

Луцький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)  
Факультет аграрних технологій та екології  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))  
Кафедра аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

на тему: «Дослідження процесу викопування картоплі з удосконаленням сепаратора картоплекопача»

Виконав: студент 2 курсу, групи АІм - 21  
спеціальності 208 Агроінженерія  
за освітньо-професійною  
програмою «Агроінженерія»

Сиротинський А.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Юхимчук С.Ф.

(прізвище та ініціали)

Гарант ОП Хомич С.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Дацюк Л.М.

(прізвище та ініціали)

Луцьк 2024

**ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет	<i>аграрних технологій та екології</i>
Кафедра	<i>аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса</i>
Галузь знань	<i>20 Аграрні науки та продовольство</i>
Освітній ступінь	<i>магістр</i>
Спеціальність	<i>208 Агроінженерія</i>
Освітньо-професійна програма	<i>Агроінженерія</i>

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри аграрної інженерії  
ім. проф. Г.А.Хайліса

доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_ С.М. Хомич  
«30» грудня 2023 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ**

Сиротинському Андрію Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження процесу викопування картоплі з удосконаленням сепаратора картоплекопача

керівник роботи Юхимчук Сергій Федорович, доцент, к.т.н.

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

затверджена наказом ЛНТУ від «30» грудня 2023 р. № 445/01-02

2. Термін здачі студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Титульний аркуш .
2. Завдання на роботу магістра.
3. Реферат.
4. Зміст.
5. Вступ.
6. Основну частину.
7. Загальні висновки.
8. Перелік джерел посилань.
9. Додатки

## 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

	к-сть листів
1. Вихідні дані .....	1 лист
2. Теоретичні положення .....	1 лист
3. Апаратура та обладнання для експериментальних досліджень	1 лист
4. Результати експериментальних досліджень	1 лист
5. Планування та результати експерименту з використанням математичного методу планування	1 лист
6. Схема експериментальної установки чи досліджуваної машини (функціональна або принципова)	1 лист
7. Складальне креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	1 лист

## 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Юхимчук С.Ф., доцент		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою, формування завдань досліджень	17.06. – 01.07.2024 р.	
2	Обґрунтування конструкції і теоретичні дослідження	20.08 – 31.08.2024 р.	
3	Розробка схеми експериментальної установки чи досліджуваної машини	01.09 – 30.09.2024 р.	
4	Розробка програми і методики експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2024 р.	
5	Реалізація та обробка результатів експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2024 р.	
6	Експериментальні дослідження з використанням математичного методу планування	15.10 – 01.11.2024 р.	
7	Розробка креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	01.11 – 15.11.2024 р.	
8	Узагальнення результатів та оформлення пояснювальної записки	15.11 – 25.11.2024 р.	
9	Оформлення ілюстративного матеріалу для захисту магістерської роботи	15.11 – 25.11.2024 р.	
10	Нормоконтроль	до 04.12.2024 р.	
11	Представлення кваліфікаційної роботи на перевірку на плагіат	04.12.– 14.12.2024 р.	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Сиротинський А.О.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Юхимчук С.Ф.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Гарант ОПП

\_\_\_\_\_ (підпис)

Хомич С.М.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Сиротинський А. - Дослідження процесу викопування картоплі з удосконаленням сепаратора картоплекопача. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» спеціальності 208 - Агроінженерія. Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2024.

Основний зміст кваліфікаційної роботи магістра викладено на 62 сторінках друкованого тексту. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань із 20 найменувань та 4 додатків, а також має 16 рисунків і 5 таблиць. Повний обсяг роботи становить 67 сторінок.

У даній роботі магістра обгрунтовано функціональну та принципову схеми нового картоплекопача. На основі і теоретичних досліджень картоплекопача і сепаратора було визначено параметри прутково-клавішного сепаратора. Розроблено креслення конструкції прутково-клавішного сепаратора картоплезбиральної машини. На основі розкриття явищ просіювання дрібної фракції ґрунту та пошкодження бульб, які здійснюються завдяки взаємодії прутків сепаратора з картопляним ворохом, розроблено математичну модель процесу його сепарації. Вперше за розробленими методиками досліджено: енергію, яка поглинається при зіткненні бульб з робочими органами картоплекопача, побудовано тарувальний графік, який апроксимовано степеневою функцією; визначено вплив частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту та знайти оптимальні значення цих факторів використовуючи математичний метод планування експерименту.

Ключові слова: картоплекопач, сепаратор, бральний апарат, леміш, бульба, бадилля, ґрунт.

## ABSTRACT

Syrotynskyi A. - Digging potatoes process study with improvement of the topspulling apparatus of the potato digger. Manuscript.

Qualification work of masters for the educational-professional program "Agroengineering" specialization 208 - Agricultural engineering. Lutsk National Technical University, Lutsk, 2024.

The main content of the master's thesis is outlined on 62 pages of printed text. The work comprises of itself introduction, four sections, findings, contents from 20 points that 4 add-ins also 16 drawings, 5 tables. The complete volume of work makes a 67 page.

In this work of the master the functional and principle schemes of the new potato digger are substantiated. On the basis of theoretical investigations of the potato digger and the separator, the parameters of the rod-key separator were determined. Drawings of a design of a rod-key separator of a potato cutter machine are developed. Based on the disclosure of the phenomena of sifting of fine fraction of soil and damage to the tubers, which are carried out due to the interaction of the separator bars with potato tuber, a mathematical model of its separation process has been developed. For the first time, the following methods have been investigated: energy absorbed by the collision of tubers with the working organs of a potato digger, a tare chart is proposed, which is approximated by the power function; The influence of the crankshaft rotation frequency and the angle of the separator on the value of the sieved soil is determined and the optimal values of these factors are found using the mathematical method of planning the experiment.

Key words: potato digger, separator, pulling apparatus, share, tuber, plant, soil.

## ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ .....	2
АНОТАЦІЯ .....	3
ABSTRACT.....	4
ВСТУП .....	7
<b>1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ, ФОРМУВАННЯ ЗАВДАНЬ</b>	
ДОСЛІДЖЕНЬ .....	10
1.1 Механіко-технологічні властивості картоплі та їх вплив на технологічний процес збирання бульб.....	10
1.2 Механіко-технологічні властивості ґрунту та їх вплив на технологічний процес збирання бульб.....	13
1.3 Аналіз конструкцій сепаруючої частини картоплекопачів .....	15
1.4 Аналіз досліджень картоплекопачів і сепараторів.....	18
1.5 Постановка мети і завдання дослідження .....	20
<b>2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ</b>	
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ .....	21
2.1 Відомості про технологічні процеси та обґрунтування функціональної схеми картоплекопача .....	21
2.2 Продуктивність та завантаження копача картоплі .....	23
2.3 Енергетичний розрахунок копача картоплі .....	24
2.4 Силовий розрахунок сепаратора .....	26
2.5 Побудова математичної моделі процесу сепарації .....	30
2.6 Висновки.....	37
<b>3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	
3.1 Програма експериментальних досліджень .....	38
3.2 Опис експериментальних установок та апаратури, що використовується при експериментальних дослідженнях.....	38
3.3 Методика статистичної обробки даних.....	40

3.4	Методика визначення енергії, поглиненої при зіткненні бульби з робочими органами.....	41
3.5	Методика дослідження впливу частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту.....	43
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....		45
4.1.	Визначення енергії, поглиненої при зіткненні бульби з робочими органами .....	45
4.2.	Визначення впливу частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту	46
4.3.	Висновки.....	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....		59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....		60
ДОДАТКИ .....		62

## ВСТУП

Картоплярство одна з галузей сільськогосподарського виробництва, робота в яких пов'язана із значними енерговитратами і витратами праці. Збирання картоплі є досить трудомістким процесом. Затрати праці на збирання складають 45-60% загальних затрат праці на вирощування картоплі.

Специфічні труднощі механізації збирання картоплі пов'язані головним чином з тим, що плоди цієї культури знаходяться під поверхнею ґрунту. Існують два методи збирання коренебульбоплодів: бранням (висмикуванням) плодів за гичку і підкопування їх разом із ґрунтом.

Аналіз агротехнічних і фізико-механічних характеристик рослин картоплі в різних зонах вирощування і в різні строки збирання показує, що картопля поширених сортів найбільш надійно і повно може бути зібрана машинним методом тільки при використанні принципу збирання, котрий оснований на підкопуванні шару ґрунту з бульбоплодами і наступній сепарації їх від ґрунту. Для отримання товарних бульб машина повинна відділити їх від великої кількості ґрунту.

Проблема здійснення процесу сепарації в машинах для викопування картоплі зумовлена рядом факторів, основні з яких наступні: незначна кількість бульб в підкопуваній масі ґрунту (не більше 2%); сильна чутливість бульб до механічних дій; несприятливих для сепарації фізико-механічні властивості ґрунту; різка зміна властивостей ґрунту в залежності від вологості; наявність в ґрунті каміння, кореневищ, бур'янів і інших домішок.

У зв'язку з ростом фермерства та дрібних господарств виникла гостра потреба у малопотужній і продуктивній техніці, котра змогла б задовольнити потреби користувача. Тому всі зусилля були направлені на розробку малопотужного і малогабаритного копача картоплі, котрий забезпечував порівняно з невеликими затратами викопування бульб і відділення їх від ґрунту. На даний час існують малопотужні копачі картоплі, але вони або не пошкоджують бульбоплоди, або не низький рівень сепарації підкопаної маси.

З цього випливає, що розробка нових та вдосконалення вже існуючих викопуючих та сепаруючих робочих органів є основою для забезпечення якісних показників роботи картоплезбиральних машин.

Нами пропонується машина, котра виконує одночасно два технологічні процеси: очищення грядки від бадилля та підкопування шару ґрунту, що містять плоди картоплі. Машина агрегується з вітчизняним енергетичним засобом, низького класу тяги – 2 кН. Сепаруючий робочий орган активного типу, здійснює коливальний рух з одночасним зворушуванням підкопуючої маси.

Мета роботи – зменшення металомісткості, збільшення продуктивності та якості сепарації картоплекопача завдяки розробці прутково-клавішного сепаратора картоплекопача та обґрунтування його параметрів і режимів роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити задачі, що полягають у теоретичному та експериментальному дослідженні системи, яка складається із бульб картоплі, ґрунту і робочих органів картоплекопача, для визначення раціональних параметрів машини з врахуванням агротехнічних вимог до картоплезбиральної техніки.

Об'єкт дослідження – процес сепарації картопляного вороху, картопляний ворох, прутково-клавішний сепаратор картоплезбиральної машини.

Предмет дослідження – взаємодія прутково-клавішного сепаратора з картопляним ворохом, а також вплив його параметрів та режимів роботи на показники якості процесу сепарації.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводились з використанням основних положень вищої математики, теоретичної механіки, теорії механізмів і машин. Аналіз математичних моделей здійснювався за допомогою прикладних програм на ПЕОМ. Експериментальні дослідження проводились на основі системного підходу із використанням математичного планування багатofакторних експериментів, статистики та теорії ймовірності.

У даній магістерській роботі обґрунтовано функціональну та принципову схеми нового картоплекопача. На основі і теоретичних досліджень

картоплекопача і сепаратора було визначено параметри прутково-клавішного сепаратора. Розроблено креслення конструкції прутково-клавішного сепаратора картоплезбиральної машини. На основі розкриття явищ просіювання дрібної фракції ґрунту та пошкодження бульб, які здійснюються завдяки взаємодії прутків сепаратора з картопляним ворохом, розроблено математичну модель процесу його сепарації. Вперше за розробленими методиками досліджено: енергію, яка поглинається при зіткненні бульб з робочими органами картоплекопача, побудовано тарувальний графік, який апроксимовано степеневою функцією; визначено вплив частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту та знайти оптимальні значення цих факторів використовуючи математичний метод планування експерименту.

Результати даної наукової роботи мають теоретичне і практичне значення. Вони можуть бути використані при розробці нового картоплекопача та для перевірки і визначення оптимального режиму його роботи.

Результати роботи можуть бути використані для наступних дисертаційних досліджень. А також будуть корисними для спеціалізованих установ, які займаються розробленням та удосконаленням посівної техніки.

Основні положення виконаних теоретичних і експериментальних досліджень роботи доповідались на IV студентській науково-технічній конференції «Сучасні технології у агровиробництві та природокористуванні» факультету аграрних технологій та екології ЛНТУ [15].

Логіка дослідження зумовила структуру роботи магістра: вступ, 4 розділи, загальні висновки, перелік джерел посилання із 20 найменувань, 5 додатків. Загальний обсяг 62 сторінок.

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ, ФОРМУВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Механіко-технологічні властивості картоплі та їх вплив на технологічний процес збирання бульб

Під час сепарації бульбоносного пласта необхідно враховувати технологічні властивості картоплі як об'єкту збирання, їх вплив на ступінь пошкоджень бульб, вибір способів сепарації, повноту відокремлення грудок ґрунту від бульб.

Численні дослідження вказують на те, що ступінь пошкоджень бульб під час збирання урожаю залежить як від їхніх технологічних властивостей: сорту, ступеня зрілості, розмірів, так і від умов збирання ґрунтово-кліматичних умов, агротехнічних вимог по догляду, конструкції та параметрів картоплезбиральних машин, а також режимів їх роботи.

Зусилля, яке необхідне для роздавлювання бульб, коливається для дрібних – 500...600 Н, для середніх – 700...800 Н, для великих – 900...1000 Н і вище. Із збільшенням ваги бульб збільшується зусилля на їх руйнування [13].

Дослідженнями міцності бульб та грудок в статичних умовах (стисненням) займався Г.Д.Петров, який встановив, що зусилля, яке необхідне для роздавлювання грудок середнього та важкого суглинків, досягають 350 Н, а для бульб допустиме стискаюче навантаження повинне становити 200...250 Н. Отже, руйнування грудок методом стиснення призводить до значного ступеня пошкоджень бульб і доцільно його замінити на руйнування розтягом.

Ступінь руйнування грудок та пошкодження бульб залежить від сили стиснення (рис. 1.1) [13].

На основі аналізу вищенаведених даних та огляду спеціальної літератури можна зробити наступні висновки :

1. Удари по бульбах, які мають опору впритул до ґрунтового пласту, пошкоджують 6...8% бульб. Завдавання ударів по бульбах через шар ґрунту

товщиною 10...14 мм дозволяє збільшити швидкість удару до 6 м/с. При цьому пошкодження бульб не перевищують 2,5...3,5% .

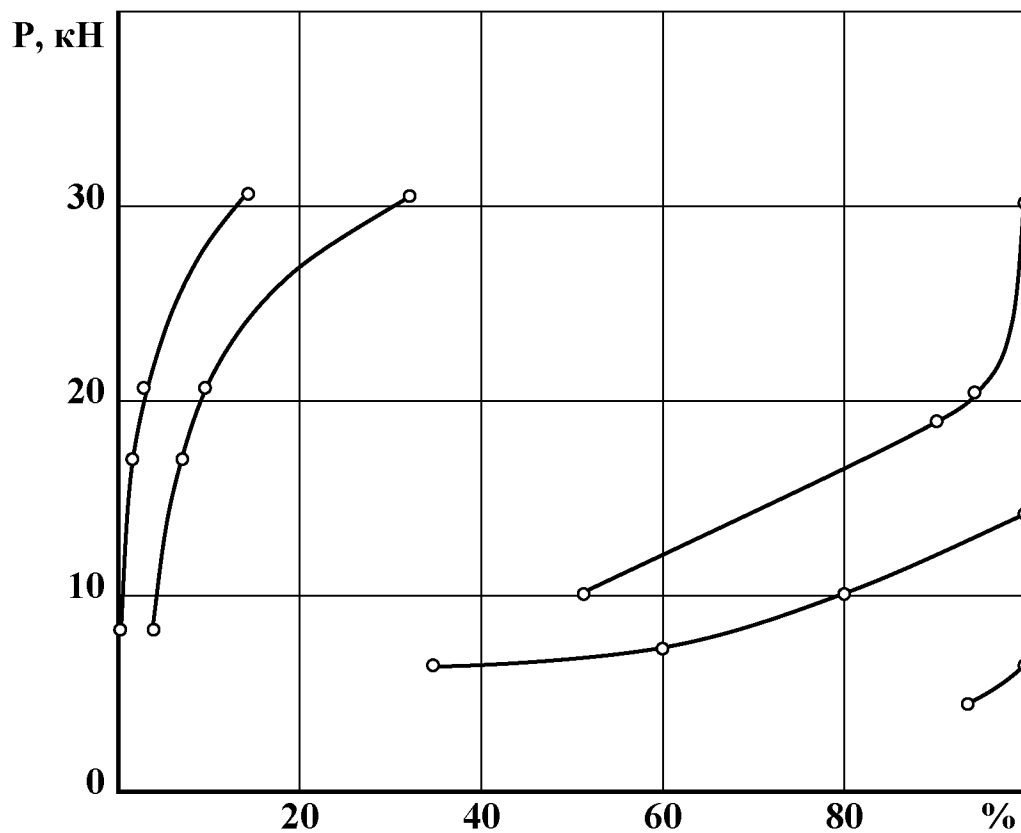


Рисунок 1.1 Залежність пошкоджень бульб та руйнування грудок на важких ґрунтах від сили стиснення

- 1 – середнє пошкодження бульб;
- 2 – максимальне пошкодження бульб;
- 3 – руйнування грудок при вологості 11,5%;
- 4 – руйнування грудок при вологості 17,8%;
- 5 – руйнування грудок при вологості 22,7%.

