

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

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр" на тему:
**Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів дозувального
пристрою туковисівного апарата**

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-3-24
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Шевчук Сергій Сергійович

Керівник: _____ Лупко Кристина Олегівна

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.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Шевчуку Сергію Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів дозувального пристрою туковисівного апарата

керівник роботи: Лупко Кристина Олегівна, доктор філософії

(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 добрив. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан і напрями досліджень. 2. Аналітичні дослідження процесу роботи косарки. 3. Методика чисельного моделювання. 4. Результати чисельного моделювання. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік демонстраційного матеріалу

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Лупко К. О., старший викладач	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 проєкту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний	до 05.11.2025 р	виконано
2	Теоретичний	до 14.11.2025 р	виконано
3	Експериментальний	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

_____ Шевчук С. С. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Лупко К. О. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Шевчук С.С. Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів дозувального пристрою туковисівного апарата. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

У роботі представлено результати дослідження процесу дозування гранульованих мінеральних добрив у туковисівному апараті. Метою є підвищення точності та рівномірності подачі добрив шляхом удосконалення конструкції дозувального пристрою. Проведено чисельне моделювання процесу подачі та руйнування гранул методом дискретних елементів (DEM) і експериментальні дослідження на створеному стенді. На основі плану Бокса–Бенкена побудовано регресійні моделі, що описують вплив конструктивно-технологічних параметрів спірального гвинтового дозатора на рівномірність подачі та ступінь руйнування гранул. Виконано оптимізацію режимів роботи, визначено раціональні параметри гвинта та форми спіралі. Розраховано економічну ефективність, яка підтвердила доцільність упровадження удосконаленого дозатора в агровиробництво.

Ключові слова: дозувальний пристрій, туковисівний апарат, рівномірність подачі, експериментальні дослідження, регресійна модель

Апробація. Шевчук С.С. (2025). Способи внесення 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, 271–274.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1 Вимоги до внесення мінеральних добрив.....	9
1.2 Способи внесення мінеральних добрив	11
1.3 Стан досліджень точних дозаторів мінеральних добрив	14
1.4 Висновки з розділу	23
2 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДОЗУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ТУКОВИСІВНОГО АПАРАТА.....	25
2.1 Модель зв'язків у методі дискретних елементів (DEM).....	25
2.2 Тривимірна модель спірального дозатора добрив	26
2.3 Геометрична модель блоку добрив	27
2.4 Калібрування параметрів моделі	29
2.5 Налаштування параметрів моделювання та методика аналізу	33
2.6 Результати чисельного моделювання	36
2.7 Висновки з розділу.....	38
3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДОЗУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ТУКОВИСІВНОГО АПАРАТА.....	40
3.1 Стенд для проведення експериментальних досліджень	40
3.2 Методика проведення експериментальних досліджень.....	42
3.3 Методика статистичної обробки даних	45
3.4 Висновки з розділу.....	47
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	49
4.1 Побудова та перевірка регресійної моделі	49
4.2 Аналіз взаємодії факторів моделі.....	52
4.3 Оптимізація	56
4.4 Висновки з розділу.....	58
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	60
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО ДОЗУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ТУКОВИСІВНОГО АПАРАТА.....	62
ВИСНОВКИ	65
Бібліографія.....	67
Додатки	73

ВСТУП

Раціональне дозування мінеральних добрив є одним із ключових чинників підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва, забезпечення рівномірного живлення рослин і зменшення негативного впливу на довкілля. Від точності роботи туковисівного апарата, а особливо його дозувального пристрою, залежить не лише рівномірність розподілу добрив, а й економічна ефективність технологічного процесу внесення.

У сучасних умовах підвищення вартості мінеральних добрив і необхідності оптимізації витрат на їх використання особливого значення набуває обґрунтування конструктивно-режимних параметрів дозувальних пристроїв. Від правильного вибору геометричних параметрів робочих органів (діаметра, форми, кроку гвинтової поверхні, кількості комірок тощо) та режимних показників (частоти обертання, швидкості руху агрегату, кута нахилу робочої поверхні) залежить стабільність подачі матеріалу, рівномірність висіву, запобігання забиванню дозатора й руйнуванню гранул.

