

Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра інжинірингу технічних систем

**Пояснювальна записка**  
до дипломної роботи  
освітнього ступеня "Магістр" на тему:  
**Чисельне моделювання розкидача мінеральних добрив**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МгАІ-1-24  
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

\_\_\_\_\_ Луценко Артур Владиславович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Алієв Ельчин Бахтияр огли

**Рецензент:** \_\_\_\_\_ Яропуд Віталій Миколайович

Дніпро, 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем  
Освітній ступінь: «Магістр»  
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«24» жовтня 2025 р.

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

Луценку Артуру Владиславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Чисельне моделювання розкидача мінеральних добрив

керівник роботи: Алієв Ельчин Бахтияр огли, д-р техн. наук, старший дослідник

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від  
«24» жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 05.12.2025 року

3. Вихідні дані до проекту Огляд стану питання в галузі механізації сільського господарства та існуючих технічних засобів для внесення гранульованих мінеральних добрив. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз технологій та машин внесення мінеральних добрив. 2. Аналітичні дослідження процесу внесення мінеральних добрив відцентровим дисковим робочим органом. 3. Методика чисельного моделювання процесу внесення мінеральних добрив відцентровим дисковим робочим органом. 4. Результати чисельного моделювання процесу внесення мінеральних добрив відцентровим дисковим робочим. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Техніко-економічна оцінка ефективності розкидача мінеральних добрив. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема. Мета і задачі досліджень (2 аркуша, А4). 2. Стан і напрями досліджень (1 аркуш, А4). 3. Аналітичні дослідження (2 аркуша, А4). 4 Чисельне моделювання (4 аркуша, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ        | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---------------|---|----------------|------------------|
|               |   | завдання видав | завдання прийняв |
| 1-6           | Алієв Е. Б., професор                     | 24.10.2025     | 05.12.2025       |
| Нормоконтроль | Івлєв В. В., доцент                       | 05.10.2025     | 05.12.2025       |

7. Дата видачі завдання: 24 жовтня 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Аналітичний                     | до 05.11.2025 р               | виконано |
| 2     | Теоретичний                     | до 14.11.2025 р               | виконано |
| 3     | Чисельний експеримент           | до 26.11.2025 р               | виконано |
| 4     | Охорона праці                   | до 28.11.2025 р               | виконано |
| 5     | Економічний                     | до 01.12.2025 р               | виконано |
| 6     | Демонстраційна частина          | до 05.12.2025 р               | виконано |
|       |                                 |                               |          |
|       |                                 |                               |          |
|       |                                 |                               |          |
|       |                                 |                               |          |

Студент

\_\_\_\_\_ Луценко А. В. \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ Алієв Е. Б. \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)



Луценко А. В. Чисельне моделювання розкидача мінеральних добрив. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Проаналізовано стан рослинництва в Україні, зокрема стан ґрунтів, якість яких сильно знизилась через кліматичні зміни, воєнні дії, високу вартість добрив та техніки для внесення. Досліджено сучасні технології, які використовуються у процесі внесення добрив: прецизійне землеробство, диференційоване внесення добрив, внесення добрив за допомогою дронів, біотехнології та мікробні добрива. Розглянуто конструктивні особливості будови робочих органів відцентрового розкидача мінеральних добрив та вплив цих особливостей на продуктивність машини в цілому. Змодельовано відомі конструкції розкидачів, задано фактори та проведено дослідження у віртуальному середовищі. Прописано заходи з безпеки працівників при роботі з мінеральними добривами. Проведено порівняльну роботу з машиною прототипом та проектуємою.

**Ключові слова:** добрива, робочий орган, розкидач, ґрунт, якість внесення, продуктивність МТА, стаціонарність, мобільність.

**Апробація.** Луценко А. В. (2025). Чисельне моделювання розкидача мінеральних добрив. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 237–239.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 8  |
| 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МАШИН ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ.....  | 10 |
| 1.1 Технології внесення мінеральних добрив .....   | 10 |
| 1.2 Аналіз технічних засобів мінеральних добрив.....   | 15 |
| 1.3 Аналіз робочих органів розкидачів мінеральних добрив .....   | 20 |
| 1.4 Фізико-механічні властивості та характеристики гранульованих мінеральних добрив .....                        | 25 |
| 1.6 Агротехнічні вимоги для внесення мінеральних добрив.....   | 26 |
| 1.7 Висновки з розділу .....   | 26 |
| 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ ВІДЦЕНТРОВИМ ДИСКОВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ .....         | 28 |
| 2.1 Складання диференціального рівняння руху частинки по лопаті дискового робочого органу .....                  | 28 |
| 2.2 Рішення диференціального рівняння руху частинки по лопаті дискового робочого органу .....                    | 30 |
| 2.3 Висновки з розділу.....  | 36 |
| 3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ ВІДЦЕНТРОВИМ ДИСКОВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ..... | 37 |
| 3.1 Постановка задачі моделювання .....  | 37 |
| 3.2 Створення 3D-моделі робочого органу.....   | 38 |
| 3.3 Створення сіткової і фізичної моделі робочого органу .....   | 38 |
| 3.3 Планування чисельного експерименту .....   | 46 |
| 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ ВІДЦЕНТРОВИМ ДИСКОВИМ РОБОЧИМ .....      | 47 |
| 4.1 Симуляція процесу внесення мінеральних добрив .....  | 47 |
| 4.2 Регресійний аналіз результатів моделювання .....   | 49 |

|   |    |
|---|----|
|   | 7  |
| 4.4 Висновки з розділу.....   | 51 |
| 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....                     | 53 |
| 6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗКИДАЧА<br>МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ..... | 57 |
| ВИСНОВКИ .....  | 63 |
| Бібліографія.....   | 66 |
| Додатки .....   | 70 |

## ВСТУП

Для ведення конкурентоспроможного та прибуткового агробізнесу, насамперед галузі рослинництва, необхідно подбати про такі пункти:

- Застосування сучасних технологій обробітку ґрунту, які дають змогу якісно та з мінімальними затратами підготувати землю для подальших операцій;
- Своєчасне внесення добрив, які забезпечать ґрунт поживними речовинами;
- Використання якісного насінневого матеріалу.

У дипломній роботі розглянуто тематику внесення добрив. Через занепад галузі тваринництва, використання суто органічних добрив економічно недоцільне як з точки зору вартості матеріалу для внесення так і з точки зору утримання спеціальних машин для внесення, не використовуючи їх на 100%. Тому особливу увагу приділяють інтегрованим системам живлення: поєднання мінеральних добрив з органічними елементами точного землеробства, з тенденцією переходу суто на мінеральні. Сучасні дослідження в агрохімії спрямовані на удосконалення мінеральних добрив, підвищуючи коефіцієнт корисної дії і паралельно приділяючи увагу екологічній безпеці. Надмірне або нерациональне використання добрив може призвести до деградації ґрунтів, забруднення водних ресурсів та, як наслідок, зниження врожайності. Тип добрив, спосіб та період внесення прямо впливають на хіміко-фізико-механічні властивості.

Також вагомим фактором є машина, яка вносить добрива. Конструктивні особливості дозуючого апарату та робочого органу, допустима робоча швидкість впливають на кількісні та якісні показники. До якісних показників відносять рівномірність розподілу добрив на поверхню поля та точність дозування, а до кількісних – норму внесення та втрати добрив при внесенні.

Аналізуючи глобальність використання мінеральних добрив, дослідження конструктивних параметрів робочого органу машин для внесення є актуальним питанням сьогодення.

**Метою дослідження** є підвищення рівномірності внесення мінеральних добрив шляхом обґрунтування раціональних конструктивних та режимних параметрів відцентрового дискового робочого органу. Для досягнення цієї мети необхідно виконати аналіз кінематики розподілу частинок, розробити чисельну модель процесу розкидання, провести параметричні дослідження та визначити оптимальні значення основних факторів.

**Задачі досліджень:**

1. Провести аналіз існуючих конструкцій робочих органів розкидачів мінеральних добрив, визначити їх переваги, недоліки та напрями вдосконалення.

2. Виконати аналітичні дослідження процесу внесення мінеральних добрив відцентровим дисковим робочим органом, установити закономірності впливу основних параметрів (кутів, швидкостей, геометрії лопатей) на траєкторії руху частинок.

3. Розробити методику чисельного моделювання процесу розкидання мінеральних добрив із використанням сучасних обчислювальних засобів для визначення просторового розподілу частинок.

4. Проаналізувати отримані результати чисельного моделювання процесу внесення мінеральних добрив, оцінити рівномірність розподілу, визначити оптимальні конструктивно-технологічні параметри робочого органу.

5. Порівняти характеристики машини-прототипу та нової.

**Об'єкт досліджень:** процес внесення мінеральних добрив відцентровими розкидачами у сільськогосподарському виробництві.

**Предмет досліджень:** конструктивно-технологічні параметри відцентрового дискового робочого органу та їх вплив на рівномірність розподілу мінеральних добрив на поверхні ґрунту.

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МАШИН ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ

## 1.1 Технології внесення мінеральних добрив

Мінеральні добрива – сполуки мікро- та макроелементів, які виготовляють у формі гранул кулястої форми або у формі пелетів. Добрива виготовляють з метою примножити ріст рослин та отримати плоди з високими якісними показниками.

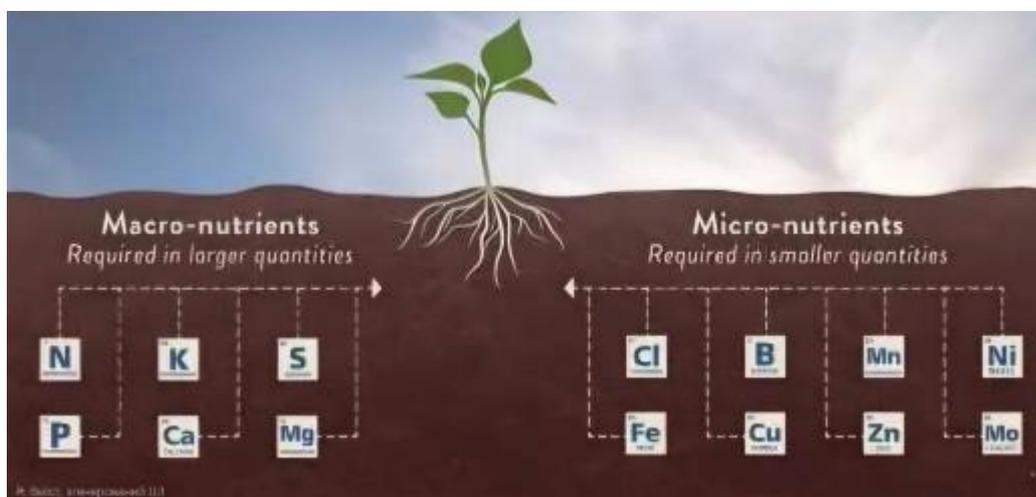


Рисунок 1.1 – Макро- та мікроелементи, які рослина отримує з ґрунту

Функції макроелементів:

- Азот (N) – відповідає за стимуляцію росту зеленої маси;
- Фосфор (P) – сприяє розвитку кореневої системи та цвітінню;
- Калій (K) – підвищує стійкість до хвороб та посухи;
- Кальцій (Ca) – робить структуру ґрунту більш однорідною та нейтралізує кислотність;
- Магній (Mg) – покращує фотосинтез, є одним з основних компонентів хлорофілу;
- Сірка (S) – бере участь у білковому обміні.

Основні макроелементи – це азот, фосфор та калій(далі NPK).

Функції мікроелементів:

- Хлор (Cl) – контроль водообміну та транспірації.
- Бор (B) – впливає на запилення, та розвиток плодів;
- Цинк (Zn) – впливає на обмін ферментів в рослині;
- Мідь (Cu) - впливає на фотосинтез та метаболізм;
- Марганець (Mn) – активація ферментів та засвоєння азоту;
- Молібден (Mo) – затримує азот в рослині;
- Кобальт (Co) – надважливий для бобових культур;
- Залізо (Fe) – сприяє кращому фотосинтезу та фотосинтезу.

Технології внесення мінеральних добрив - це сукупність агроприйомів та способів із залученням техніки, які гарантують ефективне використання добрив.

Класифікують за способом внесення:

а) Основне – вносять перед сівбою/садівництвом культур на глибину під оранку (20-30 см).Це калійні, фосфорні та азотні добрива;

б) Передпосівне – вносять перед сівбою з подальшим загортанням у верхній шар ґрунту (5-10 см).Використовують аміачну селітру, або карбамідно-аміачну суміш(далі КАС);

в) Припосівне – добрива вносять у рядки або +-декілька см в сторону під час сівби. Використовують в якості бустерів росту комбіновані добрива NPK або суперфосфат гранульований;

г) Підживлення - вносять під час вегетації кореневим методом(в ґрунт) або позакореневим на листя. Використовують КАС та карбамід.

Класифікують за способом розподілу:

а) Поверхнєве внесення(розкидання) – добрива розкидають по поверхні ґрунту(застосовують для озимих культур, багаторічних трав, пасовищ);

б) Стрічкове внесення – добрива вносяться в ґрунт на глибину 3-4 см нижче загортання насіння або садівництва розсади;



а



б



в



г

Рисунок 1.2 – Загальний вигляд машин для внесення добрив

а – основне внесення мінеральних добрив; б – передпосівне внесення рідких мінеральних добрив; в – внесення добрив одночасно із сівбою; г – підживлення рослин під час вегетації

в) Прикореневе(ін'єкційне) внесення – вносять рідкі мінеральні добрива на глибину для потрібної культури;

г) Фертигація – подача розчинених добрив із поливною водою(краплинне зрошування) з метою підвищити імунітет рослин проти хвороб;

д) Позакореневе живлення - обприскування листової маси рослин.

д) Позакореневе живлення.

Сучасні технології внесення добрив:

– Використання навігації та телематики. Супутникові системи(3+1 супутник) надають дані про вологість ґрунту, індекс вегетації(далі

NDVI), рельєф та кислотність ґрунту. Карти NDVI дають виявляє зони з високим вмістом NPK та дозволяє знизити витрати добрив на 15-20%;



а



б



в



г

Рисунок 1.3 – Загальний вигляд машин для внесення добрив

а – поверхнєве внесення добрив; б – стрічкове внесення мінеральних добрив(технологія Strip-till); в – прикоренєве внесення добрив; г – краплинне зрошення із системою внесення добрив

– Прецизійне внесення – оператори МТА використовують карти врожайності, які формуються супутниковою навігацією, дронами та датчиками;

– Диференційне внесення(далі Variable Rate Application, скорочено VRA) – є складовою прецизійного внесення; автоматичне регулювання норми внесення під час руху МТА системою датчиків та супутникових даних. Для розкидачів мінеральних добрив точність регулювання складає до 1 кг/га.



Рисунок 1.4 – Застосунок «Solvi», аналіз стану полів за допомогою дронів та систем датчиків. Зображено аналіз стану здоров'я рослинної маси

Принцип роботи системи диференційного внесення:

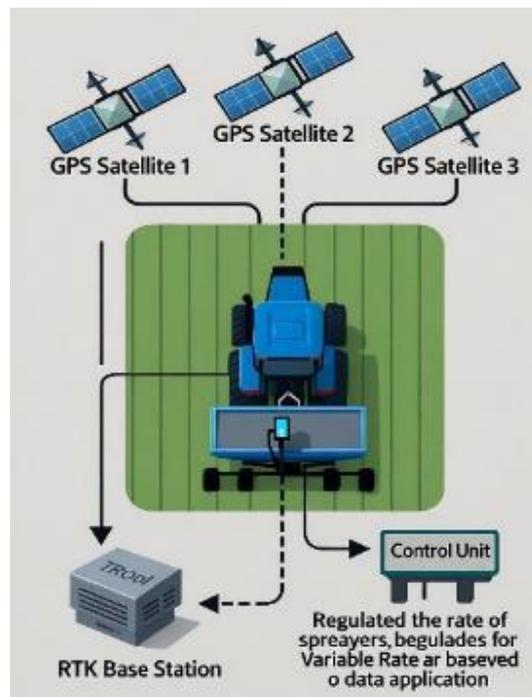


Рисунок 1.5 – Схема роботи точного землеробства

Супутники аналізують стан поля та передають дані на бортовий комп'ютер МТА, програмне забезпечення якого створює зональні карти. Далі бортовий комп'ютер подає сигнал на серводвигуни, актуатори та інші елементи, які регулюють положення дросельної заслінки, кут нахилу, висоту, швидкість обертання дисків розкидачів; тиск подачі рідини до форсунок обприскувачів, зміна швидкості руху МТА, використовуючи стандартний протокол ISOBUS. Для підвищення точності використовують RTK-станції. Станції підсилюють сигнал і перенаправляють його на МТА, щоб скорегувати його роботу. Радіус дії RTK до 50 км, за умови рівного рельєфу та відсутності перешкод.

## **1.2 Аналіз технічних засобів мінеральних добрив**

Одним з факторів, який впливає на якість внесення добрив є технічний засіб. Залежно від типу мінеральних добрив (гранульовані, рідкі, порошкоподібні), способу внесення(описані в попередньому розділі) та рівня автоматизації технічні засоби для внесення мінеральних добрив поділяють на:

1. Розкидачі мінеральних добрив – використовують для поверхневого внесення гранульованих та порошкоподібних добрив. У відцентрових розкидачів внесення добрив відбувається за рахунок відцентрових сил, які виникають під час високої швидкості обертання дисків. Бувають причіпні, начіпні, стаціонарні. Схема роботи: гранули через заслінку потрапляють на диск. Швидкість обертання (становить від 600-1000 об/хв) та кут нахилу дисків(20-40 град.) регулюється автоматично від бортового комп'ютера або вручну за допомогою важелів. Довжина лопаток на дисках становить приблизно 300-500 мм. Ширина захвату розкидачів становить від 10 до 50 м. Об'єм бункера від 500-5000 л. Продуктивність становить до 18 га/год.

2. Обприскувачі для рідких мінеральних добрив(КАС, аміачна селітра в розчині) штангового типу. Існують причіпні, начіпні та самохідні. Працюють за принципом гідравлічного розпилення робочого розчину. Добрива змішують з водою в баку обприскувача, ретельно гомогенізують та пропускають через

фільтри, видаляючи домішки. Об'єм бака 1000-5000 л. Далі насос мембранного або поршневого типу (тиск від 2 – 8 бар) нагнітає розчин з баку через шланги до форсунок норма внесення регулюються клапанами та датчиками(для VRA – GPS/NVDI). Форсунки розпилюють розчин під заданим кутом(факел регулюється залежно від тиску розчину. Насос змінює тиск залежно від сигналу з бортового комп'ютера) та подрібнює на краплі розміром від 100 до 500 мкм під тиском. Форсунки бувають плоскофакельні, конусні(повний та напівконус), вихрові та інжекторного типу. Ширина захвату обприскувачів варіюється від 12 до 50 м. Продуктивність становить до 22 га/год.



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд машин для внесення добрив  
 а – розкидач мінеральних добрив фірми VINA VI, робочий орган; б – Причіпний розкидач добрив фірми Amazone; в – Начіпний розкидач добрив Amazone



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд машин для внесення добрив  
 а – Причіпний обприскувач ОПШ-2418; б – Обприскувач начіпний KUHN;  
 в – Самохідний обприскувач Case IH Patriot 4440

3. Сівалки із туками для мінеральних добрив. Це причіпні машини, принцип з двома бункерами— один для зерна, другий для добрив. На сучасних сівалках для зменшення габаритів, економії матеріалу та пришвидшення виробництва бункери виготовляють камерного типу у співвідношенні 50/50 або 60/40, об'єм яких становить від 400 до 5000 л. Гранули та насіння дозуються пневматичними пристроями із електронними компонентами. По гофрованому рукаву(трубі) матеріал подається до сошників певного типу. Добрива закладають на глибину 3-4 см нижче насіння або сошники для добрив йдуть не концентрично із сошниками насіння, а обабіч, з відступом від ряду насіння на 2-5 см, щоб уникнути опіків. Продуктивність становить до 15 га/год.



Рисунок 1.8 – Загальний вигляд машин для внесення добрив  
а – Сівалка Väterstad; б – Сівалка BEDNAR

Далі розглянуто використання систем та датчиків для процесу внесення добрив. Загальні для всіх типів машин для внесення добрив датчики

а) GPS-системи паралельного водіння – усуває перекриття або пропуски, завдяки сигналу із супутника який приходить на антену трактора, що зменшує витрати палива та добрива, та дає змогу якісно працювати вночі.



Рисунок 1.9 – Результат сівби з використанням паралельного водіння

б) Автопілот – МТА керується автоматично з корекцією вхідного сигналу (сигнал корегується за допомогою RTK-станції) з точністю до 2 см.

в) GPS та диференційованого внесення – сигнал приходить від бортового комп'ютера трактора та керує серводвигунами, які регулюють положення заслінки, тим самим і потік добрив.



Рисунок 1.10 – Диференційне внесення добрив

Датчики, які використовують в розкидачах мінеральних добрив:

а) Датчики швидкості обертання дисків: працюють за принципом датчиків Холла або використовують оптичний енкодер. Функція датчика – корегування ширини розкидання залежно від швидкості руху агрегату з точністю до  $\pm 1\%$ .

б) Датчики витрати добрив: тензо- або ультразвукові датчики, які знаходяться в бункері в дозувальному каналі. Функція датчика – моніторинг масової витрати (кг/хв) для автоматичного корегування норми внесення з точністю  $\pm 5\%$ .

в) Оптичні датчики та стереовізійні камери, функція яких полягає у вимірюванні швидкості (сприймають до 30 м/с) та побудові траєкторії руху гранули на в тривимірній площині для моделювання розподілу частинок під час роботи. Далі ці дані використовують для калібрування роботи дисків (швидкість обертання, кут нахилу, подачу від дозуючого пристрою, ширину захвату та врахування зовнішніх факторів).

г) Датчики вимірювання вологи та розмірів гранул(ємнісного типу), які розміщують в бункері .Функція датчиків – визначення вологості (точність 5-15%) та розмірів гранул для запобігання склепіння та нерівномірності подачі добрив на робочий орган. Кориують дозуючий пристрій.

д) Датчик рівня добрив у бункері – використовують ультразвукові датчики, функція яких контроль рівня добрив у бункері.

На обприскувачі встановлюють такі датчики:

а) Датчики тиску – вимірюють тиск розпилення розчину, використовуючи п'єзоелектричні або тензометричні елементи. Функція сенсорів – коригування роботи насосу для контролю норми внесення.

б) Датчики витрати рідини – ультразвукові сенсори в магістралях подачі рідини. Функція датчиків – моніторинг витрати об'єму рідини з точністю  $\pm 2\%$ .

в) Оптичні датчики аналізу стану рослин (NDVI) – використовують інфрачервоні сенсори для вимірювання індексу вегетації рослин та регулювання норми внесення добрив за результатами стану рослин.