2. Ступінь механічного пошкодження бульб залежить від їхньої ваги, коефіцієнтів тертя, площі контакту бульби при співударі.

3. Міцність бульб збільшується по мірі їх дозрівання їх вологості .

4. Для уникнення пошкоджень бульб найбільш сприятливою формою їх є сферична.

5. При збільшенні навантаження сепарувальних органів пошкодження бульб зменшується і навпаки.

6. Максимальна висота падіння бульб при ударі:

а) на необгумовану поверхню – 0,15 м;

б) на металічну площу – 0,25 м;

в) на супіщаний ґрунт – до 4 м;

г) на обгумований пруток  $\varnothing 12$  – 1,25 м.

7. Ступінь механічного пошкодження бульб залежить від параметрів і режимів роботи кортоплезбиральних машин, до яких можна віднести: лінійну та кутову швидкість співудару, вид удару, матеріал поверхні співудару, кут нахилу поверхонь співудару, місце розташування робочих органів та інші.

8. Порівняно із металічними на обгумованих поверхнях швидкість співудару більша в 1,5 рази, а на резинових – в 2,5 рази.

Існуючі методи оцінки пошкодження бульб картоплі, у тому числі і за ОСТ 10 8.5-87, передбачають її зовнішній огляд, розподіл бульб по видах ушкоджень. Методика припускає закладання бульб на 10 днів зберігання з подальшим визначенням потемніння м'якуша, якщо на бульбі немає явного поверхневого ушкодження, що займає тривалий проміжок часу. Проведення лабораторних експериментів, з використанням цих методик, можливо тільки в період збирання картоплі (проміжок часу між викопуванням і проведенням експериментів з бульбами не повинен, перевищувати 1... 1,5 год) [13].

Кочетковим В. А. і Углановим М.Б. був запропонований метод оцінки величини зусилля взаємодії бульби з робочими органами кортоплезбиральних машин з використанням крихких покриттів, який дозволяє визначати зусилля, що діяло на бульбу безпосередньо після дії [11]. Авторами методу переслідувалися наступні цілі: скорочення часу проведення експериментальних досліджень, а також розширення тимчасового інтервалу проведення лабораторних випробувань. При використанні цього методу, визначення травмуючої дії на бульби можливе безпосередньо після експерименту без

закладки бульб на зберігання. Відсутня потреба в розрізанні бульб на частинки завтовшки 3 мм, для оцінки ушкоджень внаслідок травм [ 11 ].

Суть методу полягає в тому, що бульба після відповідної підготовки покривалася спеціальним складом, характер руйнування якого пропорційний величині зусилля сприйманого бульбою. Величина зусилля, що діяло на бульбу, з боку робочого органу визначалася за величиною плями на крихкому покритті.

У зв'язку з поставленими цілями і завданнями досліджень Кочетковим В. А. і Углановим М.Б. була проведено тарування величини зусилля і діаметру плями крихкого покриття [ 20 ]. Проте при роботі більшості сепараторів машин для збирання і післязбирального обробітку картоплі, бульби піддаються переважно динамічній дії (зіткненню) з боку робочих органів, тому доцільно провести тарування величини енергії, поглиненої при ударі і діаметру плями крихкого покриття. D. Parke [ 11 ] встановив, що ушкодження бульби починається при поглинанні ними енергії 0,13Дж.

## 1.2 Механіко-технологічні властивості ґрунту та їх вплив на технологічний процес збирання бульб

В основу технологічного процесу роботи сучасних вітчизняних та іноземних картоплезбиральних машин покладений принцип виймання бульбоносного пласта та руйнування його шляхом стиснення, зсуву, розриву. Розглянемо основні механіко-технологічні властивості ґрунту, які впливають на процес збирання бульб.

Як відомо, до основних факторів, які визначають міцність грудок можна віднести механічний склад та вологість ґрунту, розмір грудок, кліматичні умови, при яких утворились грудки та інші.

При всіх інших умовах як для грудок, так і для бульб, справедливе твердження, при якому руйнівне зусилля збільшується із розміром грудок. Проте величина зусилля, віднесеного до ваги, об'єму, поверхні грудок, зменшується із збільшенням ваги останнього. Отже, великі бульби та великі грудки більш міцні, але питомо менш міцні, ніж дрібні бульби та дрібні грудки.

Міцність грудок знаходиться в оберненій залежності по відношенню до вологості ґрунту, тобто із зменшенням вологості ґрунту міцність грудок збільшується.

Із вищесказаного випливає, що не всі грудки можуть однаково руйнуватися. В'язкі грудки при стисканні їх в сирому стані сплющуються. Проте ті ж самі грудки при меншій вологості руйнуються на дрібні частинки. Дуже сухі грудки потребують значно великих зусиль для руйнування. При невеликому розмоченні (до визначеної межі) грудки починають втрачати в'язкість та перетворюватись в масу, яка створює незначний опір діючим на неї навантаженням [ 19 ].

До ґрунтів, у яких утворюється велика кількість міцних грудок при вирощуванні картоплі, можна віднести дерново-підзолисті та чорноземи.

В.П.Горячкін дослідив, що ґрунт в залежності від вологості знаходиться у твердій, пластичній та текучій консистенціях. Кожна консистенція ґрунту має свої фізичні властивості, які дуже впливають на процес сепарації [ 19].

В результаті досліджень міцності різних типів ґрунтів в залежності від вологості та виду деформації було встановлено, що межа міцності середнього суглинку при вологості біля 4% - в 3...6 разів і при вологості 16...20 % - в 4... 15 разів більша при стисненні, ніж при зсуві.

Міцність грудок знаходиться у прямій залежності від їх розміру по величині. Середня міцність дрібних грудок (21...30 мм) складає 40...50 Н, а великих (71...80 мм) – 120...200 Н [13 ].

Досліди Л.П.Безрукого встановили, що навантаження для руйнування грудок при стисненні значно більше, ніж при зсуві. Відношення  $R_{ст.}/R_{зс.}$  коливається в межах:

- для легкого суглинку – 4,0...4,5;
- для середнього суглинку – 5,3...8,0.

Грудки, які мають вміст глини, зменшують опір розриву та зсуву із збільшенням вологості, а опір стисненню, навпаки збільшують [ 13 ].

На основі вищенаведених даних можна зробити наступні висновки :

1. Навантаження для руйнування грудок при стисненні значно більше, ніж при зсуві. Відношення  $R_{ст.}/P_{зс.}$  коливається в межах 4,0...8,0 в залежності від типу і стану ґрунту;

2. Межа міцності грудок ґрунту в значній мірі залежить від його вологості. Із збільшенням вологості міцність ґрунту знижується, а відношення  $R_{ст.}/P_{зс.}$  збільшується;

3. Руйнівне зусилля збільшується із розміром грудок. Проте величина зусилля, віднесеного до ваги, об'єму, поверхні грудок, зменшується із збільшенням ваги останнього. Отже, великі бульби та великі грудки більш міцні, але питомо менш міцні, ніж дрібні бульби та дрібні грудки.

### 1. 3 Аналіз конструкцій сепаруючої частини картоплекопачів

В картоплекопачах і комбайнах застосовують сепаруючі робочі органи найрізноманітніших типів з різними кінематичними схемами (рис. 1.2), але основними типами є грохоти з коливальним рухом решіт (рис. 1.2, а), пруткові елеватори (рис. 1.2, б), барабанні (рис. 1.2, в) і валкові (кулачкові) (рис. 1.2, г) грохоти.

Хоча прутковий елеватор і є одним з найдавніших сепаруючих пристроїв, на більшості вітчизняних та зарубіжних комбайнів він залишається основним робочим органом. Велике поширення прутковий елеватор отримав завдяки простоті конструкції та можливості одночасно з сепаруванням здійснювати транспортування пласта вверх при куті нахилу 20...25°. Перевагою такого сепаруючого пристрою є також низька чутливість до нахилів машини відносно горизонтального положення. Поряд з перевагами прутковий елеватор має й вагомні недоліки: наявність великої кількості поверхонь тертя, наслідком чого є швидке зношування поверхонь, які труться в абразивному середовищі та зайві витрати енергії на привід елеватора; значна металоємкість, викликана тим, що робоча частина елеватора складає менш ніж 80% загальної довжини елеватора; залипання проміжків між прутками елеватора при роботі на вологих ґрунтах тощо.

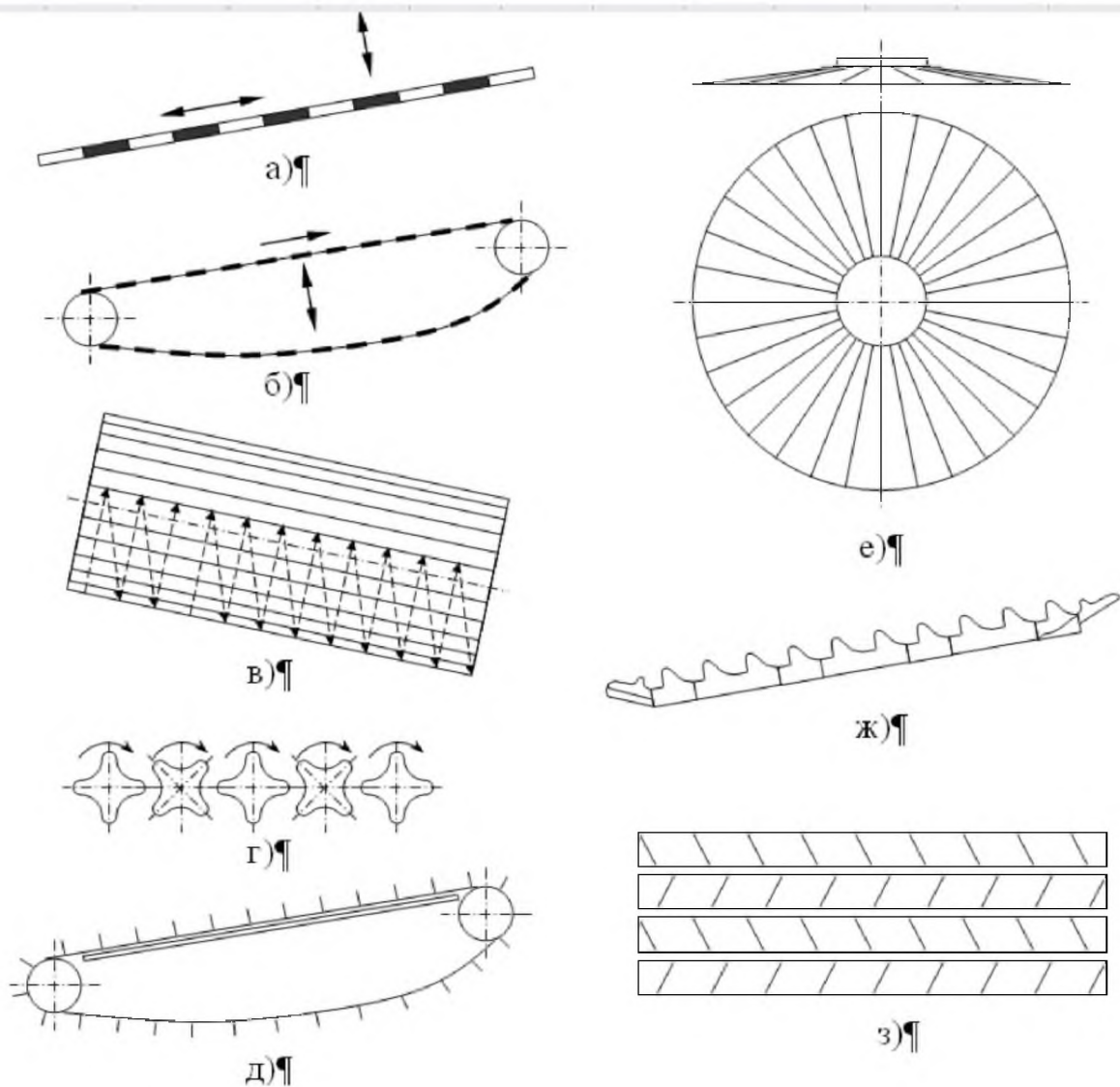


Рисунок 1.2 - Сепаруючі робочі органи картоплезбиральних машин

Поряд з прутковими елеваторами на сучасних картоплезбиральних машинах використовуються грохоти з коливальним рухом, вібраційні та барабанні грохоти.

У вібраційних грохотів коливання решета викликаються незрівноваженими вантажами (дебалансним вібратором). Амплітуда і траєкторія коливань залежать від співвідношення мас дебаланса і корпусу. При збільшенні маси грохоту в період його перевантаження масою, яка сепарується, амплітуда може зменшитися до нуля. Тому такі грохоти малоприйнятні в картоплезбиральних машинах.

Плоскі грохоти з поздовжніми коливаннями в даний час є найбільш поширеним типом грохотів картоплезбиральних машин. Перевагою такого

грохоту є те, що він дозволяє без особливих труднощів шляхом заміни решіт змінювати відстань між сусідніми прутками практично в любых необхідних межах.

Досить широкого розповсюдження в ранніх конструкціях картоплезбиральних машин знаходили барабанні грохоти (рис. 1.2, в), який відрізняється надійністю в роботі та зносостійкістю. Їх перевагою є також відсутність незрівноважених інерційних сил і можливість підйому маси на велику висоту. Однак барабан забивається рештками рослинності та вологим ґрунтом, у зв'язку з чим знижується його сепаруюча здатність. Під час роботи на каменистих ґрунтах бульби сильно пошкоджуються в барабані камінням.

На деяких комбайнах в якості основного елеватора використовували ротаційний чашевий сепаратор. Перевагою чашевих сепараторів, як і барабанних, є відсутність незрівноважених інерційних сил. За характером руху сепаруючої поверхні до чашевих сепараторів близьке циліндричне решето (рис. 1.2 е), яке використовується на ряді картоплезбиральних машин за кордоном.

Велику групу сепараторів складають валикові грохоти (рис. 1.2 г). Вони дозволяють підіймати масу при куті нахилу до  $15^{\circ}$ . Перевагою цих сепараторів є відсутність інерційних сил і місць інтенсивного зношування, але вони схильні до заклинювання при потраплянні сторонніх тіл та каміння між кулачки та намотування на валики рослинних рештків.

Підйом маси успішно здійснюється скребковим транспортером в поєднанні з колосниковою граткою (рис. 1.2, д). Під час руху маси відбувається фрезерування та руйнування ґрунтових грудок об виступаючі один над одним прутки гратки. В приймальній частині прутки розташовані паралельно, а далі під кутом  $45^{\circ}$  до осьової лінії. Кінці прутків перекривають один одного.

Прутково-клавішний сепаратор (рис. 1.2, ж) складається з двох секцій пруткових клавіш, нахилених під кутом  $22^{\circ}$  з зазором між прутками 30 мм. Прутки однієї секції розташовані між прутками іншої секції і створюють перепади в кожній секції. При обертанні колінчастих валів картопля пересувається по перепадам вгору на перебиральний стіл.

Гвинтові (шнекові) сепаратори (рис. 1.2, з) складаються з однієї чи декількох пар гвинтів, які обертаються в різних напрямках. Особливістю роботи цих сепараторів є участь у робочому процесі окрім сил гравітації сил тертя, що дозволяє окрім ґрунту видаляти і рослинні рештки, протягуючи їх скрізь щілини. Хоча гвинтові сепаратори використовуються на деяких картоплезбиральних машинах, вони не можуть бути признаними перспективними внаслідок сильного пошкодження бульб.

Таким чином, ні один з розглянутих робочих органів для сепарації бульбоносної маси не має значних переваг. Тому в картоплезбиральних машинах найбільшого поширення останнім часом набули пруткові елеватори внаслідок простоти конструкції.

#### 1.4 Аналіз досліджень картоплекопачів і сепараторів

Дослідження процесу роботи сепаруючих пристроїв збиральних машин проводились в наступних напрямках.

М.Е. Мацепуро досліджував закономірність сепарації картопляного вороху по довжині елеватора. Для опису явища просіювання ґрунту запропонував степеневу функцію наступного виду [ 11]:

$$\varepsilon = 1 - Q_0^{-(\alpha_1 x + 1)}, \quad (1.3)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь сепарації ґрунту;  $Q_0$  - маса ґрунту, що поступила на елеватор;  $x$  - довжина елеватора;  $\alpha_1$  - коефіцієнт, який залежить від типу і стану ґрунту.

Таким чином, стан картопляного вороху характеризується лише одним узагальнюючим показником, який, безперечно, не може адекватно описати фізичну модель ґрунту, тому рівняння (1.3) не завжди відповідає реальному процесу сепарації ґрунтів різних типів.

Професор Петров Г.Д. запропонував для опису процесу просіювання ґрунту сепараторами картоплезбиральних машин рівняння наступного виду [13]:

$$\varepsilon = 1 - e^{-k_2 T} + (1 - \nu) \frac{k_2}{k_2 - k_1} (e^{-k_2 T} - e^{-k_1 T}), \quad (1.4)$$

де  $k_1$  і  $k_2$  - коефіцієнти, які визначають здатність грудок до руйнування і здатність ґрунту до просіювання відповідно;  $\nu$  - відносний вміст прохідної фракції в воросі, що поступає на елеватор;  $T$  - час сепарації.