Серед різних типів туковисівних апаратів широке застосування отримали дозувальні пристрої з гвинтовими або жолобчастими катушками, що забезпечують безперервне транспортування та дозування гранульованих добрив. Проте експлуатація таких систем супроводжується низкою проблем – злипанням матеріалу при підвищеній вологості, нерівномірним витоком через комірки, а також зміною продуктивності залежно від фізико-механічних властивостей добрив.

Тому актуальним є проведення досліджень, спрямованих на визначення оптимальних конструктивно-режимних параметрів дозувального пристрою туковисівного апарата, які забезпечують мінімальний коефіцієнт варіації подачі, високу рівномірність розподілу та збереження гранул під час транспортування. Для досягнення цієї мети доцільним є застосування методів математичного моделювання, планування експерименту типу Бокса–Бенкена, регресійного аналізу та оптимізації за допомогою програмного пакета Wolfram

Cloud, що дозволяє встановити закономірності впливу конструктивних і режимних факторів на показники роботи дозувального пристрою та визначити раціональні параметри його функціонування.

Мета роботи – підвищення точності та рівномірності подачі гранульованих мінеральних добрив шляхом удосконалення конструкції дозувального пристрою туковисівного апарата та обґрунтування його конструктивно-режимних параметрів на основі чисельного моделювання і експериментальних досліджень.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан і напрями розвитку технічних засобів для дозування та внесення мінеральних добрив, визначити основні вимоги до їх роботи.
2. Провести чисельне моделювання процесу подачі та руйнування гранульованих добрив методом дискретних елементів (DEM), визначити закономірності руху частинок і характер міжчастинкових взаємодій.
3. Побудувати регресійні моделі, що описують вплив конструктивно-технологічних параметрів на рівномірність подачі та ступінь руйнування гранул.
4. Виконати оптимізацію параметрів дозувального пристрою з використанням критеріїв точності подачі та мінімізації руйнування гранул.
5. Оцінити економічну ефективність впровадження удосконаленого дозувального пристрою в агротехнічну практику.

Об'єкт дослідження – процес дозування гранульованих мінеральних добрив у туковисівному апараті під час припосівного та локального внесення.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів спірального гвинтового дозувального пристрою (форма поперечного перерізу, швидкість обертання гвинта, кут підйому спіралі) на рівномірність подачі та ступінь руйнування гранул добрив.

1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Вимоги до внесення мінеральних добрив

Раціональне та науково обґрунтоване внесення мінеральних добрив є одним із найважливіших чинників підвищення продуктивності сільськогосподарських культур, збереження родючості ґрунтів і забезпечення сталого розвитку аграрного виробництва. Ефективність використання добрив визначається правильним вибором їх виду, доз, строків і способів внесення, а також технічним станом обладнання, яке застосовується для дозування і розподілу поживних речовин.

Перед внесенням добрив обов'язковим етапом є проведення агрохімічного обстеження ґрунту з метою визначення рівня його забезпеченості макро- та мікроелементами, кислотності, вмісту органічної речовини, а також виявлення можливих ознак засолення або деградації. На основі результатів аналізу складають план удобрення, що передбачає досягнення оптимального балансу поживних речовин у системі «ґрунт–рослина» без перевищення допустимих норм концентрації.

Мінеральні добрива, що використовуються у виробництві, повинні відповідати чинним державним стандартам (ДСТУ або ГОСТ) за хімічним складом, вологістю, гранулометричними характеристиками та фізико-хімічними властивостями. Недопустиме застосування продукції, що має ознаки злежування, злипання, надмірної вологості або наявності сторонніх домішок. Зберігання добрив здійснюється у сухих вентильованих приміщеннях із твердим покриттям, що запобігає потраплянню речовин у ґрунт і стічні води.

