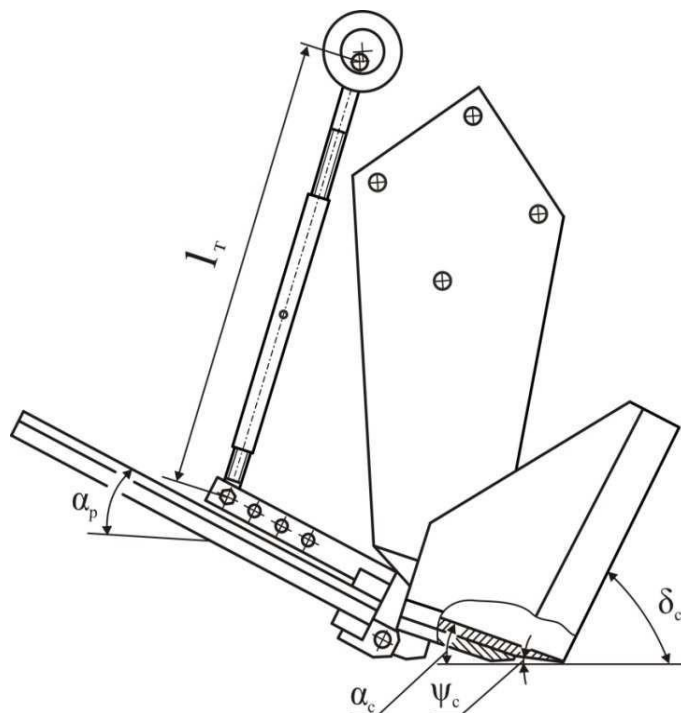


Рис. 2.4. Характеристики розміщення робочого органу викопувального плуга

Ексцентрикова тяга має довжину  $l$  (рис. 2.4), яку можна регулювати для встановлення необхідного кута нахилу поверхні розпушувача відносно горизонту.

Конструкція спроектована на основі функцій, що виконує розпушувач (табл. 2.3), і включає такі технічні рішення:

Розпушувач рухається коливально, при цьому його конструкція дозволяє змінювати положення розпушувача у горизонтальній площині.

Система важеля та ексцентрикової тяги забезпечує одночасне регулювання амплітуди коливань і кута нахилу розпушувача відносно горизонту.

На рис. 2.5 наведено конструктивно-технологічну схему робочого органу, адаптованого для встановлення на плуг ВПН-2, а також графічне відображення технологічного процесу викопування саджанців.

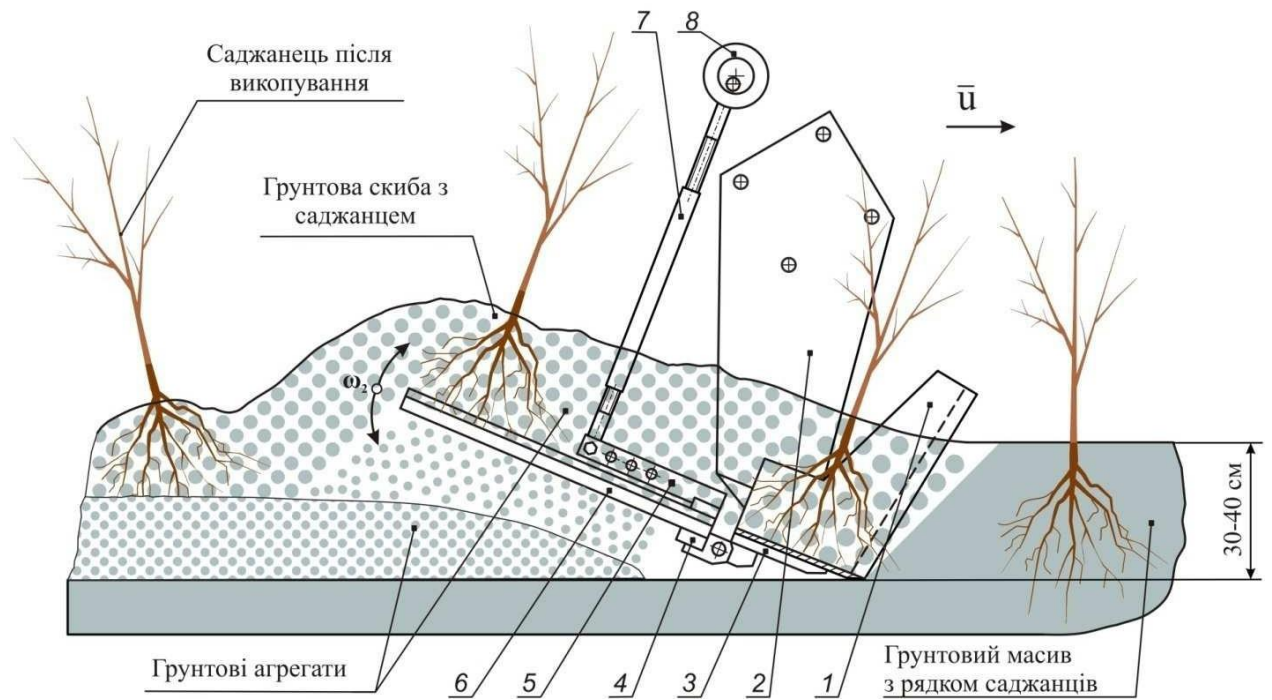


Рис. 2.5. Конструктивно-технологічна схема робочого органу викопувального плуга для викопування саджанців: 1 – робоча скоба для викопування; 2 – опорна стійка; 3 – башмак; 4 – траверса; 5 – важільний механізм; 6 – розпушувач ґрунту; 7 – ексцентрикова тяга; 8 – ексцентриковий механізм.

## 2.2. Кінематичний аналіз коливань розпушувача

На кінематичній схемі (рис. 2.6) показані складові робочого органу плуга та його приводу. Привід розпушувача (6) включає приводний вал (1) з ексцентриком (2), до якого приєднана ексцентрикова тяга (3).

Під дією цієї тяги розпушувач здійснює коливальні рухи навколо осі  $O_2$  під час обертання приводного валу. Вісь  $Y$  проведена уздовж хорди, що з'єднує крайні положення точок  $B_0$  і  $B_1$  важеля. Початок осі  $Y$  відповідає нижньому положенню розпушувача в точці  $O$ , яка збігається з  $B_0$ . Переміщення точки  $B$  уздовж осі  $Y$  визначається наступним рівнянням:

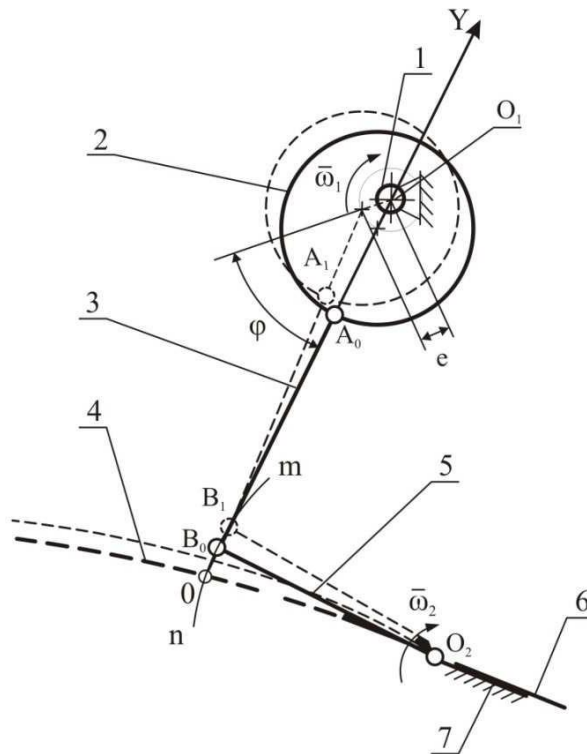


Рис. 2.6. Кінематичний аналіз коливань розпушувача робочого органу плуга:

1 – вал приводу; 2 – ексцентриковий механізм; 3 – тяга ексцентрика; 4 – робочий розпушувач; 5 – важільна передача; 6 – робоча скоба; 7 – опорний башмак

$$y_B = e - e \cdot \cos\phi, \quad (2.1)$$

де  $e$  – величина ексцентриситету;

$\phi$  – кут обертання ексцентрика.

Величина кута обертання ексцентрика визначається за формулою:

$$\phi = \omega_1 \cdot t, \quad (2.2)$$

де  $\omega_1$  – кутова частота коливань ексцентрика;

$t$  – час обертання ексцентрика.

Враховуючи рівняння (2.2), вираз для переміщення точки В (2.1) набуває вигляду:

$$y_B = e(1 - \cos(\omega_1 \cdot t)). \quad (2.3)$$

Наступною кінематичною характеристикою є кутове прискорення коливань точки В, яке розраховується за формулою:

$$\varepsilon_2 = \frac{e \cdot \omega_1^2 \cos(\omega_1 \cdot t)}{l}. \quad (2.4)$$

Враховуючи рівняння (2.7), обертальне (дотичне) прискорення точок розпушувача вздовж його довжини набуває вигляду:

$$a_{\tau} = \frac{e \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot u \cdot t}{l}, \quad (2.5)$$

де  $u$  - швидкість руху агрегату.

### **2.3 Аналіз руху ґрунтової скиби зі саджанцем по розпушувачу з різними конфігураціями робочої поверхні**

Встановлено, що форма робочих поверхонь розпушувача (їхні геометричні параметри та положення) безпосередньо впливає на величину тягового опору, який включає зусилля на переміщення ґрунтового масиву. У попередніх дослідженнях переміщення ґрунту здійснювалося по поверхнях, параметри яких залишалися незмінними.

Під час руху ґрунтової скиби по поверхні, яка здійснює коливальні рухи, відбувається більш інтенсивне розпушування ґрунту. Переміщення скиби разом із саджанцем здійснюється завдяки силі, що виникає у відповідь на опір незруйнованого масиву ґрунту.

Робочі органи викопувальних плугів оснащені розпушувальними пристроями, до складу яких входять розпушувачі, напрямні та відокремлювачі, на робочих поверхнях яких відбувається взаємодія з ґрунтом. У існуючих конструкціях робочі поверхні елементів формуються за схемами: пряма, опукла або ввігнуто-опукла. Проте систематичних досліджень впливу форми поверхні розпушувача на величину рухомої сили у наявних роботах не наведено.

Розглянуто переміщення ґрунтової скиби, виходячи з того, що маса саджанця значно менша від маси ґрунтового кома. Рух ґрунтової скиби по розпушувачу досліджувався для поверхонь із такими формами:

- а) пряма;
- б) опукла;
- в) ввігнуто-опукла крива.