Аналізуючи це рівняння неважко помітити, що навіть коли на сепараторі товщина вороху буде досить малою, тобто він буде розміщуватись в один шар, у воросі ще буде значна кількість прохідної фракції. А експериментальні дослідження свідчать про те, що вже протягом декількох перших секунд на сепараторі залишаються лише частинки ґрунту непрохідної фракції. Тому, рівняння (1.4) не відповідає реальному проходженню сепарації картопляного вороху.

Досить точно описує процес сепарації картопляного вороху математична модель, побудована на ймовірнісній природі протікання процесів перемішування вороху та просіювання частинок прохідної фракції, що опинилися на сепаруючій поверхні [ 18 ].

$$h(t_{i+1}) = h(t_i) - \frac{H}{\sqrt{2\pi b \Delta t}} \int_0^{h(t_i)} k_s \cdot q(z, t_i) \cdot e^{-\frac{(x+z)^2}{2b\Delta t}} dx, \quad (1.5)$$

де  $H$  - товщина шару вороху в початковий момент часу  $t_0$ , м;  $q(z, t)$  - відносна кількість відповідно грудок ґрунту прохідної фракції, непрохідної фракції та бульб картоплі на віддалі  $z$  від сепаруючої поверхні в момент часу  $t$ ;  $b$  - коефіцієнт перемішування вороху,  $c^{-1}$ ;  $h$  - змінна товщина шару вороху, м;  $k_s$  - коефіцієнт просіювання ґрунту;  $k_1$  і  $k_2$  - емпіричні коефіцієнти, які характеризують відповідно здатність грудок ґрунту до руйнування та ступінь зниження руйнуючого впливу сепаратора із віддаленням від робочої поверхні;  $T$  - час сепарації, с.

Проте використання рівняння (1.5) для різних конструкцій сепараторів вимагає проведення значної кількості трудомістких експериментальних досліджень з визначення емпіричних коефіцієнтів моделі, які залежать не лише

від параметрів та режимів роботи машини, але й від фізико-механічних властивостей картопляного вороху.

Тому актуальним є розробка нової математичної моделі сепарації вороху картоплі, на основі інтенсивності руйнування грудок та просіювання ґрунту в сепараторі.

### 1.5 Постановка мети і завдання дослідження

Мета роботи – зменшення металомісткості, збільшення продуктивності та якості сепарації картоплекопача завдяки розробці прутково-клавішного сепаратора картоплекопача та обґрунтування його параметрів і режимів роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати конструкції та способи здійснення робочих впливів на картопляний ворох наявними сепараторами та окреслити напрями підвищення ефективності їх роботи;

2. У даній роботі необхідно обґрунтувати функціональну та принципову схеми нового картоплекопача, а також провести розрахунок його вузлів.

3. Розробити конструкцію прутково-клавішного сепаратора картоплекопача та ідентифікувати головні його параметри і режими роботи;

4. На основі розкриття явищ просіювання дрібної фракції ґрунту та пошкодження бульб, які здійснюються завдяки взаємодії прутків сепаратора з картопляним ворохом, розробити математичну модель процесу його сепарації;

4. Запропонувати методику визначення енергії, поглиненої при зіткненні бульби з робочими органами картоплекопача.

5. Розробити лабораторну установку для визначення впливу частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту та знайти оптимальні значення цих факторів використовуючи математичний метод планування експерименту.

Ці завдання виконані. Нижче подані отримані результати цих досліджень.

## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ

2.1 Відомості про технологічні процеси та обґрунтування функціональної схеми картоплекопача

Роздільний спосіб збирання картоплі застосовується там де через ґрунтово-кліматичні та інші умови ускладнюється застосування даних способів. При цьому способі бульби викопують і частково очищають картоплекопачами, які залишають бульби на поверхні поля. Після підсихання бульби підбирають вручну.

Копач картоплі, що проектується призначений для виконання таких технологічних процесів (рис.2.1):

- попереднє очищення грядок від бадилля і спрямування його під опорно-привідні колеса;
- підкопування одного рядка картоплі;
- відокремлення (сепарація) бульбоплодів від ґрунту;
- укладання їх на поверхні поля.

Попереднє очищення грядки від рослинних решток відбувається за допомогою бральних апаратів, встановлених перед підкопуючим лемешем. При русі агрегату, бральний апарат захоплюючи вітки рослин, що знаходяться над поверхнею рядка, витягує їх із ґрунту разом з кореневою системою і транспортує у зону кочення опорних коліс машини. В ході транспортування, рослини звільняються від захоплення гумовим конусом і попадають під опорні колеса, котрі укладають рослинну масу у міжряддя. Дана технологічна операція дозволяє відчутно полегшити роботу наступних робочих органів, так як вони вже будуть взаємодіяти з відносно однорідною масою, що складається з ґрунту, кам'яних включень та бульбоплодів.

Леміш, що розташований в кінці зони брання бральних апаратів підрізаючи шар ґрунту полегшує процес витягування рослин. Підрізаний шар

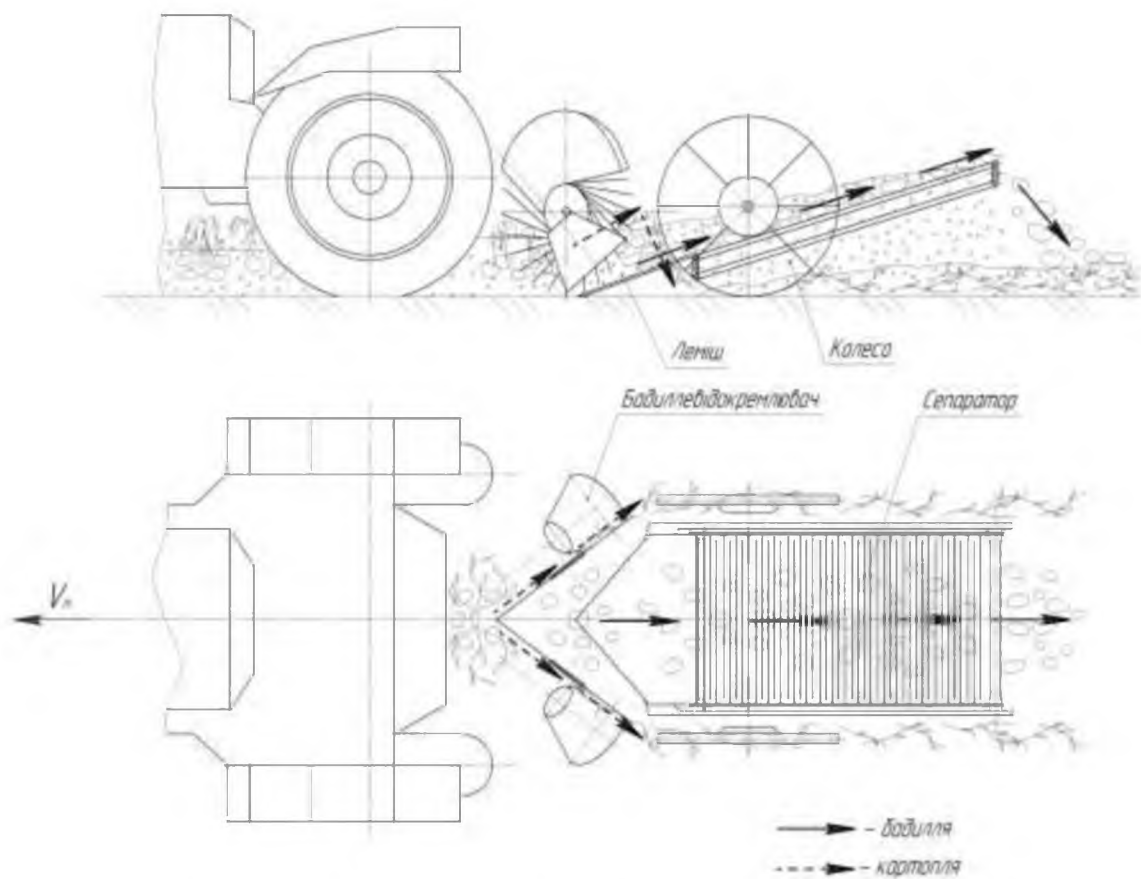


Рисунок 2.1 - Функціональна схема картоплекопача

грунту, очищений від рослинних залишків, кріпиться і спрямовується лемешем на сепаратор. Підрізання лемеша полягає в тому, що він повинен повністю, не залишаючи поза собою бульбоплоди, підрізати шар і частково зруйнувавши транспортувати ні подальші робочі органи.

Наступна технологічна операція є завершальною в даній машині і тому вона є найважливішою у технологічному процесі збирання картоплі. Шар ґрунту, частково зруйнований лемешем, спрямовується на сепаруючий робочий орган. Сама операція відокремлення бульбоплодів від ґрунту включає в себе такі дії: зворушення шару ґрунту, просіювання ґрунту та кам'яних включень за розмірами меншими 30 мм, транспортування бульб за межі сепаруючого робочого органу. Сепаруючий орган дозволяє повністю відокремити бульбоплоди від ґрунту порівняно з машинами-аналогами на малій робочій довжині, що діє змогу спростити конструкцію машини і знизити матеріаломісткість.

Очищені бульбоплодів від бадилля, ґрунту і кам'яних включень укладаються на поверхні поля в межах підкопуючого рядка.

Після механізованого підкопування і очищення бульбоплодів від ґрунту один робітник має змогу без зайвих зусиль підібрати бульбоплоди.

Розроблений картоплекопач дозволяє повністю підкопати і очистити бульби картоплі від ґрунту при складних ґрунтово-кліматичних умовах; підвищеній вологості, високій забрудненості та тяжких ґрунтах.

## 2.2 Продуктивність та завантаження копача картоплі

Швидкість руху машини визначається з умови недопущення згрупування маси на сепаруючому органі [17]

$$V_m = V_{zp} \cdot \cos \alpha_c, \quad (2.1)$$

де  $V_{zp}$  - швидкість руху маси ґрунту на решетах, м/с

$$V_{zp} = \frac{\pi n}{30} \cdot r_A, \quad (2.2)$$

де  $r_A$  - радіус кривошипа (0,015м);

$$V_{zp} = \frac{3,14 \cdot 495}{30} \cdot 0,015 = 0,78 \text{ м/с};$$

$$V_m = 0,78 \cdot \cos 17^\circ = 0,75 \text{ м/с}.$$

Розрахункова продуктивність копача картоплі за 1 год чистої роботи

$$F_o = 0,1icV_m, \text{ га/год} \quad (2.3)$$

де  $i$  - число рядків, котрі підкопуються ( $i=1$ );

$c$  - ширина міжрядь ( $c = 700 \text{ мм}$ ).

$$F_o = 0,1 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 0,7 = 0,19 \text{ га/год}.$$

Завантаження копача картоплі масою – масова витрата (в кг/с)

$$Q = Q_{zp} + Q_{кор.} + Q_{гич}, \quad (2.4)$$

де  $Q_{zp}$  - завантаження підкопаним ґрунтом,

$Q_{кор.}$  - завантаження коренеплодами,

$Q_{гич}$  - завантаження гичкою.

Середнє секунднє завантаження підкопаною масою без врахування в щільності коренеплодів складає

$$Q_{cp} = Q_2 + Q_{кор.} \approx SV_M \rho_2, \quad (2.5)$$

де  $S$  - площа поперечного перерізу підкопаного пласта, м<sup>2</sup> ( $S = 0,1\text{м}^2$  при грудковому садінні);

$\rho_2$  - щільність ґрунту, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_2 = 1700$  кг/м<sup>3</sup>).

$$Q_{cp} = 0,1 \cdot 0,75 \cdot 1700 = 127,5 \text{ кг/с.}$$

Секунднє завантаження гичкою може бути визначене за формулою

$$Q_{гич} = 0,1icG_{гич}V_M, \quad (2.6)$$

де  $G_{гич}$  - врожайність гички, т/га ( $G_{гич} = 12\text{т/га}$ ).

$$Q_{гич} = 0,1 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 12 \cdot 0,75 = 0,63 \text{ кг/с.}$$

Отже,

$$Q = 127,5 + 0,63 = 128,13 \text{ кг/с.}$$

### 2.3 Енергетичний розрахунок копача картоплі

Потужність, що використовується начіпним копачем картоплі, витрачається на переміщення  $N_n$ , подолання опору ґрунтового шару, що підрізається лемешем  $N_p$ , на привід бральних апаратів та на привід сепаратора:

$$N = N_n + N_p + N_{гич} + N_c. \quad (2.7)$$

Потужність на переміщення

$$N_n = fN_k gV_M, \quad (2.8)$$

де  $N_k$  - маса копача картоплі ( $N_k = 150\text{кг}$ );

$f$  - коефіцієнт перекочування ( $f = 0,2[17]$ ).

Тоді

$$N_n = 0,2 \cdot 150 \cdot 9,81 \cdot 0,75 = 220,73 \text{ Вт.}$$

При використанні пасивних лемешів зусилля на підрізання і передачу шару на сепаруючі робочі органи може бути визначено за формулою:

$$P_p = kS + mg \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \varepsilon S \rho V_m^2, \quad (2.9)$$

де  $k = 6500 \text{ Па}$  - питомий опір ґрунту, [17];

$m$  - маса шару ґрунту, що знаходиться на лемеші:

$$m = \rho(S \cdot L_n) = 1700(0,1 \cdot 0,3) = 51 \text{ кг},$$

$\alpha = 18^\circ$  - кут нахилу лемеша;

$\varphi = 26,56^\circ$  - кут тертя ґрунту по сталі [17];

$\varepsilon = 1$  - коефіцієнт, що характеризує тип лемеша.

Звідси

$$P_p = 6500 \cdot 0,1 + 51 \cdot 9,81 \cdot \operatorname{tg}(18 + 26,56) + 1 \cdot 0,1 \cdot 1700 \cdot 0,75^2 = 993,2 \text{ Н}.$$

Потужність на підрізання і переміщення шару

$$N_p = P_p V_m = 993,2 \cdot 0,75 = 745 \text{ Вт}. \quad (2.10)$$

Зусилля на гаку

$$P_{\text{зак}} = P_n + P_p \leq 2 \text{ кН},$$

де  $P_n = N_n / V_m = 220,73 / 0,75 = 294,3 \text{ Н}$ .

Тоді  $P_{\text{зак}} = 294,3 + 993,2 = 1287,5 \leq 2 \text{ кН}$ .

Потужність на привід брального апарата:

$$N_{\text{б}} = A_{\text{б}} B n j V_m, \quad (2.11)$$

де  $B = 0,205 \text{ м}$  - ширина захвату 1 секції;

$n$  - кількість секції ( $n = 2$ );

$j = 1100 \text{ ст/м}^2$  - густина стеблестою;

$A_{\text{б}} = 0,28 \text{ Дж}$  - робота, що використовується на брання 1 стебла; [13].

Отже,

$$N_{\text{б}} = 0,28 \cdot 0,205 \cdot 2 \cdot 1100 \cdot 0,75 = 84,71 \text{ Вт}.$$

Потужність на привід сепаруючого робочого органа визначається за формулою:

$$N_c = T\omega, \quad (2.12)$$

де  $T = 10,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$  - крутний момент на валу, що визначається за формулою (2.26);

$\omega = 51,81 \text{ с}^{-1}$  - кутова швидкість обертання вала.

Потужність для привода сепаратора

$$N_c = 10,2 \cdot 51,81 = 528,46 \text{ Вт}.$$

Тоді загальна потужність копача картоплі буде рівна

$$N = 220,73 + 745,0 + 84,71 + 528,46 = 1589 \text{ Вт} \approx 1,6 \text{ кВт}.$$

#### 2.4 Силовий розрахунок сепаратора

Необхідно визначити ряд силових факторів, котрі впливають на режим навантаження.

Сила ваги ґрунту, що знаходиться на сепараторі

$$G_{gp} = \frac{1}{2} S L_p \rho g, \quad (2.13)$$

де  $\frac{1}{2}$  - коефіцієнт розподілу маси (маса розділена у вигляді трикутника);

$$G_{gp} = \frac{1}{2} \cdot 0,1 \cdot 0,75 \cdot 1700 \cdot 9,81 = 625,4 \text{ Н}.$$

Сила ваги решета, котре несе на собі підкопану масу

$$G_p = n_{np} \cdot m_{np} \cdot k \cdot g, \quad (2.14)$$

де  $n_{np} = 25$  - кількість прутків решета;

$m_{np} = 0,250 \text{ кг}$  - маса одного прутка;

$k = 1,2$  - коефіцієнт, що враховує масу клавіші.

Тоді  $G_p = 25 \cdot 0,250 \cdot 1,2 \cdot 9,81 = 73,58 \text{ Н}$ .

Сила ваги бульбоплодів, що знаходяться на решеті (бульбоплоди розподілені рівномірно):

$$G_k = \kappa \cdot m_k \cdot g, \quad (2.15)$$

де  $\kappa = 25$  - кількість підкопаних картоплин на решеті;

$m_k = 0,2 \text{ кг}$  - маса бульбоплодів.

Звідси сила ваги бульбоплодів на решеті

$$G_k = 25 \cdot 0,2 \cdot 9,81 = 49,8 \text{ Н.}$$

Розглянемо крайнє положення решіт сепаратора при якому кривошипні вала знаходяться в горизонтальному положенні (рис. 2.2).