г) Датчик рівня рідини в баку – використовують ємнісні або ультразвукові датчики. Функція – запобігти спустошенню баку та холостій роботі систем подачі та внесення обприскувача.

д) Датчики швидкості, вологості та температури повітря: використовують анемометри, гігрометри та термометри, які виконують в одному корпусі та розміщують на штанзі. Функція – корекція факелу розпилення.

е) Датчики забруднення форсунок: використовують інфрачервоні або оптичні датчики, як і сигналізують оператору про необхідність очистки форсунок.

На сівалки із туками для мінеральних добрив встановлюють такі датчики:

а) Оптичні датчики контролю потоку – установлюють на пневматичні сівалки із туками для добрив. Відстежують перебої в постачанні гранул від бункера до робочого органу(сошників або відцентрового диску) за допомогою

фотодатчику з інфрачервоним світлом. Точність детекції в діапазоні від 2 до 0.5 мм.

б) Датчики глибини висіву: механічного або ультразвукового типу на сошниках. Функція датчиків – контроль глибини висіву насіння та внесення добрив з точністю  $\pm 0,5$  см, враховуючи рельєф поля.

в) Датчики стану ґрунту – використовують ємнісні або інфрачервоні датчики, які встановлюють на сошниках. Функція: вимірювання вологості ґрунту (в діапазоні 5-25%) та його ущільнення та коригування глибини внесення насіння та добрив.

г) Оптичні датчики контролю висіву – використовують інфрачервоні або фотодіодні сенсори, які розміщують у висівних апаратах. Функція: моніторинг потоку насіння (в діапазоні 5 – 50 шт/с) та коригування висіву насіння.

д) Датчики тиску у пневмосистемі – використовують п'єзоелектричні сенсори в пневматичних магістралях. Функція: регулювання тиску (в діапазоні 0,5 – 2 бар) для рівномірного розподілу добрив через сошники.

е) Датчик рівня добрив у бункері – використовують ультразвукові датчики, функція яких контроль рівня добрив у бункері.

### **1.3 Аналіз робочих органів розкидачів мінеральних добрив**

Від конструкції робочих органів розкидача залежать дальність, ширина та рівномірність розподілу частинок, а також стабільність подачі матеріалу за різних режимів роботи [1, 2].

Сучасні розкидачі мінеральних добрив поділяються за типом робочого органу на відцентрові, пневматичні, стрічкові та вібраційні. Найбільшого поширення набули відцентрові розкидачі, які відзначаються простою конструкцією, високою продуктивністю, можливістю регулювання ширини захвату та адаптацією до різних типів добрив [4].

Основним елементом відцентрового розкидача є дисковий робочий орган, який забезпечує надання частинкам добрив початкової швидкості за рахунок дії

відцентрових сил. Конструктивно диск може бути оснащений двома або більше лопатями, що визначають напрям і рівномірність розподілу частинок. На ефективність розкидання впливають такі параметри: діаметр і частота обертання диска; кількість і геометрія лопатей; кут їх встановлення відносно площини обертання; швидкість і напрям руху агрегату; висота падіння добрив на диск; фізико-механічні властивості добрив (розмір частинок, густина, форма, вологість) [4].

Однодисккові розкидачі мають простішу конструкцію та використовуються переважно для внесення добрив на невеликі площі або в міжряддя. Дводисккові системи забезпечують ширше перекриття робочих зон і вищу рівномірність внесення, особливо при накладанні секторів розкидання від обох дисків. У сучасних конструкціях застосовуються системи з регульованим кутом нахилу лопатей, що дає змогу оперативно змінювати дальність польоту частинок і норму внесення [5, 6, 7].

Крім класичних механічних систем, у новітніх моделях використовуються регульовані приводи робочих органів (гідравлічні або електричні), що дозволяють змінювати швидкість обертання дисків залежно від швидкості руху агрегату та норм внесення. Додатково можуть встановлюватися сенсори контролю подачі матеріалу, системи автоматичного калібрування та елементи GPS-навігації для точного внесення добрив.

Важливою характеристикою робочого органу є енергоефективність, оскільки надмірна швидкість обертання дисків призводить до подрібнення гранул, підвищення втрат і зростання витрат енергії. Тому завданням інженерного удосконалення є пошук компромісу між рівномірністю розподілу, дальністю розкидання та мінімальним енергоспоживанням.

Отже, аналіз показує, що конструкція відцентрового дискового робочого органу визначає якість і ефективність процесу розкидання мінеральних добрив. Подальше вдосконалення цих систем доцільно проводити шляхом оптимізації геометричних параметрів лопатей, швидкості обертання диска та системи подачі

добрив на робочу поверхню з використанням методів аналітичних досліджень і чисельного моделювання.

У міжнародній практиці розподіл мінеральних добрив здебільшого здійснюється відцентровими дисковими розкидачами з лопатями (рис. 1.11), що зумовлено їхньою високою продуктивністю, а також простотою конструкції та експлуатації. Незважаючи на ці переваги, для забезпечення високої рівномірності розподілу добрив у полі, а отже – необхідних показників урожайності, потрібно правильно обирати параметри робочого процесу цих механізмів.

У цьому контексті моделювання руху частинок добрива на диску розкидача неодноразово ставало предметом досліджень різних авторів [8, 9] з метою визначення взаємозв'язків між параметрами цього процесу, такими як: діаметр і кутова швидкість диска, положення лопатей, місце падіння або подачі добрива на диск тощо.

Робота центрифугального розкидача мінеральних добрив складається з трьох фаз (етапів):

1. Перша фаза – добриво під дією сили тяжіння висипається через отвір або заслінку, розташовану в нижній частині бункера, у зону поблизу центру диска.

2. Друга фаза – матеріал транспортується до краю диска під дією системи сил, серед яких провідною є відцентрова сила, при цьому частинки зазнають дії сил тертя з поверхнями самого диска та лопатей.

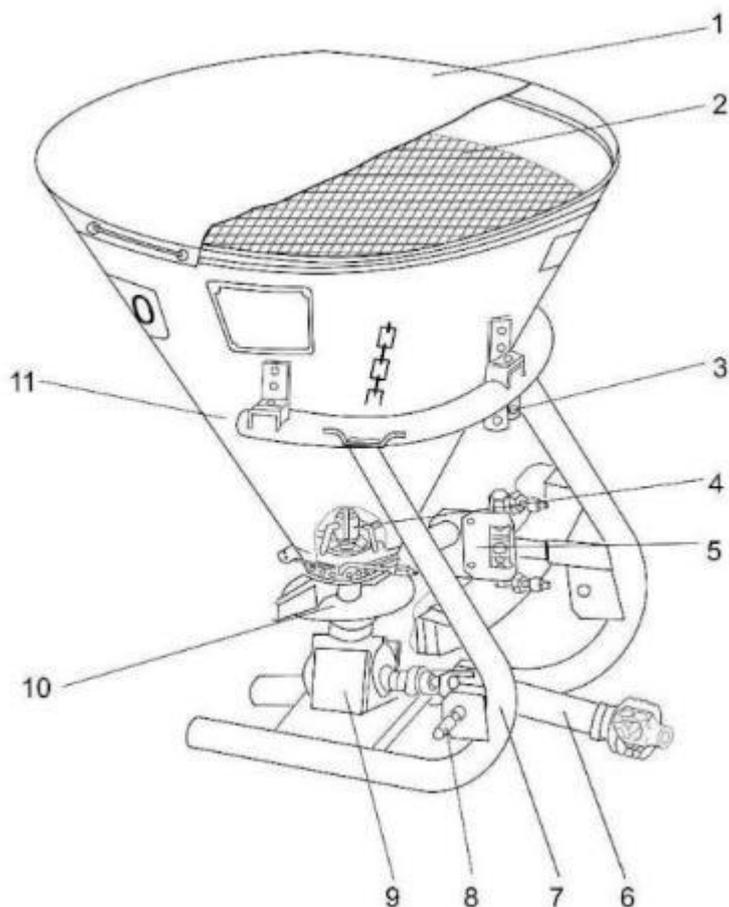
3. Третя фаза – частинки викидаються у поле, а їхня траєкторія визначається балістичним польотом під впливом густини та швидкості навколишнього повітря.

Очевидно, що точне прогнозування і контроль руху частинок у другій фазі, які починаються з правильного визначення точки падіння добрива з бункера, дають змогу регулювати як швидкість вильоту, так і кут розсіювання частинок на полі.

Моделювання другої фази розглядалося в багатьох наукових роботах.

В статті [9] розробили аналітичну модель, яка описує рух частинок на увігнутому диску з плоскими лопатями. Модель дозволяє визначити співвідношення між горизонтальними радіальними та дотичними компонентами

швидкості вильоту, хоча безпосередньо не може бути застосована до плоских дисків.



1 – кришка; 2 – сітка; 3, 5, 8 – кронштейни; 4 – роторна ворушилка; 6 – вал відбору потужності; 7 – рама; 9 – редуктор; 10 – відцентровий дисковий робочий орган; 11 – бункер для мінеральних добрив

Рисунок 1.11 – Конструктивно-технологічна схема відцентрового дискового робочого органу

В роботі [10] проаналізували рух ідеальної сферичної однорідної частинки добрива вздовж прямої лопаті, закріпленої на обертовому плоскому диску, який використовується в центрифугальних розкидачах добрив. Аналіз виконано в неінерціальній системі відліку і з застосуванням законів класичної механіки. У результаті запропоновано систему однорідних звичайних диференціальних рівнянь другого порядку, розв'язок якої наближено описує реальний відносний

рух частинки вздовж прямої лопаті, закріпленої радіально на диску, що обертається з постійною кутовою швидкістю.

Запропонована модель є корисною для оптимізації параметрів такого типу розкидачів, хоча не може бути точно застосована для випадків, коли лопаті розміщені під нахилом відносно радіального напрямку. Для свого аналізу в статті [10] спиралися на попередні дослідження [10, 11].

Останні з них дозволяють розраховувати рух частинок, коли диск оснащений лопатями, нахиленими відносно радіального напрямку, і стали основою для створення моделі та програмного забезпечення, представлених у цій роботі, які дають змогу визначати віяло розсіювання частинок добрива на виході з диска розкидача. Третя фаза, що відповідає польоту частинки після її викиду диском, розглядалася іншими авторами – [12–14].

Нижче наведено перелік характеристик провідних фірм розкидачів мінеральних добрив, які знадобляться для розрахунків при чисельному моделюванні.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики розкидачів мінеральних добрив

| Параметри/Машини                     | RAUCH<br>AXERA<br>H 1101 | KUHN<br>AXIS<br>30.1 | AMAZONE<br>ZA M 1800 | KVERNELAND<br>EXACTA HL<br>1500 | DONDER<br>CGSA<br>PRO-T<br>3000 |
|--------------------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Частота обертання дисків, об/хв      | 720                      | 750                  | 720                  | 720                             | 850                             |
| Робоча швидкість, м/с                | 3-5,5                    | 3-4                  | 3-4                  | 2,5-4                           | 3-4                             |
| Діаметр заслінки дозатора добрив, мм | 100                      | 70                   | 100                  | 80                              | 110                             |
| Діаметр дисків, мм                   | 580                      | 500                  | 600                  | 550                             | 760                             |
| Довжина лопаток, мм                  | 250                      | 180                  | 220                  | 330                             | 300                             |
| Ширина внесення тах, м               | 36                       | 20                   | 32                   | 50                              | 36                              |
| Висота дисків на поверхнею поля, мм  | 80                       | 70                   | 65                   | 70                              | 70                              |

## 1.4 Фізико-механічні властивості та характеристики гранульованих мінеральних добрив

Мінеральні добрива виготовляють згідно ДСТУ(ГОСТ), тому їх фізико-механічні властивості є конкретними величинами. Ці властивості впливають на те, як будуть транспортуватись, зберігатись та вноситись добрива. Перелік основних фізико-механічних властивостей мінеральних добрив.

Таблиця 1.2 – Основні характеристики мінеральних добрив

| Властивість              | Од. виміру        | Аміачна селітра | Суперфосфат | Хлорид калію | НРК       |
|--------------------------|-------------------|-----------------|-------------|--------------|-----------|
| Абсолютна щільність      | г/см <sup>3</sup> | 1,72            | 2,1         | 1,98         | 2-2,2     |
| Насипна щільність        | г/см <sup>3</sup> | 0,8-1,05        | 0,9-1       | 1-1,1        | 0,9-1,1   |
| Міцність на стиск        | МПа               | 3,5-5           | 2-3,5       | 4,5-6        | 3-5       |
| Коеф. внутрішнього тертя | -                 | 0,35-0,45       | 0,45-0,55   | 0,3-0,4      | 0,35-0,45 |
| Кут природнього відкосу  | Град.             | 28-32           | 30-35       | 30-35        | 25-30     |
| Модуль пружності         | МПа               | 150-250         | 100         | 200-300      | 150-250   |
| Гігроскопічність         | %                 | 0,2             | 1-3         | 0,5          | 0,3-0,6   |

- Щільність (насипна та абсолютна) – маса на одиницю об'єму сипкого тіла;
- Розмір гранул – знаходиться в діапазоні 1-5 мм. Зі збільшення розмірів – зменшується міцність гранул;
- Сипучість – здатність просипатися крізь отвори. Властивість тісно пов'язана з вологістю та кутом природнього відкосу. Гранульовані добрива добре просипаються крізь отвори при куті природнього відкосу до 40 градусів, а порошкоподібні – до 35 за нормальної вологості;
- Злежуваність – здатність утворювати суцільну масу різної щільності, залежно від наявності пустот між частинками;
- Гігроскопічність - здатність поглинати вологу з навколишнього середовища(повітря);
- Відносна вологість – відношення маси води до маси добрив;
- Коефіцієнт тертя – внутрішній та зовнішній(характеризує опір відносному руху частинок).

- Коефіцієнт парусності – збільшується зі зменшенням розмірів гранул(знаходиться в діапазоні 0,07-0,75);
- Критична швидкість знаходиться в діапазоні 3,5 – 11 м/с;
- Міцність – опір гранул руйнуванню(контактна, стискаюча)

Для проєктування машин для внесення мінеральних добрив керуються міцнісними та кінематичними характеристиками, адже гранула має потрапити на робочий орган та пройти свою траєкторію неушкодженою.

### **1.6 Агротехнічні вимоги для внесення мінеральних добрив**

Після тривалого зберігання потрібно подрібнити та просіяти. Розмір агрегатів після просіювання в діапазоні від 1-5мм.Допускається вміст агрегатів менше 1 мм до 6%.

Втрати добрив під час затарювання у паперові мішкотари становлять до 1%, у поліетиленову – до 0.5%. Вміст домішок у вигляді лоскутів мішкотари для паперової допускається до 3%. від маси і для поліетиленової - 0,1% від маси.

Вологість компонентів під час змішування не повинна відрізнятись від нормативної більше ніж на 25%.Неорідність поживних елементів у тукосумішах  $\pm 10\%$ .

Нерівномірність розкидання при поверхневому внесенні мінеральних добрив на всій площі поля допускається не більше 25%.Розбіжність між заданою та фактичною дозою внесення становить  $\pm 10\%$ .

Розриви між потоками внесених добрив розкидачами не допускаються. Допускається перекриття між проходами МТА не більше 5% від ширини захвату машини.

### **1.7 Висновки з розділу**

1. Різні способи внесення та розподілу мінеральних добрив використовують в різні пори року, перед певною операцією певної технології, але я виокремлю

основний спосіб внесення із поверхневим розподілом по полю з використанням відцентрових розкидачів, адже ця комбінація забезпечує високу продуктивність (швидкість МТА до 15 км/год та ширина розкидання до 50 м), ефективність (достатня точність внесення із залученням навігації та телематики) внесення мінеральних добрив, та просту надійну конструкцію.

2. Аналіз конструкцій і принципів роботи робочих органів розкидачів мінеральних добрив показує, що саме геометрія та кінематичні параметри відцентрових дискових систем визначають рівномірність, дальність і стабільність розподілу гранул у полі. Відцентрові розкидачі залишаються домінуючим типом завдяки простоті конструкції, високій продуктивності та можливості оперативного регулювання ширини захвату. Ефективність їх роботи залежить від багатьох чинників: діаметра й швидкості обертання диска, форми та положення лопатей, точки падіння добрив, а також фізико-механічних властивостей гранул.

3. Моделювання руху частинок на диску, зокрема другої фази транспортування під дією відцентрових сил, є ключем до оптимізації конструктивних параметрів і підвищення точності розподілу.

4. З урахуванням агротехнічних вимог стає очевидним, що подальший розвиток розкидачів має ґрунтуватися на поєднанні раціональної геометрії робочих органів, використанні регульованих приводів і застосуванні сучасних методів аналітичного та чисельного моделювання, що забезпечить зменшення втрат добрив, підвищення рівномірності внесення та збереження цілісності гранул у процесі роботи.

## 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ ВІДЦЕНТРОВИМ ДИСКОВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

### 2.1 Складання диференціального рівняння руху частинки по лопаті дискового робочого органу

Подану модель розроблено для визначення характеру руху частинок добрива на розподільному диску та при їхньому контакті з лопатями, що дозволяє встановити величину і напрям швидкості, з якою частинки залишають диск, залежно від його геометричних і кінематичних параметрів.

Під час розроблення моделі розглядався плоский диск, хоча на практиці використовують також конічні. Щодо лопатей – вони можуть бути орієнтовані у радіальному напрямку, нахилені у бік, протилежний обертанню диска (задньоорієнтовані лопаті), або нахилені у напрямку його обертання. Для побудови моделі було обрано останній варіант, оскільки він вважається найбільш ефективним для досягнення вищої швидкості вильоту частинок за однакової частоти обертання диска.

Аналіз проводився шляхом отримання диференціального рівняння динаміки руху частинки з використанням законів класичної механіки (другий закон Ньютона). Розрахунок здійснено в неінерціальній системі відліку, що обертається разом із диском, тому необхідно було врахувати «фіктивні» сили (відцентрову та силу Коріоліса), які діють на частинку у цій рухомій системі.

Розв'язання диференціального рівняння руху здійснювалося класичними методами математичного аналізу. Отримані рівняння було реалізовано у програмному середовищі Wolfram Cloud, що дозволило перевірити модель на конкретних даних і визначити вихідну швидкість та кут розсіювання добрива залежно від таких вхідних параметрів: кут нахилу лопатей, коефіцієнт тертя між добривом і матеріалом диска та лопатей, геометричні розміри та швидкість

обертання диска, а також координати зони падіння добрива з вихідного отвору бункера.

На рис. 2.1 зображено сили, що діють на частинку добрива під час її взаємодії з диском і лопаттю відцентрового розсіювача.

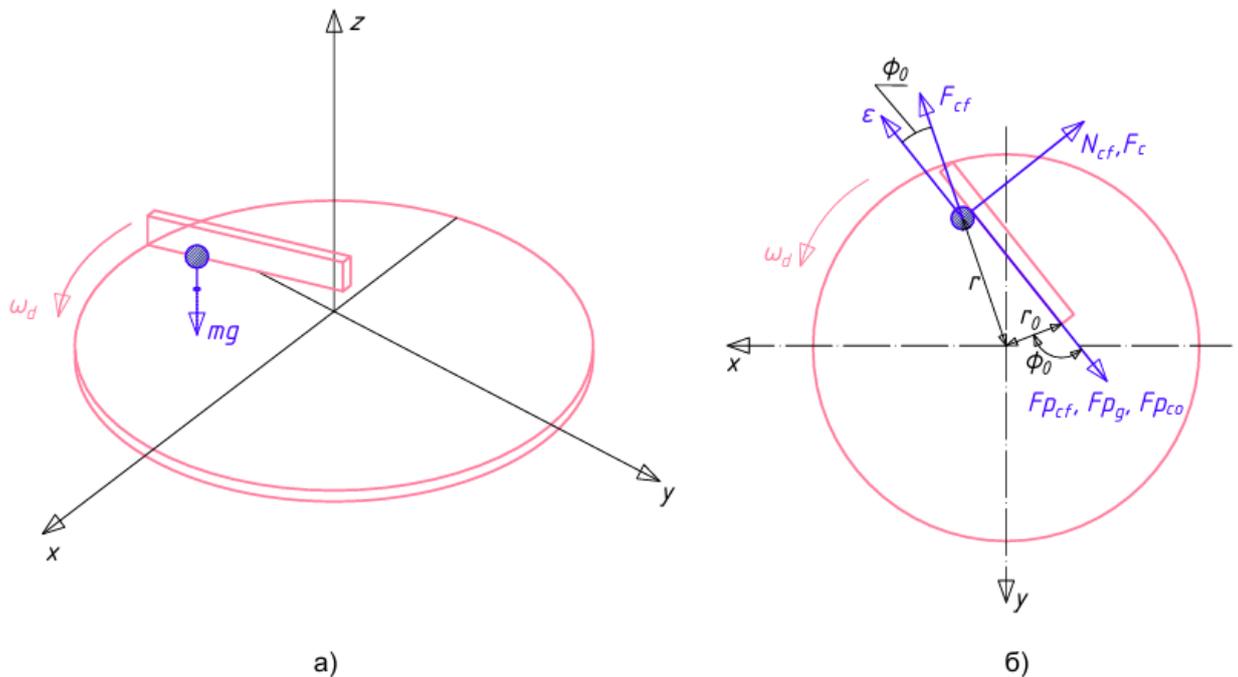


Рисунок 2.1 – Сили, що діють на частинку в дисковому відцентровому розсіювачі з лопатями

Як видно з рис. 2.1, на частинку діють такі сили:

–  $mg$  – сила тяжіння частинки, напрямлена перпендикулярно до поверхні диска (рис. 3.2, а), дорівнює добутку маси частинки  $m$  на прискорення вільного падіння  $g$ ;

–  $F_{cf}$  – відцентрова сила, напрямлена вздовж радіус-вектора  $r$ , який визначає радіальне положення частинки відносно центра диска. Вона виражається як:

$$\vec{F}_{cf} = -m \cdot \vec{\omega}_d \times (\vec{\omega}_d \times \vec{r}), \quad (2.1)$$

її величина дорівнює:

$$F_{cf} = m \cdot r \cdot \omega_d^2, \quad (2.2)$$

–  $F_{co}$  – сила Коріоліса, визначається як:

$$\vec{F}_{co} = 2m \cdot \vec{\xi} \times \vec{\omega}_d. \quad (2.3)$$

Її напрям є перпендикулярним до векторів відносної швидкості частинки щодо лопаті  $\vec{\xi} = \frac{d\bar{\xi}}{dt}$  та кутової швидкості  $\vec{\omega}_d$  диска, протилежним до напрямку обертання диска, а величина дорівнює:

$$F_{cf} = 2m \cdot \dot{\xi} \cdot \omega_d, \quad (2.4)$$

–  $F_{pcf}$  – сила тертя між лопаттю та частинкою, зумовлена дією відцентрової сили:

$$F_{pcf} = \mu_f \cdot m \cdot r \cdot \omega_d^2 \cdot \sin \psi, \quad (2.5)$$

де  $\mu_f$  – коефіцієнт тертя між частинкою та матеріалом лопаті;  $\psi$  – кут між напрямом відцентрової сили та напрямом відносного руху частинки вздовж лопаті;

–  $F_{pco}$  – сила тертя між лопаттю та частинкою, зумовлена дією сили Кориоліса:

$$F_{pco} = \mu_f \cdot 2m \cdot \dot{\xi} \cdot \omega_d, \quad (2.6)$$

–  $F_{pg}$  – сила тертя між диском і частинкою:

$$F_{pg} = \mu_{fd} \cdot m \cdot g. \quad (2.7)$$

Зазвичай матеріал диска та лопатей є однаковим, тому коефіцієнт тертя між диском і частинкою приймається рівним  $\mu$ .