Щоб визначити силу, необхідну для переміщення ґрунтової скиби, потрібно встановити її залежність від типу та параметрів форми поверхні розпушувача, який

поступово переміщується і здійснює коливальні рухи.

Для моделювання руху ґрунтової скиби по розпушувачу прийняті такі припущення:

Ґрунтова скиба розглядається як матеріальна точка (окрема частка ґрунту).

Відділення частки ґрунту від розпушувача відбувається без виникнення зворотної реакції з боку його поверхні.

Рух частки відбувається без відриву від поверхні розпушувача.

Маса частки ґрунту під час переміщення залишається сталою.

При цьому рух частки по криволінійній поверхні розпушувача вважається рівномірним і прямолінійним.

2.2.1 Рух частки ґрунту по розпушувачу з прямолінійною робочою поверхнею

Рух частки ґрунту під час переміщення по поверхні розпушувача складається з двох компонентів: відносного руху та переносного руху. Коливальні рухи розпушувача надають ґрунтовій частці обертальний переносний рух.

Для визначення прискорення та швидкості частки ґрунту (точка С) під час її руху по розпушувачу з прямолінійною напрямною була використана кінематична схема, показана на рис. 2.7.

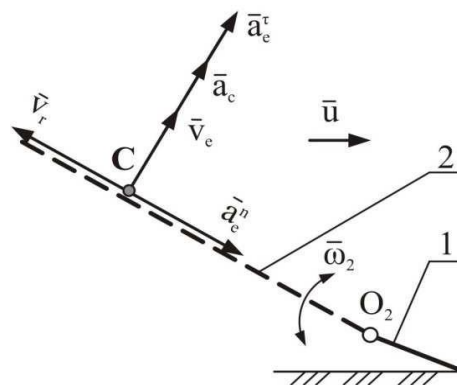
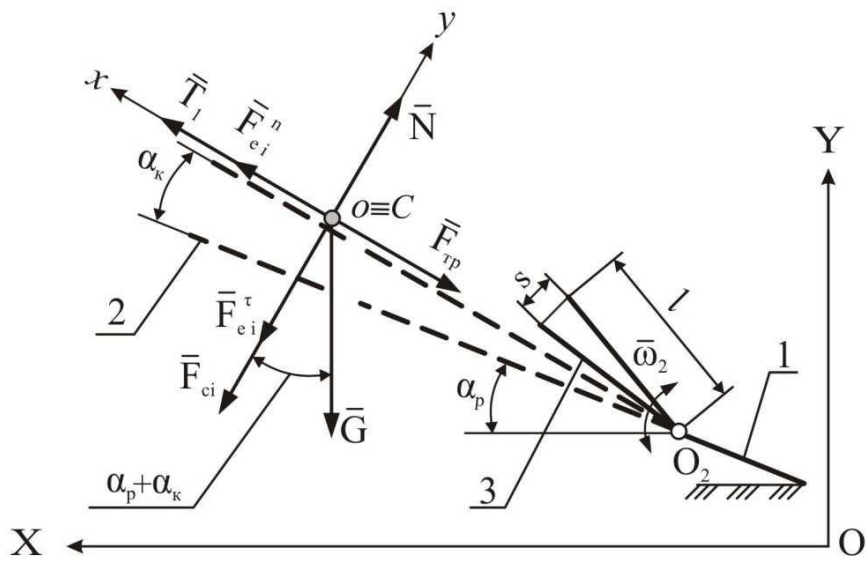


Рис. 2.7. Ілюстрація зміни швидкостей та прискорень частки ґрунту (точка С) під час її переміщення по поверхні розпушувача з прямолінійною напрямною в процесі коливальних рухів.

Для подальших розрахунків використано рухому систему координат  $xOy$  (рис. 2.8), яка відноситься до нерухомої інерційної системи  $XOY$  (лівобічна координатна система).



### 2.2.2 Рух частки ґрунту по розпушувачу з опуклою робочою поверхнею

Для оцінки рухомої сили, яка діє на частку ґрунту під час її переміщення по поверхні розпушувача з опуклою напрямною, аналізуються кінематичні характеристики цього руху.

Кінематична схема розгляду наведена на рис. 2.9 і дозволяє визначити залежність швидкості та прискорення частки ґрунту від параметрів опуклої поверхні, а також врахувати вплив коливального руху розпушувача на переміщення ґрунту.

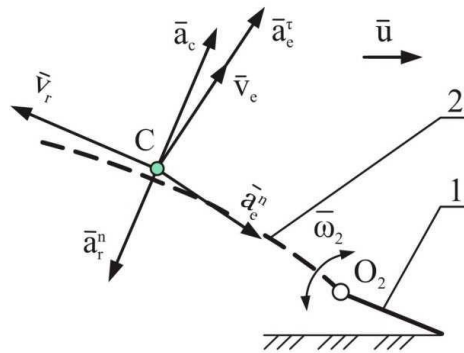


Рис. 2.9. Характер зміни швидкостей і прискорень частинки ґрунту під час її переміщення вгору по опуклій поверхні розпушувача: 1 – викопувальна скоба; 2 – розпушувальний елемент.

Схему дії сил на частинку ґрунту під час її руху по опуклій поверхні подано на рис. 2.10..

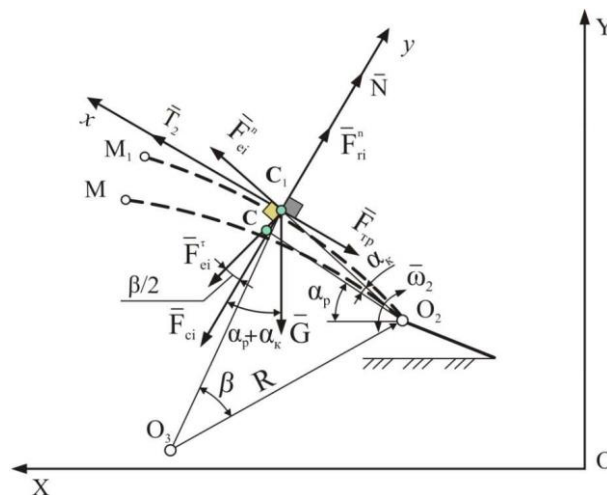


Рис. 2.10. Схема дії сил на частинку ґрунту під час її підйому по опуклій поверхні розпушувача: 1 – скоба; 2 – розпушувач; 3 – важіль.

Кут  $\alpha_p$  змінний, а його поточне значення буде визначатися з виразу

$$\alpha_p = \alpha_{pp} - \beta,$$

де  $\alpha$  - кут, що визначає початкове положення робочої поверхні розпушувача в точці  $O_2$  (рис. 2.11);

$\beta$  - кут закручування (торсії) напрямної поверхні розпушувача.

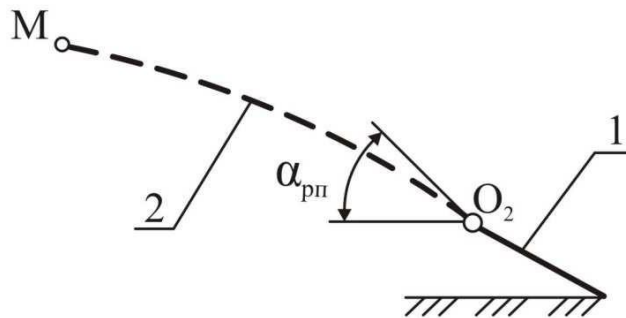


Рис. 2.11. Початковий кут нахилу поверхні розпушувача в точці  $O_2$ : 1 – викопувальна скоба; 2 – розпушувач.

Довжина розпушувача  $L$  відповідає довжині дуги  $O_2M$  (рис. 2.10), яка обчислюється за формулою:

$$L = R \cdot \beta,$$

де  $R$  - радіус дуги  $O_2M$ .

Довжину розпушувача  $L$  можна визначити через відносну швидкість  $v_r$  та час переміщення ґрунтової частки вздовж розпушувача. У цьому випадку кут  $\beta$  буде обчислюватися за формулою:

$$\beta = \frac{v_r \cdot t}{R}.$$

Остаточно для кута  $\alpha_p$  маємо

$$\alpha_p = \alpha_{pp} - \frac{v_r \cdot t}{R}.$$

2.2.3 Рух частки ґрунту по розпушувачу з ввігнуто-опуклою робочою поверхнею

Для оцінки рухомої сили, що діє на частку ґрунту при її переміщенні по поверхні розпушувача з ввігнуто-опуклою напрямною, проводиться аналіз кінематичних характеристик цього руху.

Кінематична схема, наведена на рис. 2.12, дозволяє визначити швидкість і прискорення частки ґрунту в залежності від кривизни поверхні та амплітуди коливального руху розпушувача. Це забезпечує розрахунок впливу форми робочої поверхні на інтенсивність руйнування ґрунту і величину рухомої сили.

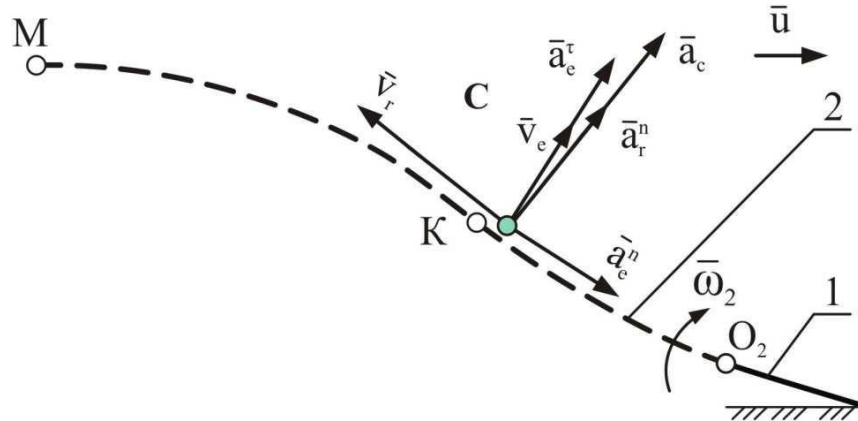


Рис. 2.12. Прискорення та швидкість переміщення ґрунтової частки вздовж увігнутої ділянки дуги  $O_2K$  розпушувача під час підйому: 1 – викопувальна скоба; 2 – розпушувач.

Розглянемо переміщення частки ґрунту по робочій поверхні розпушувача, яка має форму увігнуто-опуклої кривої з точкою перегину  $K$  (рис. 2.12). Поверхня кривої утворена двома дугами:  $O_2K$  та  $KM$ . Радіус дуги  $O_2K$  ( $R_1 \geq 0,6$  глибини викопування саджанців) вибрано на основі досліджень Фришева С.Г., що забезпечує ефективне руйнування ґрунтової скиби. Радіус дуги  $KM$  визначено з урахуванням умов сходу ґрунтової скиби з розпушувача на рівень денної поверхні поля.