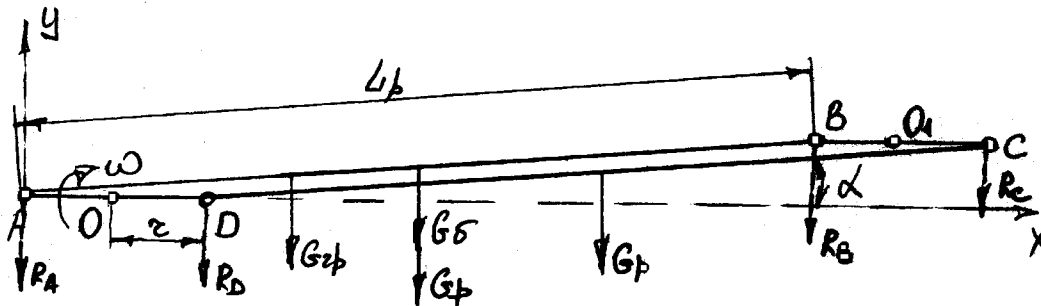


Рисунок 2.2 - Схема визначення крутного моменту

Розглянемо решето  $AB$  на яке діють:

- сила ваги ґрунту, що знаходиться на відстані  $\frac{1}{3}L_p$ ;
- сила ваги бульбоплодів і решета, котрі прикладені на відстані  $0,5L_p$  від шарніра  $A$  (рис. 2.3).

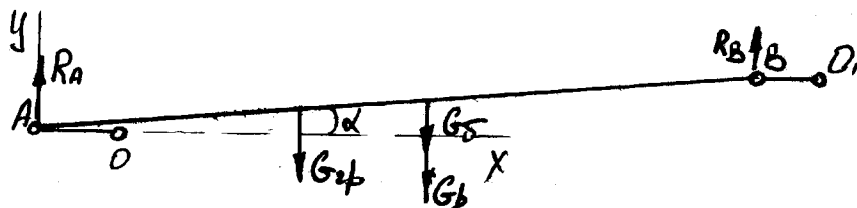


Рисунок 2.3 - Схема решета  $AB$

При розрізі, в шарнірах  $A$  і  $B$  виникають реакції  $R_A$  і  $R_B$ , направлені по осі  $y$ , визначимо їх величину. Складаємо два рівняння рівноваги:

$$1. \sum Y = 0;$$

$$R_A + R_B - G_{\omega} - G_e - G_p = 0;$$

$$2. \sum M_A = 0;$$

$$-G_{zp} \cdot \frac{1}{3} L_p \cdot \cos \alpha - G_k \cdot 0,5 L_p \cdot \cos \alpha - G_p \cdot 0,5 L_p \cdot \cos \alpha + R_B \cdot L_p \cos \alpha = 0.$$

З другого рівняння знайдем реакцію  $R_A$ :

$$R_A = \frac{1}{3} G_{zp} + 0,5 G_k + 0,5 G_p = \frac{1}{3} \cdot 625,4 + 0,5 \cdot 49,8 + 0,5 \cdot 73,58 = 270,16 H.$$

Тепер розглянемо дію сил решета  $DC$  рис. 2.4.

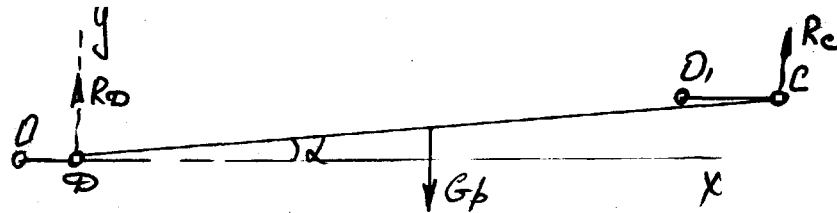


Рисунок 2.4 - Схема решета  $DC$

Решето  $DC$  працює на холостому ході, тому на нього діє тільки сила ваги.

Складемо також два рівняння рівноваги:

$$1. \sum Y = 0;$$

$$R_D - G_p + R_C = 0;$$

$$2. \sum M_D = 0;$$

$$G_p \cdot 0,5 L_p \cdot \cos \alpha + R_C \cdot L_p \cos \alpha = 0.$$

З другого рівняння рівноваги

$$R_C = G_p \cdot 0,5 = 73,58 \cdot 0,5 = 36,8 H.$$

$$\text{Тоді } R_D = G_p - R_C = 73,58 - 36,8 = 36,78 H.$$

Отже, коли ці реакції прикласти до кривошипів ведучого та веденого валів, ми можемо визначити необхідний крутний момент для приведення в рух механізму:

$$M_{кр.н} \geq M_{кр.о} + M_{кр.о_1}, \quad (2.16)$$

де  $M_{кр.о}$  - крутний момент на ведучому валі  $O$ :

$$M_{кр.о} = (R_A - R_D) \cdot r = (478,62 - 36,78) \cdot 0,015 = 6,63 H \cdot м;$$

$M_{кр.о_1}$  - крутний момент на веденому валі  $O_1$ :

$$M_{кр.о1} = (R_B - R_C) \cdot r = (270,16 - 36,8) \cdot 0,015 = 3,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$\text{Отже, } M_{кр.н} \geq 6,63 + 3,5 = 10,13 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$\text{Приймаємо, що } M_{кр.н} = 10,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначимо згинальні моменти консольного закріплення прутків.

Згинальний момент виникає при навантаженні масою прутка, а також під дією власної ваги. Для визначення цих моментів розглянемо схему дії сил на пруток при навантаженні і холостому ході рис. 2.5.

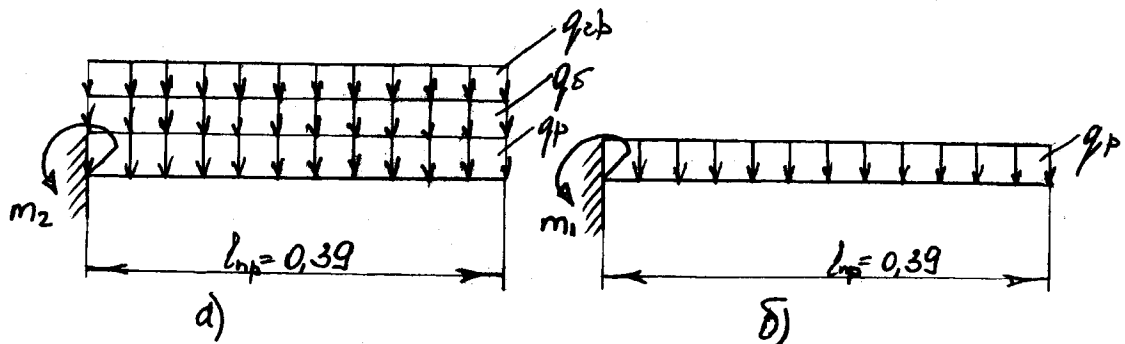


Рисунок 2.5 - Схема визначення згинальних моментів:

а) при робочому ході; б) при холостому ході

На пруток, що закріплений консольно діють рівномірно розподілені навантаження  $g_{зр}$ ,  $g_{к}$ ,  $g_{р}$  - при робочому ході та  $g_{р}$  - при холостому. Під дією цих навантажень виникає згинальний момент, для котрого передається на коліна вала. Отже, цей момент лемеша визначимо за такою формулою:

- момент  $m_1$

$$m_1 = \frac{1}{2} g_{р} \cdot L_p^2 = \frac{1}{2} \cdot 188,7 \cdot 0,39^2 = 14,35 \text{ Нм}, \quad (2.17)$$

- момент  $m_2$

$$m_2 = \frac{1}{2} (g_{р} + g_{к} + g_{зр}) \cdot L_p^2 = \frac{1}{2} (1603,6 + 127,7 + 188,7) \cdot 0,39^2 = 146 \text{ Нм}.$$

## 2.5 Побудова математичної моделі процесу сепарації

В результаті аналізу досліджень вчених, які вивчали процес руйнування грудок ґрунту робочими органами сільськогосподарських машин встановлено, що інтенсивність руйнування грудок ґрунту із віддаленням від робочого органу зменшується за показниковим законом (рис. 2.6), тобто ступінь руйнування грудок можна записати як функцію від ступеню інтенсивності впливів сепаратора на картопляний ворох, тривалості сепарації та відстані від грудки до сепаруючої поверхні:

$$\varepsilon = r_1 e^{-r_2 \cdot z} \Delta t, \quad (2.18)$$

де  $\varepsilon$  - ступінь руйнування грудок;

$r_1$  і  $r_2$  – емпіричні коефіцієнти, які залежать від механічних властивостей грудок ґрунту та нормальної швидкості зіткнення частинок вороху із сепаруючою поверхнею;

$z$  - віддаль до робочого органу.

Коефіцієнт  $r_1$  характеризує здатність грудок ґрунту до руйнування під дією нормальної складової швидкості зіткнення, а коефіцієнт  $r_2$  -ступінь зниження інтенсивності впливу сепаратора на картопляний ворох із віддаленням від робочої поверхні.

Таким чином, інтенсивність руйнування грудок можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{dR}{dt} = (1 - q) \int_0^h r_1 \cdot e^{-r_2 \cdot z} dz, \quad (2.19)$$

де  $q$  - відносна кількість прохідної фракції ґрунту на сепараторі.

Кількість ґрунту непрохідної фракції на сепараторі в момент часу  $T$  визначатиметься з рівняння:

$$R = R_0 - \int_0^T (1 - q) \int_0^h r_1 \cdot e^{-r_2 \cdot z} dz dt, \quad (2.20)$$

де  $T$ - тривалість сепарації, с.

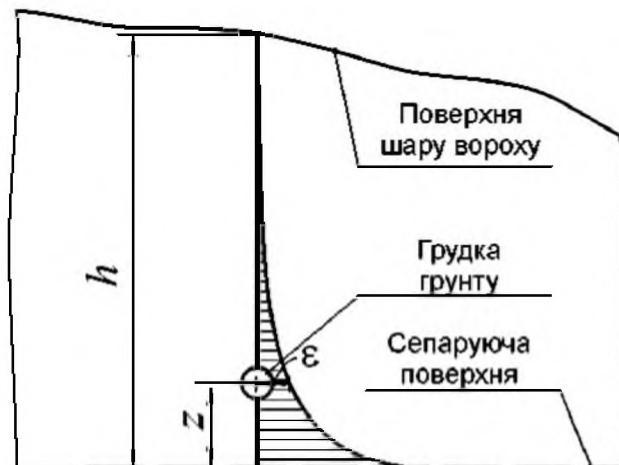


Рисунок 2.6 - Схема до грунту. визначення інтенсивності руйнування грудок

Динамічна дія сепаруючої поверхні на ворох окрім корисної роботи з руйнування грудок ґрунту призводить до шкідливої роботи з пошкодження бульб. Оскільки характер пошкоджуючих дій сепаратора на бульби подібний до руйнуючого впливу на грудки, інтенсивність пошкоджень бульб картоплі буде збільшуватись із наближенням до сепаруючої поверхні і буде залежати від інтенсивності динамічної дії сепаратора на ворох, тривалості сепарації та відстані від бульби до сепаруючої поверхні:

$$\varepsilon_b = k_1 e^{-k_2 \cdot z} t, \quad (2.21)$$

де  $\varepsilon_b$  - ступінь пошкоджень бульб;

$k_1$  і  $k_2$  - емпіричні коефіцієнти, які залежать від механічних властивостей бульб та інтенсивності динамічної дії сепаратора на картопляний ворох;

$z$  - віддаль від бульби до сепаруючої поверхні, м;

$t$  - час сепарації, с.

Коефіцієнт  $k_1$  характеризує здатність бульб до пошкодження та інтенсивність динамічної дії сепаратора на ворох, а коефіцієнт  $k_2$  - ступінь зниження інтенсивності пошкоджень бульб сепаратором із віддаленням від робочої поверхні.

Тоді, залежність інтенсивності пошкодження бульб запишеться наступним чином:

$$\frac{dm_{n\bar{o}}}{dt} = q_k \int_0^h k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot z} dz \quad (2.22)$$

де  $q_k$  - відносна кількість картопляних бульб у воросі.

Загальну кількість пошкоджених бульб впродовж часу  $T$  можна визначити за формулою:

$$m_{n\bar{o}} = \int_0^T q_k \int_0^h k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot z} dz dt \quad (2.23)$$

Відповідно, ступінь пошкоджень бульб сепаратором буде дорівнювати:

$$P_{\bar{o}} = \frac{m_{n\bar{o}}}{m_{0\bar{o}}} \int_0^T q_k \int_0^h k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot z} dz dt / m_{0\bar{o}} \quad (2.24)$$

де  $m_{0\bar{o}}$  - кількість бульб в картопляному воросі, кг.

Значення коефіцієнтів  $k_1$  і  $k_2$ , які характеризують вплив фізико-механічних властивостей бульб та інтенсивності динамічної дії сепаратора на пошкоджуваність бульб, можна визначити експериментально шляхом аналізу ступеня пошкоджень бульб сепаратором на різних режимах роботи.

В дослідженнях [11] встановлено, що ймовірність того, що за час  $\Delta t$  частинка з точки з координатою  $z_0$  переміститься в точку з координатами  $z$  дорівнюватиме (рис. 2.7):

$$f(z_0, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b \Delta t}} e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2b \Delta t}} \quad (2.25)$$

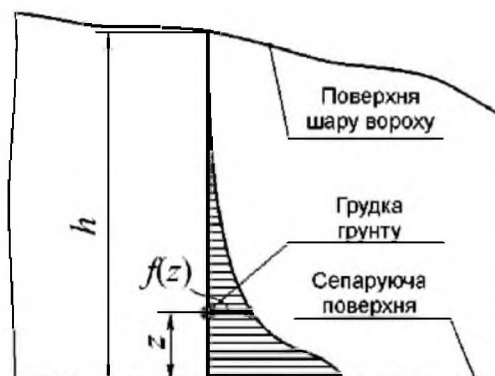


Рисунок 2.7 - Схема до визначення інтенсивності просіювання ґрунту

Для опису процесу сепарації ґрунту припустимо, що дрібні частинки, які опустилися на сепаруючу поверхню просіюються з ймовірністю  $k_s$ , яка, очевидно, залежить від просвіту та розміру отворів між прутками сепаруючої поверхні, а також розміру частинок, що просіюються.

Залежність інтенсивності просіювання ґрунту від нормальної швидкості зіткнення вороху з поверхнею сепаратора доцільно врахувати шляхом введення емпіричного коефіцієнта  $k_v$ . Тоді, кількість ґрунту, що просіюється за час  $\Delta t$  становитиме:

$$\Delta h = \frac{k_v k_s}{\sqrt{2\pi b \Delta t}} \int_0^h e^{-\frac{x^2}{2b\Delta t}} dx,$$

де  $h$  - поточна товщина шару вороху, м.

Таким чином, рівняння зміни товщини шару вороху на сепараторі можна записати у вигляді :

$$h(T) = H - \int_0^T \left( \frac{k_v k_s}{\sqrt{2\pi b t}} \int_0^h e^{-\frac{x^2}{2bt}} dx \right) dt,$$

де  $T$  - час сепарації, с;  $H$  - товщина шару вороху в початковий момент часу, м.

Тоді ступінь сепарації ґрунту можна визначити за формулою:

$$\eta_c(T) = -\frac{H - h(T)}{H}. \quad (2.28)$$

Для реалізації моделі процесу сепарації картопляного вороху необхідно було вибрати програмний пакет, який володіє інструментарієм призначеним для інтегрування заданих користувачем функцій, а також гнучкими засобами для аналізу результатів моделювання. Доцільно також мати можливість використання розробленої моделі для оптимізації параметрів та режимів роботи сепаратора. Усім цим вимогам відповідає система MatLAB з вбудованим пакетом SimuLink.

Пакет SimuLink призначений для інтерактивного моделювання динамічних систем. При цьому використовуються графічні елементи, які з'єднуються у послідовності, яка відповідає необхідним функціональним

зв'язкам. Істотною перевагою цього пакету є наявність засобів для інтегрування і диференціювання функцій будь-якої складності, а також розвинутого інструментарію для графічного відображення результатів моделювання.

Запропонована нами модель процесу сепарації картопляного вороху у системі SimuLink наведена на рис. 2.8. Визначення емпіричних коефіцієнтів математичної моделі процесу сепарації картопляного вороху уможливило аналіз залежності показників якості сепарації від параметрів та режимів роботи сепаратора. Побудуємо графічні залежності показників процесу сепарації від параметрів та режимів роботи сепаратора.