Записуючи другий закон Ньютона в неінерціальній системі відліку, одержують диференціальне рівняння руху частинки у напрямку лопаті:

$$m r \omega_d^2 \cos \psi - \mu_f m g - \mu_f m r \omega_d^2 \sin \psi - 2 \mu_f m \omega_d \frac{d\xi}{dt} = m \frac{d^2 \xi}{dt^2}. \quad (2.8)$$

## 2.2 Рішення диференціального рівняння руху частинки по лопаті дискового робочого органу

З рисунка 2.1, б видно, що:

$$r \cos \psi = \xi - r_0 \cos(\pi - \psi_0). \quad (2.9)$$

де  $\xi$  – шлях, пройдений частинкою вздовж лопаті, відрахований від її початку;  $r_0$  – початковий радіус-вектор, спрямований від центра диска до початку лопаті;  $\psi_0$  – початкове значення кута  $\psi$  між радіус-вектором і лопаттю:

$$r \sin \psi = r_0 \sin(\pi - \psi_0) = \text{cte}. \quad (2.10)$$

Також можна записати:

$$\mu_f = \tan \phi_f. \quad (2.11)$$

З іншого боку, коефіцієнт тертя  $\mu_f$  можна виразити через кут тертя  $\phi_f$  за співвідношенням:

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + 2\mu_f \omega_d \frac{d\xi}{dt} - \omega_d^2 \xi = r_0 \omega_d^2 \frac{\cos(\pi - \psi_0 - \phi_f)}{\cos(\phi_f)} - \mu_f g. \quad (2.12)$$

що є звичайним лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням другого порядку з постійними коефіцієнтами, загальний розв'язок якого можна визначити як суму розв'язку однорідного рівняння та частинного розв'язку неоднорідного рівняння.

$$\xi = \xi_h + \xi_p. \quad (2.13)$$

Однорідна частина цього рівняння записується як:

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + 2\mu_f \omega_d \frac{d\xi}{dt} - \omega_d^2 \xi = 0. \quad (2.14)$$

Загальний розв'язок має вигляд:

$$\xi_h = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}. \quad (2.15)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  – сталі інтегрування, а  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – корені характеристичного рівняння:

$$\lambda^2 + 2\mu_f \omega_d \lambda - \omega_d^2 = 0. \quad (2.16)$$

$$\lambda_1 = \omega_d (-\mu_f + \sqrt{1 + \mu_f^2}). \quad (2.17)$$

$$\lambda_2 = -\omega_d (-\mu_f + \sqrt{1 + \mu_f^2}). \quad (2.18)$$

Частинний розв'язок для неоднорідного рівняння (2.12) можна визначити, застосувавши метод невизначених коефіцієнтів:

$$\xi_p = C. \quad (2.19)$$

Після диференціювання (2.19) і підстановки в рівняння (2.12) отримують наступний частинний розв'язок неоднорідного диференціального рівняння:

$$\xi_p = r_0 \frac{\cos(\pi - \psi_0 - \phi_f)}{\cos(\phi_f)} - \frac{\mu_f g}{\omega_d^2}. \quad (2.20)$$

Підставивши (2.15) і (2.20) у (2.13), отримаємо загальний розв'язок диференціального рівняння (2.12) у вигляді:

$$\xi = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + r_0 \frac{\cos(\pi - \psi_0 - \phi_f)}{\cos(\phi_f)} - \frac{\mu_f g}{\omega_d^2}. \quad (2.21)$$

Нарешті, рівняння (2.21) оцінюється для початкових умов, що відповідають початковому положенню лопатей, при  $t = 0$ ,  $\xi = 0$  та  $d\xi/dt = 0$  (початкова швидкість частинок дорівнює нулю). Таким чином, остаточно отримують розв'язок диференціального рівняння руху частинки:

$$\xi = \left[ \frac{\mu_f g}{\omega_d^2} - r_0 \frac{\cos(\pi - \psi_0 - \phi_f)}{\cos(\phi_f)} \right] \left[ \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} + \lambda_1 e^{\lambda_2 t} - 1) \right]. \quad (2.22)$$

Графік цієї залежності, побудований для певних умов, наведено на рис. 2.2, який показує, що час перебування частинок на диску становить порядку сотих частки секунди.

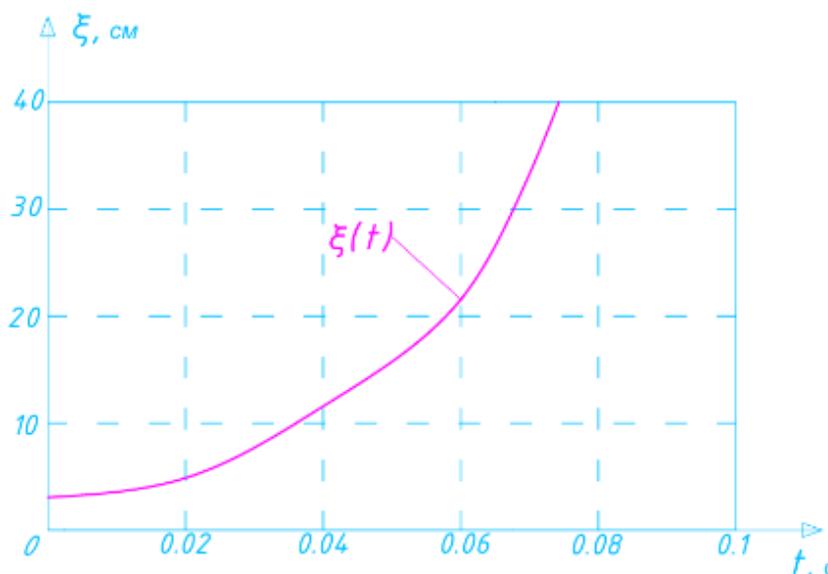


Рисунок 2.2 – Зміна відносного переміщення частинок уздовж диска з нахиленими вперед лопатями, що обертається зі швидкістю 800 об/хв, як функція часу

Диференціюючи вираз (2.22) за часом, отримують відносну швидкість руху частинок уздовж лопатей розсіювача:

$$v_r = \frac{d\xi}{dt} = \left[ \frac{\mu_f g}{\omega_d^2} - r_0 \frac{\cos(\pi - \psi_0 - \phi_f)}{\cos(\phi_f)} \right] \left[ \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} + \lambda_1 e^{\lambda_2 t} - 1) \right]. \quad (2.23)$$

Величина радіус-вектора, що з'єднує центр диска з поточним положенням частинок, визначається за формулою:

$$r(t) = \sqrt{(\xi - r_0 \cos \psi_0)^2 + (r_0 \sin \psi_0)^2}. \quad (2.24)$$

Підставивши у вираз (2.24) залежність  $\xi = f(t)$  з рівняння (2.22) і провівши обчислення для максимальної величини радіус-вектора ( $r_e$ ) (зовнішній радіус диска), можна визначити час перебування частинок на диску ( $t_p$ ) – від моменту їх подачі (положення  $(r_0, \psi_0)$ ) до досягнення зовнішнього краю диска (положення  $(r_e, \psi_e)$ ).

За цей час диск повернеться на певний кут ( $\theta_d$ ), а частинка переміститься відносно лопаті на кут ( $\theta_p$ ); таким чином, кут виходу частинок визначається виразом:

$$\theta_s = \omega_d t_p + (\psi_0 - \psi_e). \quad (2.25)$$

Оцінюючи ці рівняння для точок подачі 1 і 2 (рис. 2.3), які утворюють смугу  $b_f$  на початку лопаті, можна визначити кути ( $\theta_{s1}$ ) та ( $\theta_{s2}$ ), що відповідають точкам виходу добрива на краю диска. Кут виходу обмежується векторами  $v_{s1}$  і  $v_{s2}$ , які відповідають абсолютним швидкостям вильоту частинок добрива. Ці швидкості визначаються як векторна сума швидкості обертання диска (дотична до його зовнішнього краю)  $v_a$  і відносної швидкості частинок  $v_r$ , напрям якої збігається з напрямом лопатей.

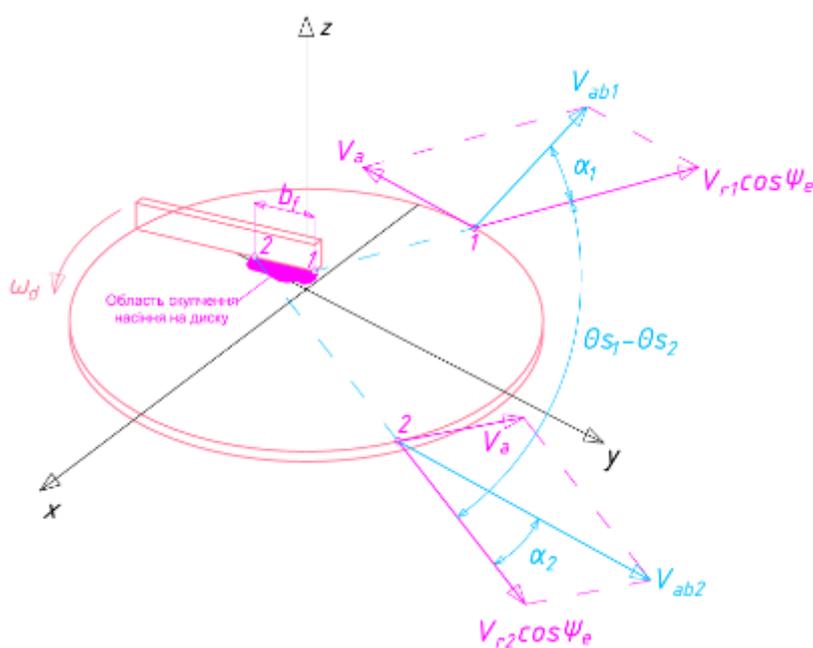


Рисунок 2.3 – Умови виходу добрива з відцентрового диска

Модуль абсолютної швидкості частинок ( $v_s$ ) визначається залежністю:

$$v_{ab} = \sqrt{v_a^2 + (v_r \cos \psi_e)^2}. \quad (2.26)$$

де  $v_a$  – швидкість обертання диска, а  $v_r$  – відносна швидкість частинок, визначена виразом (2.23).

Кут розсіювання добрива ( $\theta_s$ ) обмежується напрямками векторів  $v_{ab1}$  і  $v_{ab2}$  (рис. 2.4) та визначається рівнянням:

$$\theta_s = \theta_{s1} - \theta_{s2} - \alpha_2 + \alpha_1. \quad (2.27)$$

де:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \frac{\omega_d r_e}{v_{r1} \cos \psi_e}; \alpha_2 = \tan^{-1} \frac{\omega_d r_e}{v_{r2} \cos \psi_e}. \quad (2.28)$$

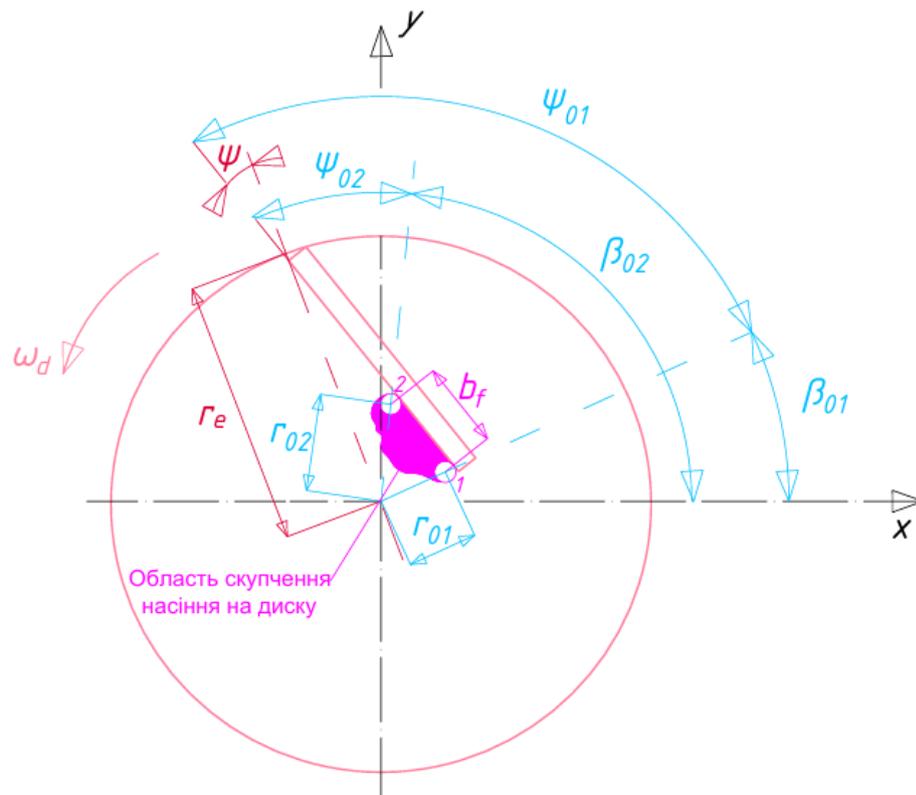


Рисунок 2.4 – Кути, який проходить гранула під час роботи відцентрового диска

Визначити зону ( $b_f$ ) розміщення добрива на відцентровому диску з нахиленими вперед лопатями, щоб забезпечити кут розсіювання  $90^\circ \pm 2^\circ$  у напрямку, протилежному руху машини.

Відомі такі дані: швидкість обертання диска:  $n_d = 540$  об/хв; зовнішній радіус диска:  $r_e = 25$  см; кут між лопаттю та кінцевим радіус-вектором:  $\psi_e = 20^\circ$ ; коефіцієнт тертя добрива по матеріалу диска та лопатей:  $\mu_f = 0.6$ .

Як видно з результатів роботи програми, кути, що відповідають точкам виходу добрива в крайніх положеннях 1 і 2, які визначають зону подачі добрива  $b_f = 7,945$  см, отримані у графічній формі (графіки в полярних координатах).

Як пояснювалося раніше, зона вильоту добрива (зафарбована ділянка на рис. 2.5) обмежується напрямками абсолютних швидкостей ( $v_{ab1}$  та  $v_{ab2}$ ), які визначено на основі значень відносних швидкостей ( $v_{r1}$  та  $v_{r2}$ ) і швидкості обертання диска ( $v_a$ ).

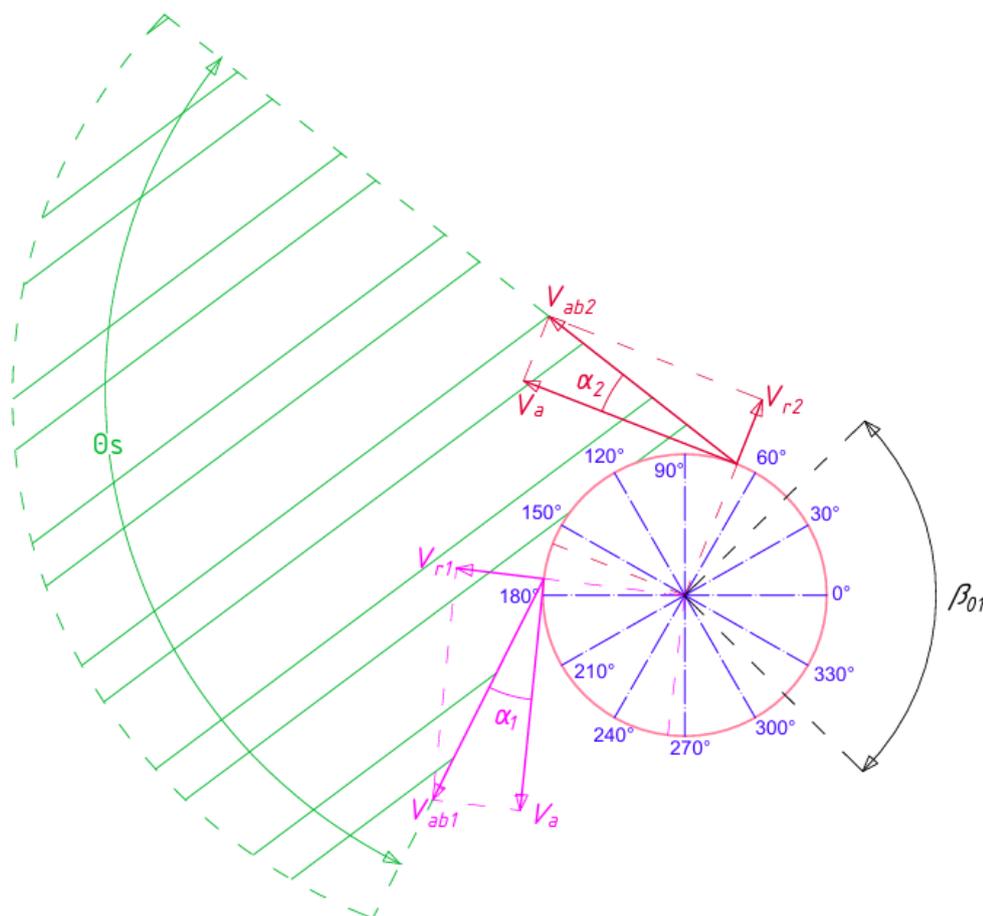


Рисунок 2.5 – Побудова зони виходу добрива

На рисунку 2.5 показано, що кут  $\beta_{01}$  зміщено приблизно на  $90^\circ$ , щоб забезпечити розташування віяла розсіювання добрива у напрямку, протилежному руху машини.

Отримано аналітичну модель, що описує рух частинок на розсіювальному диску відцентрового типу з прямими лопатями, нахиленими відносно радіального напрямку.

Внаслідок програмної реалізації моделі у Wolfram Cloud стало можливим розраховувати параметри виходу добрива (швидкість вильоту та кут розсіювання) на основі вхідних параметрів, таких як: кут нахилу лопатей, коефіцієнт тертя між добривом і матеріалом диска та лопатей, геометричні розміри та швидкість обертання диска, координати зони падіння добрива з вихідного отвору бункера. У результаті виконання демонстраційного прикладу із застосуванням програми отримано кут розсіювання частинок  $\theta_s \approx 90^\circ$ , а ширина зони подачі добрива на диск становила  $b_f \approx 7,5$  см.

### 2.3 Висновки з розділу

1. У ході аналітичних досліджень розроблено математичну модель руху частинок мінеральних добрив на відцентровому дисковому розсіювачі з нахиленими вперед лопатями. Модель враховує дію основних сил – тяжіння, відцентрової, Кориоліса та тертя, що виникають у неінерціальній системі відліку, пов'язаній із диском. На основі другого закону Ньютона отримано диференціальне рівняння руху частинки вздовж лопаті, розв'язок якого дозволяє визначати швидкість, траєкторію та кут вильоту добрива залежно від геометричних і кінематичних параметрів розсіювача.

2. Програмна реалізація рівнянь у середовищі Wolfram Cloud дала змогу провести розрахунки та побудувати графічні залежності зміни положення частинок у часі. Визначено, що при швидкості обертання диска 540 об/хв, куті нахилу лопатей  $20^\circ$  та коефіцієнті тертя 0,6 зона подачі добрива має ширину приблизно 7,5–8 см, а кут розсіювання становить близько  $90^\circ$ , що забезпечує рівномірний розподіл у напрямку, протилежному руху машини.

### **3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ ВІДЦЕНТРОВИМ ДИСКОВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ**

#### **3.1 Постановка задачі моделювання**

Процес внесення мінеральних добрив відцентровим дисковим розкидачем є складним багатофакторним явищем, яке поєднує в собі взаємодію великої кількості сипких частинок між собою та з елементами конструкції машини, вплив відцентрових, гравітаційних і аеродинамічних сил, а також стохастичні ефекти, що зумовлюють нерівномірність розподілу добрив по поверхні поля. Для кількісного опису такого процесу використання аналітичних методів є практично неможливим, тому доцільним підходом є застосування чисельного моделювання із використанням методів обчислювальної механіки. В роботі використано програмний пакет Simcenter Star-CCM+ [15–16], який належить до інтегрованих систем інженерного аналізу, призначених для тривимірного моделювання процесів із залученням багатофазних середовищ, зокрема для розрахунку поведінки сипких матеріалів у межах дискретно-елементної моделі (DEM).

Основною метою проведеного чисельного моделювання було дослідження кінематики руху частинок мінеральних добрив при роботі відцентрового дискового робочого органа, визначення закономірностей формування зони розсіювання та оцінка впливу конструктивних і режимних параметрів на рівномірність внесення матеріалу. Для досягнення зазначеної мети було створено тривимірну геометричну модель робочого органу, визначено фізико-механічні характеристики частинок, налаштовано параметри обчислювальної області, граничні умови та розрахункові моделі контактних взаємодій.

### 3.2 Створення 3D-моделі робочого органу

Геометричну модель дискового розкидача створювали у середовищі Solidworks, після чого вона була імпортована у Simcenter Star-CCM+ для подальших налаштувань проведення симуляції (рис. 3.1).