У цьому випадку рухома сила, що переміщує ґрунтову частку по даній поверхні, розкладається на дві складові:

$$T_3 = T_{3.1} + T_{3.2}$$

$T_{3.1}$  – сила, що забезпечує переміщення ґрунтової частки по увігнутій ділянці дуги  $O_2K$ ;

$T_{3.2}$  – сила, що відповідає переміщенню ґрунтової частки по випуклій ділянці дуги  $KM$ .

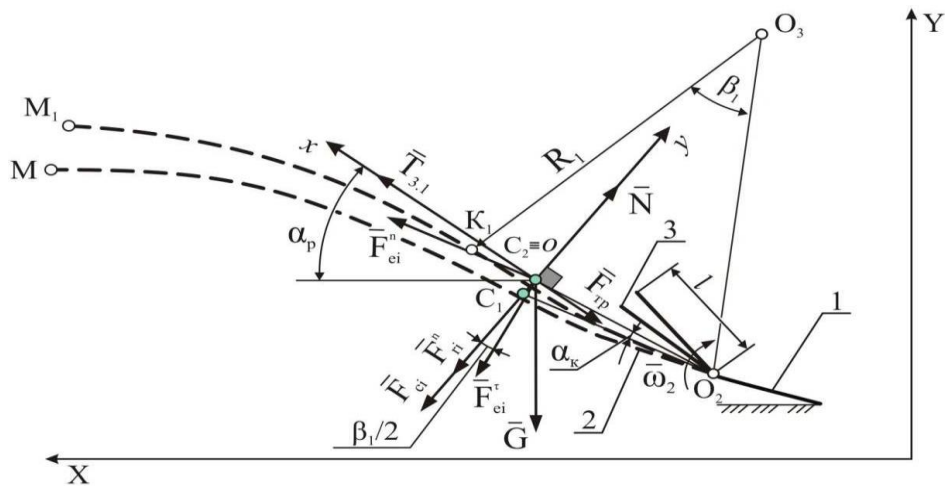


Рис. 2.13. Схема розподілу сил, що діють на частку ґрунту під час її переміщення по увігнутій ділянці комбінованої (ввігнуто-опуклої) напрямної під час підйому розпушувача: 1 – викопувальна скоба; 2 – розпушувач; 3 – важіль.

На основі отриманих аналітичних залежностей виконано розрахунки величини рухомої сили на переміщення частки ґрунту по поверхнях розпушувача з різними напрямними: прямою, опуклою та ввігнуто-опуклою. Обчислення проводились у програмному середовищі Maple.

Для розрахунків значень рухомої сили по розглянутих поверхнях були прийняті такі вихідні дані, наведені в таблиці 2.1:

Таблиця 2.1

Фіксовані вихідні параметри для розрахунку сили, необхідної для переміщення ґрунтової частки

е, м	$v_r$ , м/с	l, м	L, м	f	g, м/с	$\omega_1$ , с <sup>-1</sup>	m, кг
0,019	1,45	0,35	1	0,5	9,81	26	80

змінні вхідні параметри для розрахунку поверхонь з різними типами напрямних:

- прямої –  $\alpha_p=15^0$ ;
- опуклої –  $\alpha_p=25^0$ ,  $R = 2$  м;
- ввігнуто - опуклої –  $\alpha_p=15^0$ ,  $R_1 = 0,8$  м,  $R_2= 1,4$  м.

Графічне представлення результатів розрахунків рухомої сили подано на рис. 2.14–2.15..

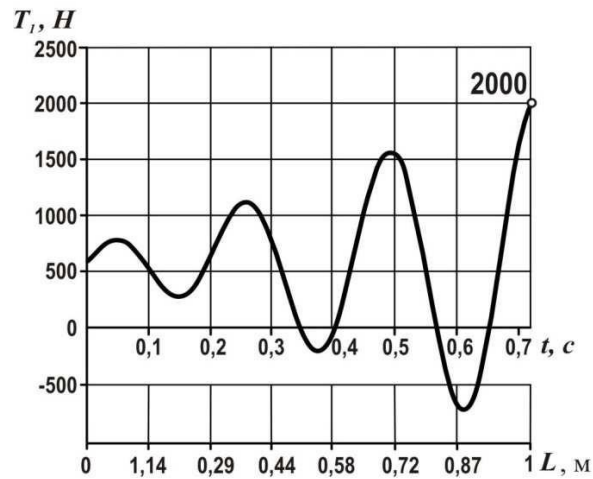


Рис. 2.14. Залежність рухомої сили від переміщення ґрунтової частки по розпушувачу з прямою напрямною.

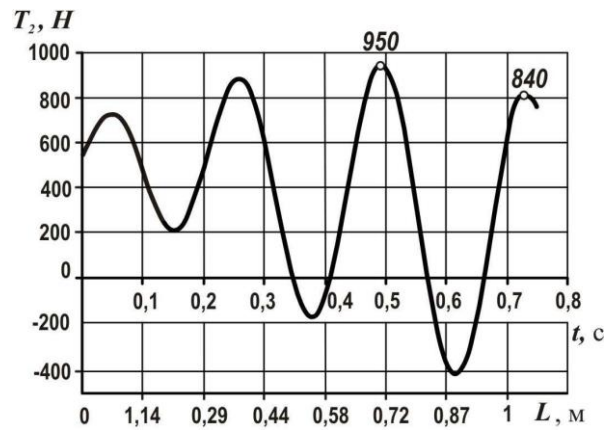


Рис. 2.15. Залежність рухомої сили від переміщення ґрунтової частки по розпушувачу з опуклою напрямною.

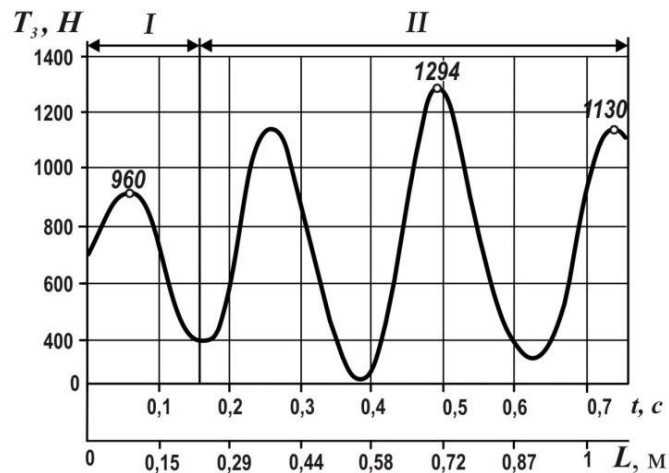


Рис. 2.16. Залежність рухомої сили від переміщення ґрунтової частки по розпушувачу з увігнуто-опуклою напрямною:

I – зміна рухомої сили  $T_{3.2}$ .

## 2.5. Розрахунок роботи сили, що забезпечує переміщення ґрунтової частки

### 2.5.1. Розрахунок роботи рухомої сили та оптимальний вибір форми поверхні розпушувача

Роботу рухомої сили визначено для поверхонь розпушувача з трьома видами напрямних: прямою, опуклою та ввігнуто-опуклою. Розрахунки виконані за умов переміщення частки ґрунту на однакову висоту  $a=0,25$  м та довжину  $L = 1$  м (рис. 2.17).

Для ввігнуто-опуклої напрямної довжина робочої поверхні розпушувача визначається як сумарна величина двох дуг:

$$L=L_1+L_2,$$

де  $L_1$  та  $L_2$  - довжини увігнутої та опуклої ділянок відповідно.

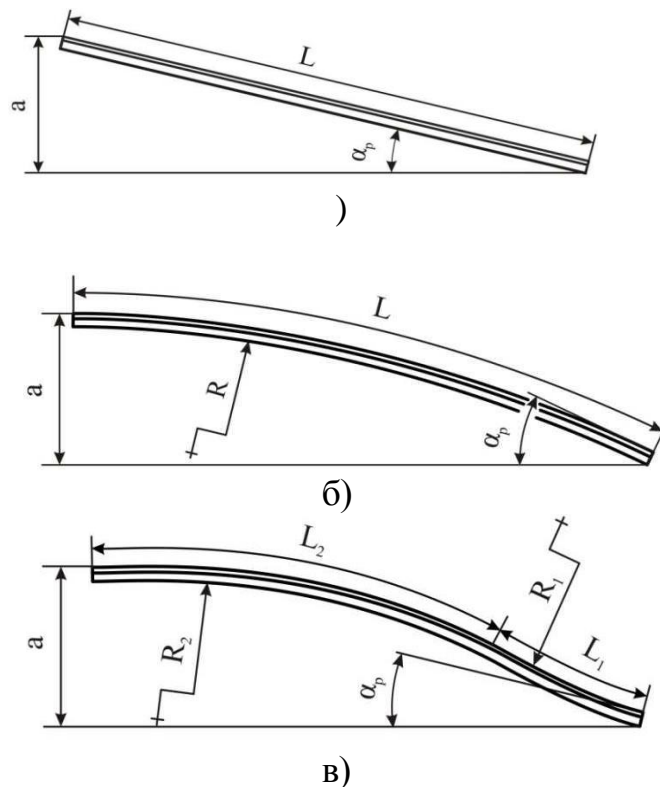


Рис. 2.17. Типи робочих поверхонь розпушувача: а) пряма; б) випукла; в) комбінована (увігнуто-опукла).