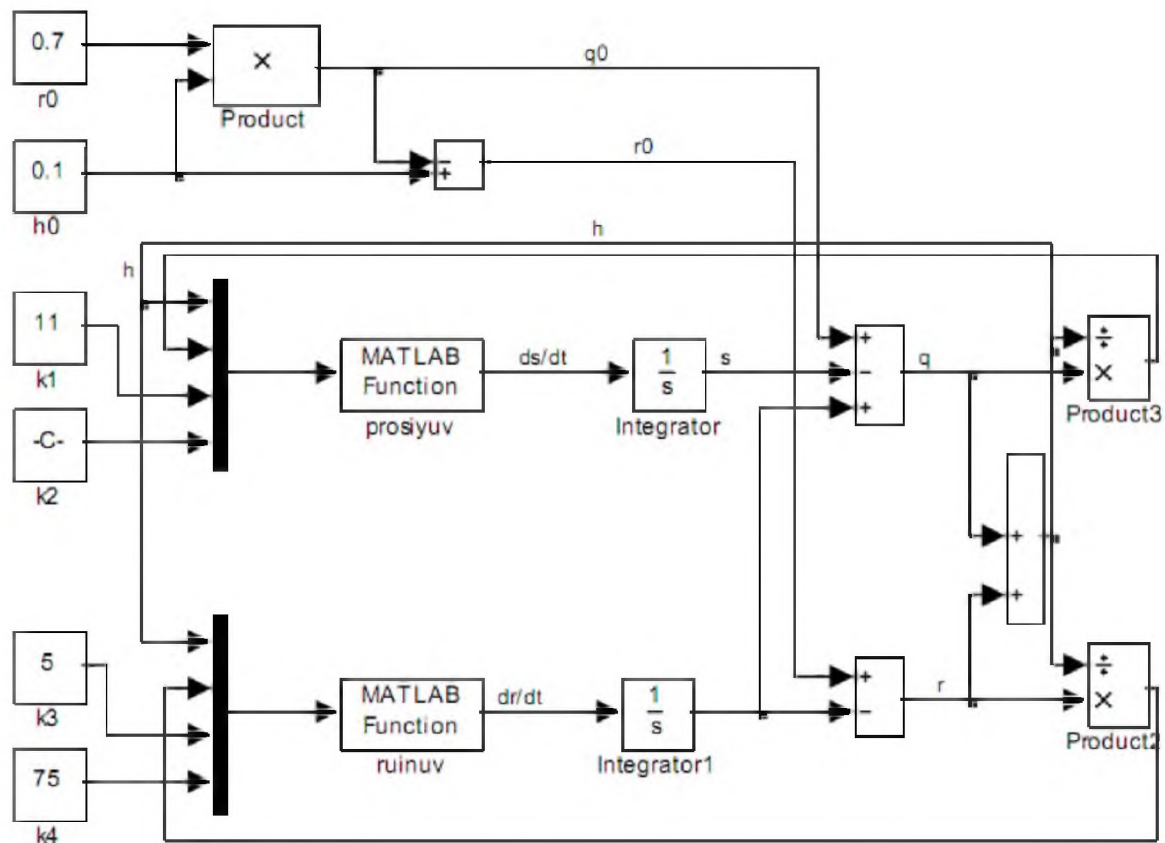


Рисунок 2.8 - Реалізації моделі процесу сепарації картопляного вороху за допомогою додатка SimuLink

На рис. 2.9 і рис. 2.10 наведені графічні залежності інтенсивності руйнування грудок ґрунту та інтенсивності просіювання ґрунту від тривалості сепарації при різних значеннях ексцентриситету ланки колінчастого вала. З графіків видно, що максимальна інтенсивність руйнування грудок ґрунту

спостерігається в період, який відповідає повному відсіюванню дрібних частинок ґрунту, оскільки в цей час забезпечується прямий контакт крупних грудок з сепаруючою поверхнею. Інтенсивність просіювання ґрунту із часом сепарації зменшується. Це пояснюється зменшенням товщини шару вороху на сепараторі, а також поступовим відсіюванням прохідної фракції.

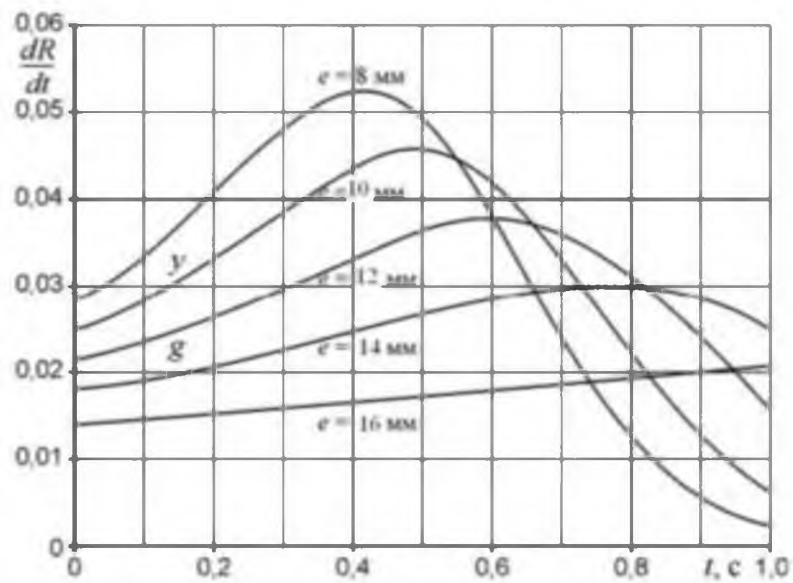


Рисунок 2.9 - Залежність інтенсивності руйнування грудок від тривалості сепарації  $t$  при різних значеннях ексцентриситету ланки колінчастого вала  $e$

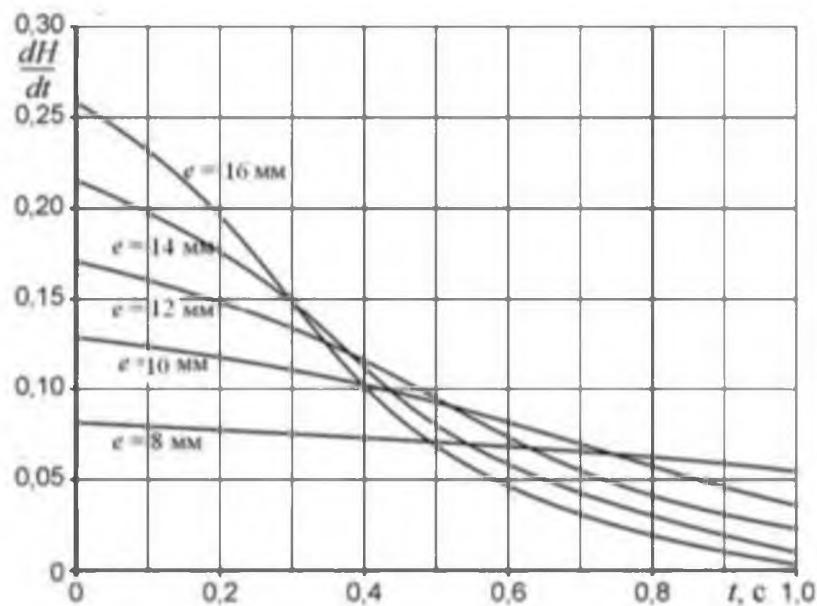


Рисунок 2.10 - Залежність інтенсивності просіювання ґрунту від тривалості сепарації  $t$  при різних значеннях ексцентриситету ланки колінчастого вала  $e$

Як видно з рис. 2.11, при однакових інших параметрах із збільшенням частоти обертання колінвала сепаратора збільшується як ступінь сепарації ґрунту, так і ступінь пошкоджень бульб. Горизонтальна ділянка графіків описує режими роботи сепаратора, які не забезпечують підкидання картопляного вороху.

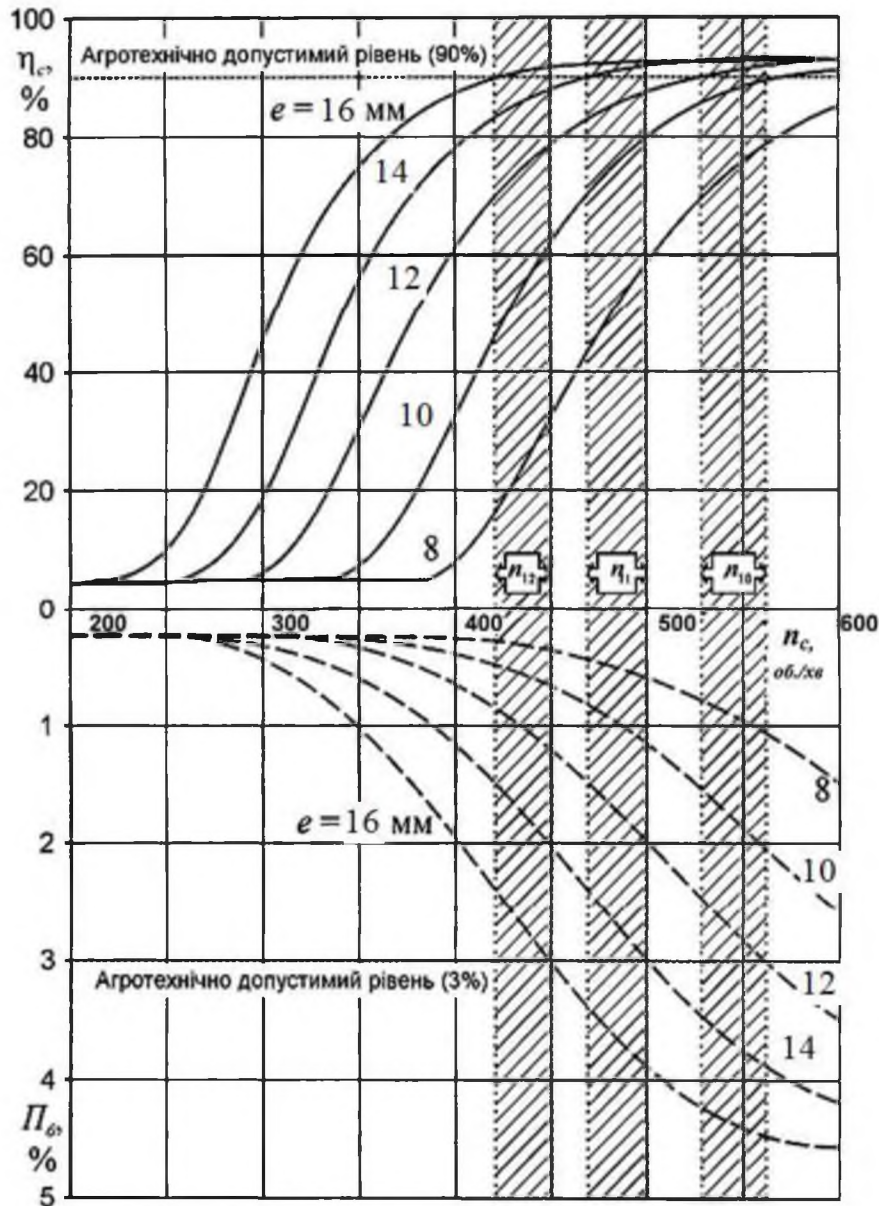


Рисунок 2.11 - Залежність ступеня сепарації ґрунту  $\eta_c$  та ступеня пошкоджень бульб  $P_b$  від частоти обертання колінвала сепаратора  $n_c$  при різних значеннях ексцентриситету ланки колінчастого вала  $e$  (при  $H = 0,1$  м,  $T = 1$  с,  $z = 0,023$  м,  $a = 17^\circ$ )

Виходячи із того, що агротехнічними вимогами накладаються обмеження на допустимий ступінь сепарації ґрунту (не нижче 90%) та ступінь пошкодження бульб (не більше 3%) з наведеного графіка можна виділити допустимі режими роботи сепаратора: при ексцентриситеті ланки колінчастого вала  $e=16$  мм - частота обертання колінвала сепаратора  $n_c=420\ldots450$  об./хв; ланки колінчастого вала  $e=14$  мм -  $n_c=465\ldots500$  об./хв;  $e=12$  мм -  $n_c=530\ldots565$  об./хв.

## 2.6 Висновки

1. Обґрунтовано функціональну схему нового картоплекопача.

3. На основі і теоретичних досліджень сепаратора картоплекопача було визначено наступні параметри:

1. Частота обертання колінвала - 495 об./хв.,
2. Довжина сепаратора - 0,75 м,
3. Кут нахилу решет до горизонту -  $17^\circ$ ,
4. Швидкість руху машини - 0,75 м/с,
5. Ширина решет - 0,39 м,
6. Крок між прутками решет - 30 мм,
7. Продуктивність копача картоплі - 0,19га/год,
8. Потужність копача картоплі - 1,6кВт.

4. Розроблено креслення конструкції прутково-клавішного сепаратора картоплезбиральної машини.

5. На основі розкриття явищ просіювання дрібної фракції ґрунту та пошкодження бульб, які здійснюються завдяки взаємодії прутків сепаратора з картопляним ворохом, розроблено математичну модель процесу його сепарації.

### 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Програма експериментальних досліджень

В зв'язку з основними завданнями, викладеними в першому розділі, на базі теоретичного аналізу роботи прутково-клавішного сепаратора розроблена програма та методика експериментальних досліджень сепаратора

Загальною програмою експериментальних досліджень передбачається:

а) визначення енергії, поглиненої при зіткненні бульби з робочими органами;

б) визначення впливу частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту.

Для виконання вищевказаної програми експериментальних досліджень необхідно вирішити наступні питання:

- розробити методику проведення окремих етапів досліджень;
- вибрати необхідне стандартне обладнання;
- розробити конструкцію лабораторної установки;
- організувати проведення досліджень у відповідності із методикою планування експериментів та обробкою результатів досліджень.

3.2 Опис експериментальних установок та апаратури, що використовується при експериментальних дослідженнях

Для визначення енергії, поглиненої при зіткненні бульби з робочими органами була запропонована лабораторна установка, зображена на рис. 3.1. До металевої плити 1 під кутом  $90^0$  приварена лінійка 2 з міліметровою шкалою, на якій за допомогою фіксатора 4 кріпиться кутник 3.

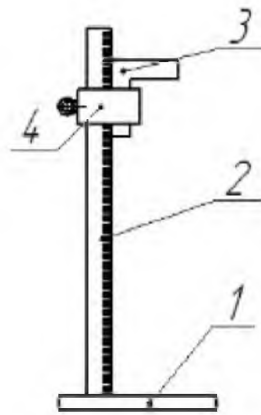


Рисунок 3.1 - Схема лабораторної установки для тарування руйнування крихкого покриття: 1 - металева плита 300x200x10 мм; 2 - лінійка; 3 - кутник; 4 - фіксатор

Ми поставили за мету дослідити вплив частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту. Для цього пропонуємо конструкцію експериментальної установки зображеної на рис. 3.2.

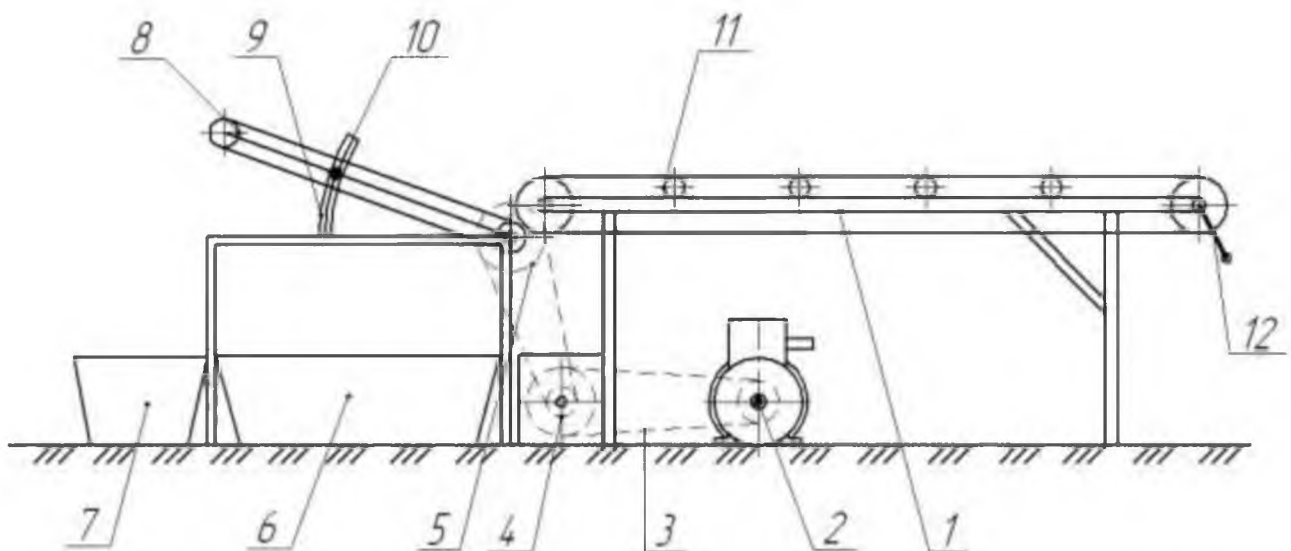


Рисунок 3.2 - Схема експериментальної установки: 1 – стіл; 2 – електродвигун з фазним ротором; 3 – клинопасова передача; 4 – коробка передач; 5 – варіатор; 6 – ящик для збору ґрунту; 7 – ящик для збору бульб; 8 – сепаратор; 9 – транспортер; 10 – фіксатор; 11 – стрічковий транспортер; 12 – корба

Дана установа складається з стола 1, під яким встановлений електродвигун 2, який через клинопасову передачу 3, коробку передач 4 і варіатор 5, приводить в рух колінчастий вал сепаратора 8. Сепаратор 8 закріплений до стола шарнірно, кут нахилу сепаратора забезпечується зажимом на транспортірі 9 фіксатора 10. Для подачі на сепаратор 8 бульбоносного шару використаний стрічковий транспортер 11, який приводиться в ручну за допомогою корби 12. Для збору просіяного ґрунту і бульб картоплі під сепаратором 8 розміщені ящики 6 і 7.

Для зважування окремих бульб картоплі і для зважування від сепарованої картоплі і ґрунту використовували електронні ваги з точністю до 1 г. Для вимірювання плями руйнування крихкого покриття на картоплі користувалися штангенциркулем з точністю вимірювання 0,5 мм.

Для тарування варіатора у відповідності до частоти обертання колін вала сепаратора користувалися ручним тахометром HANDY.