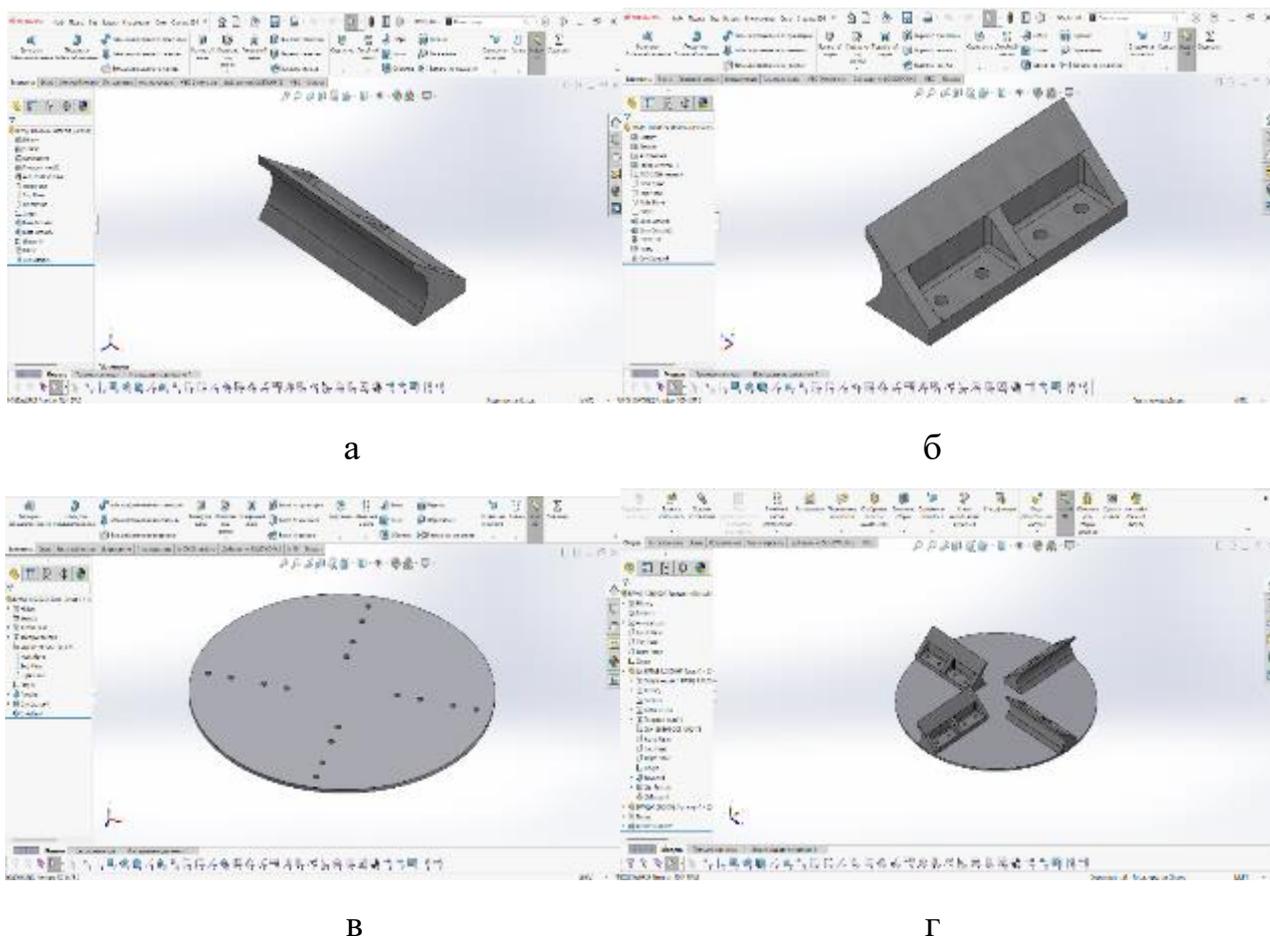


Рисунок 3.1 – Створення 3D-моделі робочого органу

а, б – модель радіальної лопатки відвального типу; в – модель диску;

г – спрощена модель робочого органу відцентрового розкидача мінеральних добрив

### 3.3 Створення сіткової і фізичної моделі робочого органу

Далі інтегровано модель робочого органу в середовище Simcenter STAR CCM+ на висоті 800 мм від поверхні поля.

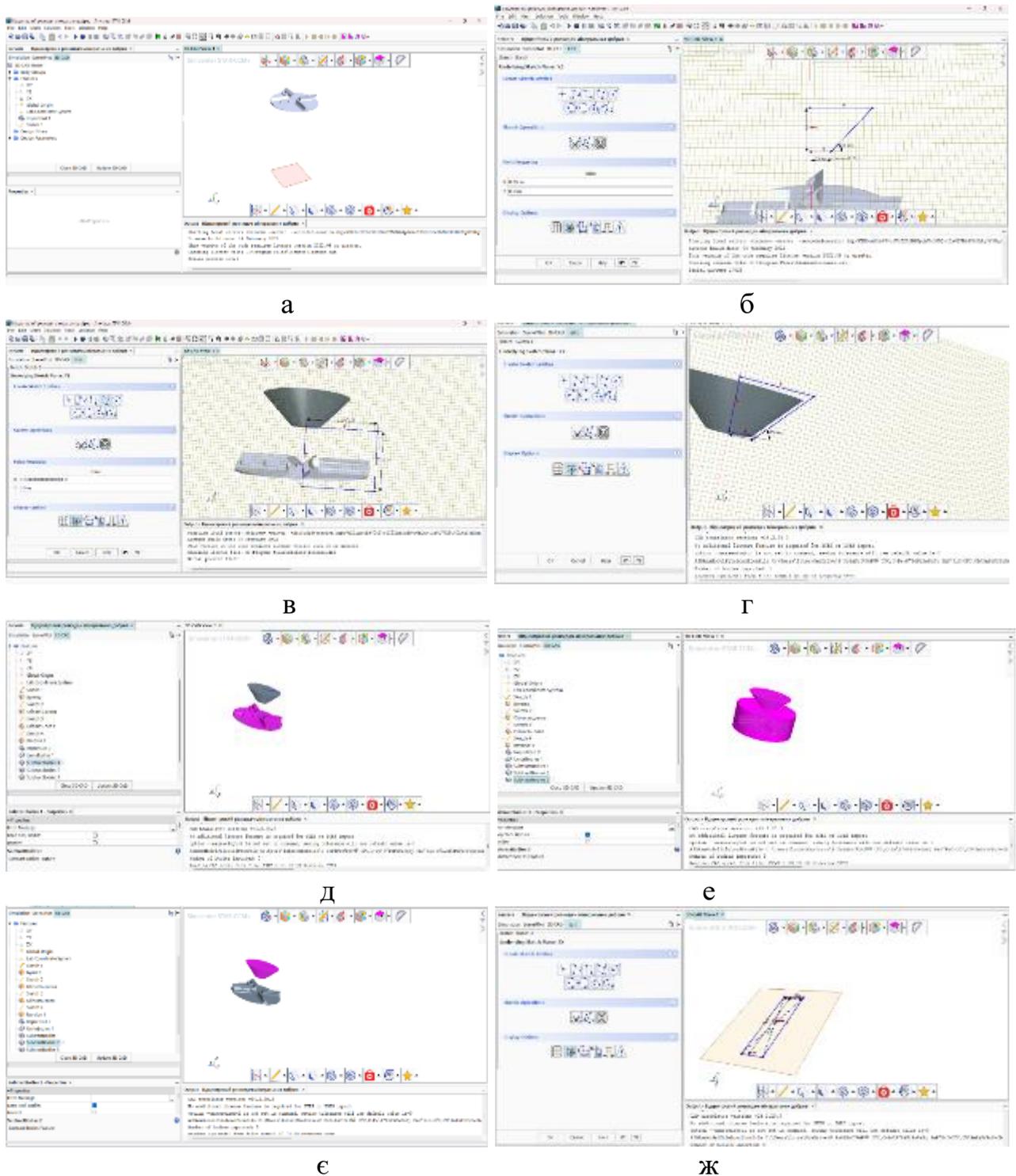


Рисунок 3.2 – Створення сіткової моделі робочого органу

- а – імпортування STEP-моделі в середовище Star-CCM+; б – моделювання частини бункера; в – ескіз середовища диска; г – ескіз середовища бункера; д – ескіз середовища поля; е – моделювання середовища диска; є – моделювання середовища бункера; ж – моделювання середовища поля

Модель включала диск діаметром 450 мм з чотирма радіальними лопатями відвального типу довжиною 170 мм, частину бункера із діаметром заслінки 100 мм та кутом між твірними конуса 90 градусів. Для проведення симуляції необхідно задати області, в яких частинки контактують між собою та іншими тілами від початку до кінця руху.

Переслідуючи цю мету, створено область бункера, в якій буде відслідковуватись поява гранул, область диска, де гранули будуть контактувати з поверхнями диска та область поля, гоном в 1000м. Висота простору від поверхні поля становить 2000 мм.. Таким чином створено цифрову модель трьох фаз руху гранул, які описані в аналітичному дослідженні (рис. 3.2).

Наступний крок – задання «інтерфейсів», площин контакту між межами змодельованих областей та моделей. Для бункера задано дві області взаємодії – взаємодія із областю бункера, яка візуалізує контакт частинок із стінками бункера та взаємодія з областю диску, яка візуалізує перехід частинок із бункера на диск (1 етап); для області бункера – це взаємодія із поверхнею бункера та простором поля; для області диска – це взаємодія між простором поля, площина контакту із бункером та поверхня із робочим органом; для диска - це поверхня контакту із областю диска; для області поля – це площина поля, простір контакт із областями диска та бункера (рис 3.3).

Далі створюємо області та поверхні для кожного елемента які підуть в розрахунок. На попередньому етапі було задано назви інтерфейсів, тож тепер вони автоматично з'являться в меню нижче, що є зручним для контролю (рис.3.4).

Для сипкої фази, представлені гранулами мінеральних добрив, застосовувався безсітковий метод DEM, який не потребує побудови контрольних об'ємів для кожної частинки, а розраховує їх траєкторії на основі рівнянь руху Ньютона.

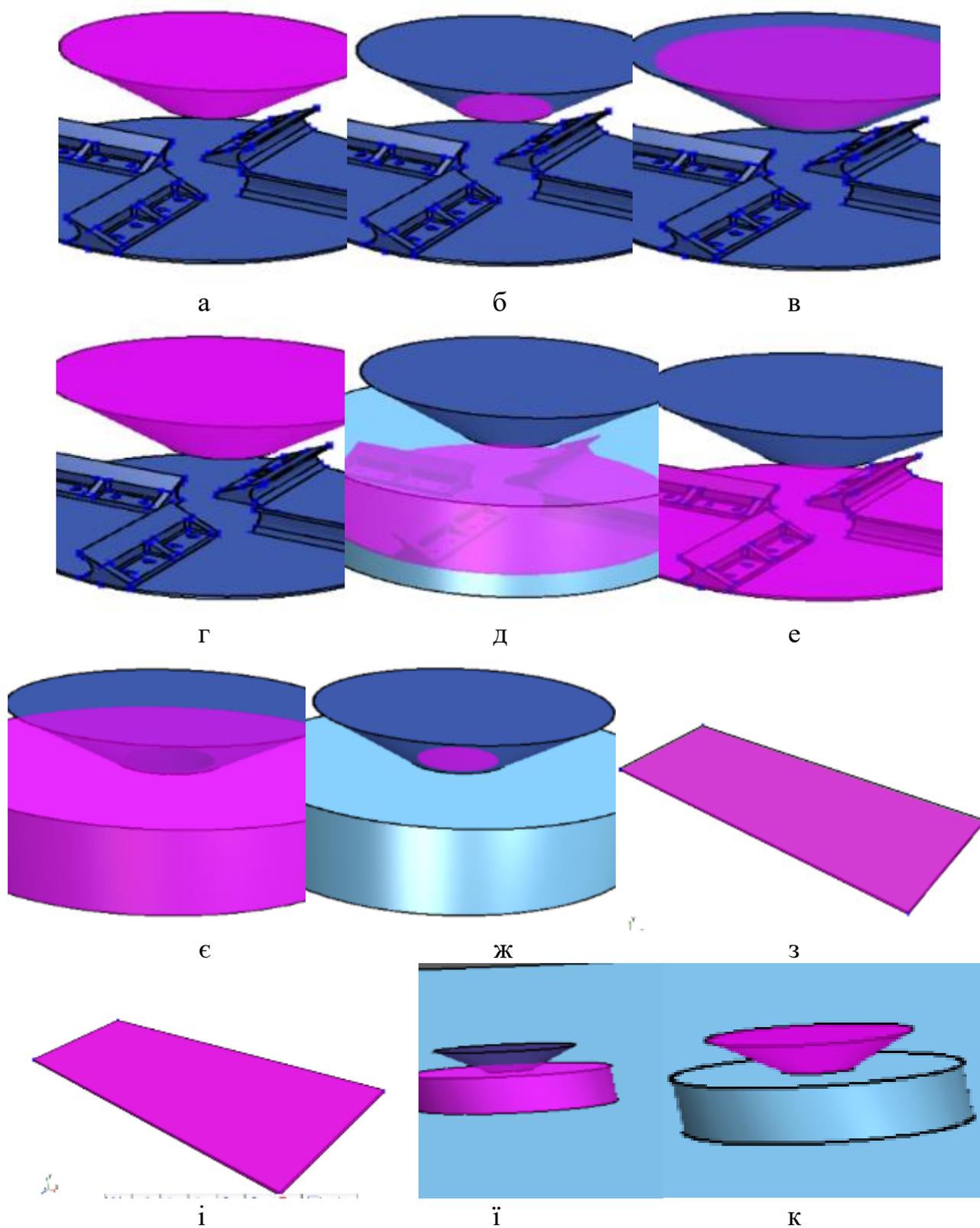


Рисунок 3.3 – Створення сіткової моделі робочого органу

а, б – задання інтерфейсів бункера; в, г – задання інтерфейсів області бункера;  
 д, е, є – задання інтерфейсів області диску; ж – задання інтерфейсу диску; з, і, й,  
 к – задання інтерфейсів області поля

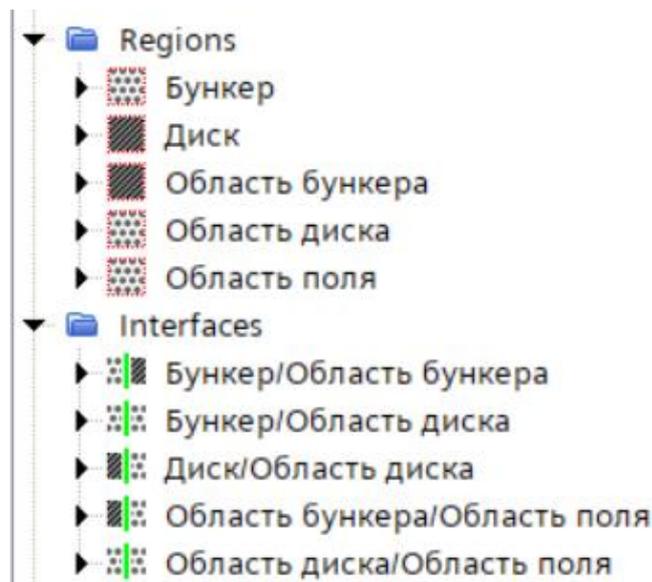


Рисунок 3.4 – Створення областей та інтерфейсів за раніше заданими.

У процесі чисельного моделювання розподілу мінеральних добрив відцентровим дисковим робочим органом у Simcenter Star-CCM+ використано комплекс фізичних моделей, що дозволяють точно описати поведінку гранул під час руху, зіткнення з лопатками та вильоту в повітря. Основою є модель дискретних елементів (DEM) у безсітковій постановці, яка дає змогу розглядати кожену гранулу як окрему частинку із власними фізико-механічними властивостями. Безсітковий підхід забезпечує високу точність опису складної геометрії руху частинок і дозволяє враховувати явища відскоку, ковзання та накопичення матеріалу.

Рух частинок описано за лагранжевим підходом, що дозволяє відстежувати траєкторію кожної гранули від моменту подачі на диск до вильоту. У моделі задано постійну густину частинок, сферичну форму, а також параметри часу існування для забезпечення коректного розрахунку тривалості їх перебування в зоні дії лопаток.

Процес враховує багатофазну взаємодію твердої та газової фаз. Опір перекочуванню і сили взаємодії з повітрям моделюються через підмодуль «Phase Interaction DEM», що дозволяє оцінити вплив турбулентного потоку на траєкторію польоту гранул. Це особливо важливо для визначення рівномірності розподілу добрив на поверхні поля.

Контактні взаємодії між частинками описано за моделлю Герца–Міндліна, яка враховує пружні деформації при зіткненнях і втрати енергії через тертя. Такий підхід забезпечує реалістичну симуляцію руху гранул по металевих лопатках, дозволяючи визначити сили удару та момент відриву частинки.

Для забезпечення стабільності розрахунків застосовано інтерполяцію рішення, що згладжує переходи між зонами різної концентрації частинок. Моделювання виконано у нестационарному неявному режимі, який дозволяє відстежити зміну положення частинок у часі, враховуючи дію відцентрових сил і гравітації. Сила тяжіння відіграє ключову роль у формуванні траєкторії падіння добрив після вильоту з диска.

Основні фізико-механічні властивості частинок мінеральних добрив визначають їхню поведінку при русі, зіткненні та розсіюванні.

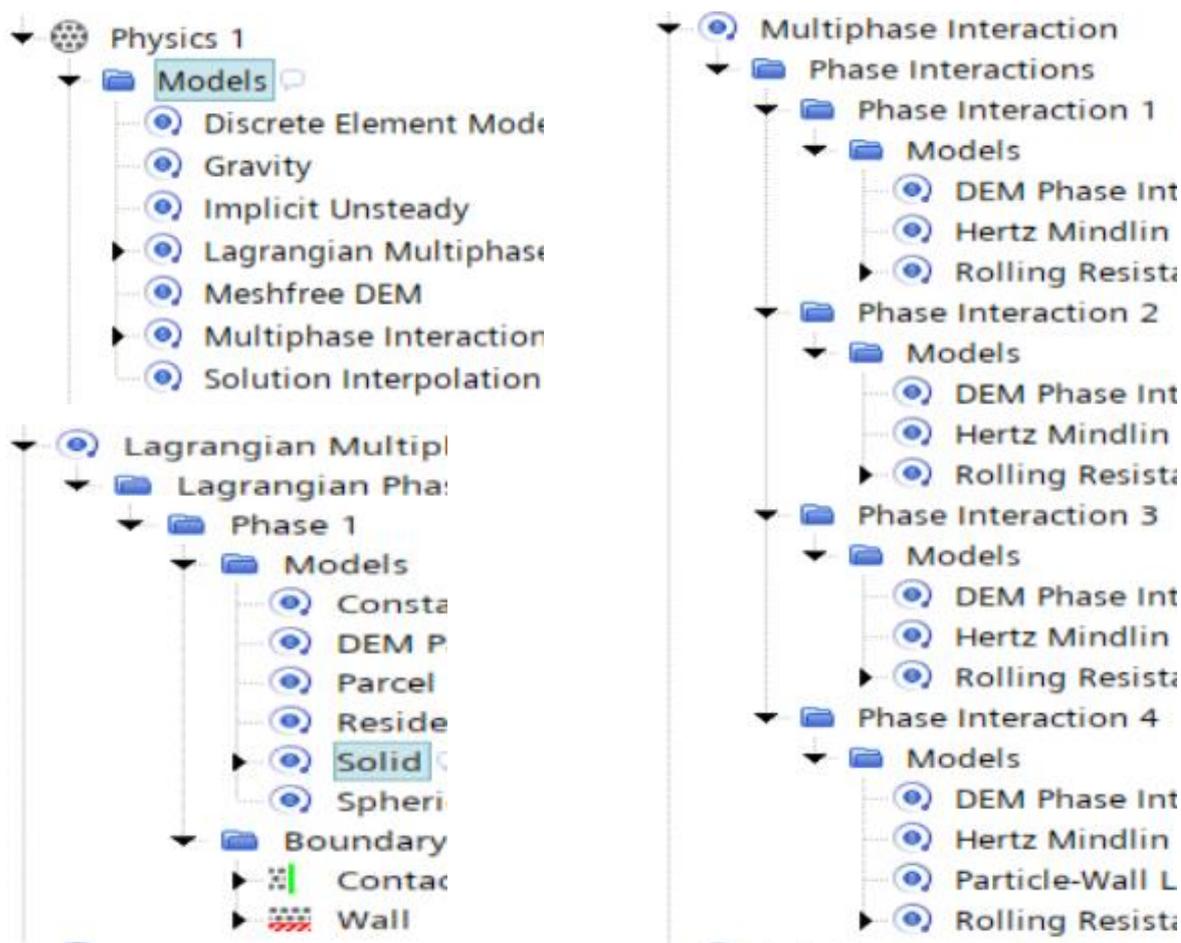


Рисунок 3.5 – Задання фізичних умов

Для моделювання в Simcenter Star-CCM+ використовують такі параметри: густина –  $1200 \text{ кг/м}^3$ , діаметр –  $5 \text{ мм}$ , коефіцієнт відновлення –  $0,3$ , коефіцієнт тертя ковзання –  $0,4$ , коефіцієнт тертя кочення –  $0,05$ , модуль пружності –  $5\text{--}50 \text{ МПа}$ , кут внутрішнього тертя –  $35^\circ$ . Контакт частинок зі стінками та лопатками моделюється з урахуванням матеріалу поверхні (переважно сталь). Для таких контактів приймають коефіцієнт відновлення  $0,4$  і коефіцієнт тертя  $0,45$ .

Далі створено інжектор, який інжектуює гранули в бункері, та задано рух для областей. Модель готова для проведення симуляції. Створено сцени і графіки відображення результатів (рис. 3.6–3.7).

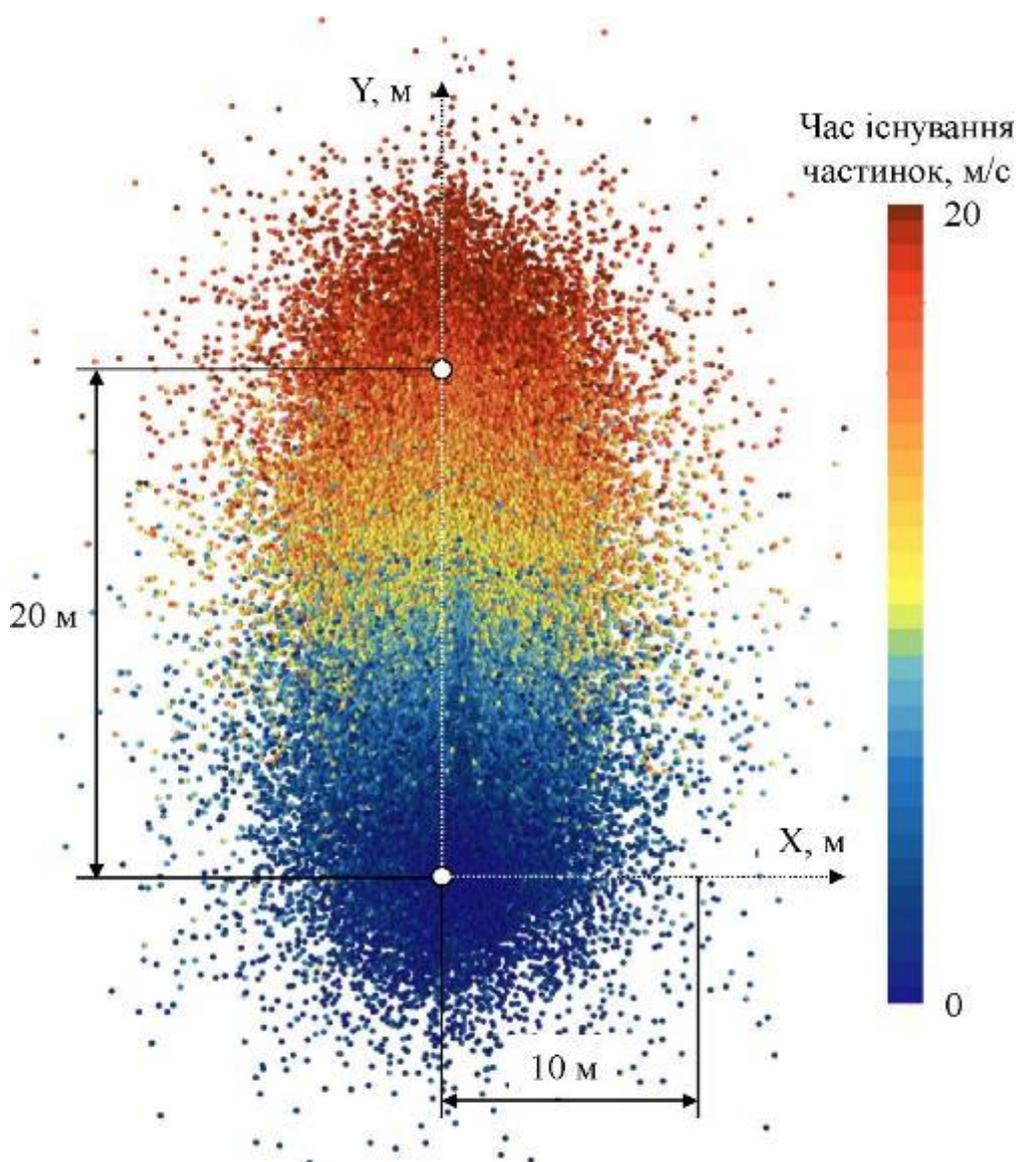


Рисунок 3.6 – Сцена відображення розміщення частинок добрива на імітованому полі під час переміщення розкидача

Рисунок 3.6 ілюструє сцену відображення розміщення частинок добрива на імітованому полі під час переміщення розкидача. У цій сцені показано фактичний розподіл частинок на поверхні ґрунту у момент часу, коли розкидач рухається із швидкістю 10 км/год. Кольорове кодування частинок дозволяє оцінити щільність покриття та локальні скупчення добрив.