Обчислення роботи рухомої сили для розглянутих видів поверхонь розпушувача виконано з використанням тих же вхідних даних, що застосовувалися для визначення величини рухомої сили, із застосуванням програмного забезпечення Maple. Отримані результати представлені у таблиці 2.2

## 2.6. Розрахунок режиму коливальних рухів розпушувача

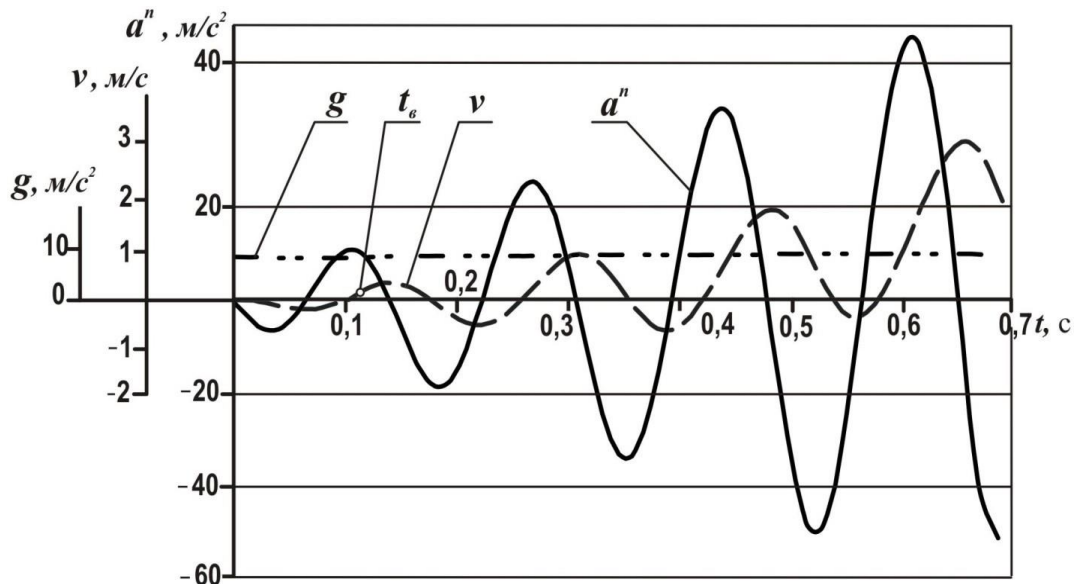
Розглядалось переміщення ґрунтової скиби разом із кореневою системою через розпушувач із опуклою напрямною, яка забезпечує мінімальну витрату роботи для транспортування. Рух ґрунту з кореневою системою саджанця відбувається шляхом ковзання по поверхні розпушувача і підтримується силою реакції незруйнованого ґрунтового горизонту. Це можливо за умови, що опір стисненню ґрунтового шару перевищує силу тертя, тому деформацією стиснення можна знехтувати, приймаючи модель ґрунтової скиби з кореневою системою як жорстку і недеформовану.

Для аналізу застосовано систему диференціальних рівнянь, що описують рух частки ґрунту вздовж осі  $y$ . Підкидання ґрунтової частки розпушувачем відбувається за умов:

нормальне прискорення розпушувача перевищує прискорення вільного падіння;

напрямок нормального прискорення спрямований вниз;

рух розпушувача здійснюється вгору.



Час відриву частки ґрунту від поверхні розпушувача, а також її швидкість ( $v$ ) та прискорення поверхні ( $a$ ) обчислено за допомогою програмного забезпечення Maple, використовуючи ті ж вхідні дані, що й при визначенні рухомої сили. Результати розрахунків представлені у вигляді залежностей на рис. 2.18.

Рис. 2.18. Графічне та аналітичне відображення зміни швидкості ( $v$ ) та прискорення ( $a$ ) поверхні розпушувача у часі.

З наведених залежностей (рис. 2.18) видно, що момент початку відриву частки ґрунту від поверхні розпушувача настає при  $t_v=0,11$  с. У цей момент швидкість  $v$  спрямована вгору, а прискорення  $aa_n$  – вниз, тобто виконуються всі три умови підкидання частки ґрунту.

Величина ексцентриситету визначається так, щоб прискорення розпушувача перевищувало прискорення вільного падіння у третьому квадранті обертання ексцентрика. За цих умов ексцентриситет повинен становити не менше  $e \geq 0,02$  м.

### **Висновки до розділу**

На основі біометричних параметрів кореневої системи саджанців визначено, що оптимальна ширина розпушувача повинна становити 0,38–0,44 м, що дозволяє охоплювати від 70% до 80% кореневої системи. Ці значення відповідають ширині викопувальної скоби (0,55 м) з урахуванням відділення близько 90% коренів саджанців та технологічних особливостей роботи плуга, зокрема можливого відхилення саджанців від осі ряду та трактора від напрямку руху.

Доведено, що конструкція розпушувача має забезпечувати можливість регулювання кута нахилу його поверхні відносно горизонту, амплітуди коливань і відстані між розпушувачами для ефективного розпушення ґрунту.

Встановлено, що мінімальна робота рухомої сили для переміщення ґрунтової скоби ( $A_T = 997$  Дж) досягається при використанні лінійчатої поверхні розпушувача з опуклою напрямною, радіус якої становить 2 м.

Дослідження показали, що режим коливань розпушувача з відривом частки ґрунту реалізується у третьому квадранті обертання приводного валу ексцентрика при чотирьох качаннях, частоті обертання  $6 \text{ с}^{-1}$ , швидкості руху агрегату 1,45 м/с та величині ексцентриситету  $e = 0,02$  м.

Визначено доцільність регулювання інтенсивності розпушення ґрунтової скоби шляхом зміни амплітуди коливань розпушувача через зміну довжини важеля. Оптимальна довжина важеля знаходиться в межах 0,35–0,45 м.

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### **3.1. Лабораторно-польові випробування викопувального плуга з новою конструкцією робочого органу**

##### 3.1.1. План та методика проведення лабораторно-польових випробувань

Метою проведення польових випробувань було визначення продуктивності та ефективності роботи викопувального плуга ВПН-2М, обладнаного експериментальною моделлю робочого органу.

Програма досліджень передбачала виконання таких етапів:

- виготовлення дослідного зразка робочого органу для плуга ВПН-2М, параметри форми якого були обґрунтовані у теоретичній частині роботи;
- проведення математично планованого експерименту щодо визначення конструктивних характеристик розпушувача, зокрема:
  - кута його нахилу до горизонтальної площини;
  - довжини важеля;
  - відстані між окремими розпушувальними елементами.

Для реалізації поставлених завдань робочий орган (рис. 3.1) було виготовлено на підприємстві «Кам'янець-Подільськсільмаш» (м. Кам'янець-Подільський). Конструкцію робочого органу розроблено таким чином, щоб забезпечити його сумісність із рамою плуга ВПН-2.

На рамі плуга ВПН-2 (позиція 12) змонтована стійка (2) з башмаком (4), на якому закріплена викопувальна скоба (3). До башмака через шарнір приєднана траверса (5), на якій розташовані розпушники (6) з можливістю регулювання їхнього положення у горизонтальній площині. Важіль (7) жорстко з'єднаний з траверсою та через шарнір сполучається з ексцентриковою тягою (8), яка підключена до ексцентрикового механізму (10), встановленого на приводному валу (11). Приводний вал, своєю чергою, з'єднаний з редуктором для передачі обертового руху.

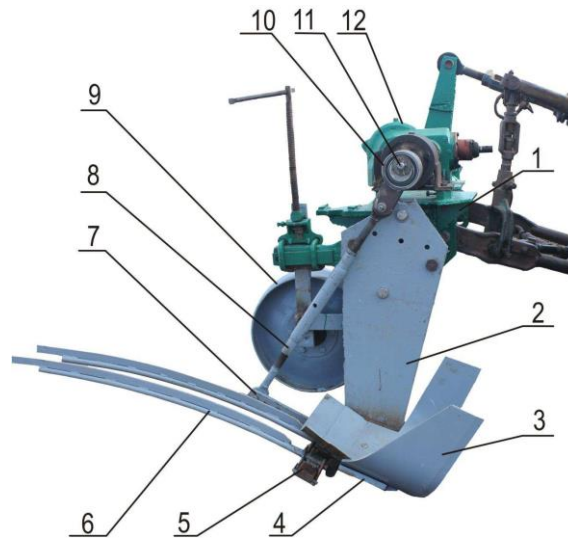


Рис. 3.1. Експериментальна конструкція робочого органу на рамі плуга ВПН-2: 1 – основна рама; 2 – опорна стійка; 3 – викопувальна скоба; 4 – башмак-опора; 5 – траверса; 6 – робочий розпушувач; 7 – важільна передача; 8 – ексцентрикова тяга; 9 – опорне колесо; 10 – ексцентриковий механізм; 11 – приводний вал; 12 – редуктор передачі.

Принцип роботи викопувального плуга полягає в наступному. Під час руху агрегату скоба відокремлює ґрунтову скибу із саджанцями від основного масиву та подає її на розпушувач. В процесі переміщення скиби до поверхні поля відбувається осипання ґрунту крізь щілини між прутковими розпушниками. Після цього саджанці сходять з розпушувача та опиняються на дні борозни, що утворюється після викопування.

Робочий орган забезпечує можливість регулювання таких параметрів:

- кут нахилу поверхні розпушувача до горизонту залежно від глибини підкопування;
- відстань між прутковими розпушниками;
- амплітуда коливань розпушувача, що змінюється шляхом регулювання довжини важеля.

### 3.1.1. Математичне планування дослідів

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень та визначення найбільш ефективних параметрів розпушувача були проведені польові експерименти, організовані за методом математичного планування.

## Вибір факторів для оптимізації

Фактори, що впливають на умови праці під час вибірки саджанців та забезпечують належну якість їх кореневої системи, поділяються на керовані та некеровані.

Керовані фактори поділяються на:

Технологічні:

- глибина викопування саджанців;
- ширина захвату робочого органу;
- швидкість руху агрегату.

Конструктивні:

- довжина розпушувача;
- довжина важеля;
- відстань між розпушниками;
- величина ексцентриситету;
- кут нахилу розпушувачів відносно горизонту.

Кінематичні:

- частота обертання приводного валу ексцентрика;
- амплітуда коливань розпушувача.

Некеровані фактори включають:

- фізичні властивості ґрунту (структура, об'ємна маса, вологість);
- технологічні властивості ґрунту (схильність до розпушування та подрібнення, твердість, коефіцієнт тертя);
- біометричні показники саджанців (розмір крони та кореневої системи, кількість і товщина коренів);
- масу ґрунту, що утримується кореневою системою під час витягування;
- масу ґрунту на поверхні розпушувача під час його руху та сепарування.

Тип ґрунту та його фізико-технологічні властивості (об'ємна маса, вологість, твердість, кут зовнішнього тертя) були враховані при формуванні умов експерименту.

В якості критерію оптимізації обрано силу, необхідну для витягування саджанців із розпушеного ґрунту, із забезпеченням належної якості кореневої системи.

Метою досліджень було визначити такі параметри розпушувача, які гарантують допустимі умови праці (для жінок – до 70 Н, для чоловіків – до 150 Н) та відповідають технічним вимогам щодо якості саджанців.

#### Визначення рівнів варіювання факторів

Рівні зміни параметрів встановлені для: кута нахилу розпушувача до горизонту (X1), довжини важеля (X2) та відстані між розпушниками (X3). Значення X1 обчислено за відповідною формулою та вихідними даними (п. 2.5.3). Графічну залежність роботи рухомої сили від цього фактору наведено на рис. 3.3.