### 3.3 Методика статистичної обробки даних

При проведенні дослідів ми маємо справу з параметрами які потрібно визначати за допомогою знаходження середнього статистичного (або арифметичного) та середньоквадратичного відхилень з числа повторень  $n$ .

Середнє статистичне значення  $x_{cp}$  та середнє квадратичне відхилення  $S_c$  визначалися за наступними формулами:

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.1)$$

$$S_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{n-1}}, \quad (3.2)$$

Як відомо, неможливо провести абсолютно точно будь-яке вимірювання. Так при вимірюванні будь-яким приладом певної величини похибку приймають

рівною ціні поділки вимірювального приладу. Крім цього ми визначали абсолютні  $\Delta$  та відносні  $\delta$  похибки за наступними формулами:

$$\Delta = a - x, \quad (3.3)$$

$$\delta = \frac{\Delta}{a}, \quad (3.4)$$

де  $a$  – дійсне значення величини.

Також, для зручності, відносну похибку виражали у відсотках, тоді:

$$\delta = \frac{\Delta}{a} \cdot 100\%, \quad (3.5)$$

Бралось до уваги і те, що поняття похибки на пряму пов'язане з поняттям точності: чим вища похибка, тим нижча точність і, навпаки, чим вища точність, тим нижча похибка.

Застосовували ми також коефіцієнт варіації для характеристики розсіювання (мінливості) статичного розподілу. Цей коефіцієнт визначали за формулою:

$$V = \frac{S_c}{x_{cp}} \cdot 100\%, \quad (3.6)$$

Всі розрахунки проводились із застосуванням комп'ютера що забезпечувало їх високу точність. Для визначення деяких значень величин також використовувались спеціалізовані комп'ютерні програми, результатами яких були розрахунки проведені з високою точністю.

### 3.4. Методика визначення енергії, поглиненої при зіткненні бульби з робочими органами

Мета дослідів – визначити енергію, поглинену при зіткненні бульби з робочими органами картоплезбиральної машини.

Досліди проводились в лабораторних умовах на лабораторній установці, зображеної на рис. 3.1. Поверхня картоплин оброблялась спеціальним розчином. При проведенні експериментальних досліджень був зроблений вибір складу крихкого покриття : каніфоль - 99,65% і віск бджолиний - 0,35%. При такому складі крихкого покриття виключається поява тріщин на поверхні бульби, що не взаємодіє з поверхнею, в яку вдаряється бульба [ 11].

Перед нанесенням крихкого покриття бульба картоплі промивалися і просушувалися при кімнатній температурі до повного видалення вологи з їх поверхні. Для отримання оптимальної товщини крихкого покриття, бульби картоплі витримувалися в тепловій камері при температурі 50...60°C протягом 30 хвилин. Підготовка бульб до експерименту полягала в тому, що вони опускалися в розчин крихкого покриття, розігрітий до температури 80...90°C, витримувалися в нім 2...3 секунди і повільно виймалися. Після чого 5...7 секунд бульба витримувалася над ємкістю з розчином, потім охолоджувалася при кімнатній температурі до повного затвердіння крихкого покриття.

Проміжок часу між обробкою бульб і проведенням дослідів не повинен перевищувати 1...1,5 доби, при зберіганні бульб в діапазоні температур 5...10°C.

Енергія, поглинена при ударі, задавалася висотою падіння бульби (заздалегідь за допомогою ваг відбиралися бульби масою  $60 \pm 2$ г), за допомогою лінійки 2, трикутника 3, і розраховувалася по формулі:

$$W = mgh(1 - k^2), \quad (3.8)$$

де  $W$  - енергія, поглинена при ударі, Дж;

$m$  - маса бульби, кг;

$H$  - висота падіння бульби, м;

$k$  - коефіцієнт відновлення [13], при падінні картоплі на залізну плиту  $k = 0,59$ , а при вдарянні об гуму -  $k = 0,73$ .

Висота падіння змінювалась від 0,05 м до 0,5 м з інтервалом 0,05 м.

При взаємодії бульби картоплі з металевою плитою, на ній з'являються характерні плями у вигляді матових поверхонь округлої форми з чітко видимими

межами плями. Залежність поглиненої енергії і руйнування крихкого покриття на бульбах картоплі визначалася за величиною діаметру плями, вимірюваної штангенциркулем на його межі з точністю до 0,1 мм. За найменшим і найбільшим вимірам обчислювалося середнє значення, яке бралось за показник поглиненої енергії.

Досліди робились у трьохразовій повторюваності. Отримані дані статистично обробляються за формулами 3.1, 3.2 і 3.6.

### 3.5 Методика дослідження впливу частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту

Мета дослідів – визначення впливу частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту та знайти оптимальні значення цих факторів.

Досліди проводились на лабораторній установці, яка описана в п. 3.2 (рис. 3.2).

Для дослідів бралася картопля сорту Санте і ґрунт - суглинок середній з відносною вологістю 16,5 %.

Досліди проходили наступним чином. Картоплю і ґрунт окремо зважували і записували в журнал  $m_k$  і  $m_g$ . Після чого картоплю з ґрунтом ретельно перемішували і вкладали у вигляді картопляної грядки на полотно тстрічкового транспортера 11. Виставляли кут нахилу сепаратора 8 за допомогою транспортера 9 і фіксатора 10. За допомогою коробки передач 4 і варіатора 5 добивалися відповідної частоти обертання колінчастого вала сепаратора 6. після включення електродвигуна 2 за допомогою корби 12, обертаючи її з постійною швидкістю, забезпечували подачу картопляного вороху на сепаратор. Після сепарації вороху електродвигун 2 виключали, витягували ящики 6 і 7 та зважували в ящику 6 ґрунт, що від сепарувався.

Знаючи початкову масу ґрунту  $m_g$  і масу відсепарованого ґрунту  $m_c$  визначаємо показник просіяного ґрунту:

$$v = \frac{m_c}{m_s} 100 \%. \quad (3.9)$$

Досліди проводились у триразовій повторюваності, значення мас наважок ґрунту і визначеного показника просіяного ґрунту записували у зошит, після чого отримані дані оброблялись. При цьому, якщо результат повторюваності дослідів відрізнявся від інших результатів повторюваностей більш ніж на 10 %, тоді він вважався промахом і дослід перероблявся.

Оптимізацію технологічного процесу можна уявити як маршрут, по якому рухається дослідник з деякої вихідної точки в область екстремуму (максимуму або мінімуму).

Для вирішення поставленої задачі використаємо математичний метод планування експерименту, такий, що потребує меншої кількості дослідів, а значить коштів і часу.

Оптимізацію багатofакторних систем найчастіше здійснюють у три етапи. На початку, розглядаючи вплив факторів, що вирішуються на двох рівнях, за методом Бокса-Уілсона отримують повне квадратне рівняння регресії і перевіряють на адекватність його лінійну частину. У випадку невиконання умови адекватності лінійної моделі необхідно провести додаткові дослідів, ще на одному середньому рівні варіювання факторів і побудувавши за отриманим рівнянням регресії поверхню відгуку знайти оптимальні значення даних факторів. У такому разі вирішення задачі обмежується першим етапом. Якщо вимога адекватності задовольняється, то переходять до другого етапу

На даному етапі використовуючи метод “крутого сходження”; рухаючись в напрямку найбільшої зміни критерію оптимізації, проробляємо додаткові дослідів і знаходимо уявну зону знаходження оптимуму.

На третьому етапі для уточнення розміщення оптимуму експерименти проводяться в майже стаціонарній області, яка описується рівнянням регресії другого і більш високого порядку. За побудованою поверхнею регресії та проєкціями її двомірних січень знаходимо оптимальні значення факторів, що досліджуються.

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Визначення енергії, поглиненої при зіткненні бульби з робочими органами

Досліди по визначенню енергії, поглиненої при зіткненні бульби з робочими органами проводилися у лабораторних умовах згідно з методикою, описаною в п.3.2.

В результаті обробки дослідних даних побудовано тарувальний графік поглиненої бульбою енергії і діаметру плями руйнування крихкого покриття на бульбах картоплі (рис. 4.1).

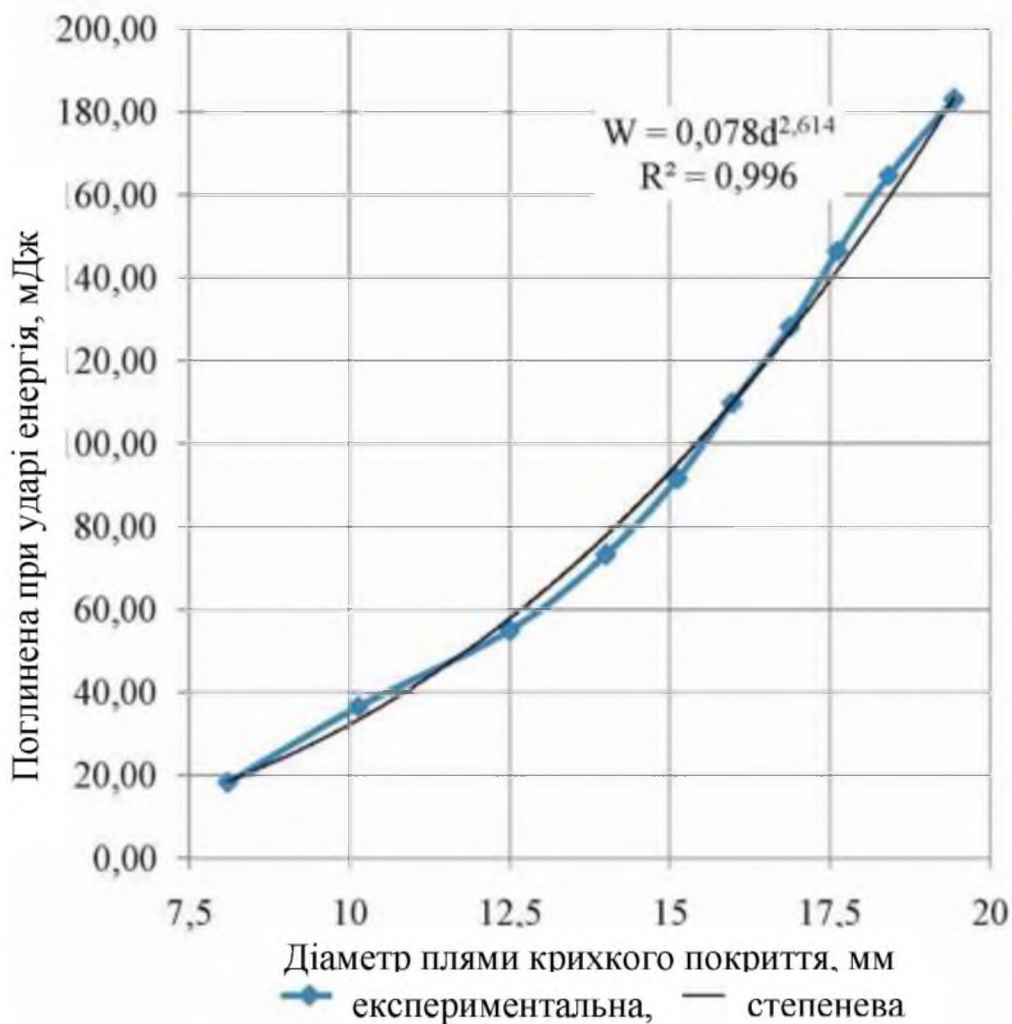


Рисунок 4.1 - Тарувальний графік поглиненої бульбою енергії і діаметру плями руйнування крихкого покриття на бульбах картоплі

Тарувальний графік (рис. 4.1) може бути використаний для визначення енергії поглиненою при взаємодії бульби з сепаруючою поверхнею картоплекопача. Отримана емпірична залежність, приведена на рис 4.1, дозволяє обчислювати значення поглиненої енергії при зіткненні бульби з робочими органами по діаметру плями руйнування крихкого покриття з величиною достовірності апроксимації  $R^2$  більш 0,99.

4.2 Визначення впливу частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту

В зв'язку з неможливістю проведення експериментів через відсутність експериментальної установки досліди проводилися умовно, тобто необхідні дані експериментів бралися з прийнятої гіпотези, розробленої на основі аналізу апріорної інформації.

Як перший етап оптимізації на основі математичного планування експерименту, знайдемо лінійне рівняння регресії, що описує вплив частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту. Для цього використаємо метод Бокса-Уілсона.

Спочатку закодуємо фактори для переведення натуральних значень у безрозмірні величини з метою побудови плану-матриці експерименту. Зв'язок між кодovими і натуральними значеннями факторів встановлюється залежністю:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (4.1)$$

де  $x_i$ ,  $X_i$  – відповідно кодове та натуральне значення і-го фактора;

$X_{i0}$  – натуральне значення і-го фактора на нульовому рівні;

$\Delta X_i$  – інтервал варіювання і-го фактора.

Таблиця 4.1 - Результати кодування факторів

Фактор	Натуральне позначення	Кодове позначення	Інтервал варіювання	Рівні варіювання					
				Натуральні			Кодові		
				Верхній	Нижній	Нульовий	Верхній	Нижній	Нульовий
Частота обертання колінчастого вала сепаратора, об./хв	$X_1$	$x_1$	100	300	100	200	+1	-1	0
Кут нахилу сепаратора, °	$X_2$	$x_2$	4	11	3	7	+1	-1	0

Після закінчення кодування факторів складають план-матрицю експерименту для чотирьох дослідів ( $n=2^2=4$ ). При цьому дослід №1 являє собою сукупність  $x_1$  і  $x_2$  на нижньому рівні, дослід №2 сукупність  $x_1$  на нижньому рівні, а  $x_2$  – на верхньому рівнях; дослід №4 –  $x_1$  і  $x_2$  на верхньому рівні. План-матриця поданий у табл. 4.2, він називається планом першого порядку і дозволяє проводити незалежну оцінку коефіцієнтів регресії.

Після цього проводиться рандомізація дослідів з метою встановлення послідовності їх проведення. Справа в тому, що у залежить не тільки від  $x_1$  і  $x_2$ , а й від інших факторів, які можуть бути невідомі досліднику. Проявлення невідомих факторів (наприклад, вологість повітря) може по-різному відзначитися на результатах експерименту і буде залежати від того, чи будемо ми проводити досліди в послідовності 1, 2, 3, 4 (див табл. 4.2) або 1, 3, 2, 4 чи в будь якій іншій послідовності. Щоб виключити цей вплив, встановлюється випадковий порядок постановки дослідів у часі, для чого користуються таблицями випадкових величин.

В результаті отримали таку послідовність проведення дослідів: 2, 3, 1, 4. Проводимо досліди в трьох повторюваностях, тоді послідовність 2, 3, 1, 4 будемо вважати такою, що належить до першої послідовності; нехай для другої

і третьої повторюваностей вибраним способом ми отримали ще дві послідовності: 2, 1, 3, 4 та 3, 2, 4, 1.

Нехай у подальшому при проведенні дослідів (при реалізації плану-матриці експерименту) ми одержимо дані, подані в табл. 4.3, де  $u$  – номер дослідів,  $u_1$  – номер дослідів в першій повторюваності (в першій реалізації плану),  $u_2$  – номер дослідів в другій повторюваності (другій реалізації плану) тощо.

Таблиця 4.2 - Умови проведення і результати дослідів

Точка плану і номер дослідів, $u$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	Вихідний параметр $y$ , %			Середнє арифметичне значення вихідного параметра $\bar{y}_u$
				Перша повторюваність $y_{u_1}$	Друга повторюваність $y_{u_2}$	Третя повторюваність $y_{u_3}$	
1	-1	-1	+1	50,4	51,4	49,1	50,3
2	+1	-1	-1	60,6	59,8	56,9	59,1
3	-1	+1	-1	72,5	71,9	69,2	71,2
4	+1	+1	+1	78,0	77,2	74,3	76,5

Значення  $y_{u_1}$ ,  $y_{u_2}$  і  $y_{u_3}$  в таблиці 4.3 отримані в результаті дослідів, а значення  $\bar{y}_u$  - при розрахунках за формулою  $\bar{y}_u = 1/3 \cdot (y_{u_1} + y_{u_2} + y_{u_3})$ . Необхідно перевірити їх відтворюваність.

Перевірка відтворюваності дослідів при однаковому числі повторюваностей для кожного дослідів (для кожної точки плану) проводиться за критерієм Кохрена, табличне значення якого позначимо  $G(0,05;n;f_u)$ , де 0,05 означає 5 %-й рівень значущості (дорівнює  $1-\alpha$ , де  $\alpha$  - довірна ймовірність;  $n$  – число незалежних оцінок дисперсії (число дослідів);  $f_u = m_0 - 1$  – число ступенів вільності кожної оцінки, тут  $m_0$  – число повторюваностей. Перевірка відтворюваності проводиться за умови:

$$G \leq G(0,05;n;f_u), \quad (4.2)$$

де

$$G = \frac{S_{Umax}^2}{\left(\sum_{U=1}^n S_U\right)} \quad (4.3)$$

Тут  $S_u^2$  - дисперсія, що характеризує розсіювання результатів в  $u$ -му досліді (тобто на  $u$ -му поєднанні рівнів факторів);  $S_{umax}^2$  - найбільша із дисперсій.

$$S_u^2 = \frac{1}{m_0 - 1} \sum_{i_k=1}^{m_0} (y_{ui_k} - \bar{y}_u)^2, \quad (4.4)$$

де  $i_k$  – номер повторюваності;

$y_{ui_k}$  - вихідний параметр при  $i_k$  повторюваності.