Рисунок 3.7 демонструє векторну сцену розподілу швидкостей частинок добрива при вильоті з робочого органу. На цій сцені представлено вектори швидкості кожної частинки, що виходить з поверхні диска, із врахуванням її тангенціальної та нормальної складових. Колірна шкала відображає величину швидкості, що дозволяє легко визначити максимальні та мінімальні значення кінетичної енергії частинок.

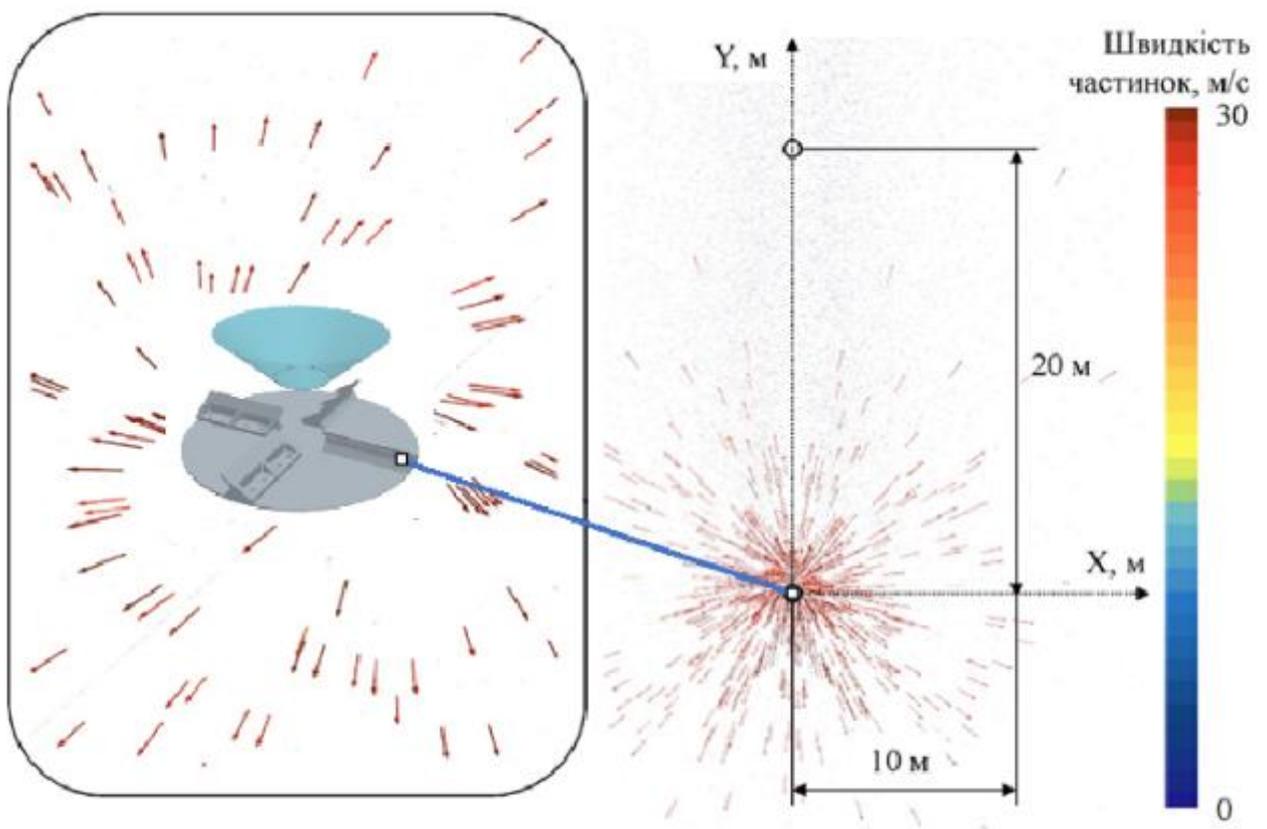


Рисунок 3.7 – Векторна сцена розподілу швидкостей частинок добрива при вильоті з робочого органу

### 3.3 Планування чисельного експерименту

Факторами моделювання є:

- швидкість розкидача (швидкість руху агрегату по полю)  $V$  (1,0–3,5 м/с або 3,6–12,6 км/год);
- частота обертання робочого органу (диска)  $n$  (300–900 об/хв);
- діаметр випускного отвору бункера  $D$  (50–100 мм).

Критерії оцінки:

- рівномірність внесення  $\delta$ :

$$\delta = \left(1 - \frac{\sigma}{\bar{x}}\right) \times 100\%, \quad (3.1)$$

де  $\sigma$  – стандартне відхилення маси у секторах, кг;  $\bar{x}$  – середня маса на сектор, кг; при  $\delta \rightarrow 100\%$  – найкраща рівномірність внесення.

- норма внесення (масова норма)  $q$

$$q = \frac{M}{S}, \quad (3.2)$$

де  $M$  – маса частинок в секторі, кг;  $S$  – площа сектора, м<sup>2</sup>.

– максимальна дальність польоту  $L$ , яка визначається як відстань від точки вильоту частинки до місця її зіткнення з поверхнею ґрунту.

Дослідження проведено за повнофакторним планом експерименту  $3^3 = 27$ , який передбачає варіювання кожного з трьох основних факторів на трьох рівнях. Статистична обробка отриманих результатів проводилась у середовищі Wolfram Cloud, з використанням вбудованих функцій для багатофакторного аналізу: [LinearModelFit] – для побудови рівнянь регресії між факторами і критеріями; ["ParameterTable"] – для оцінювання значущості факторів за критерієм Стьюдента; [FindMaximum], [FindMinimum] – для визначення оптимумів факторів при яких досягається максимальне і мінімальне значення; [Plot3D] – для побудови поверхонь відгуку та визначення області оптимальних режимів.

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ ВІДЦЕНТРОВИМ ДИСКОВИМ РОБОЧИМ

### 4.1 Симуляція процесу внесення мінеральних добрив

В результаті чисельного моделювання було отримано розподіл частинок на імітованому полі (рис. 4.1) для одного проходу та декількох проходів. Для наочності на рис. 4.1 відображено приклад із шести проходів. Отриманий розподіл демонструє щільність розподілу частинок за кольоровими відтінками, що дозволяє оцінити рівномірність внесення добрив на різних ділянках поля. За елементарну комірку взято квадрат зі стороною 1 м, що покладено в основу подальших розрахунків.

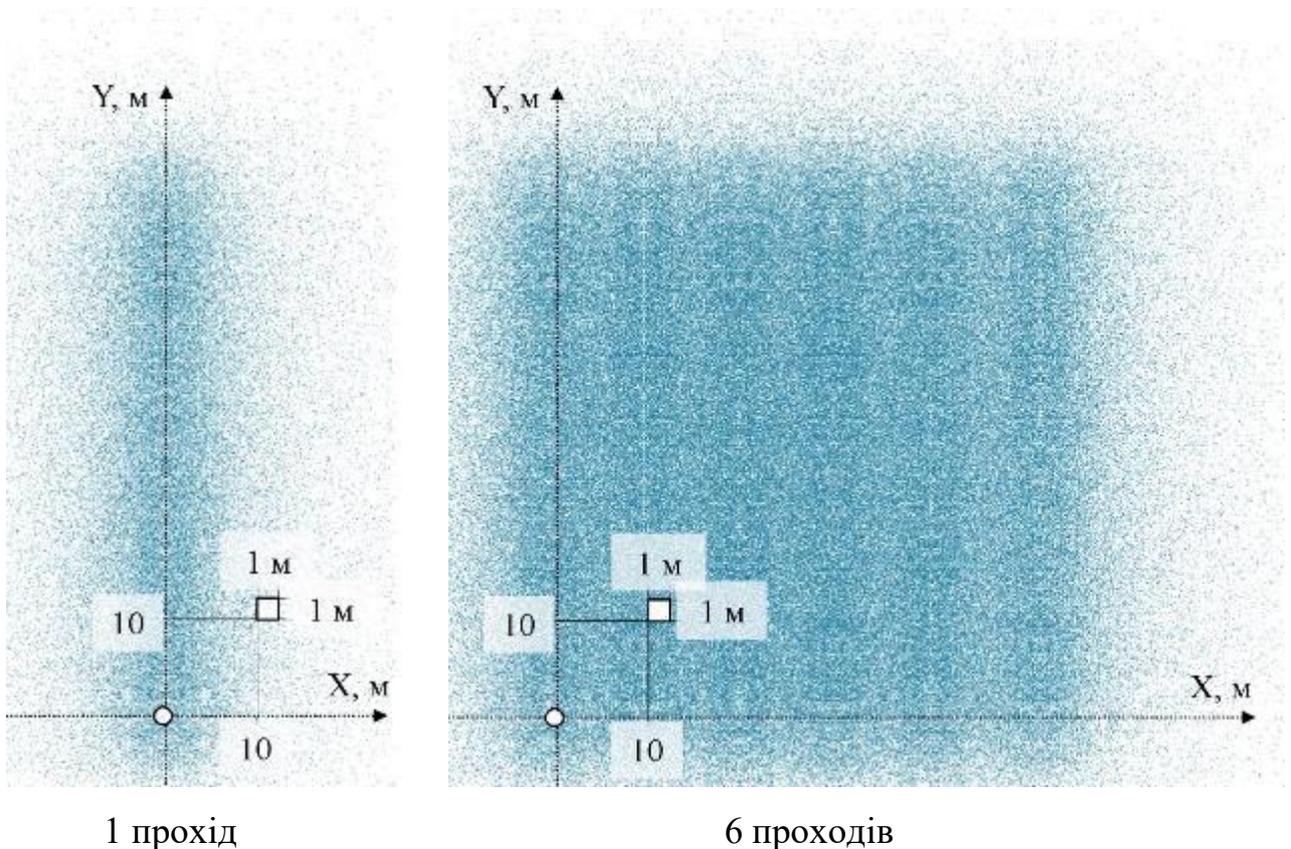


Рисунок 4.1 – Розподіл частинок на імітованому полі

Аналіз результатів показав, що:

- при одному проході розкидання частинок має характерні зони концентрації і прогалини, що свідчить про нерівномірний розподіл;
- зі збільшенням кількості проходів розподіл стає більш однорідним, зменшується кількість зон із надлишком або дефіцитом добрив;
- візуалізація щільності розподілу дозволяє визначити оптимальну швидкість руху агрегату та параметри обертання диска для досягнення максимально рівномірного внесення.

Для наочності побудовано графіки норми внесення (масової норми)  $q$  у елементарних комірках ( $1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$ ) у відповідних координатах (рис. 4.2). Розподіл вздовж координати  $X$  показує, що норма внесення спочатку збільшується до максимального значення, а потім поступово зменшується до  $0 \text{ г/м}^2$ . Оскільки при кожному проході розкидача кількість частинок добрив накладається на одиницю площі, для визначення оптимальної відстані між проходами приймають подвоєну відстань до піку масової норми.

Вздовж координати  $Y$  спостерігаються лише коливання значень  $q$ , які залежать від параметрів роботи агрегату та інших факторів дослідження, таких як швидкість руху розкидача та частота обертання диска. Такий аналіз дозволяє оцінити рівномірність внесення та визначити оптимальні технологічні параметри для забезпечення однорідного покриття поля.

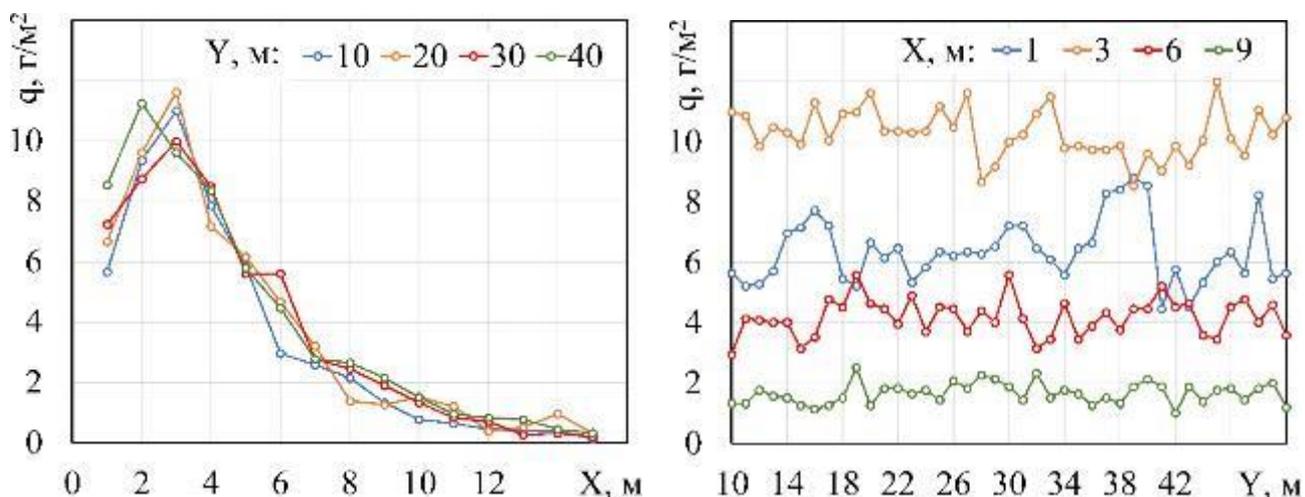


Рисунок 4.2 – Графіки норми внесення (масової норми)  $q$  у елементарних комірках ( $1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$ ) у відповідних координатах

## 4.2 Регресійний аналіз результатів моделювання

В результаті обробки матриці чисельного моделювання з використанням Wolfram Cloud, отримані рівняння регресії без урахування не значущих коефіцієнтів регресії в розкодованому вигляді від факторів досліджень (рис. 4.3):

– рівномірність внесення  $\delta$  (%):

$$\delta = 58,5306 + 0,2562 D - 0,0026507 D^2 + 0,044431 n + 0,0001657 d n - 0,0000277407 n^2 - 1,26 V + 0,0021 n V - 0,816667 V^2; \quad (4.1)$$

– норма внесення  $q$  (кг/м<sup>2</sup>):

$$q = 18,3296 + 0,362222 D + 0,00113778 D^2 + 0,019537 n - 8,95062 \cdot 10^{-6} n^2 - 6,76667 V - 0,0886667 d V; \quad (4.2)$$

– максимальна дальність польоту  $L$  (м):

$$L = 4,69259 + 0,019463 n - 1,79012 \cdot 10^{-6} n^2; \quad (4.3)$$

де  $V$  – швидкість руху розкидача по полю, м/с;  $n$  – частота обертання робочого органу (диска), об/хв;  $D$  – діаметр випускного отвору бункера, мм.

Рівномірність внесення  $\delta$  зростає зі збільшенням діаметра отвору  $D$  та частоти обертання  $n$ , що логічно, оскільки більший потік частинок і вища відцентрова сила сприяють рівномірнішому розподілу по поверхні поля. Взаємодіючі члени  $nV$  і  $dn$  відображають спільний вплив швидкості руху і частоти обертання на стабільність потоку добрив.

Норма внесення  $q$  істотно залежить від діаметра отвору  $D$  та частоти обертання  $n$ . Збільшення  $D$  спричиняє зростання масового потоку матеріалу, а підвищення  $n$  – посилює інтенсивність розкидання частинок. Водночас збільшення швидкості руху  $V$  має негативний вплив на норму внесення, оскільки при вищій швидкості агрегату добрива розподіляються на більшу площу, зменшуючи питому дозу.

Максимальна дальність польоту  $L$  визначається переважно частотою обертання  $n$ : при її зростанні відцентрова сила збільшує початкову швидкість частинок, забезпечуючи більшу дальність. Однак наявність від'ємного

квадратичного члена  $n^2$  відображає обмеження цього ефекту – надто висока частота спричиняє турбулентність і розсіювання потоку, що зменшує ефективну дальність розкидання.

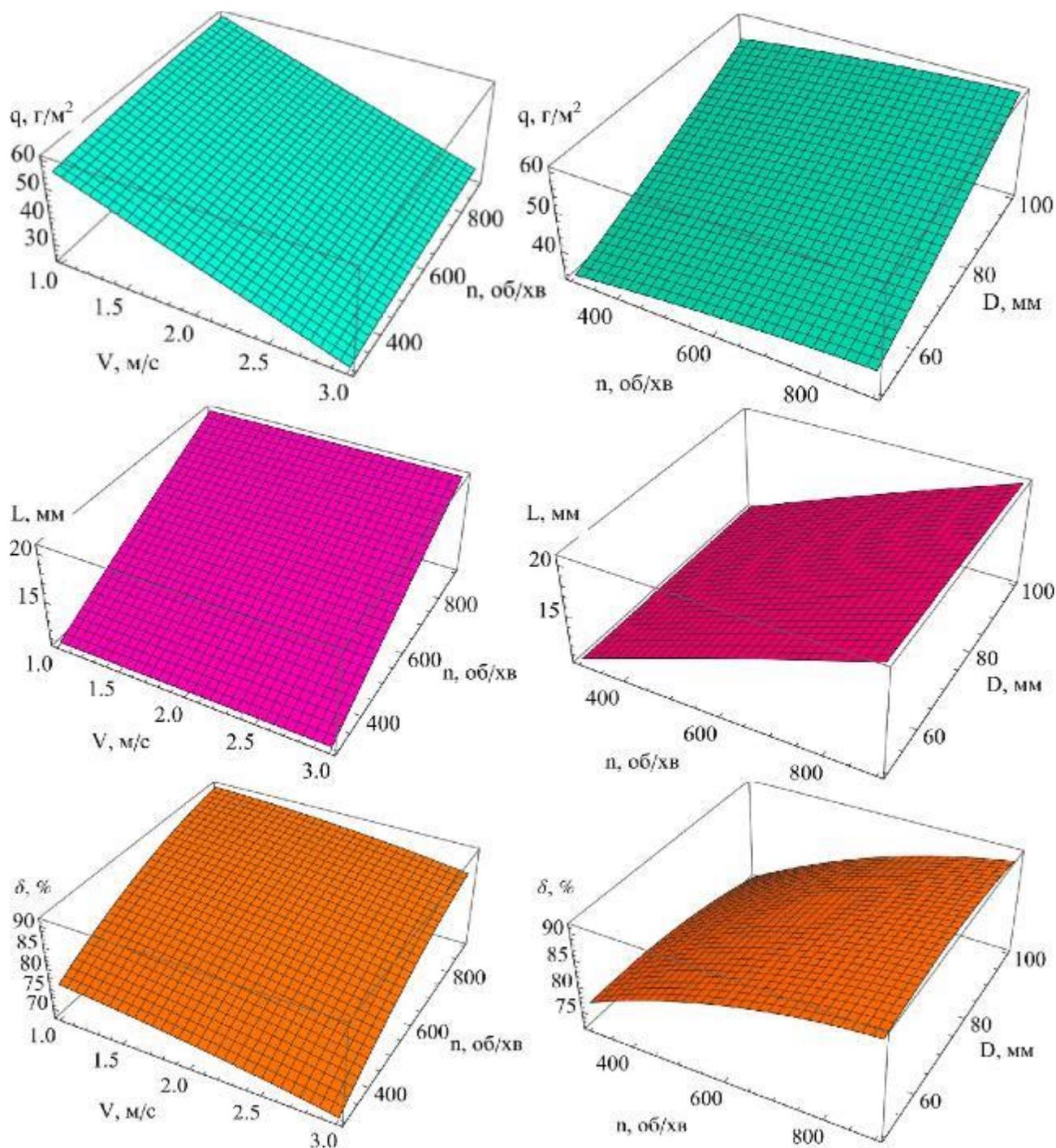


Рисунок 4.3 – Залежності рівномірність внесення добрив  $\delta$ , норми внесення добрив  $q$  і максимальної дальності польоту  $L$  від швидкості руху розкидача по полю  $V$ , частоти обертання робочого органу  $n$  і діаметра випускного отвору бункера  $D$

Оптимізацію проведено з урахуванням наступних умов: рівномірність внесення добрив  $\delta$  повинна бути максимальною при заданій нормі внесення добрив  $q$ , максимальній швидкості руху розкидача по полю  $V$  і дальності польоту частинок  $L$ .

$$\begin{aligned} q(V, n, d) &= q_0, & \delta(V, n, d) &\rightarrow \max, \\ L(V, n, d) &\rightarrow \max, & V &\rightarrow \max. \end{aligned} \quad (4.4)$$

За результатами розрахунку системи рівнянь (4.1)–(4.4) у середовищі Wolfram Cloud було отримано таблицю раціональних (оптимальних) значень факторів для різних заданих величин параметра  $q_0$  (табл. 4.1), яку можна використовувати у виробничих умовах.