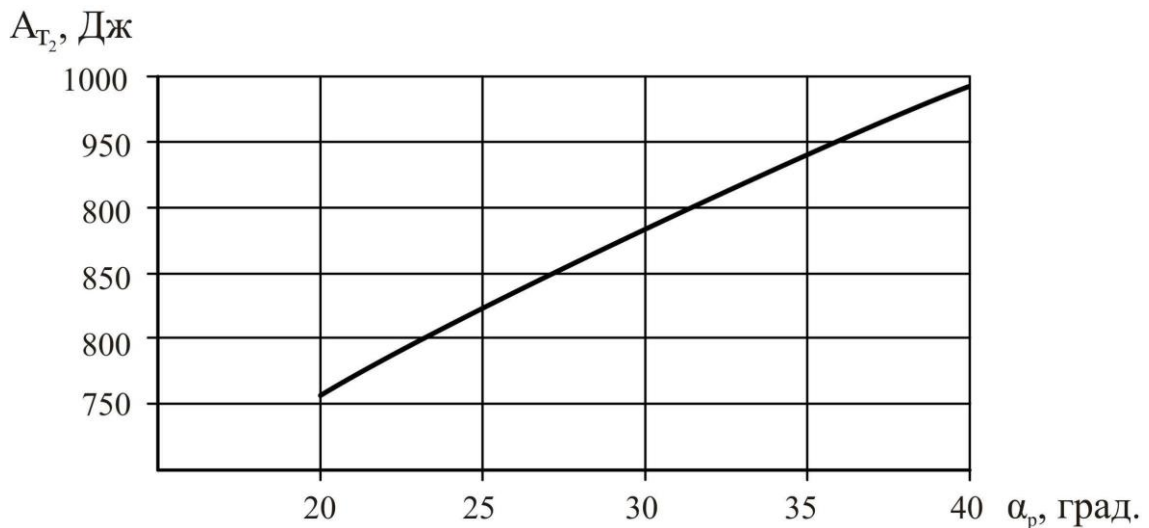


Рис. 3.3. Залежність величини роботи рухомої  $A_{T_2}$  від кута нахилу поверхні сили від кута нахилу розпушувача до горизонту.

За графіком наведеної залежності видно, що збільшення кута нахилу розпушувача призводить до зростання величини роботи рухомої сили, тому доцільно обирати менші кути. Водночас зменшення кута обмежується тим, що при заданій глибині викопування збільшується шлях переміщення ґрунтової скиби до поверхні поля, що подовжує час взаємодії розпушувача з ґрунтом і, як наслідок, також підвищує величину роботи рухомої сили.

Для прийнятої довжини розпушувача межі варіювання кута його нахилу до горизонту визначено в діапазоні від  $25^\circ$  до  $35^\circ$ .

Значення рівня варіювання фактора X2 (довжина важеля) визначено за відповідною формулою та вхідними даними (п. 2.5.3). Залежність роботи рухомої сили від довжини важеля представлено на рис. 3.4.

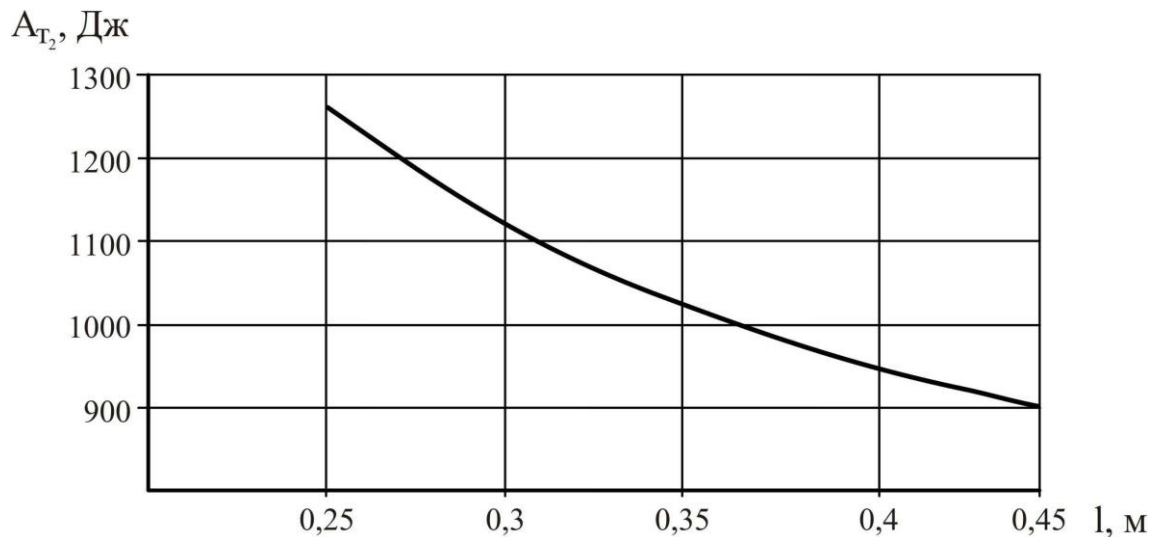


Рис. 3.4. Вплив довжини важеля на величину роботи рухомої сили ( $A_{T_2}$ )

За даними, представленими на рис. 3.4, робота рухомої сили змінюється найбільш різко на ділянці довжиною 0,25–0,3 м. Тому для експерименту було обрано діапазон довжини важеля від 0,3 до 0,45 м. Кількість розпушників визначається їх розташуванням відносно ширини захвату викопувальної скоби. Збільшення відстані між розпушниками сприяє більш ефективному відділенню ґрунту від ґрунтової скоби, однак надмірне збільшення може зменшити площу контакту, що призведе до недостатнього розпушення ґрунту та пошкодження коренів. У сучасних викопувальних плугах відстань між розпушниками зазвичай коливається від 0,1 до 0,2 м, а їхня кількість складає 3–4 одиниці. Для плуга ВПН-2М з шириною захвату 0,55 м оптимальна відстань між розпушниками прийнята в межах 0,08–0,14 м.

#### Методика проведення експерименту

Польові випробування плуга ВПН-2М з експериментальними робочими органами проводилися на території розсадника Аграрної компанії «VITAGRO» у місті Волочиськ, Хмельницька область. Досліди виконувалися на другому полі розсадника під час викопування саджанців яблуні сортів Ред Чиф та Бребурн, із схемою посадки  $0,9 \times 0,15$  м.

Плуг під час випробувань агрегувався з трактором Т-150К. Ґрунт на полі — чорнозем південний. Умови проведення експерименту відповідали загальноприйнятим методикам, а фізичні показники ґрунту наведені в таблиці 3.1.

## Фізичні властивості ґрунту

Шар ґрунту, см	Абсолютна вологість, %	Твердість, МПа
0 – 10	22,7	1,1
10 – 20	19,6	1,2
20-30	202,3	1,5

Для оцінки величини зусилля ( $y$ ) при витягуванні саджанців із ґрунту застосовано повний факторний експеримент, у якому три фактори змінювалися на максимальних і мінімальних рівнях. На основі отриманих даних будувалася математична модель першого та другого порядків для прогнозування результатів експерименту.

На першому етапі планування експерименту розглядалася лінійна модель.

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

Для застосування стандартної матриці значення факторів переводять у закодовану форму за допомогою наступної формули

$$z_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta_i}$$

де  $z_i$  - закодоване значення фактора (може приймати значення +1, -1 або 0);

- $x_i$  - натуральне значення фактора;
- $x_{i0}$  - натуральне значення фактора на нульовому рівні;
- $\Delta x_i$  - інтервал варіювання фактора.

Таблиця 3.3 містить план експерименту, який передбачає вісім варіантів дослідів, кожен із яких виконано тричі, а порядок проведення визначено рандомізовано за допомогою таблиці випадкових чисел.

Рис. 3.5 ілюструє величини зусиль, які прикладали робітники для витягування саджанців після їх викопування.



Рис. 3.5. Процес викопування саджанців конкретного сорту Ред Чиф з допомогою експериментального робочого органу плуга ВІН-2М.

Зусилля, що прикладали робітники для витягування саджанців із ґрунту після його розпушення, вимірювали динамометром ДПУ-0,01-2 (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Вимірювання сили витягування саджанців динамометром ДПУ-0,01-2

Однорідність (відтворюваність) дослідів оцінюють за допомогою критерію Кохрена.

За критерієм Кохрена порівнюють розраховане та табличне значення дисперсії.

$$G_p = \frac{S_i^2 \max}{\sum_{i=i}^N S_i^2} \quad (3.1)$$

Для побудови математичної моделі обчислюють коефіцієнти рівняння регресії. Значення коефіцієнтів лінійної моделі визначено за допомогою матричного методу.

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3.2)$$

Матриця X містить усі рівні змінних факторів, Y - експериментальні значення параметра оптимізації, а  $X^T$  - її транспонована версія. Вплив окремих факторів на результуючий параметр оцінювався шляхом статистичного тестування значущості коефіцієнтів лінійної моделі за критерієм Стьюдента.

Коефіцієнт регресії  $b_i$  вважають значущим, якщо виконується умова:  $t_{bi} > t_t$ .

Розраховані значення коефіцієнтів регресії наведено у пакеті MathCad у наступному вигляді

$$y_i = 51,625 - 2,875z_1 + 5,625z_2 - 7,625z_3 + 0,875z_2 \cdot z_3 \quad (3.3)$$

Коефіцієнти  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{123}$  виявилися незначущими і тому не включені до моделі.

Адекватність моделі оцінювали за критерієм Фішера, який розраховується за формулою:

де  $m$  - кількість повторів експерименту;

$N$  - число рядків у матриці планування;

$l$  - кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні лінійної моделі. регресії, із дотриманням умови:

$$F_T(\alpha = 0,05; f_1 = N - l; f_2 = N(m - 1)) F_T(\alpha = 0,05; f_1 = 2, f_2 = 16) = 3,634 .$$

де  $F$  - табличне значення критерію Фішера. Його обирають відповідно до ступенів свободи  $f_1$  та  $f_2$ .

Отриману лінійну модель вважають адекватною експериментальним даним, оскільки  $2,875 < 3,634$ .