Дисперсія відтворюваності (помилка досліді) визначається за формулою:

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n S_u^2, \quad (4.5)$$

У нашому випадку  $m_0 = 3$ ,  $n = 4$ ;

$$S_{u_1}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((50,4-50,3)^2 + (51,4-50,3)^2 + (49,1-50,3)^2) = 1,33 \%^2;$$

$$S_{u_2}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((60,6-59,1)^2 + (59,8-59,1)^2 + (56,9-59,1)^2) = 3,79 \%^2;$$

$$S_{u_3}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((72,5-71,2)^2 + (71,9-71,2)^2 + (69,2-71,2)^2) = 3,09 \%^2;$$

$$S_{u_4}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((78,0-76,5)^2 + (77,2-76,5)^2 + (74,3-76,5)^2) = 3,79 \%^2.$$

$$S_y^2 = \frac{1}{4} \cdot (1,33+3,79+3,09+3,79) = 3 \%^2.$$

Підставивши значення  $S_{u_1}^2$ ,  $S_{u_2}^2$ ,  $S_{u_3}^2$  і  $S_{u_4}^2$  в (4.3) отримаємо:

$$G = 3,79/12 = 0,315.$$

Табличне значення критерію Кохрена при  $n = 4$  і  $f_u = m_0 - 1 = 2$ , буде 0,770. Число 0,770 більше від 0,315, тому приходимо до висновку, що процес відтворюється.

Оскільки розглядуваний процес відтворюваний, то вираховують коефіцієнти рівняння регресії. Вище вказувалось, що повноту очищення будемо визначати у формі неповного квадратного рівняння, тому за даними табл. 4.3 необхідно визначити коефіцієнти  $b_0, b_1, b_2, b_{12}$  за такими залежностями:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n \bar{y}_u; \\ b_i &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u; \\ b_{ij} &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u; \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

де  $n$  – число точок плану (число дослідів);

$\bar{y}_u$  - середнє арифметичне значення вихідного параметра в  $u$ -му досліді;

$x_{iu}$  - значення  $i$ -го кодованого фактора в рядку матриці в  $u$ -му досліді;

$x_{ju}$  - значення  $j$ -го кодованого фактора в ряду матриці в  $u$ -му досліді.

Отже, в нашому випадку отримаємо:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{50,3 + 59,1 + 71,2 + 76,5}{4} = 66,775; \\ b_1 &= \frac{(-1) \cdot 50,3 + (+1) \cdot 59,1 + (-1) \cdot 71,2 + (+1) \cdot 76,5}{4} = 6,025; \\ b_2 &= \frac{(-1) \cdot 50,3 + (-1) \cdot 59,1 + (+1) \cdot 71,2 + (+1) \cdot 76,5}{4} = 12,075; \\ b_{12} &= \frac{(+1) \cdot 50,3 + (-1) \cdot 59,1 + (-1) \cdot 71,2 + (+1) \cdot 76,5}{4} = 1,625. \end{aligned}$$

Рівняння регресії буде мати вигляд:

$$y = 66,775 + 7,025 x_1 + 13,075 x_2 + 1,625 x_1 x_2, \quad (4.7)$$

Перевірка адекватності рівняння проводиться спочатку на лінійній частині  $y = 66,775 + 7,025 x_1 + 13,075 x_2$  за допомогою критерію Фішера  $F$ . Адекватність матиме місце, коли виконується нерівність:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F(0,05; f_{ad}; f_y), \quad (4.8)$$

де  $S_{ad}^2$  - дисперсія адекватності;

$F(0,05; f_{ad}; f_y)$  - критерій Фішера при 5 %-му рівні значущості;

$f_{ad}$  - число ступенів вільності дисперсії адекватності,

$f_{ad} = n - k - 1 = 4 - 2 - 1 = 1$  ( $k$  - число факторів, у нашому випадку  $k=2$ );

$f_y$  - число ступенів вільності дисперсії відтворюваності.

$$f_y = n(m_0 - 1), \quad (4.9)$$

де  $m_0$  - число повторюваностей;

$$f_y = 4(3 - 1) = 8.$$

Дисперсія  $S_{ad}^2$  обчислюється за формулою

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{n - k - 1} \sum_{u=1}^n (y - \bar{y}_u)^2, \quad (4.10)$$

де  $y$  - розрахункове значення відгуку в  $i$ -му досліді лінійної частини формули (4.7).

Для дослідів №1 відгук  $y^{(1)}=48,675$ , і для решти дослідів  $y^{(2)}=60,725$ ;  $y^{(3)}=72,825$ ;  $y^{(4)}=84,875$ . Відповідне значення  $(y - \bar{y}_u)$  для першого дослідів дорівнює  $(48,675-50,3)^2=2,64$ ; для другого  $(60,725-59,1)^2=2,64$ ; для третього  $(72,825-71,2)^2=2,64$ ; для четвертого  $(74,875-76,5)^2=2,64$ .

Таким чином, значення  $F$  критерію Фішера при дисперсії:

$$S_{ad}^2 = \frac{2,64 + 2,64 + 2,64 + 2,64}{4 - 2 - 1} = 10,56;$$

$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$ , де  $S_y^2$  визначене вище і складає 2,5, буде:

$$F = 10,56/3=3,52 < F(0,05; 1; 8) = 5,318,$$

де 5,318 - число в таблиці.

Після перевірки адекватності рівняння проводиться оцінка значущості коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Стюдента. Коефіцієнт вважається значущим (таким, що суттєво впливає на відгук), якщо виконується нерівність.

$$b_a \geq \Delta b_a = t(0,05; f_y) \frac{S_y}{\sqrt{n}}, \quad (4.11)$$

де  $b_a$  – коефіцієнти  $b_0$ ,  $b_i$  і  $b_{ij}$  у формулах (4.6);

$\Delta b_a$  – довірча границя;

$t(0,05; f_y)$  – критерій Стюдента при 5 %-му рівні значущості та числі ступенів вільності дисперсії відтворюваності  $f_y$  за (4.8).

Рівень значущості дорівнює  $1-\alpha$ , де  $\alpha$  - довірча ймовірність.

З урахуванням цього критерій Стюдента можна визначити за таблицею [21], де приводяться його значення залежно від  $\alpha$ . Оскільки при 5 %-му рівні значущості  $\alpha = 0,05$ , а  $f_y=8$ , то при таких  $\alpha$  і  $f$  в таблиці  $t = 2,3$ ; тоді  $\Delta b_a = 2,3 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{4}} = 1,992$ . Оскільки  $b_0=66,775$ ;  $b_1=6,025$ ;  $b_2=12,075$ ;  $b_{12}=1,625$ , то всі одержані в рівнянні (4.7) коефіцієнти значущі, за винятком коефіцієнта перед взаємодією факторів  $b_{12}=1,625$ , який менший за  $\Delta b_a=1,992$ .

На основі викладеного приходимо до висновку, що рівняння (4.7) добре описує явище, яке визначається, при цьому останнім членом  $1,625x_1x_2$  можна знехтувати.

Аналізуючи отримане рівняння регресії (4.7) видно, що значення  $y$  збільшується при збільшенні  $x_1$  та збільшенні  $x_2$ . При цьому вплив фактора  $x_2$  більший ніж  $x_1$ .

Перейдемо до рівняння регресії у натуральному вигляді:

$$x_1 = \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta X_1}, \quad (4.12)$$

$$x_2 = \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta X_2}, \quad (4.13)$$

При  $X_{10}=200$  об./хв,  $\Delta X_1=100$  об./хв,  $X_{20}=7^\circ$ ,  $\Delta X_2=4^\circ$ ,

$$x_1 = \frac{X_1 - 200}{100}; \quad x_2 = \frac{X_2 - 7}{4};$$

$$y = 66,775 + 6,025 \cdot \left( \frac{X_1 - 200}{100} \right) + 12,075 \cdot \left( \frac{X_2 - 7}{4} \right) = 33,59975 + 0,06025 \cdot X_1 + 3,01875 \cdot X_2$$

Дане рівняння використаємо для визначення напрямку та кроків руху за градієнтом, тобто методу “крутого сходження”. Методика цього методу наступна:

1. Розрахуємо складові градієнта:

$$b_1 \Delta X_1 = 0,06025 \cdot 100 = 6,025;$$

$$b_2 \Delta X_2 = 3,01875 \cdot 4 = 12,075.$$

2. В якості базового (опорного) приймаємо фактор  $X_1$ , для якого добуток ( $b_1 \Delta X_1$ ) вийшов меншим за модулем. З позиції доцільності призначимо крок його зміни (крок  $\Delta X_1'$  приймаємо меншим за попередній крок  $\Delta X_1$ , найчастіше в 2 рази):

$$\Delta X_1' = 100/2 = 50.$$

3. Розраховуємо співвідношення по базовому фактору:

$$K_2 = \left| \frac{\Delta X_2}{\Delta X_1} \right| = \frac{4}{100} = 0,04;$$

4. Визначаємо крок для фактора  $x_2$ :

$$\Delta X_2' = \Delta X_1' \cdot K_2 = 50 \cdot 0,04 = 2;$$

5. Умови проведення 5, 6, 7, 8, 9-го дослідів одержимо додаванням  $\Delta X_1' = 50$  і  $\Delta X_2' = 2$  до основних нульових рівнів факторів.

Для наглядності заповнимо таблицю 4.3.

Після проведення другої серії дослідів виявилось, що оптимум досягається у 8-му досліді. Значить, можна вважати, що оптимальним є значення факторів  $X_1 = 450$  об./хв,  $X_2 = 17^\circ$ . Для перевірки такого припущення ставиться повний факторний експеримент, в якому отримані значення факторів приймаються в якості основного рівня.

Таблиця 4.3 - Розрахунок крутого сходження

Параметри	Фактори		Функція відгуку, у, %
	$X_1$ , м/с	$X_2$ , мм	
Основний (нульовий) рівень	200	7	-
Інтервал варіювання $\Delta X_i$	100	4	-
Коефіцієнт рівняння регресії $b_i$	0,06025	3,01875	-
Добуток $b_i \cdot \Delta X_i$	6,025	12,075	-
Крок для зміни фактора $\Delta X'_i$	50	2	-
Досліди: 4	250	9	65,8
5	300	11	76,4
6	350	13	77,3
7	400	15	78,0
8	450	17	93,95
9	500	19	88,7

Перейдемо тепер до заключного етапу. В області оптимуму для опису поверхні відгуку необхідно розв'язати рівняння регресії 2-го порядку. Для цього розглянемо вищевказані фактори на трьох рівнях з тими ж інтервалами варіювання що брали при методі “крутого сходження”. Аналогічно до першого етапу закодуємо фактори.

Таблиця 4.4 - Результати кодування факторів

Фактор	Натуральне позначення	Кодове позначення	Інтервал варіювання	Рівні варіювання					
				натуральні			кодові		
				нижній	нульовий	верхній	нижній	нульовий	верхній
Частота обертання колінчастого вала сепаратора, об./хв	$X_1$	$x_1$	50	400	450	500	-1	0	+1
Кут нахилу сепаратора, °	$X_2$	$x_2$	2	15	17	19	-1	0	+1

Для складання план-матриці візьмемо метод ортогонального композиційного планування, так як при ньому коефіцієнти регресії оцінюються

незалежно, тому фактори з незначущими коефіцієнтами можна відкидати без перерахунку останніх значущих факторів. Проводячи за вибраним планом у трьохразовій повторюваності досліди, заповнюємо таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 - Умови проведення і результати дослідів

Точки	№ дос- ліду, $u$	$X_1$	$X_2$	Вихідний параметр, $y$			Середнє значення, $\bar{y}_U$
				$y_1$	$y_2$	$y_3$	
Ядро $2^2$	1	-1	-1	78,01	77,95	78,03	78,00
	2	+1	-1	92,78	92,81	92,82	92,80
	3	-1	+1	76,76	76,74	76,77	76,76
	4	+1	+1	88,71	88,68	88,67	88,69
Зіркові точки	5	-1	0	83,54	83,57	83,58	83,56
	6	+1	0	94,94	94,91	94,90	94,92
	7	0	-1	91,15	91,19	91,13	91,16
	8	0	+1	87,26	87,25	87,29	87,27
Нульова точка	9	0	0	93,95	93,93	93,97	93,95

Значення  $y_1$ ,  $y_2$  і  $y_3$  в таблиці 4.5 отримані в результаті дослідів, а значення  $\bar{y}_U$  - при розрахунках за формулою  $\bar{y}_U = 1/3 \cdot (y_1 + y_2 + y_3)$ . Необхідно перевірити їх відтворюваність. Цю перевірку здійснюємо аналогічно з описаним вище прикладом, що відповідає першому етапу.

У нашому випадку  $m_0 = 3$ ,  $n = 4$ ; тоді за формулою 4.4 обрахуємо:

$$S_{u_1}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((78,01-78,00)^2 + (77,95-78,00)^2 + (78,03-78,00)^2) = 0,0035;$$

$$S_{u_2}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((92,78-92,80)^2 + (92,81-92,80)^2 + (92,82-92,80)^2) = 0,0010;$$

$$S_{u_3}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((76,76-76,76)^2 + (76,74-76,76)^2 + (76,77-76,76)^2) = 0,0005;$$

$$S_{u_4}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((88,71-88,69)^2 + (86,68-88,69)^2 + (88,67-88,69)^2) = 0,0010;$$

$$S_{u_5}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((83,54-83,56)^2 + (83,57-83,56)^2 + (83,58-83,56)^2) = 0,0010;$$

$$S_{u_6}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((94,94-94,92)^2 + (94,91-94,92)^2 + (94,90-94,92)^2) = 0,0010;$$

$$S_{u_7}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((91,15-91,16)^2 + (91,19-91,16)^2 + (91,13-91,16)^2) = 0,0019;$$

$$S_{u_8}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((87,26-87,27)^2 + (87,25-87,27)^2 + (87,29-87,27)^2) = 0,0008;$$

$$S_{u_9}^2 = \frac{1}{3-1} \cdot ((93,95-93,95)^2 + (93,93-93,95)^2 + (93,97-93,95)^2) = 0,0008.$$

За формулою 4.5 знаходимо:

$$S_y^2 = \frac{1}{9} \cdot 0,0001 (35+10+5+10+10+10+19+8+8) = 0,0013.$$

Підставивши значення  $S_{u_1}^2$ ,  $S_{u_2}^2$ ,  $S_{u_3}^2$ ,  $S_{u_4}^2$ ,  $S_{u_5}^2$ ,  $S_{u_6}^2$ ,  $S_{u_7}^2$ ,  $S_{u_8}^2$  і  $S_{u_9}^2$  в 4.3 отримаємо:

$$G = \frac{0,0035}{0,0001 \cdot (35 + 10 + 5 + 10 + 10 + 10 + 19 + 8 + 8)} = 0,304.$$

Табличне значення критерію Кохрена при  $n = 9$  і  $f_u = m_0 - 1 = 2$ , буде 0,477. Число 0,477 більше від 0,304, тому приходимо до висновку, що процес відтворюється.

Для подальших обчислень використаємо спеціальну комп'ютерну програму "PLAN". Результати обчислень приведені в додатку А. Отримане рівняння регресії має вигляд:

$$y = 94,1459 + 6,3483 \cdot x_1 - 1,5411 \cdot x_2 - 5,0039 \cdot x_1^2 - 5,0322 \cdot x_2^2 - 0,0496 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (4.14)$$

Степінь вільності  $f_y = 18$ ; дисперсія адекватності  $S_{ad}^2 = 0,0142$ ; дисперсія відтворюваності  $S_y^2 = 0,0061$ ; розрахунковий критерій Фішера:

$$F_{розр} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,0142}{0,0061} = 2,327.$$

Користуючись додатком знаходимо табличні значення критерію Фішера  $F(0,05;6;10)=3,217$  та  $F(0,05;6;20)=2,599$ . Використовуючи лінійну інтерполяцію знаходимо:

$$F(0,05;6;18)=3,217+(2,599-3,217)\frac{18-10}{20-10}=2,723.$$

Що більше за  $F_{розр}$ , значить модель адекватна.

Для перевірки значущості коефіцієнтів рівняння регресії порівнюємо розрахункові коефіцієнти Стюдента для кожного окремого коефіцієнта рівняння регресії з табличним значенням.  $t_{табл}(0,05;f_y)=2,1$ . Коефіцієнти значущості за умови, що  $t_{ірозр} \geq t_{табл}$ . Дану умову не задовольняє коефіцієнт  $b_{12}$ , тому його можна викинути з рівняння регресії, при цьому буде задовольнятися 95 % довірна ймовірність. Але так, як наступні операції будуть виконуватись на комп'ютері і врахування всіх коефіцієнтів регресії не призведе до незручностей при обчисленні ми будемо враховувати як значущі так і незначущий коефіцієнт рівняння регресії.