Таблиця 4.1 – Раціональні (оптимальні) значень факторів для заданій нормі внесення добрив  $q_0$

| $q_0, \text{г/м}^2$ | $V, \text{м/с}$ | $n, \text{об/хв}$ | $D, \text{мм}$ | $\delta, \%$ | $L, \text{м}$ |
|---------------------|-----------------|-------------------|----------------|--------------|---------------|
| 10                  | 3,00            | 300               | 50             | 68,8         | 10,4          |
| 15                  | 2,74            | 404               | 50,3           | 74,2         | 12,3          |
| 20                  | 2,65            | 512               | 60,9           | 78,7         | 14,2          |
| 25                  | 2,34            | 621               | 61,5           | 83,1         | 16,1          |
| 30                  | 1,99            | 698               | 62,8           | 86,1         | 17,4          |
| 35                  | 1,71            | 819               | 64,6           | 89,0         | 19,4          |
| 40                  | 1,41            | 900               | 66,7           | 90,6         | 20,8          |
| 45                  | 1,09            | 900               | 69,2           | 91,1         | 20,8          |
| 50                  | 1,00            | 900               | 77,6           | 91,4         | 20,8          |
| 55                  | 1,00            | 900               | 88,4           | 91,0         | 20,8          |
| 60                  | 1,00            | 900               | 98,7           | 90,0         | 20,8          |

#### 4.4 Висновки з розділу

1. У результаті чисельного моделювання процесу внесення

мінеральних добрив відцентровим дисковим робочим органом із використанням Simcenter Star-CCM+ та Wolfram Cloud отримано рівняння регресії, що адекватно описують залежність рівномірності внесення  $\delta$ , норми  $q$  та дальності польоту частинок  $L$  від швидкості руху розкидача  $V$ , частоти обертання диска  $n$  і діаметра випускного отвору  $D$ .

2. Оптимізацію проведено з урахуванням наступних умов:  $q(V, n, d) = q_0$ ,  $\delta(V, n, d) \rightarrow \max$ ,  $L(V, n, d) \rightarrow \max$ ,  $V \rightarrow \max$ . За результатами розрахунку системи рівнянь у середовищі Wolfram Cloud було отримано таблицю раціональних (оптимальних) значень факторів для різних заданих величин параметра  $q_0$ , яку можна використовувати у виробничих умовах.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці при роботі з розкидачем мінеральних добрив є важливою складовою забезпечення безпеки та здоров'я працівників, які працюють на МТА. Нормативні документи, що регулюють питання охорони праці в Україні – це Закон України «Про охорону праці» та «Правила охорони праці в сільськогосподарському виробництві».

Потенційні ризики:

– хімічні: контакт з пилом добрив, аміаком та нітратами, які при тривалій взаємодії викликають подразнення шкіри та дихальних шляхів. Перевищення гранично допустимої концентрації пилу в повітря може перевищувати норму в 10 – 20 разів, щоб може призвести до опіків або подразнення шкіри та слизистих;

– фізичні ризики: шуми, які інколи досягають 85-100дБ, та вібрації від двигуна та мікронерівностей поверхні поля негативно впливають на слуховий апарат та психо-емоційний стан оператора МТА;

– механічні ризики: небезпека від деталей, які обертаються на високій швидкості, навантаження на спину під час завантаження туків матеріалом;

– ергономічні ризики: незручні пози під час завантаження туків, тривалий час перебування в шумі та вібрації.

Закон України «Про охорону праці» визначає базові норми щодо забезпечення безпечних умов для працівників. Додаткові, більш вузькоспеціалізовані вимоги для виконання сільськогосподарських робіт регламентуються такими нормативними документами:

1. «Правила охорони праці в сільськогосподарському виробництві» – містять положення щодо організації безпечного виробничого середовища, порядку проведення інструктажів, правил застосування засобів індивідуального захисту та вимог до експлуатації техніки.

2. «Державні санітарні норми і правила» – встановлюють допустимі величини впливу шкідливих чинників на працівників, зокрема концентрацію пилових частинок у повітрі, рівні шуму, вібрації та параметри мікроклімату.

Для забезпечення безпеки працівників під час роботи на машинах розкидачах мінеральних добрив потрібно дотримуватись наступних пунктів.

- Навчання та інструктаж: регулярне проведення вступних, первинних, повторних, позапланових та цільових інструктажів з охорони праці та експлуатації;

- Використання засобів індивідуального захисту:

1. Комбінезон з пилозахисної тканини;
2. Окуляри захисні або щиток;
3. Рукавиці гумові;
4. Спеціальне взуття із захисним носком;
5. Протишумові навушники при перевищенні рівня шуму;
6. Распіратор РУ-60М або напівмаска ЗМ 6200 з фільтрами 6051/6055

при завантаженні добрив.

- Проведення технічного обслуговування перед початком роботи:

1. Перевірка справності захисних кожухів на обертових частинах;
2. Цілісність шплінтів та пальців;
3. Світлові індикатори та звукова сигналізація
4. Перевірка тиску в колесах;
5. Перевірка паливо-мастильних матеріалів;
6. Перевірка з'єднань обертових частин згідно з посібником по експлуатації.

- Забороняється при роботі з розкидачами мінеральних добрив:

1. Перебувати між трактором та агрегатом під час приєднання;
2. Очищати, регулювати робочий орган розкидача під час працюючого валу відбору потужності;

3. Працювати на полях з нахилом рельєфу більше 10 градусів із начіпними машинами;

4. Виїжджати в поле не провівши щозмінне технічне обслуговування
  5. Приступати до роботи без засобів індивідуального захисту;
  6. Перебувати в зоні розкидання мінеральних добрив під час його роботи;
  7. Перебувати на рамі МТА або перевозити людей на бункері.
  8. Перевищувати допустиму швидкість внесення мінеральних добрив;
- Ергономіка та організація праці:
    1. Раціональне планування маршрутів та грамотне оформлення технологічних карт;
    2. Формування оптимальної нормо-зміни для оператора;
    3. Не допускати різких гальмувань для запобігання шкідливих сил інерції та перекидання;
    4. Вимикати вал відбору потужності перед розворотом на 180 градусів.
  - Дії при виникненні аварійних або надзвичайних ситуацій:
    1. При потраплянні пилу в органи зору необхідно промити водою у великій кількості та звернутись до лікаря;
    2. При отруєнні – вийти на свіже повітря, викликати швидку;
    3. При хімічному опіку промити рану водою з милом та звернутись до лікаря;
    4. При загорянні добрив забороняється гасити пінними засобами, використовувати лише пісок та воду.
  - Операції при закінченні зміни:
    1. Очистити бункер та робочий орган розкидача від залишків мінеральних добрив;
    2. За необхідності змастити пари тертя;
    3. Перегнати МТА на спеціальний майданчик з навісом або в гараж на зберігання;
    4. Здати засоби індивідуального захисту на прання або утилізацію.

Постійний нагляд за станом умов праці є одним із ключових елементів безпечної роботи. Для цього застосовують такі заходи:

- аудити та перевірки: систематичний контроль дотримання норм охорони праці;
- оцінювання ризиків: регулярне визначення й аналіз можливих небезпек під час пересування по полю;
- медичні огляди: періодичне обстеження працівників з метою раннього виявлення професійних захворювань.

Дотримання цих вимог допомагає зменшити кількість виробничих травм і випадків профзахворювань, а також підтримувати високу продуктивність і зберігати здоров'я персоналу.

Використання GPS-навігації та систем точного землеробства в техніці для внесення добрив значно підвищує ефективність процесів. Працівники повинні проходити відповідні інструктажі й навчання щодо експлуатації МТА та машин для внесення добрив, включно з правилами налаштування, використання та технічного обслуговування, а також бути поінформованими про можливі небезпеки.

До технічних засобів безпеки варто віднести датчики виявлення перешкод або присутності людей у зоні роботи, що дають змогу автоматично зупиняти МТА у разі ризикової чи аварійної ситуації. Регулярне технічне обслуговування обладнання допомагає попереджати несправності, а систематичні перевірки засобів безпеки гарантують надійну дію захисних механізмів.

Працівникам забороняється втручатися у роботу агрегатів, не зупинивши попередньо всі рухомі елементи. Усі операції слід виконувати відповідно до вимог інструкцій з експлуатації та техніки безпеки.

## 6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗКИДАЧА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

Метою дипломного проєкту було оптимізація робочого органу відцентрового дискового розкидача мінеральних добрив. Порівняємо отримані дані із прототипом. За прототип обрано розкидач мінеральних добрив фірми Jar-Met ємністю 500 л, з регульованою шириною розкидання від 6 -14 м та робочою швидкістю до 13 км/год, продуктивність 12 га/год(рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Відцентровий розкидач мінеральних добрив Jar-Met RM 2023

Проектуєма машина має таку ж ємність, але ширина розкидання становить  $20,8 \times 2 = 41,6$  м при швидкості 3,6-4 км/год. Продуктивність обчислюємо за формулою

$$W = 0,1 \times Bp \times V, \text{ де} \quad (5.1)$$

$W$  – продуктивність, га/год;  $Bp$  – ширина захвату МТА, м;  $V$  – швидкість МТА, км/год. Обираємо середню швидкість.

$$W = 0,1 \times 41,6 \times (3,6 + 4) / 2 = 15,8 \text{ (га/год)}$$

Також варто відзначити, що продуктивність – це кількісна оцінка показнику ефективності внесення, тож зацентуємо увагу на якісних показниках, а саме - нормі внесення ( $\text{г/м}^2$ ). Обчислимо норму внесення для

стокового варіанту, для цього використаємо спрощені розрахунки. Діаметр заслінки беремо так само 80 мм, кількість обертів приймаємо із врахуванням спадом потужності на з'єднаннях  $0.9 \times 540 = 486$  (об/хв), швидкість руху МТА становить 3,8 км/год, ширина розкидання максимальна - 14 м. Емпіричним шляхом визначаємо потік добрив(Q) за хв, який становить 9,86 кг/хв. Далі підставляємо у формулу значення:

$$N = \frac{Q \times 600}{Bp \times V} = \frac{9,86 \times 600}{14 \times 3.8} = 111 \text{ кг} / \text{га} = 11,1 (\text{г} / \text{м}^2) \quad (5.2)$$

Наступний крок – обчислення рівномірності розподілу добрив стоковою машиною. Для цього емпіричним методом було розставлено лотки розмірами 500x500 мм через кожний (всього 28 шт). Після проїзду МТА кожен лот був зважений. Результати представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку коефіцієнту розподілу мінеральних добрив

|              |      |      |    |      |     |      |     |      |     |      |    |      |      |      |      |      |      |     |      |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |
|--------------|------|------|----|------|-----|------|-----|------|-----|------|----|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|
| №            | -7   | -6.5 | -6 | -5.5 | -5  | -4.5 | -4  | -3.5 | -3  | -2.5 | -2 | -1.5 | -1   | -0.5 | 0    | 0.5  | 1    | 1.5 | 2    | 2.5 | 3   | 3.5 | 4   | 4.5 | 5 | 5.5 | 6   | 6.5 | 7   |
| N, г/м2      | 6    | 5.5  | 6  | 5.9  | 6.2 | 6.2  | 6.8 | 7.1  | 8.6 | 8.9  | 9  | 9.6  | 10.9 | 11.1 | 11.1 | 10.9 | 10.5 | 9.8 | 10.2 | 9.5 | 9.3 | 8.4 | 7.5 | 8.2 | 8 | 7.3 | 6.8 | 7.1 | 6.2 |
| qсер         | 8.5  |      |    |      |     |      |     |      |     |      |    |      |      |      |      |      |      |     |      |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |
| σ кв.відхил. | 1.91 |      |    |      |     |      |     |      |     |      |    |      |      |      |      |      |      |     |      |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |
| CV           | 22.5 |      |    |      |     |      |     |      |     |      |    |      |      |      |      |      |      |     |      |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |
| δ, %         | 77.5 |      |    |      |     |      |     |      |     |      |    |      |      |      |      |      |      |     |      |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |

Обчислимо затрати на виготовлення проєктуємої машини.

Вартість прототипу – 9900 грн.

Вартість проєктуємої машини складається з вартості машини прототипу, від якої віднімають затрати на виготовлення диска-прототипа, додають вартість проєктуємого диску з полімерів та вартість мультиплікатора, який буде кріпитись до вала відбору потужності та диска.

Вартість диска-прототипа складається із вартості листа сталі AISI 304, обробки листа на лазері, зварювання та оплати праці працівнику. Лист сталі AISI 304 3x 1500x3000/ EN 1.4301 вартує 13000 грн.

Діаметр диску 500 мм, довжина та ширина лопаток 50x200 мм, кількість лопаток – 6 шт. Розкладемо на лист деталі та дізнаємось вартість матеріалу.

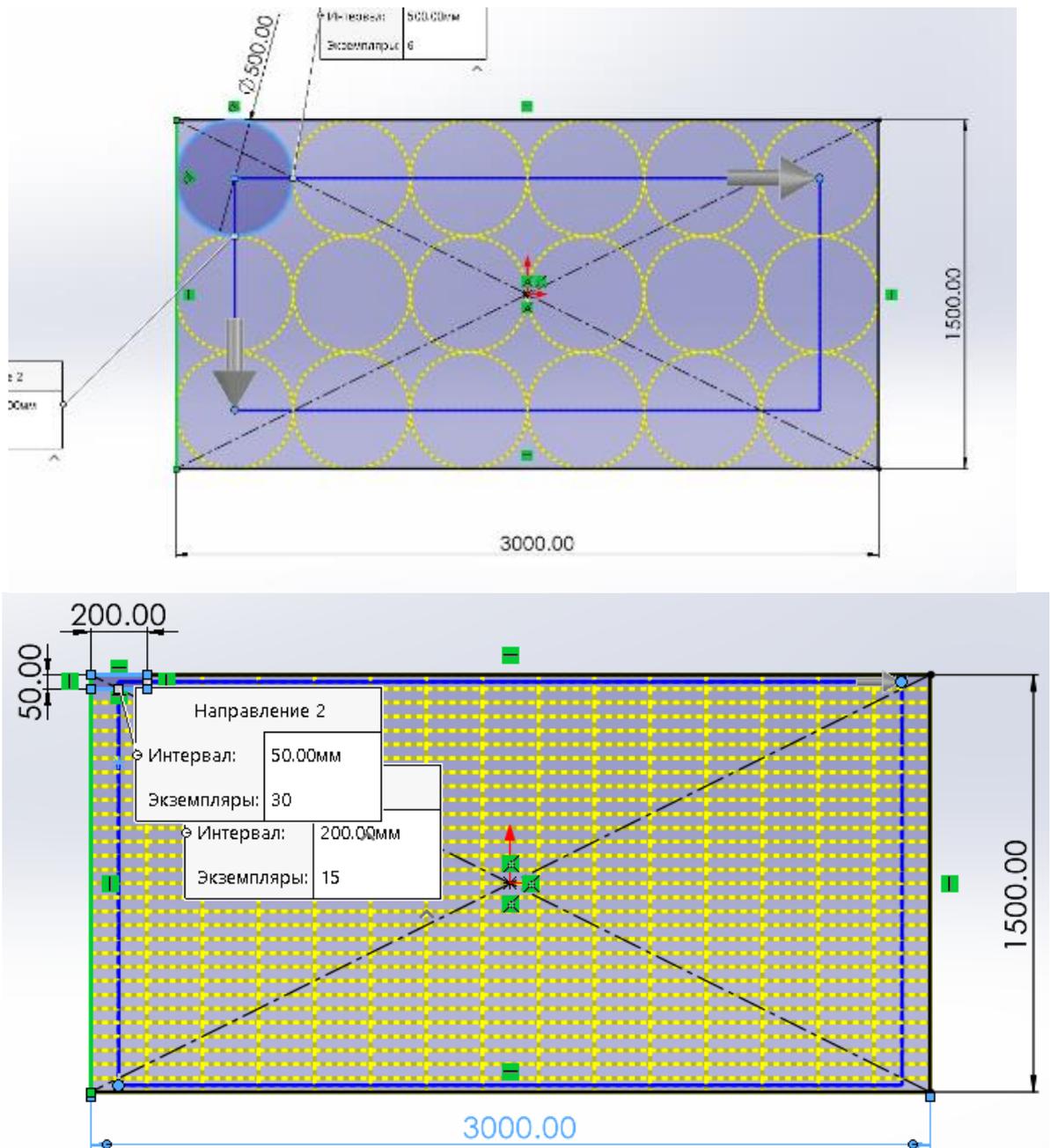


Рисунок 5.2 – Розкладка на лист деталей

Припуск на обробіток не враховується у поточних розрахунках, бо обробіток лазером підпадає під 14 квалітет. Вартість матеріалу 1 диска  $13000/18=720$  грн, а 6 лопаток –  $13000/(30 \times 15) \times 6=174$  грн. Затрати на порізку лазером, прийmemo, що погонний метр коштує 30грн, отже довжина диска  $3,14 \times 500=1570$  мм, а 6 лопаток –  $6 \times (2 \times 200 + 50 \times 2)=3000$  мм, загалом  $30 \times (1,57 + 3)=137$  грн. Для з'єднання диску та лопаток використовують

електродугове зварювання точковим способом. Затрати на зварювання низькі, тому в даному розрахунку ними знехтуємо. Також закладемо 50 грн у вартість кінцевого виробу, як суму взяту із заробітних плат водія, вантажника, лазерного різчика, зварювальника та балансирувальника. Загалом,  $720+174+137+50=1080$  грн. Продаж становитиме вартість виготовлення з націнкою в 50 відсотків становить 1600 грн.

Змінюємо наявний мультипліактор на більш потужний, щоб підвищити кількість обертів до 900 об/хв. Вартість такого складає 1600 грн. Вартість наявного у прототипу приблизно рівна до проєктуємого, тож закладати у вартість машини не будемо.

Вартість проєктуємого диска складається із закупівлі матеріалу, футерування диску поліуританом та відливки під тиском лопаток у форми. Так як лиття – це серійне виробництво, то будемо розглядати партію деталей зі 100 одиниць, щоб вийти на вартість одного диска. Комплект складається з диска та 4 лопаток. Серія починається зі 100 одиниць, тож можна зібрати  $100/4 = 25$  комплектів. Диск виготовляється з листа холоднокатанної легованої(нержавіючої) сталі 08X18N10 2В ГОСТ 4543-717, габаритами  $3 \times 1000 \times 2000$  мм. На 1 листі можна розмістити 8 дисків, тобто це 4 листа. Вартість листа 6200 грн, отже  $6200 \times 4 = 24800$  (грн).

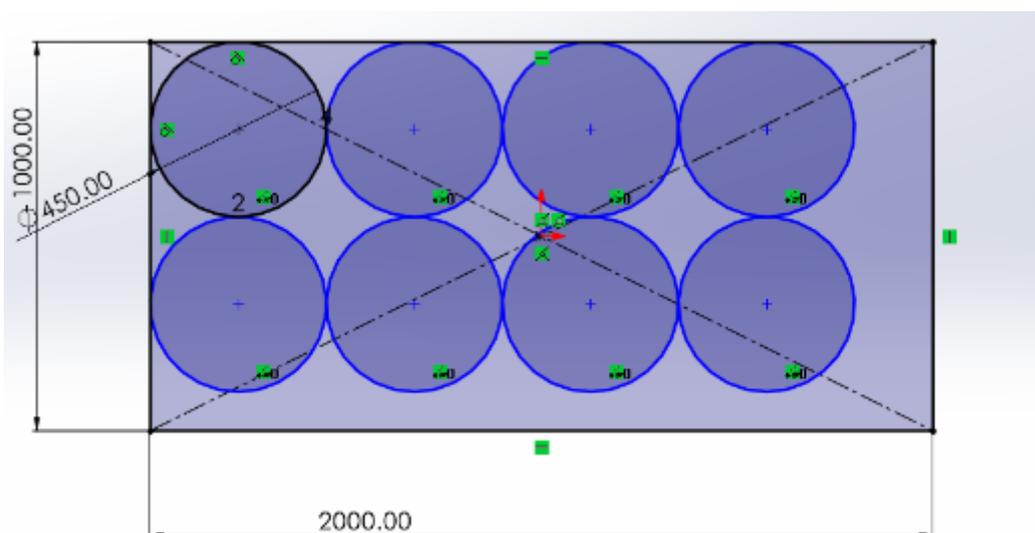


Рисунок 5.2 – Розкладка деталей на лист

Затрати на різ. Довжина, яку проходить інструмент  $3.14 \times 450 = 1413$  мм, для 25 дисків  $25 \times 1413 = 35325$  мм, вартість різку  $35 \times 35,3 = 1235$  (грн).

Затрати на футерування диску: матеріал Поліуритан ГОСТ 14896, вартість послуг 25000 грн для футерування товщиною 3 мм партії з 25 дисків.

Лопатки будуть відливати в Китаї, матеріал поліамід-6. Вартість за партію зі 100 лопаток складає 1500 доларів або 63000 грн, це із врахуванням доставки.

Метиз. На з'єднання 1 комплекту необхідно 16 комплектів (болт-шайба-контргайка), для 25 комплектів  $25 \times 16 = 400$  пар. Вартість одного комплекту 6 грн. Всього  $6 \times 400 = 2400$  грн

Вартість 25 комплектів робочого органу  $24800 + 1235 + 25000 + 63000 = 116435$  грн/100од. За один комплект  $116435/25 = 4800$  грн. З націнкою 50% 7000 грн.

Вартість проектуємого розкидача  $9900 - 1600 + 7000 = 15300$  грн. З амортизаційними відрахуваннями  $15300 + 15\% = 17600$ .

Обчислення терміну окупності. Згідно з даними статей [37] та [38] знос нержавіючих сталей розкидачів мінеральних добрив становить близько 0,008-0,03 мм/га при інтенсивному потоку добрив та високій частоті обертання, для поліуритану та поліаміду показник становить 0,001-0,005 мм/га. Згідно з агротехнічними нормами ГОСТ 26972-86 (ISO 5690) допустимий знос по товщині – 1 мм, та лопаток 0,5-1 мм. Недотримання норм знижує ширину розкидання, та призводить до втрат добрив, що знижує продуктивність агрегату. Ресурс, який напрацьовує прототип  $1/0,008 = 125$  (га), потім починає знижуватись ширина розкидання, якщо не замінити диск. Ресурс, який напрацьовує проектуєма машина  $4/0,004 = 1600$  га. (4 мм – це 3 мм товщина футерування + 1 мм самого диска).

Кількість ТО прототипа  $1600/125 = 12$  разів,  $12 \times 1600 = 19200$  грн. Це без урахування оплати праці, вартості самого розкидача та втраченого часу на внесення добрив).

Економічний ефект складає  $20800-7000=13800$  грн, питомий економічний ефект  $13800/1600=8,6$  грн/га.

Термін окупності:  $7000/13800=0,5$  років.