Розкодована форма моделі має наступний вигляд: (3.4)

$$y = 72,83 - 0,1x_1 + 64,44x_2 - 416,67x_3 + 1,33x_1x_2 + 444,44x_2x_3$$

Описати область оптимуму за допомогою лінійного рівняння регресії неможливо через значущість взаємодії факторів та квадратичних ефектів. Тому пошук точок оптимуму здійснюватимемо за допомогою полінома другого порядку такого вигляду:

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2$$

Для розрахунку коефіцієнтів рівняння регресії потрібні експериментальні плани, у яких кожен фактор змінюється на три рівні. Однак повний факторний експеримент типу  $3^n$  передбачає значно більшу кількість дослідів, ніж потрібно для обчислення коефіцієнтів. Зменшити обсяг експерименту можна за допомогою центрального композиційного плану (ЦКП), який складається з трьох блоків: точки повного факторного експерименту типу  $2^n$ ; «зіркові» точки (план типу «хреста») -  $2^n$ ; центральні (нулеві) точки -  $m_0$ .

Загальна кількість експериментів у матриці ЦКП для  $n$  факторів визначається за формулою:

$$N = 2^n + 2n + m_0 \quad (3.5)$$

Відповідно до критерію Фішера, табличне значення для  $m = 3$  та  $N = 15$  становить

$$F_{кр} [\alpha = 0,05; N - m; N \cdot (m - 1)] = 2,334, \text{ а розрахункове склало } F_p = 0,521.$$

При умові  $F_p < F_{кр}$  ( $0,521 < 2,334$ ) модель вважається адекватною експериментальним даним.

Розшифрована нелінійна модель, що описує величину зусилля, необхідного для витягування саджанців із ґрунту, може бути подана у вигляді:

$$y = 284,51 - 9,73x_1 + 430,47x_2 - 87,07x_3 + 388,89x_2x_3 + 0,15x^2$$

Таким чином, згідно з проведеним експериментом, отримана модель може використовуватися для прогнозування зусилля на витягування саджанців із ґрунту.

Для знаходження точок оптимуму рівняння (3.9) диференціюють по кожному фактору та прирівнюють похідні до нуля, утворюючи систему рівнянь для її розв'язання.

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = 0,3x_1 - 9,73 = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = 1239,12x_2 + 388,89x_3 - 430,47 = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} = 388,89x_2 - 2793,34x_3 - 87,07 = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

З розв'язку системи рівнянь оптимальними значеннями зусилля на витягування саджанців із ґрунту виявилися:  $X_2 = 0,42$  м,  $X_3 = 0,1$  м.

Для графічного зображення функції відгуку зафіксовано значення кожного фактора на нульовому рівні, які представлені на рис. 3.7–3.10.

При  $z_1 = 0$  рівняння моделі набуває вигляду:

$$y = 126,7 - 430,47x - 87,07x + 388,89x \cdot x - 58,489x^2 - 1396,67x^2. \quad (3.7)$$

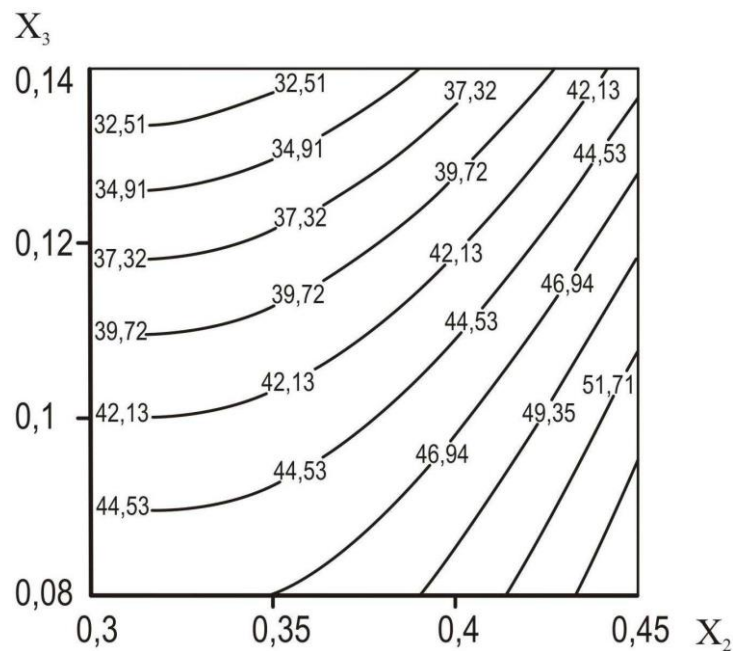


Рис. 3.8. Поверхня та ізолінії функції відгуку при  $X_2 = 0,375$  м.

При  $z_3 = 0$  рівняння моделі набуває вигляду:

$$y_2 = 210,4 - 9,73x_1 + 60,71x_3 + 0,15x_1^2 - 1396,67x_3^2 \quad (3.8)$$

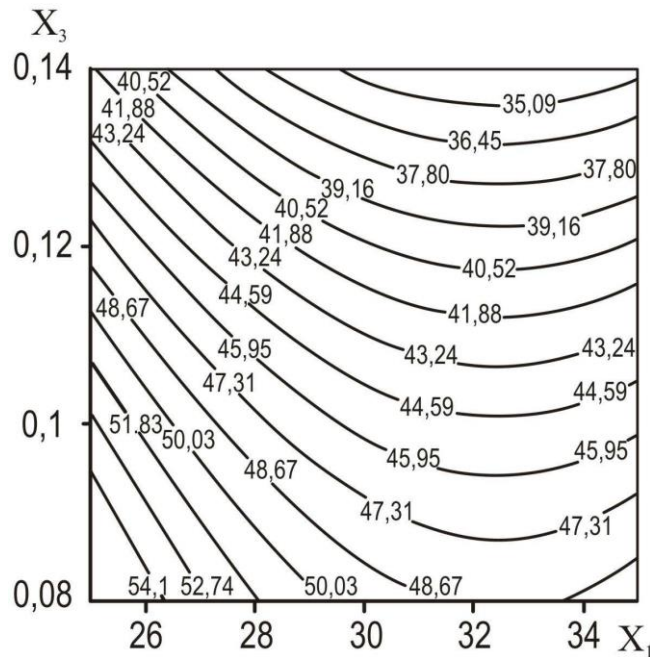


Рис. 3.8. Поверхня та ізолінії функції відгуку при  $X_2 = 0,375$  м.

При  $z_3 = 0$  модель набуває вигляду:

$$y_3 = 268,6 - 9,73x_1 - 399,36x_2 - 1,11x_1x_2 + 619,56x_2^2 + 0,15x_1^2 \quad (3.9)$$

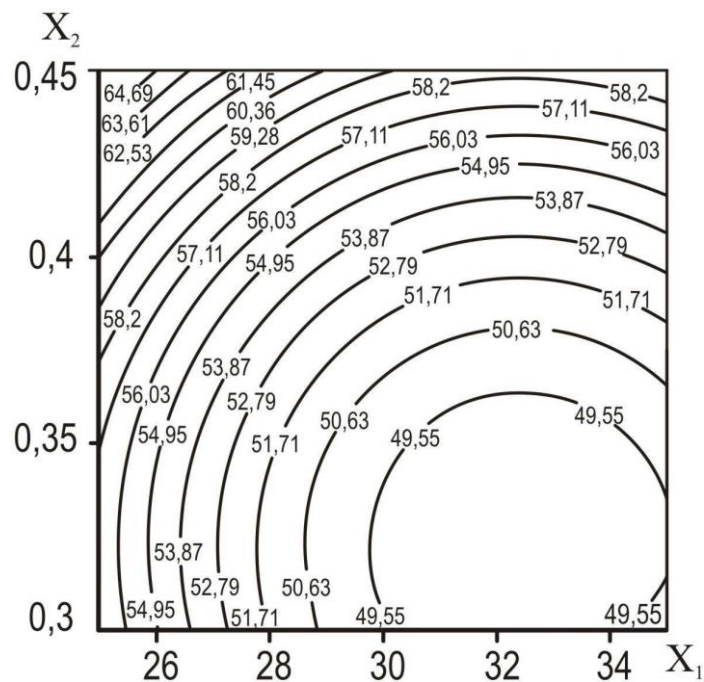


Рис. 3.9. Графічне зображення функції відгуку та її ізоліній при фіксованому параметрі  $X_3 = 0,11$  м.

Графічна залежність зусилля, необхідного для витягування саджанців, від розглянутих факторів наведена на рис. 3.10–3.12.

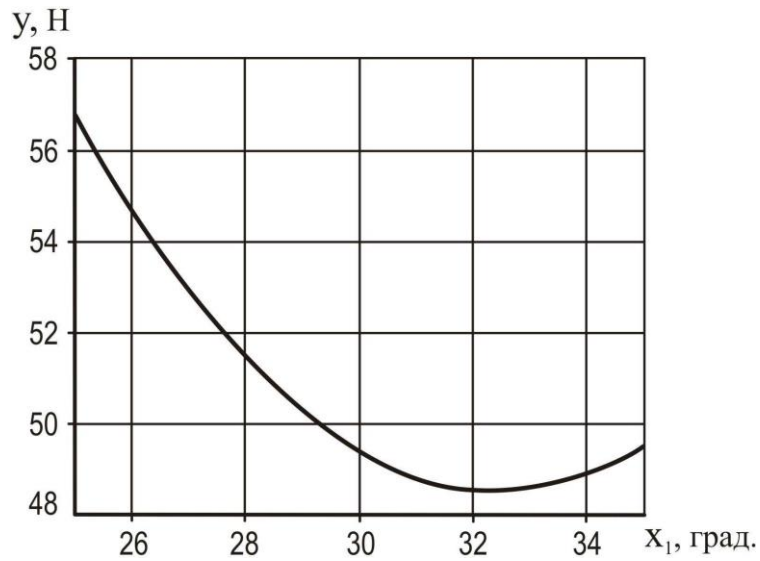


Рис. 3.10. Вплив кута нахилу розпушувача (фактор  $X_1$ ) на величину зусилля для витягування саджанців.

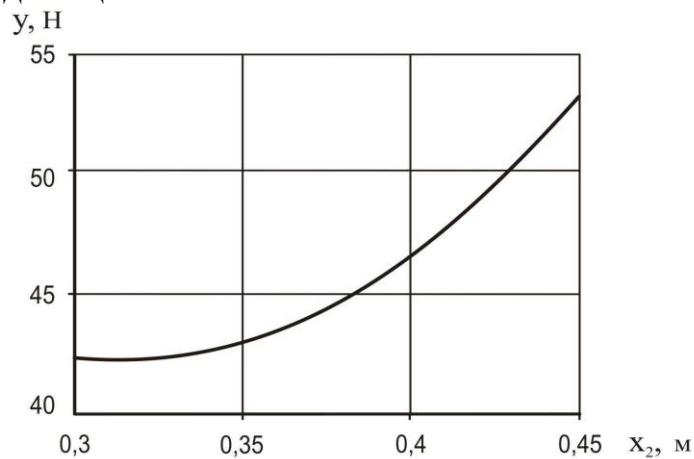


Рис. 3.11. Вплив довжини важеля розпушувача (фактор  $X_2$ ) на зусилля витягування саджанців.