Використовуючи можливості комп'ютерного забезпечення MatCAD за отриманим рівнянням регресії (4.14) будуємо поверхню відгуку та проєкції двомірних січень поверхні відгуку на площину  $x_1x_2$  (додаток Б). Після чого користуючись програмою MatCAD визначаємо максимальне значення параметра  $Y$  та координати точок  $x_1$  і  $x_2$ , що відповідають йому. Так  $Y = 95,25\%$ ,  $x_1 = 0,65$  і  $x_2 = -0,23$ . Переходячи від кодових значень  $x_1$  і  $x_2$  до натуральних  $X_1$  і  $X_2$  за формулою  $X_i = \Delta X_i \cdot x_i + X_{i0}$  отримуємо шукані оптимальні значення факторів:

$$X_1 = 50 \cdot 0,65 + 450 = 482,5 \text{ об./хв},$$

$$X_2 = 2 \cdot (-0,23) + 17 = 16,54^\circ.$$

Висновки: після проведення математичного планування експерименту та оптимізації параметрів ми отримали рівняння регресії, що має вигляд:

$$y=99,8126-0,1517 \cdot x_1-0,0911 \cdot x_2-0,5039 \cdot x_1^2-0,5322 \cdot x_2^2+0,0308 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (4.14)$$

Переходячи від кодових значень  $x_1$  і  $x_2$  до натуральних  $X_1$  і  $X_2$  отримуємо шукані оптимальні значення факторів, а саме: частота обертання колінчастого вала сепаратора:  $X_1 = 482,5$  об./хв; кут нахилу сепаратора:  $X_2 = 16,54$  °.

#### 4.3 Висновки

1. Визначено значення енергії, поглиненої при зіткненні бульби з робочими органами картоплекопача, побудований тарувальний графік, який апроксимовано степеневою функцією і може бути використаний для визначення енергії поглиненою при взаємодії бульби з сепаруючою поверхнею картоплекопача.

2. Запропоновано лабораторну установку для визначення впливу частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту та знайти оптимальні значення цих факторів використовуючи математичний метод планування експерименту, а саме: частота обертання колінчастого вала сепаратора:  $X_1 = 482,5$  об./хв; кут нахилу сепаратора:  $X_2 = 16,54$  °.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Для зменшення металомісткості, збільшення продуктивності та якості сепарації картоплекопача запропоновано нову конструкцію прутково-клавішного сепаратора картоплекопача та обґрунтовано його параметри і режими роботи.

За результатами проведених досліджень отримані наступні висновки:

1. Проаналізувано конструкції та способи здійснення робочих впливів на картопляний ворох наявними сепараторами;

2. Обґрунтовано функціональну та принципову схеми картоплекопача.

3. На основі і теоретичних досліджень картоплекопача і сепаратора було визначено наступні параметри: кут встановлення бральних секцій  $-75^\circ$ , ширина захвату брального апарата - 0,41 м, кутова швидкість обертання ведучого диска -  $5,22 \text{ с}^{-1}$ , кут встановлення лемеша -  $18^\circ$ , довжина лемеша - 0,3 м, ширина захвату лемеша - 0,41 м, частота обертання колін вала - 495 об./хв, довжина сепаратора - 0,75 м, кут нахилу решет до горизонту -  $17^\circ$ , швидкість руху машини - 0,75 м/с, ширина решет - 0,39 м, крок між прутками решет - 30 мм, продуктивність копача - 0,19га/год, потужність картоплекопача - 1,6 кВт.

4. Розроблено креслення конструкції прутково-клавішного сепаратора.

5. На основі розкриття явищ просіювання дрібної фракції ґрунту та пошкодження бульб, які здійснюються завдяки взаємодії прутків сепаратора з картопляним ворохом, розроблено математичну модель процесу його сепарації.

4. Визначено значення енергії, поглиненої при зіткненні бульби з робочими органами картоплекопача, побудовани тарувальний графік, який апроксимовано степеневою функцією і може бути використаний для визначення енергії поглиненою при взаємодії бульби з сепаруючою поверхнею картоплекопача.

5. Запропоновано лабораторну установку для визначення впливу частоти обертання колінчастого вала сепаратора та кута нахилу сепаратора на показник просіяного ґрунту та використовуючи математичний метод планування експерименту знайдено оптимальні значення цих факторів, а саме: частота обертання колінчастого вала - 482,5 об./хв; кут нахилу сепаратора -  $16,54^\circ$ .

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т. 2. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 559 с., ил.
2. Гапоненко В.С, Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини та їх використання. 4 – те вид., доп. і перероб. – К.: Урожай, 1982 – 312с.: іл
3. Довідник сільського інженера / В.Д.Гречкосій, О.М.Погорілець, І.І.Ревенко та ін.; За ред. В.Д. Гречкосія. – К.: Урожай, 1988.
4. Інтенсивна технологія вирощування картоплі / В.Д.Волков, Г.М.Колонтай, М.П.Мукосій, П.К.Сердюк. - К. : Урожай, 1989. – 40 с.
5. Кальбус Г.Л. Гидропривод и навесные устройства тракторов в вопросах и ответах – 3 – е изд., переработ. и доп. – К.: Урожай, 1990. – 216 с., ил.
6. Кваліфікаційна робота магістра [Текст] : методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого (магістерського) рівня освітньо-професійної програми «Агроінженерія» галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство спеціальності 208 Агроінженерія денної та заочної форм навчання / уклад. В.В. Сацюк, Р.В. Кірчук, Л.Ю. Забродоцька. – Луцьк : Луцький НТУ, 2020. – 60 с.
7. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти всіх освітніх програм денної та заочної форм навчання / уклад. Н.В. Ковальчук, Ю.Г. Фесіна, І.Л. Заблоцька. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 46 с.
8. Машиновикористання в землеробстві / В.Ю.Ільченко, Ю.П.Нагірний, П.А.Джолос та ін.; За ред. В.Ю.Ільченка. - К.: Урожай, 1996. - 384 с.
9. Настенко П.М., Романченко М.А. Індустріальна технологія виробництва картоплі.- 3-є вид., доп і перероб. - К.: Урожай, 1986. - 144 с., іл.
10. Осуховський В.М. Результати польових випробувань картоплекопача тракторного КТ-0,6 // Збірник наукових праць Національного аграрного університету “Механізація сільськогосподарського виробництва”. Том VI. “Теорія і розрахунок сільськогосподарських машин”. – К.: НАУ, 1999. – с. 162 – 166.

11.Пасаман Б.Ф. Обґрунтування параметрів лемішно-роторного картоплекопача; автореф. дис. на здоб. учен. ступ. кан. техн. наук: спец. 05.05.11 Машини і засоби сільськогосподарського виробництва / Б.Ф. Пасаман. Тернопіль, 2006. 15 с.

12.Перспективи розвитку галузі картоплярства в Україні // Режим доступу –<http://potatoclub.com.ua>.

13.Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины. – 2-е изд., перераб и доп.. – М.: Машиностроение, 1984. – 320 с.

14.Писаренко Г.С. та ін. Опір матеріалів: Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; За ред.Г.С. Писаренка. – К.: Вища школа., 1993 – 655 с.:іл.

15.Сиротинський А.О. Визначення параметрів прутково-клавішного сепаратора картоплекопача // Тези IV студентської науково-технічної конференції «Сучасні технології у агровиробництві та природокористуванні». Луцьк: Факультет аграрних технологій та екології, ЛНТУ. – 2024 р.– С. 74-76.

16.Смолінський С.В. Аналіз основних показників технічної характеристики сучасних картоплезбиральних машин. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК : зб.наук.праць Київ: НУБіП, 2018 № 282 (2018). С. 200- 207.

17.Хайліс Г.А. Основи теорії і розрахунку сільськогосподарських машин: Навч. Посібник. – Київ: вид-во УСГА, 1992. – 240 с.

18.Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин: Навч.посібник. – К.: НМКВО. 1992 – 320 с.

19.Хайліс Г.А. Механіка рослинних матеріалів / Г.А. Хайліс, Ю.В. Федорусь. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 2004. – 302 с

20.Nevko R.B., Tkachenko R.I., Synii S.V., Flonts I.V. Development of design and investigation of operation processes of small-scale root crop and potato harvesters. INMATEH: Agricultural engineering. Bucharest, Romania. 2016. Vol. 49. № 2. pg. 53-60.

## **ДОДАТКИ**

## Додаток А

\*\*\*\*\* MFK5 5 \*\*\*\*\*

## ПЛАН 2-ФАКТОРНОГО ОПЫТА ДЛЯ

№	УРОВНИ ФАКТОРОВ		ЗНАЧЕНИЯ ОТКЛИКОВ		
1	-1,00	-1,00	99,01	98,95	99,03
2	1,00	-1,00	98,78	98,81	98,82
3	-1,00	1,00	98,76	98,74	98,77
4	1,00	1,00	98,71	98,68	98,67
5	-1,00	0,00	99,54	99,57	99,58
6	1,00	0,00	98,94	98,91	98,90
7	0,00	-1,00	99,15	99,19	99,13
8	0,00	1,00	99,26	99,25	99,29
9	0,00	0,00	99,95	99,93	99,97

## Коэффициенты уравнения регрессии:

---

0-ый коэфф. =	99,8126	T-кр. =	4049,9093
1-ый коэфф. =	-0,1517	T-кр. =	6,1539
2-ый коэфф. =	-0,0911	T-кр. =	3,5481
1 1-ый коэфф. =	-0,5039	T-кр. =	20,4454
2 2-ый коэфф. =	-0,5322	T-кр. =	21,5950
1 2-ый коэфф. =	0,0308	T-кр. =	1,2511

---

Степень свободы для T-кр. = 18

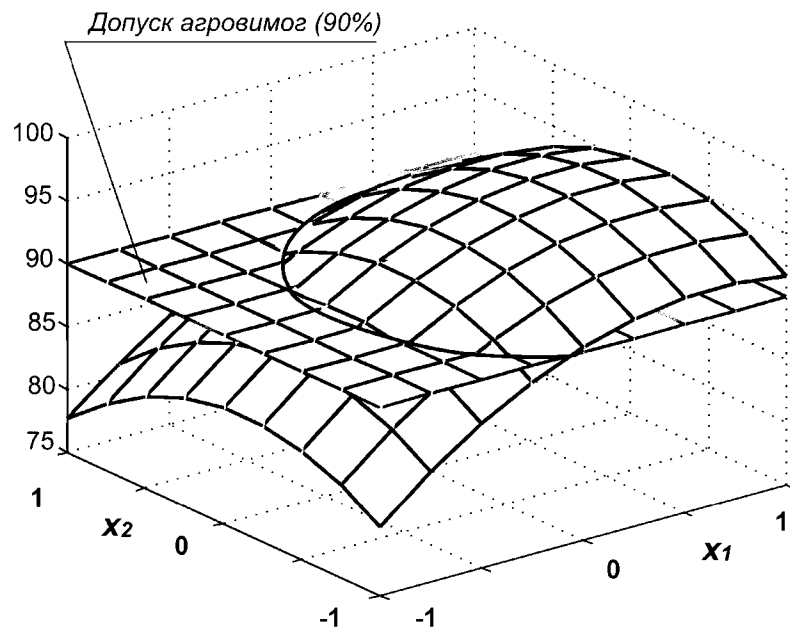
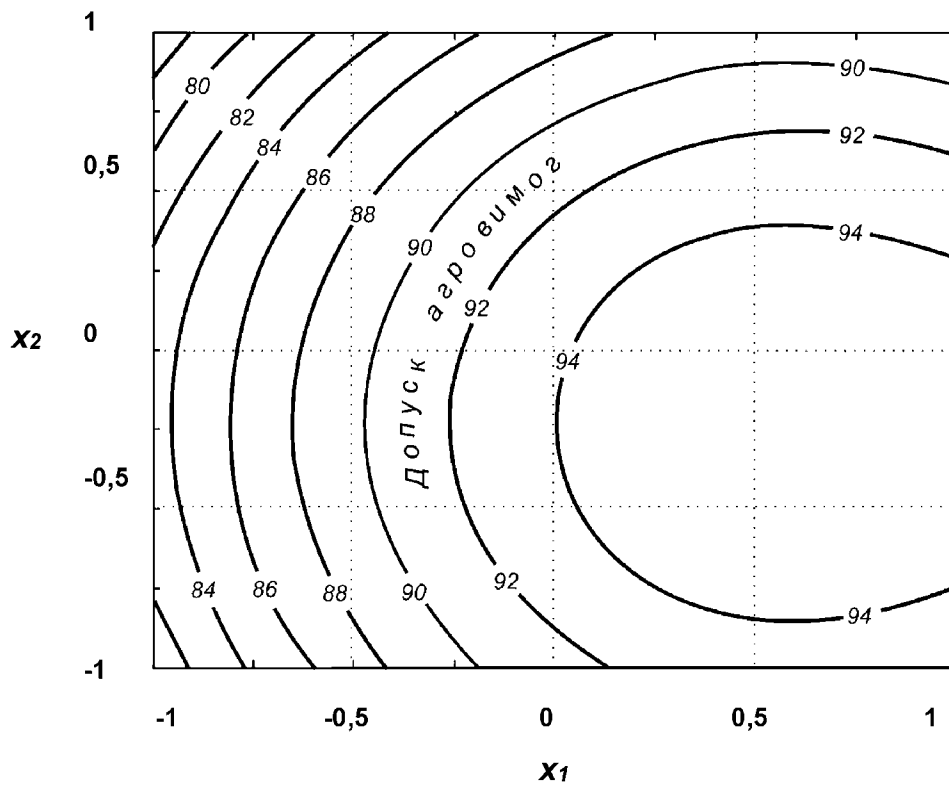
Дисперсия адекватности = 0,0016

Дисперсия воспроизводимости = 0,0013

F-критерий при 3,18 степенях свободы = 1,2308

## Додаток Б

## Поверхня відгуку

Проекція поверхні відгуку на площину  $x_1 x_2$ 

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Назва	К-ть	Примітка
				<u>Документація</u>		
			КАІ.ККН.00.00.0000 ПЗ	Пояснювальна записка	1	
41			КАІ.ККН.00.00.0000 03	Принципова схема	1	
				<u>Складальні одиниці</u>		
		1	КАІ.ККН.01.00.0000СК	Начінний механізм	1	
		2	КАІ.ККН.02.00.0000 СК	Верхня тяга	1	
		3	КАІ.ККН.03.00.0000 СК	Корданний вал	1	
		4	КАІ.ККН.04.00.0000 СК	Захисний кожух	2	
		5	КАІ.ККН.05.00.0000 СК	Бральний диск	2	
		6	КАІ.ККН.06.00.0000 СК	Бральний конус	2	
		7	КАІ.ККН.07.00.0000 СК	Леміш	1	
		8	КАІ.ККН.08.00.0000 СК	Редуктор	1	
41		9	КАІ.ККН.09.00.0000 СК	Сепаратор	1	
		10	КАІ.ККН.10.00.0000 СК	Ведений шків	1	
		11	КАІ.ККН.11.00.0000 СК	Опорне колесо	2	
		12	КАІ.ККН.12.00.0000 СК	Рама	1	
		13	КАІ.ККН.13.00.0000 СК	Захисний щит	2	
		14	КАІ.ККН.14.00.0000 СК	Ведучий шків	1	
				<u>Деталі</u>		
				<u>Стандартні вироби</u>		
		15		Муфта втулкова 16-16-11		
				ГОСТ 20761 – 75	1	
		16		Гідромотор ПМЛ - 63	2	
		17		Зубчатий пас ОН-6-07-5-63	1	

					<i>КАІ.ККН.00.00.0000 03</i>					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>Картоплекопач</i> <i>Принципова схема</i>					
Розробив		<i>Сиротинський</i>						Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		<i>Юхимчук</i>						<i>М</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
Н. контр.		<i>Юхимчук</i>						<i>ЛНТУ, гр. АІм-21</i>		
Затверд.		<i>Хомич</i>								

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Назва	К-ть	Примітка
				<u>Документація</u>		
			КАІ.ККН.00.00.0000ПЗ	Пояснювальна записка	1	
41			КАІ.ККН.09.00.0000СК	Сепаратор	1	
				<u>Складальні одиниці</u>		
		1	КАІ.ККН.09.01.0000СК	Ведений шків	1	
		2	КАІ.ККН.09.02.0000СК	Рама	1	
				<u>Деталі</u>		
		3	КАІ.ККН.09.00.0001	Кривошип	1	
		4	КАІ.ККН.09.00.0002	Тяга	1	
		5	КАІ.ККН.09.00.0003	Маслозатримувач	2	
		6	КАІ.ККН.09.00.0004	Нижня головка клавіші	2	
		7	КАІ.ККН.09.00.0005	Втулка	2	
		8	КАІ.ККН.09.00.0006	Колінчастий валн	1	
		8	КАІ.ККН.09.00.0007	Верхня головка клавіші	1	
		10	КАІ.ККН.09.00.0008	Корпус	1	
		11	КАІ.ККН.09.00.0009	Клавіша	4	
		12	КАІ.ККН.09.00.0010	Пруток	1	
		13	КАІ.ККН.09.00.0011	Втулка тяги	1	
				<u>Стандартні вироби</u>		
		14		Болт М8×8g×125 ГОСТ 7808-70	8	
		15		Гайка М8-6Н ГОСТ 5916-70	2	
		16		Гайка М10-6Н ГОСТ 5915-70	1	
		17		Гайка М8-6Н ГОСТ 5915-70	8	
		18		Гвинт М8×8g×10 ГОСТ 17473-72	4	
		19		Гвинт М6×8g×15 ГОСТ 17473-72	16	
		20		Кришка 21-42×20 ГОСТ 18513-73	4	
		21		Манжета 1,1,40×75-1 ГОСТ 8752-79	4	

					КАІ.ККН.09.00.0000СК		
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата	Сепаратор		
Розробив		Сиротинський					
Перевірив		Юхимчук					
Н. контр.		Юхимчук					
Затверд.		Хомич			Літера	Аркуш	Аркушів
					М	1	2
					ЛНТУ, гр. АІм-21		