Таблиця 5.3 – Порівняльна характеристика проєктуємої машини та прототипа

| Показник                         | Прототип | Проєкт | В од. | У %   |
|----------------------------------|----------|--------|-------|-------|
| Продуктивність, га/год           | 13       | 15,8   | +2,8  | +21,5 |
| Норма внесення, г/м <sup>2</sup> | 11,1     | 50     | +39   | +77,8 |
| Рівномірність внесення,<br>%     | 77,5     | 91,4   | +13,9 | +15,2 |
| Ресурс, га                       | 125      | 1600   | 1475  | +1200 |
| Економічний ефект,<br>грн/га     | 8,6      |        |       |       |
| Термін окупності, років          | 0,51     |        |       |       |

У результаті проведення чисельного моделювання та низки розрахунків економічної ефективності машини-прототипа та проєктуємої встановлено, що за один і той самий наробіток економічний ефект складає 13800 грн, а питомий економічний ефект 8,6 грн/га. При цьому термін окупності складає пів року.

## ВИСНОВКИ

1. Для ведення конкурентоспроможного та прибуткового агробізнесу, насамперед галузі рослинництва, необхідно подбати про такі пункти:

– Застосування сучасних технологій обробітку ґрунту, які дають змогу якісно та з мінімальними затратами підготувати землю для подальших операцій;

– Своєчасне внесення добрив, які забезпечать ґрунт поживними речовинами;

– Використання якісного насіннєвого матеріалу.

Сучасні дослідження в агрохімії спрямовані на удосконалення мінеральних добрив, підвищуючи коефіцієнт корисної дії і паралельно приділяючи увагу екологічній безпеці. Надмірне або нераціональне використання добрив може призвести до деградації ґрунтів, забруднення водних ресурсів та, як наслідок, зниження врожайності. Тип добрив, спосіб та період внесення прямо впливають на хіміко-фізико-механічні властивості. Також вагомим фактором є машина, яка вносить добрива. Конструктивні особливості дозуючого апарату та робочого органу, допустима робоча швидкість впливають на кількісні та якісні показники. До якісних показників відносять рівномірність розподілу добрив на поверхню поля та точність дозування, а до кількісних – норму внесення та втрати добрив при внесенні.

2. Проаналізовано сучасні дослідження на тему внесення мінеральних добрив, в ході яких було виведено аналітичні формули та зацентровано увагу на фізичних явищах та величинах, які впливають на рух. Рух гранули проходить в 3 фази:

– Перша фаза – добриво під дією сили тяжіння висипається через отвір або заслінку, розташовану в нижній частині бункера, у зону поблизу центру диска.

– Друга фаза – матеріал транспортується до краю диска під дією системи сил, серед яких провідною є відцентрова сила, при цьому частинки зазнають дії сил тертя з поверхнями самого диска та лопатей.

– Третя фаза – частинки викидаються у поле, а їхня траєкторія визначається балістичним польотом під впливом густини та швидкості навколишнього повітря.

3. У ході аналітичних досліджень розроблено математичну модель руху частинок мінеральних добрив на відцентровому дисковому розсіювачі з нахиленими вперед лопатями. Модель враховує дію основних сил – тяжіння, відцентрової, Коріоліса та тертя, що виникають у неінерціальній системі відліку, пов'язаній із диском. На основі другого закону Ньютона отримано диференціальне рівняння руху частинки вздовж лопаті, розв'язок якого дозволяє визначати швидкість, траєкторію та кут вильоту добрива залежно від геометричних і кінематичних параметрів розсіювача. Програмна реалізація рівнянь у середовищі Wolfram Cloud дала змогу провести розрахунки та побудувати графічні залежності зміни положення частинок у часі. Визначено, що при швидкості обертання диска 540 об/хв, куті нахилу лопатей  $20^\circ$  та коефіцієнті тертя 0,6 зона подачі добрива має ширину приблизно 7,5–8 см, а кут розсіювання становить близько  $90^\circ$ , що забезпечує рівномірний розподіл у напрямку, протилежному руху машини.

4. У результаті чисельного моделювання процесу внесення мінеральних добрив відцентровим дисковим робочим органом із використанням Simcenter Star-CCM+ та Wolfram Cloud отримано рівняння регресії, що адекватно описують залежність рівномірності внесення  $\delta$ , норми  $q$  та дальності польоту частинок  $L$  від швидкості руху розкидача  $V$ , частоти обертання диска  $n$  і діаметра випускного отвору  $D$ . Оптимізацію проведено з урахуванням наступних умов:  $q(V, n, d) = q_0$ ,  $\delta(V, n, d) \rightarrow \max$ ,  $L(V, n, d) \rightarrow \max$ ,  $V \rightarrow \max$ . За результатами розрахунку системи рівнянь у середовищі Wolfram Cloud було отримано таблицю раціональних

(оптимальних) значень факторів для різних заданих величин параметра  $q_0$ , яку можна використовувати у виробничих умовах.

5. Дотримання правил та норм при внесенні мінеральних добрив є важливим аспектом запоруки безпеки та високого рівня ергономіки робітників. Забезпечення безпеки працівників включає проведення інструктажів, практичну та теоретичну підготовку персоналу, використання засобів індивідуального захисту та увагу та психо-емоційного стану робітників. Такий комплексний підхід є запорукою високої ефективності протікання процесу.

6. У результаті проведення чисельного моделювання та низки розрахунків економічної ефективності машини-прототипа та проектуємої встановлено, що за один і той самий наробіток економічний ефект складає 13800 грн, а питомий економічний ефект 8,6 грн/га. При цьому термін окупності складає пів року.

## Бібліографія

1. Дейкун В.А., Жук Д.Г., Мачок Ю.В. (2022). Огляд способів внесення та ефективності застосування мінеральних добрив. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 52: 41–47. DOI: 10.32515/2414-3820.2022.52.41-47
2. Дейкун В.А., Сало В.М., Васильковський О.М. (2004). Аналіз способів внесення мінеральних добрив. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць Кіровоградського держ. техн. ун-ту., 14 (1): 47–51.
3. Van Liedekerke P., Tijskens E., Dintwa E., Anthonis J., Ramon H. (2006). A discrete element model for simulation of a spinning disc fertilizer spreader I. Single particle simulations. Powder Technology, 170 (2): 71–85. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.07.024.
4. Przywara A., Santoro F., Kraszkiwicz A., Pecyna A., Pascuzzi S. (2020). Experimental Study of Disc Fertilizer Spreader Performance. Agriculture, 10(10): 467. DOI: 10.3390/agriculture10100467
5. Ou M., Wang G., Lu Y., Zhang Z., Pan H., Jia W., Dong X. (2025). Structure Optimization and Performance Simulation of a Double-Disc Fertilizer Spreader Based on EDEM-CFD. Agronomy, 15: 1025. DOI: 10.3390/agronomy15051025
6. Coetzee C.J., Lombard S.G. (2011). Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader. Biosystems Engineering, 109 (4): 308–325. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.04.011.
7. Khudayarov B., Mambetsheripova A., Kuziyev U., Sarimsakov B. (2020). Free movement of mineral fertilizers and their mixtures in air. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1030, 012159. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012159
8. Villette S., Cointault F., Piron E., Chopinet B. (2005). Centrifugal Spreading, an Analytical Model for the Motion of Fertiliser Particles on a Spinning Disc. Biosystem Engineering, 92(2): 157–165.

9. Cerović V.B., Dragan, V.P.; Rade L.R., Saša R.B., Vuković A. (2018). On the Fertilizer Particle Motion Along the Vane of a Centrifugal Spreader Disc Assuming Pure Sliding of the Particle”, *Journal of Agricultural Sciences*, 63(1): 83–97. DOI: 10.2298/JAS1801083C
10. Aphale A., Bolander N., Park J., Shaw L., Svec J., Wassgren C. (2003). Granular fertilizer particle dynamics on and off a spinner spreader. *Biosystem Engineering*, 85: 319–329.
11. Dintwa E., Tijskens E., Olieslagers R.; De Baerdemaeker J., Ramon H. (2004). Calibration of a spinning disc spreader simulation model for accurate site specific fertilizer application. *Biosystem Engineering*, 88: 49–62.
12. Van Liedekerke P., Thijskens E., Dintwa E., Rioual F., Vangeyte J., Ramon H. (2009). DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader, *Powder Technology*, 190: 346–360.
13. Cool R.S., Pieters G.J., Acker V.J., Van den B.J., Mertens C.K., Nuyttens R.E.D., Van de gucht C.T., Vangeyte J. (2016). Determining the effect of wind on the ballistic flight of fertilizer particles, *Biosystems Engineering*, 151: 425–434.
14. Cool R.S., Pieters J., Mertens C.K., Hijazi B., Vangeyte J. (2014). A simulation of the influence of spinning on the Ballistic flight of spherical fertilizer grains, *Computers and Electronics in Agriculture*, 105: 121–131.
15. Алієв Е.Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
16. Алієв Е.Б. (2024). Науково-методичні основи чисельного моделювання механізованих процесів агропромислового виробництва. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ: 3–5.
17. Алієв Е.Б. Методичні рекомендації до практичних занять з навчальної дисципліни «Інжиніринг агропромислового машинобудування» для здобувачів

третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» ОНП «Галузеве машинобудування». Частина 3. Дніпро: ДДАЕУ, 2022. 80 с.

18. Алієв Е., Івлєв В. (2023). Методичні рекомендації до практичних занять з вибіркової навчальної дисципліни «Системи автоматичного керування електроприводами» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» ОПП «Агроінженерія». Дніпро: ДДАЕУ, 2023. 102 с.

19. Алієв Е., Білоус І. (2023). Методичні рекомендації до практичних занять з вибіркової навчальної дисципліни «Тривимірне моделювання робочих органів сільськогосподарських машин» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» ОПП «Агроінженерія». Дніпро: ДДАЕУ, 2023. 112 с.

20. Алієв Е. (2023). Конспект лекцій з вибіркової навчальної дисципліни «Тривимірне моделювання робочих органів сільськогосподарських машин» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» ОПП «Агроінженерія». Дніпро: ДДАЕУ, 2023. 416 с.

21. Алієв Е. (2023). Методичні рекомендації для самостійного опрацювання тем програми навчальної дисципліни «Тривимірне моделювання робочих органів сільськогосподарських машин» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» ОПП «Агроінженерія». Дніпро: ДДАЕУ, 2023. 20 с.

22. Алієв Е. Б. (2022). Автоматичне фенотипування насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Київ: Аграрна наука. 104 с. ISBN 978-966-540-540-5.

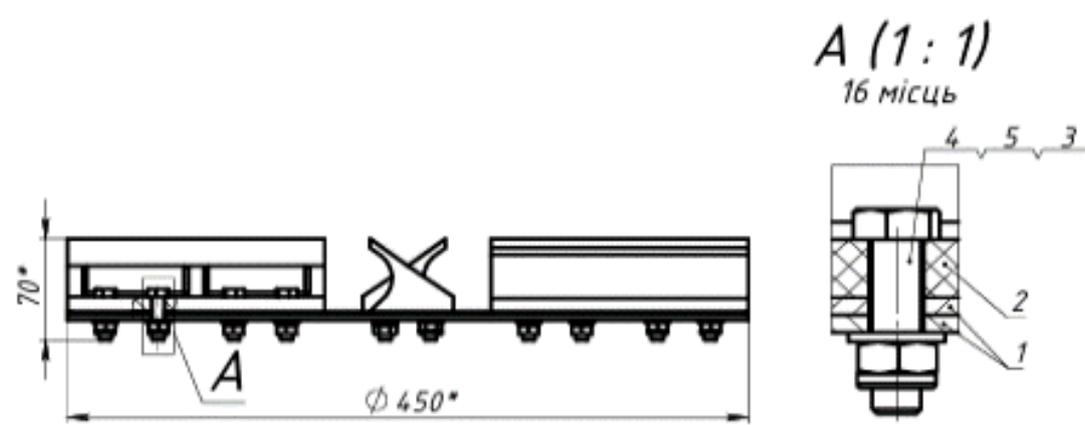
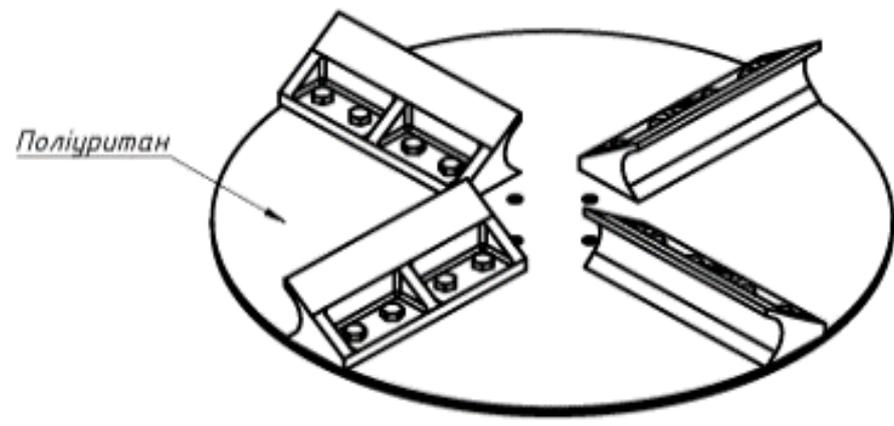
23. Войтюк В. Д. Управління системами машин у виробничих процесах рослинництва. Ніжин : Аспект-Поліграф, 2020. 503 с.

24. Войтюк В. Д. Якість, стандартизація, метрологія та сертифікація сільськогосподарської техніки. Полтава : Крюков Ю. С. 2014. 287 с.

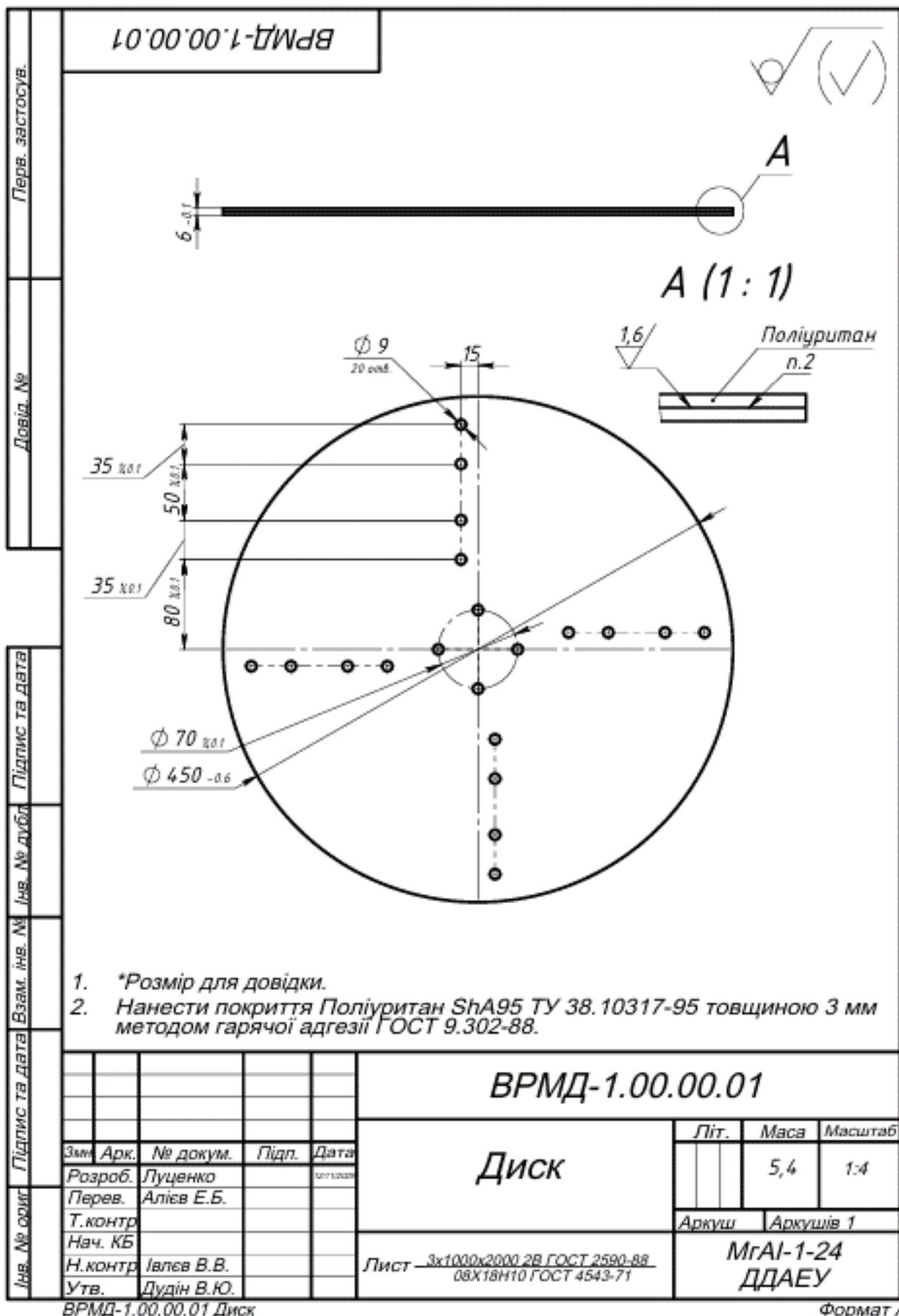
25. Войтюк Д. Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку. Київ. Вища освіта, 2020. 464 с.
26. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. Р. Сільськогосподарські машини: підручник. К.: Каравела, 2004. 552 с.
27. Дубовик В. П., Юрик І. І. Вища математика. К.: Ігнатекс-Україна, 2013. 648 с.
28. Кобець А. С. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів. Дніпропетровськ, 2019. 84 с.
29. Теоретичні та практичні питання аграрної науки: Колективна монографія / за заг. ред. А. С. Кобця. Дніпро: ЛПРА, 2023. 580 с.
30. Ловейкін В. С. Динамічна оптимізація підйомних машин. Харків: Видавництво ХНАДУ, 2020. 302 с.
31. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Динаміка машин. Київ : Компринт, 2020. 240 с.
32. Надикто В. Т. Нові мобільні енергетичні засоби України. Теоретичні основи використання в земліробстві. Мелітополь : ТДАТА, 2016. 337 с.
33. Павловський М.А. Теоретична механіка. Київ: Техніка, 2002. 512 с.
34. Пастушенко С. І., Руденко О. Г., Іщенко В. В. Практикум з теоретичної механіки. Ч.1 Статика. Кінематика. Вінниця, «Нова книга», 2006, 384 с.
35. Пастушенко С. І., Руденко О. Г., Іщенко В.В., Масюткін Є.П. Практикум з теоретичної механіки. Ч.2 Динаміка – Вінниця, «Нова книга», 2007, 544 с.
36. Роговський І. Л., Семеновський О. Є. Техніко-технологічні процеси сільськогосподарського машинобудування. Київ. АграрМедіаГруп. 2018. 328 с.
37. Ставінський А., Вахоніна Л., Мартиненко В., Мардзявко В, Руденко А. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science Vol. 28, No. 2 2024, 12 с.
38. Hossein Ashrafizadeh, Andre McDonald and Pierre Mertiny Erosive and Abrasive Wear Resistance of Polyurethane Liners 2017.

## Додатки



|   |   |                      |                |
|---|---|----------------------|----------------|
| Перв. застосує.   | ВРМД-1.00.00.00 СК  |                      |                |
| Довід. №  |   |                      |                |
| Взам. інв. №  | інв. №  | № дубл.              | Підпис та дата |
|  |   |                      |                |
| Підпис та дата  | <p style="text-align: center;">1. *Розмір для довідки.</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;"><b>ВРМД-1.00.00.00 СК</b></p> |                      |                |
| Зм.   | Арк.  | № докум.             | Підп.          |
| Розроб.   | Луценко   | № докум.             | Дата           |
| Перев.  | Алієв Е.Б.  | <b>Робочий орган</b> |                |
| Т.контр.  |   | Літ.                 | Маса           |
| Нач. КБ   |   | 5,3                  | Масштаб        |
| Н.контр.  | Івлєв В.В.  | Аркуш                | Аркушів        |
| Утв.  | Дудін В.Ю.  | 1                    |                |
| <p style="text-align: center;"><b>МГАІ-1-24</b><br/><b>ДДАЕУ</b></p>                |   |                      |                |

| Формат                 | Зона         | Поз.       | Позначення         | Найменування             | Кільк.       | При-<br>мітка |
|------------------------|--------------|------------|--------------------|--------------------------|--------------|---------------|
|                        |              |            |                    |                          |              |               |
|                        |              |            |                    | <u>Документація</u>      |              |               |
|                        |              |            | ВРМД-1.00.00.00 СК | Складальне креслення     | 1            |               |
|                        |              |            |                    | <u>Деталі</u>            |              |               |
|                        |              | 1          | ВРМД-1.00.00.01    | Диск                     | 1            |               |
|                        |              | 2          | ВРМД-1.00.00.02    | Лопатка                  | 4            |               |
|                        |              |            |                    | <u>Стандартні вироби</u> |              |               |
|                        |              | 3          |                    | Болт М8х30 DIN 933       | 16           |               |
|                        |              | 4          |                    | Контргайка М8 DIN 985    | 16           |               |
|                        |              | 5          |                    | Шайба плоска DIN 125     | 16           |               |
| Ліст. і дата           | Ліст. і дата | Зам. №     | Ліст. і дата       | Ліст. і дата             | Ліст. і дата | Ліст. і дата  |
|                        |              |            |                    |                          |              |               |
| <b>ВРМД-1.00.00.00</b> |              |            |                    |                          |              |               |
| № в. № подл.           | Зам.         | Арк.       | № докум            | Підпис                   | Дата         |               |
|                        | Розробив     |            | Луценко А.В.       |                          | 06.01.2007   | Літера        |
|                        | Перев.       |            | Алекс Е.Б.         |                          |              | Аркцв         |
|                        | Кер. Від.    |            |                    |                          |              | 1             |
|                        | Н.контр      |            | Влас В.В.          |                          |              | 1             |
| Затв.                  |              | Дядин В.Ю. |                    |                          |              |               |
| <b>Робочий орган</b>   |              |            |                    | <b>М2А1-1-24 ДДАЕУ</b>   |              |               |
| Копія                  |              |            |                    | Формат А4                |              |               |







## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗКИДАЧА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

Демонстраційний матеріал до дипломної роботи

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-1-24 за спеціальністю 208 «Агроінженерія»  
**Луценко Артур Владиславович**

Керівник: д-р. техн. наук, старший дослідник  
**Алієв Ельчин Бахтияр огли**

Дніпро 2025



### Мета і задачі дослідження

2

**Метою дослідження** є підвищення рівномірності внесення мінеральних добрив шляхом обґрунтування раціональних конструктивних та режимних параметрів відцентрового дискового робочого органу. Для досягнення цієї мети необхідно виконати аналіз кінематики розподілу частинок, розробити чисельну модель процесу розкидання, провести параметричні дослідження та визначити оптимальні значення основних факторів.