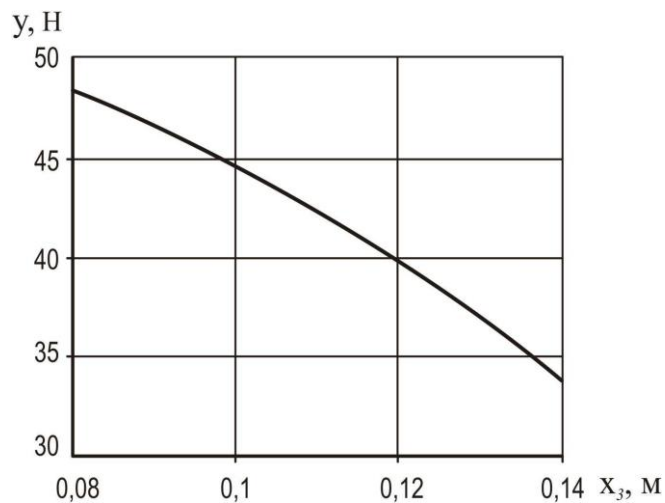


Рис. 3.12. Вплив відстані між розпушниками (фактор  $X_3$ ) на зусилля витягування саджанців.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що при прикладеному зусиллі 42 Н для витягування саджанців із ґрунту коренева система зберігає свою цілісність, а довжина коренів перевищує нормативні значення на 12 % (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Оцінка якості кореневої системи саджанців яблуні за параметром довжини коренів: а) сорт Бребурн; б) сорт Ред Чиф.

## Висновки до розділу

Аналіз чинників, що впливають на зусилля при витягуванні саджанців із розпушеного ґрунту, показав, що ключовими є: кут нахилу поверхні розпушувача до горизонту, довжина важеля та відстань між розпушниками в горизонтальній площині.

На основі досліджень роботи з переміщення ґрунтової скиби визначено оптимальні межі варіювання цих факторів:

- кут нахилу поверхні розпушувача до горизонту:  $25^{\circ}$ – $35^{\circ}$ ;
- довжина важеля: 0,35–0,4 м;
- відстань між розпушниками: 0,08–0,14 м.

Виявлено вплив цих факторів на величину зусилля:

- при куті нахилу  $32^{\circ}$  зусилля досягає мінімального значення, після чого зростає;
- збільшення довжини важеля призводить до збільшення зусилля;
- збільшення відстані між розпушниками зменшує прикладене зусилля.

Визначено, що максимальна сила, яку можуть прикладати працівники при витягуванні саджанців, становить 49 Н за таких параметрів розпушувача: кут нахилу поверхні  $\alpha = 32^{\circ}$ , довжина важеля  $l = 0,42$  м, відстань між розпушниками  $b_1 = 0,1$  м.

## РОЗДІЛ 4

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ПЕРЕВІРКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВИКОПУВАЛЬНОГО ПЛУГА ВПН-2М

#### **1.1. План і методологія науково-виробничих випробувань плуга ВПН-2М**

Науково-виробнича перевірка викопувального плуга ВПН-2М з розробленим робочим органом у складі з трактором ДТ-75Н проводилась у розсаднику Аграрної компанії «VITAGRO» (м. Волочиськ, Хмельницька область) під час викопування саджанців черешні та яблуні у листопаді 2025 року.

Програма перевірки передбачала:

- агротехнічну оцінку викопування саджанців яблуні та черешні у кількості 20 тис. штук;
- техніко-економічну оцінку викопувального плуга ВПН-2М з експериментальним робочим органом.

Агротехнічну оцінку роботи плуга виконували відповідно до чинних нормативних документів (НД):

- умови проведення перевірки - за КНД 46.16.02.08-95;
- оцінка якості роботи плуга - за ОСТ 70.16.1-86;
- оцінка якості саджанців - за ДСТУ 4938:2008 «Саджанці плодкових культур. Технічні умови».

При визначенні показників якості саджанців застосовувалися методи, рекомендовані відповідними нормативними документами.

#### **1.2. Агротехнічний аналіз ефективності роботи викопувального плуга**

Науково-виробнича перевірка проводилась у розсаднику Аграрної компанії «VITAGRO» (м. Волочиськ, Хмельницька область) у строки агротехнічного викопування саджанців. Для проведення агротехнічної оцінки роботи плуга ВПН-2М було обрано третє поле розсадника, характеристики якого наведені в таблиці 4.1.

## Опис умов проведення агротехнічної оцінки

Опис показника	Значення показника
Місце та дата проведення випробувань	Розсадник 07.11.2025.
Фонові умови роботи	Третє поле розсадника
Тип ґрунту	Чорнозем
Механічний склад	Важко суглинковий
Вологість ґрунту за шарами, %	
– від 0 до 10 вкл.	22,7
– вище 10 до 20	19,6
– вище 20 до 30	20,3
Твердість ґрунту за шарами, МПа:	
– від 0 до 10 вкл.	1,21
– вище 10 до 20	1,32
– вище 20 до 30	1,41
Характеристика посадкового матеріалу:	Саджанці плодкових культур
Сорт	Голден Делішес
Вік, роки	2
Порода	Яблуня
Схема посадки	15-90
Ширина основних міжрядь, см	90
Відстань між саджанцями в ряду, см	16,5
Допустиме відхилення саджанців від осевої лінії ряду, ± см	±4,5
Висота наземної частини саджанця, см	175
Діаметр крони саджанця, см	65
Кількість саджанців на 1 м посадкового рядку, шт.	6

Згідно з ОСТ 70.16.1-86 до показників агротехнічної оцінки належали:

- робоча швидкість руху агрегату; глибина підкопування; повнота викопування саджанців;
- частка пошкоджених саджанців; зусилля на витягування саджанців після підкопування;
- маса ґрунту, що залишається на кореневій системі саджанця.

Обробка результатів вимірювань за кожним показником проводилася за стандартною процедурою статистичного аналізу.

Агротехнічна оцінка проводилась для викопувального плуга ВПН-2М, оснащеного експериментальним робочим органом, параметри якого були визначені

теоретично та підтверджені експериментально. Основні характеристики робочого органу:

- форма поверхні розпушувача - опукла крива з радіусом  $R = 2$  м;
- частота обертання приводного валу -  $n_v = 6 \text{ с}^{-1}$ ;
- кут нахилу поверхні розпушувача до горизонту -  $\alpha = 32^\circ$ ;
- відстань між розпушниками -  $b_1 = 0,1$  м;
- довжина важеля -  $l = 0,42$  м;
- величина ексцентриситету -  $e = 0,02$  м;
- довжина розпушника -  $L = 1$  м.

Експериментальний зразок дозволяв регулювати такі параметри:

- кут нахилу поверхні розпушувача залежно від глибини підкопування;
- відстань між розпушниками відповідно до стану ґрунту;
- амплітуду коливань розпушувача шляхом зміни довжини важеля.

Отримані результати агротехнічної оцінки ілюструють процес викопування саджанців і представлені на рис. 4.1–4.3.



Рис. 4.1. Процес викопування яблуневих саджанців плугом ВПН-2М з експериментальною робочою частиною



а)



б)

Рис. 4.2. Вигляд ряду саджанців Голден Делішес після підкопування (а) та кореневої системи після витягування з ґрунту (б).



а)



б)

Рис. 4.3. Зовнішній вигляд кореневої системи саджанців після викопування:  
а) яблуні сорту Голден Делішес;

б) черешні сорту Мелітопольська чорна.

Результати агротехнічної оцінки роботи плуга ВПН-2М з експериментальним робочим органом, які отримали під час перевірки, наведені в таблиці 4.2.

Параметри ефективності агротехнічної оцінки плуга ВПН-2М з експериментальною робочою частиною

Назва показника	Значення	
	у відповідності до встановленого стандарту	на основі результатів проведених випробувань
1	2	3
Режим роботи:		
- робоча швидкість агрегату, м/с	0,	1,52
- ширина захвату робочого органу, м	0,5	0,55
Глибина підкопування, см		
- встановлена	35	30
- фактична	-	32
- стандартне відхилення, ± см	-	3
- коефіцієнт варіації, відсоток	-	9,3
Зусилля, необхідне для витягування саджанців з ґрунту, Н	150 – для чоловіків, 70 – для жінок	42
Довжина кореневої системи саджанців, см	25	28
Пошкодження саджанців, %		
Механічні пошкодження коренів	Не допустима	Відсутня
Подряпини кори	Поверхневі	2,5
Пошкодження кори та крони	Не допустима	Відсутня
Маса ґрунту, що утримується кореневою системою підкопаного саджанця, г	-	800

#### 4.3. Аналіз економічної ефективності роботи викопувального плуга

##### Визначення техніко-економічних характеристик

Ключові техніко-економічні характеристики впровадження викопувального плуга ВПН-2М подані в таблиці 4.3.

Наведені результати свідчать, що використання викопувального плуга ВПН-2М дозволило зменшити чисельність робітників, що призвело до економії робочого часу в обсязі 187 люд.-год/га, або на 23 %.

Ключові показники ефективності та економічності використання викопувального  
плуга ВПН-2М

Показники		Одини чні показ ники	Дані		
			Базова	Нова	Відхи - лення +/-
1	Балансова вартість машини	грн.	16000	24233	+
2	Річне використання плуга	год.	52	52	
3	Витрати на оплату праці	грн. / га	3106	2407	-
4	Витрати пального та мастильних матеріалів	грн. / га	1409	1409	
5	Амортизаційні відрахування	грн. / га	340	481	+
6	Витрати на ремонт та ТО	грн. / га	346	487	+
7	Загальні експлуатаційні витрати	грн. / га	5201	4784	-
8	Питома величина капіталовкладень	грн. / га	2440	3429	+
9	Скориговані витрати	грн. / га	5567	5298	-
10	Витрати часу працівників	люд. · год.	162	125	-
11	Економія робочого часу	люд. · год./га	-	187	+
12	Відсоток зменшення витрат часу	проц.	-	23	+
13	Щорічна економія коштів	грн.	-	12081	
14	Період окупності інвестицій	років	-	1,13	

При цьому річна економія коштів склала 12081 грн. Крім того, спостерігається соціальний ефект у вигляді покращення умов праці під час витягування саджанців із ґрунту та зменшення трудового навантаження.