#### Задачі досліджень:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій робочих органів розкидачів мінеральних добрив, визначити їх переваги, недоліки та напрями вдосконалення.
2. Виконати аналітичні дослідження процесу внесення мінеральних добрив відцентровим дисковим робочим органом, встановити закономірності впливу основних параметрів (кутів, швидкостей, геометрії лопатей) на траєкторії руху частинок.
3. Розробити методику чисельного моделювання процесу розкидання мінеральних добрив із використанням сучасних обчислювальних засобів для визначення просторового розподілу частинок.
4. Проаналізувати отримані результати чисельного моделювання процесу внесення мінеральних добрив, оцінити рівномірність розподілу, визначити оптимальні конструктивно-технологічні параметри робочого органу.
5. Порівняти характеристики машини-прототипу та нової.

**Об'єкт досліджень:** процес внесення мінеральних добрив відцентровими розкидачами у сільськогосподарському виробництві.

**Предмет досліджень:** конструктивно-технологічні параметри відцентрового дискового робочого органу та їх вплив на рівномірність розподілу мінеральних добрив на поверхні ґрунту.



### Аналіз технічних засобів мінеральних добрив

3



а – розкидач мінеральних добрив фірми VINAVI, робочий орган; б – Причіпний розкидач добрив фірми Amazone; в – Причіпний розкидач добрив Amazone



а – причіпний обприскувач ОІШІ-2418; б – обприскувач причіпний КУТІН;  
в – самохідний обприскувач Case IH Patriot 4440



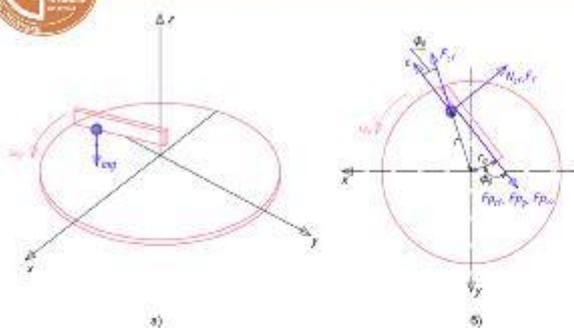
а – Сівалка Vaterstad; б – Сівалка BEDNAR



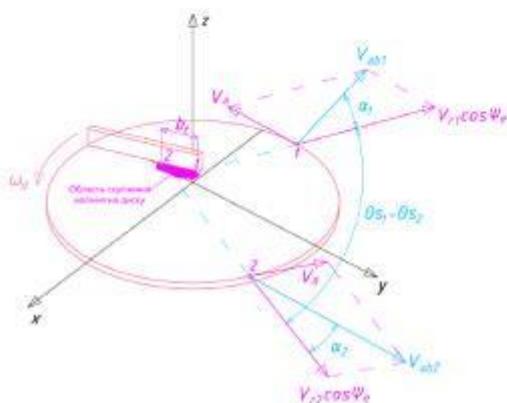
### Конструкція розкидача мінеральних добрив

4





Сили, що діють на частинку в дисковому відцентровому розсіювачі з лопатями



Умови виходу добрива з відцентрового диска

Диференціальне рівняння руху частинки у напрямку лопаті

$$m\tau\omega_d^2 \cos \psi - \mu_r mg - \mu_r m\tau\omega_d^2 \sin \psi - 2\mu_r m\tau\omega_d \frac{d\xi}{dt} = m \frac{d^2\xi}{dt^2}$$

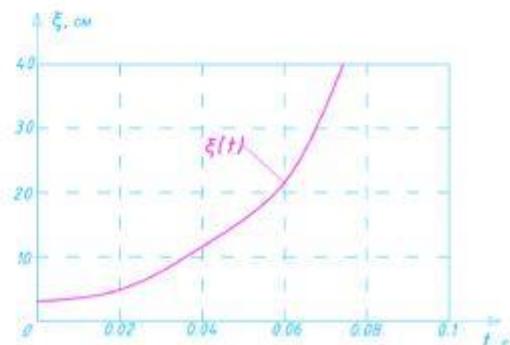
$$r \cos \psi = \xi - r_0 \cos(\pi - \psi_0)$$

$$\xi = \left[ \frac{\mu_r g}{\omega_d^2} - r_0 \frac{\cos(\pi - \psi_0 - \phi_r)}{\cos(\phi_r)} \right] \left[ \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} + \lambda_1 e^{\lambda_2 t} - 1) \right]$$

$$\lambda_1 = \omega_d (-\mu_r + \sqrt{1 + \mu_r^2}) \quad \lambda_2 = -\omega_d (-\mu_r + \sqrt{1 + \mu_r^2})$$

$$v_{\text{об}} = \sqrt{v_a^2 + (v_r \cos \psi_a)^2}$$

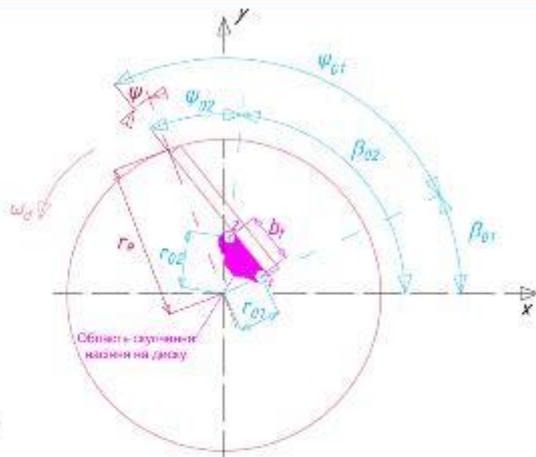
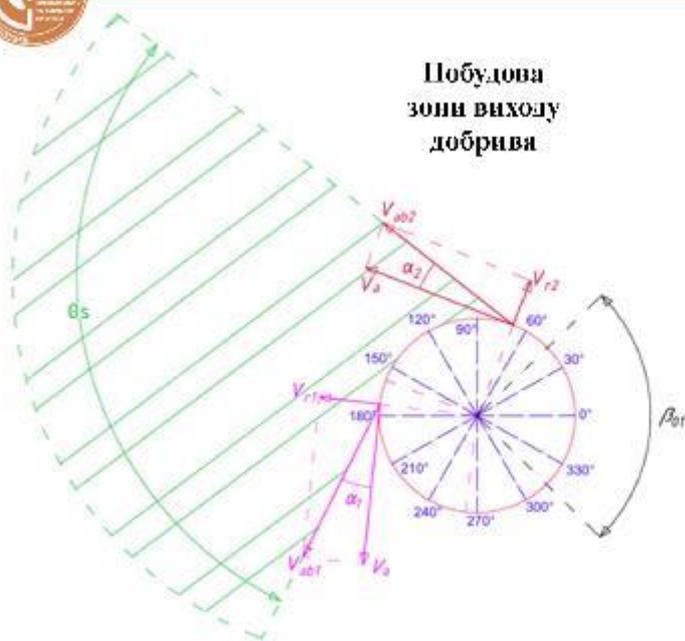
$$v_r = \frac{d\xi}{dt} = \left[ \frac{\mu_r g}{\omega_d^2} - r_0 \frac{\cos(\pi - \psi_0 - \phi_r)}{\cos(\phi_r)} \right] \left[ \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t} - 1) \right]$$



Зміна відносного переміщення частинок уздовж диска з нахиленими вперед лопатями, що обертається зі швидкістю 800 об/хв, як функція часу

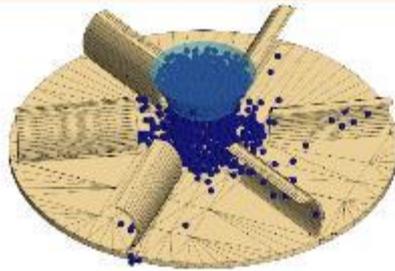


Побудова зони виходу добрива

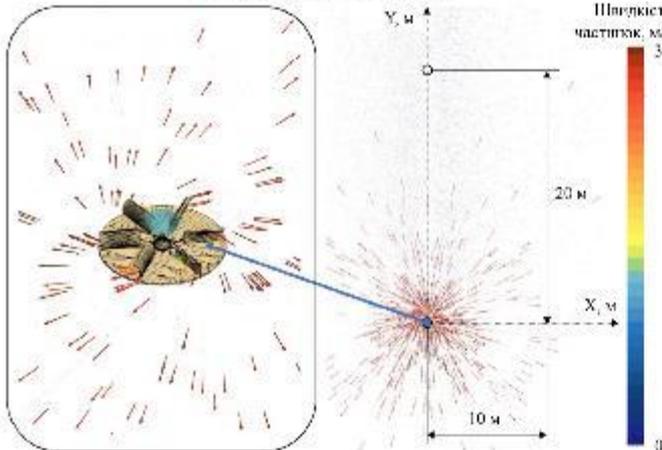


Кути, який проходить гранула під час роботи відцентрового диска

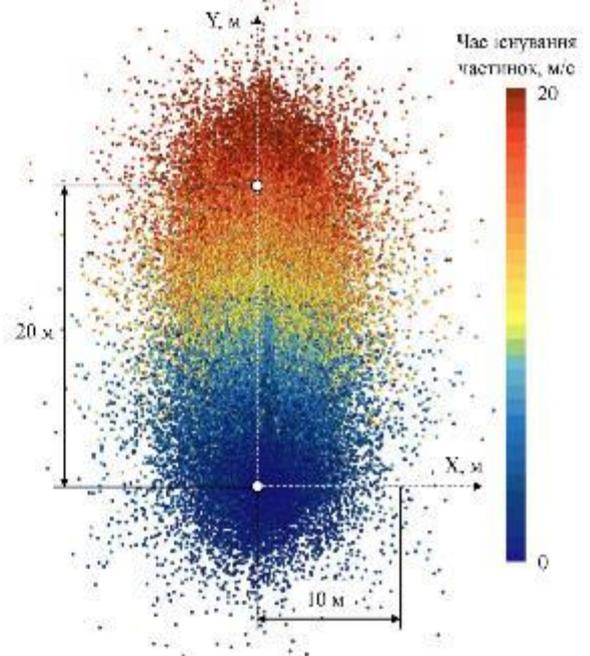
Отримано аналітичну модель, що описує рух частинок на розсіювальному диску відцентрового типу з прямими лопатями, нахиленими відносно радіального напрямку. Внаслідок програмної реалізації моделі у Wolfram Cloud стало можливим розраховувати параметри виходу добрива (швидкість вильоту та кут розсіювання) на основі вхідних параметрів, таких як: кут нахилу лопатей, коефіцієнт тертя між добривом і матеріалом диска та лопатей, геометричні розміри та швидкість обертання диска, координати зони падіння добрива з вихідного отвору бункера



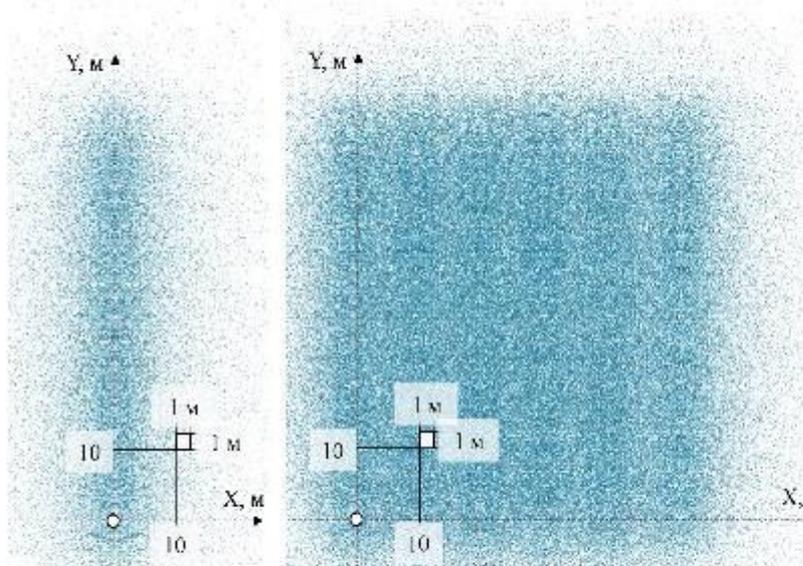
Геометрична модель дискового розкидача мінеральних добрив



Векторна сцена розподілу швидкостей частинок добрива при вильоті з робочого органу



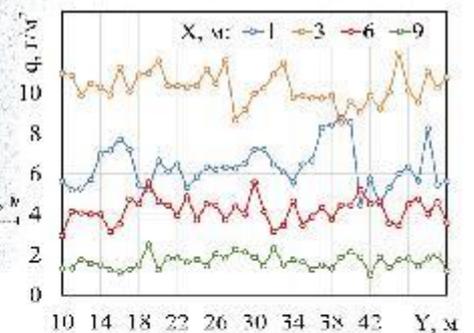
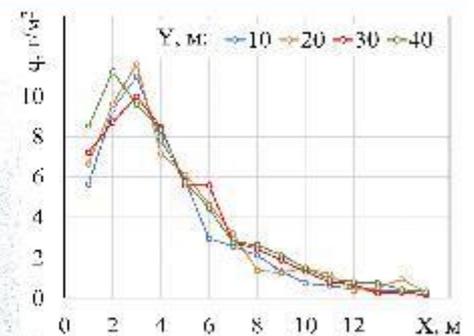
Сцена відображення розміщення частинок добрива на імітованому полі під час переміщення розкидача



1 прохід

6 проходів

Розподіл частинок на імітованому полі

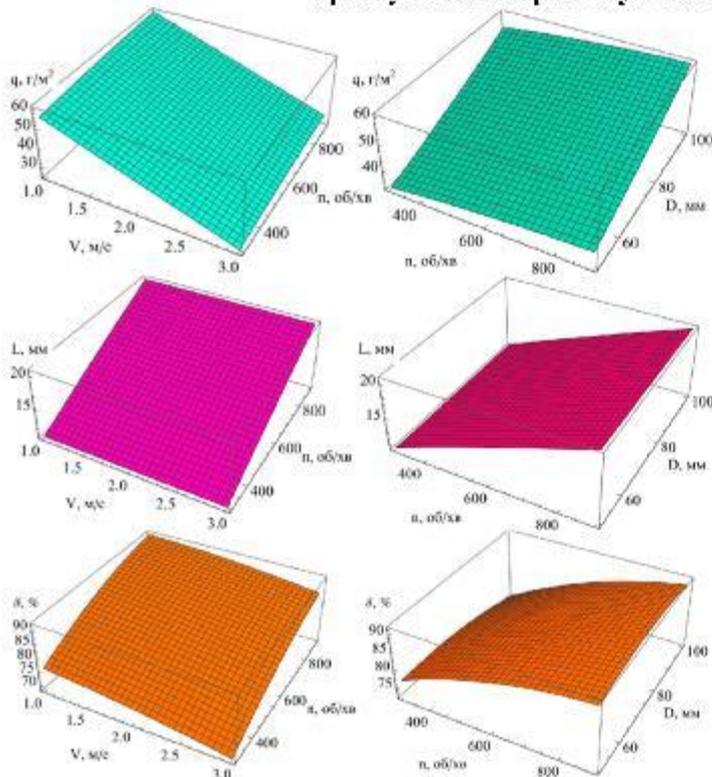


Графіки норми внесення (масової норми)  $q$  у елементарних комірках (1 м × 1 м) у відповідних координатах



Результати чисельного моделювання

Залежності рівномірності внесення добрив  $\delta$ , норми внесення добрив  $q$  і максимальної дальності польоту  $L$  від швидкості руху розкидача по полю  $V$ , частоти обертання робочого органу  $n$  і діаметра випускного отвору бункера  $D$



$$\delta = 58,5306 + 0,2562 D + 0,0026507 D^2 + 0,044431 n + 0,0001657 d n + 0,0000277407 n^2 - 1,26 V + 0,0021 n V - 0,816667 V^2;$$

$$q = 18,3296 + 0,362222 D + 0,00113778 D^2 + 0,019537 n + 8,95062 \cdot 10^{-6} n^3 + 6,76667 V + 0,0886667 d V;$$

$$L = 4,69259 - 0,019463 n - 1,79012 \cdot 10^{-6} n^2;$$

$q(V, n, d) = q_0$ ,  $\delta(V, n, d) \rightarrow \max$ ,  
 $L(V, n, d) \rightarrow \max$ ,  $V \rightarrow \max$ .

Рациональні (оптимальні) значень факторів для заданій нормі внесення добрив  $q_0$

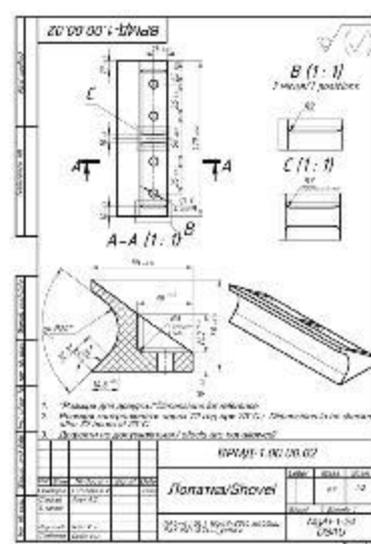
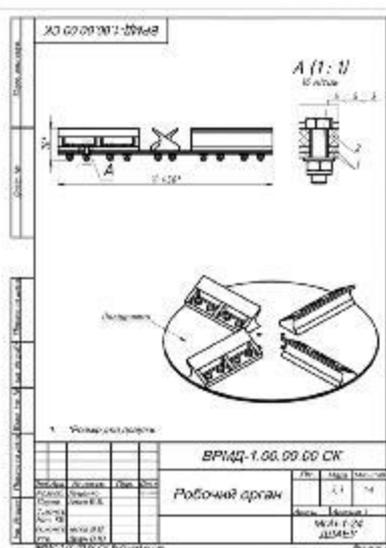
| $q_0$ , т/м <sup>2</sup> | $V$ , м/с | $n$ , об/хв | $D$ , мм | $\delta$ , % | $L$ , м |
|--------------------------|-----------|-------------|----------|--------------|---------|
| 10                       | 3,00      | 300         | 50,0     | 88,8         | 10,4    |
| 15                       | 2,74      | 404         | 50,3     | 85,2         | 12,3    |
| 20                       | 2,65      | 512         | 60,9     | 88,7         | 14,2    |
| 25                       | 2,34      | 621         | 61,5     | 85,1         | 16,1    |
| 30                       | 1,99      | 698         | 62,8     | 86,1         | 17,4    |
| 35                       | 1,71      | 819         | 64,6     | 89,0         | 19,4    |
| 40                       | 1,41      | 900         | 66,7     | 90,6         | 20,8    |
| 45                       | 1,09      | 900         | 69,2     | 91,1         | 20,8    |
| 50                       | 1,00      | 900         | 77,6     | 91,4         | 20,8    |
| 55                       | 1,00      | 900         | 88,4     | 91,0         | 20,8    |
| 60                       | 1,00      | 900         | 98,7     | 90,0         | 20,8    |



Техніко-економічна оцінка ефективності розкидача мінеральних добрив

Порівняльна характеристика проєктуємої машини та прототипа

| Показник                         | Прототип | Проєкт | В од. | У %   |
|----------------------------------|----------|--------|-------|-------|
| Продуктивність, га/год           | 13       | 15,8   | +2,8  | +21,5 |
| Норма внесення, т/м <sup>2</sup> | 11,1     | 50     | +39   | +77,8 |
| Рівномірність внесення, %        | 77,5     | 91,4   | +13,9 | +15,2 |
| Ресурс, га                       | 125      | 1600   | 1475  | +1200 |
| Економічний ефект, грн/га        |          |        | 8,6   |       |
| Термін окупності, років          |          |        | 0,51  |       |





- Ведення конкурентоспроможного та прибуткового агробізнесу, насамперед галузі рослинництва, необхідно поєднати з підтримкою застосування сучасних технологій обробки ґрунту, які дають змогу дієсно та з мінімальними затратами підготувати землю для подальших операцій, своєчасне внесення добрив, які забезпечать ґрунт поживними речовинами, використання якісного насіннєвого матеріалу.
2. Проаналізовано сучасні дослідження на тему внесення мінеральних добрив, в ході яких було виведено аналітичні формули та зацентовано увагу на фізичних явищах та величинах, які впливають на рух. Рух гранули проходить в 3 фази: перша фаза – добриво під дією сили тяжіння висипається через отвір або заглинку, розташовану в нижній частині бункера, у зону поблизу центру диска; друга фаза – матеріал транспортується до краю диска під дією системи сил, серед яких провідною є відцентрова сила, при цьому частинки зазнають дії сил тертя з поверхнями самого диска та лопатей; третя фаза – частинки викидаються у поле, а їхня траєкторія визначається балістичним польотом під впливом густини та швидкості навколишнього повітря.
  3. У ході аналітичних досліджень розроблено математичну модель руху частинок мінеральних добрив на відцентровому дисковому розсіювачі з нахиленими вперед лопатями. Модель враховує дію основних сил – тяжіння, відцентрової, Коріоліса та тертя, що виникають у неінерціальній системі відліку, пов'язаній із диском. На основі другого закону Ньютона отримано диференціальне рівняння руху частинки вздовж лопаті, розв'язок якого дозволяє визначати швидкість, траєкторію та кут вильоту добрива залежно від геометричних і кінематичних параметрів розсіювача. Програмна реалізація рівнянь у середовищі Wolfram Cloud дала змогу провести розрахунки та побудувати графічні залежності зміни положення частинки у часі. Визначено, що при швидкості обертання диска 540 об/хв, куті нахилу лопатей 20° та коефіцієнті тертя 0,6 зона подачі добрива має ширину приблизно 7,5–8 см, а кут розсіювання становить близько 90°, що забезпечує рівномірний розподіл у напрямку, протилежному руху машини.
  4. У результаті чисельного моделювання процесу внесення мінеральних добрив відцентровим дисковим робочим органом із використанням Simcenter Star-CCM+ та Wolfram Cloud отримано рівняння регресії, що адекватно описують залежність рівномірності внесення  $\delta$ , норми  $q$  та дальності польоту частинки  $L$  від швидкості руху розсіювача  $V$ , частоти обертання диска  $n$  і діаметра випускного отвору  $D$ . Оптимізацію проведено з урахуванням наступних умов: . За результатами розрахунку системи рівнянь у середовищі Wolfram Cloud було отримано таблицю раціональних (оптимальних) значень факторів для різних заданих величин параметра  $q\delta$ , яку можна використовувати у виробничих умовах.
  5. Дотримання правил та норм при внесенні мінеральних добрив є важливим аспектом запоруки безпеки та високого рівня ергономіки робітників. Забезпечення безпеки працівників висточас проведення інструктажів, практичну та теоретичну підготовку персоналу, використання засобів індивідуального захисту та увагу та психо-емоційного стану робітників. Такий комплексний підхід є запорукою високої ефективності протікання процесу.
  6. У результаті проведення чисельного моделювання та низки розрахунків економічної ефективності машини-прототипа та прототипової ветаплетелі, що за один і той самий паробіток екопомітний ефект складає 13800 грн, а питомий економічний ефект 8,6 грн/га. При цьому термін окупності складає пів року.