## **Висновки до розділу**

1. За підсумками науково-виробничих випробувань викопувального плуга ВПН-2М з експериментальним робочим органом у розсаднику Аграрної компанії «VITAGRO» (м. Волочиськ, Хмельницька область) було встановлено: середня глибина підкопування склала 0,33 м; довжина кореневої системи саджанців перевищувала норматив на 12 %.

2. Середнє зусилля, необхідне для витягування саджанців робітниками, становило 42 Н, що на 40 % менше нормативного значення; 95 % викопаних саджанців відповідали першому сорту.

3. Використання вдосконаленого плуга ВПН-2М дозволило зменшити витрати робочого часу на збір саджанців на 187 люд.-год/га, що на 23 % менше в порівнянні з плугом ВСН-1. При цьому щорічна економія коштів склала 12 081 грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

На підставі аналізу механізованих засобів викопування та збору саджанців плодкових культур у розсаднику, а також результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесу викопування, можна зробити такі висновки:

Дослідження функцій розпушувача показало, що він має бути активним. Ефективність розпушення ґрунту та відділення його від кореневої системи саджанця залежить від таких параметрів: режиму коливань із відривом ґрунтової скиби від поверхні розпушувача; кута нахилу його робочої поверхні до горизонту; відстані між розпушниками; тривалості контакту ґрунтової скиби з поверхнею розпушувача.

Конструктивно-технологічна схема розпушувача повинна передбачати можливість регулювання кута нахилу робочої поверхні, амплітуди коливань та відстані між розпушниками.

Найменша робота рухомої сили для переміщення ґрунтової скиби спостерігається на плоскій опуклій поверхні з радіусом кривизни 2 м, що становить 997 Дж.

Оптимальний режим коливань із відривом ґрунту досягається у третьому квадранті обертання приводного валу ексцентрика при чотирьох качаннях, частоті обертання 6 с<sup>-1</sup>, швидкості руху агрегату 1,45 м/с та величині ексцентриситету  $e = 0,02$  м.

Інтенсивність розпушення ґрунтової скиби доцільно регулювати зміною амплітуди коливань розпушувача шляхом корекції довжини важеля в межах 0,35–0,45 м.

Експериментальні випробування розпушувача з опуклою поверхнею у складі робочого органу плуга ВПН-2М показали, що зусилля на витягування саджанців робітниками становить 49 Н при наступних параметрах: кут нахилу поверхні розпушувача  $\alpha = 32^\circ$ ; довжина важеля  $l = 0,42$  м; відстань між розпушниками у горизонтальній площині  $b_1 = 0,1$  м.

За результатами агротехнічної оцінки плуга ВПН-2М із запропонованим розпушувачем при середній глибині підкопування 0,33 м встановлено: довжина кореневої системи саджанців перевищувала норматив на 12 %; зусилля на витягування саджанців становило 42 Н, що на 40 % менше нормативного значення; 95 % викопаних саджанців відповідали першому сорту.

Використання модернізованого плуга ВПН-2М із запропонованим розпушувачем дозволило скоротити трудові витрати при зборі саджанців на 187 люд.-год/га, що на 23 % менше порівняно з плугом ВСН-1, а річна економія коштів склала 12081 грн.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Спицький Р. Г. Обґрунтування параметрів та конструкції копача саджанців: кваліфікаційна робота. Вінниця : ВНАУ, 2024. 89 с.
2. Зімбровський Д. М. Конструктивна схема робочого органу плуга для викопування плодкових саджанців. Наукові праці ТДАТУ. 2018. № 2(38). С. 112–118.
3. Rogovskii I., Titova L., Shatrov R., Bannyi O., Nadtochiy O. Technological effectiveness of machine for digging seedlings in nursery grown on vegetative rootstocks. *Engineering for Rural Development*. 2022. Vol. 21. P. 1518–1524.
4. Liu Z., Wang J., Wang H., Li Y. Design and Testing of a Seedling Pick-Up Device for a Transplanter. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 5. P. 1–15.
5. Han L., Chen X., Zhang R., Li H. Design and test of an efficient seedling pick-up device for vegetable transplanter. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2024. Vol. 26(1). P. 112–121.
6. Jin X., Wang C., Xu Y., Li S. Development of single-row automatic transplanting device for plug seedlings. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. Vol. 11(4). P. 45–53.
7. Yablonskyi P. Computational approach to geometric modeling of plow bodies. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2024. Vol. 114. P. 33–42.
8. Mamatov F. M., Kurbonov A. A., Tursunov A. O. Potato digger with latticed plowshares and oscillating rods: design and performance evaluation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1161. P. 1–8.
9. Shen H., Gao W., Li Y. Innovative design and optimization of high-quality peanut digger. *Agronomy*. 2024. Vol. 14(2). P. 234–247.
10. Караєв О. Г. Визначення параметрів розпушувача викопувального плуга. Науковий вісник НУБіП. 2015. № 200. С. 145–152.
11. Фурманюк О. В., Семенов В. М. Вдосконалення робочих органів викопувальних машин для плодородсадників. *Аграрна наука та практика*. 2019. № 4(28). С. 57–64.
12. Теслюк В. В., Котик А. І. Механізація процесів викопування саджанців у плодкових розсадниках. *Вісник ХНТУСГ*. 2020. № 210. С. 123–129.

13. Liao Y., Sun B., Wu D. Optimization of tillage tools for reducing soil resistance: review and new approaches. *Soil & Tillage Research*. 2021. Vol. 212. P. 105–118.
14. Rogovskii I., Titova L. Trends in mechanization of seedling digging systems in horticultural nurseries. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 27(3). P. 54–63.
15. Пархоменко О. В. Аналіз конструкцій плугів для викопування саджанців та вимоги до удосконалення робочих органів. *Техніка і технології АПК*. 2017. № 7. С. 41–45.
16. Arutyunyan A., Konev V. Improving efficiency of root crop and seedling digging tools by optimizing geometry of the share. *Engineering Technologies and Systems*. 2020. Vol. 30(2). P. 236–246.
17. Лук'янов О. С., Романюк Р. І. Обґрунтування параметрів робочого органу плуга з розпушувачем для викопування саджанців. *Сучасні агротехнології*. 2021. № 3. С. 85–93.
18. Zhang X., Li Q., Chen Y. Soil–tool interaction modelling for the optimization of agricultural digging tools. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 178. P. 144–158.
19. Гуменюк С. О., Горобець А. В. Дослідження процесу підкопування саджанців та формування ґрунтового шару на лемеші плуга. *Механізація сільського господарства*. 2016. № 9. С. 22–26.
20. Tursunov A. O., Abdullayev S. Development of improved digging plowshare for seedling harvesting. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 5/1(119). P. 60–70.
21. Караєв О.Г. Розрахунок енергоємності виробництва садивного матеріалу в плодovому розсаднику / О.Г. Караєв, О.І. Матковський // Праці Таврійської державної агротехнічної академії/ відп. за вип. О.Г. Скляр. – Мелітополь, 2001. — Вип.1, т.20. – С.90 – 94.
22. Караєв О.Г. Випробування плуга для викопування саджанців плодovих культур / О. Г. Караєв // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. В. Т. Надикто. – Мелітополь, 2001.– Вип.1, т. 22.– С.85-89., Протокол попередніх випробувань №03-2000 від 12 жовтня 2000 р.

Виконавець: Підрозділ „Південно-східний” НВО „Сільгоспмашсистема” УкрНДПВТ.— 15 с.

23. Караєв О. Г. Геометричне моделювання траєкторії руху активного робочого органа викопного плуга саджанців плодкових культур / О. Г. Караєв, О. І. Матковський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. А.В. Найдиш – Мелітополь, 2001. – Вип. 4, т. 14. – С. 52 – 58.

24. Режим доступу: <http://poligon.odessa.ua/ru/sadovaya-technika>

25. Режим доступу: <http://vstisp.org/>

26. Режим доступу: <http://www.ber-to-snc.it/>

27. ОСТ 10 126-88 – Саженьцы семечковых и косточковых культур. Общие технические условия.

28. МОЗ України Наказ № 528 від 27.12.2001 «Про затвердження Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» «Класи умов праці за показниками важкості трудового процесу».

29. Матковський О. І. Удосконалення конструктивної схеми робочих органів викопувального плуга / О. І. Матковський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. О. М. Леженкін. – Мелітополь, 2011. – Вип. 12, т. 5. – С. 160 - 167.

30. Кольцов М.П. Конструктивні параметри робочого органу викопувального плуга / М.П. Кольцов, О.І. Матковський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. В. Т. Надикто. — Мелітополь, 2011.— Вип. 11, т. 2. — С.126-132.

31. Рубцов Н. О. Кінематичні характеристики коливального розпушувача – сепаратора викопувального плуга / Н.О. Рубцов, О.І. Матковський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. О. М. Леженкін. – Мелітополь, 2012. – Вип. 12, т. 5. – С. 160 - 167 (здобувач навів методику розрахунку кінематичних характеристик).

32. Кудриницький Р.Б. Взаємодія двогранного клина з ґрунтом / Р.Б. Кудриницький // Механізація та електрифікація сільського господарства.– Київ, 2001– Вип. 85. – С.85 – 90.

33. Кольцов М. П. Тяговий опір коливального робочого органа викопувального плуга / М. П. Кольцов, О. І. Матковський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. Р. В. Скляр. – Мелітополь, 2013. – Вип. 13, т. 3. – С. 156 - 160 (здобувач розробив методику аналітичного розрахунку тягового опору робочого органу).

34. Караєв О. Г. Визначення параметрів і режимів коливань розпушувача плуга для викопування саджанців / О. Г. Караєв, О. І. Матковський // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти/. – Мелітополь, 2014. – Вип. 2. – С. 175 - 190.

35. ДСТУ 4938:2008. Саджанці плодкових культур. Технічні умови. – Введ. 01.06.2008. – К.: Держспоживстандарт України, 2009.–16 с.

36. КНД 46.16.02.08 – 95. Техніка сільськогосподарська. Методика визначення умов випробувань.

37. ДСТУ 4938:2008. Саджанці плодкових культур. Технічні умови.

38. ДСТУ 4792:2007 Саджанці плодкових культур. Методи визначення якості. – Введ. 01.07.2007. – К.: Держспоживстандарт України, 2009.–18 с.

39. ДСТУ 4397:2005. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. - Чинний від 01.01.2006. – К.: Держспоживстандарт, 2005. – 16 с.

40. Методичні рекомендації до виконання та оформлення дипломних робіт для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» / Ю.І. Панцир, А.В. Рудь, В.І. Дуганець, В.І. Дуганець, Л.С. Шелудченко, С.М. Грушецький, С.П. Комарніцький. За ред. В.І. Дуганця. – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2025. - 52с.