Процес внесення мінеральних добрив повинен забезпечувати рівномірний розподіл матеріалу по поверхні поля. Допустиме відхилення фактичної норми від заданої не повинно перевищувати ± 5 %. Для цього використовуються справні, відкалібровані та правильно відрегульовані розкидачі, туковисівні апарати або комбіновані агрегати. Перед початком роботи здійснюється

контрольне зважування дози на відріжку 10 м для перевірки точності налаштування дозувального механізму з урахуванням швидкості руху агрегату.

Внесення добрив забороняється проводити під час опадів, сильного вітру, підтоплення або замерзання ґрунту, коли існує ризик змиву чи нерівномірного розподілу. У зонах із підвищеною ерозійною небезпекою (на схилах) доцільно застосовувати локальні або заглиблені способи внесення, що зменшують втрати поживних речовин та запобігають забрудненню водою.

Таблиця 1.1 – Основні нормативні вимоги до внесення мінеральних добрив

№	Показник / Вимога	Норма або умова	Примітка
1	Відхилення фактичної норми внесення від заданої	Не більше $\pm 5\%$	Для рівномірного розподілу по площі
2	Вологість гранульованих добрив під час внесення	Не більше 1,5–2,0 %	Для запобігання злипання і нерівномірності дозування
3	Швидкість руху агрегату	4–8 км/год	Залежить від типу розкидача і виду добрива
4	Висота розташування розкидного диска або апарата	0,4–0,6 м від поверхні ґрунту	Забезпечує рівномірність покриття
5	Санітарно-захисна зона від водоюм та доріг	Не менше 20–50 м	Залежно від типу добрива та рельєфу місцевості
6	Час внесення відносно погодних умов	Без опадів, при швидкості вітру ≤ 5 м/с	Для уникнення змиву або знесення добрив
7	Технічний стан дозувального пристрою	Повна справність, відсутність підтікання та засмічення	Перевіряється перед кожним виїздом у поле
8	Наявність індивідуальних засобів захисту у персоналу	Обов'язкова	Рукавички, респіратори, окуляри, спецодяг
9	Тип внесення	Суцільне, локальне, припосівне	Вибір залежно від культури та ґрунтових умов

З екологічної точки зору, особливу увагу необхідно приділяти дотриманню санітарно-захисних зон: відстань від місць внесення до відкритих водойм, житлових будівель і шляхів має бути не меншою за 20–50 м залежно від типу добрива і рельєфу місцевості. Працівники, задіяні у процесі, повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту (рукавички, респіратори, окуляри, спецодяг) і пройти інструктаж із техніки безпеки та охорони праці.

Основне внесення мінеральних добрив проводиться восени під основний обробіток ґрунту або навесні перед передпосівною культивацією. Додаткове (підживлення) виконується у період вегетації культур відповідно до фаз розвитку рослин і потреби у конкретних елементах живлення. Для зменшення втрат азоту доцільно застосовувати припосівне або локальне внесення, а також використання інгібіторів нітрифікації, що підвищують коефіцієнт засвоєння поживних елементів.

Для контролю якості виконання технологічного процесу проводяться вибіркові перевірки рівномірності розподілу добрив у полі, а також періодичне обслуговування дозувальних систем, що запобігає нерівномірності подачі, засміченню отворів або залипанню гранул.

1.2 Способи внесення мінеральних добрив

Мінеральні добрива вносяться у ґрунт різними способами залежно від їхнього призначення, фізичних властивостей, виду сільськогосподарських культур, типу ґрунту, кліматичних умов і застосовуваної технології вирощування. Основною метою вибору способу внесення є забезпечення максимально ефективного використання поживних речовин, зменшення втрат азоту, фосфору та калію, а також досягнення рівномірного їх розподілу в орному шарі ґрунту.

Залежно від призначення і технологічної операції розрізняють **основне внесення, припосівне (передпосівне), локальне (стрічкове або гніздовим способом) і підживлення.**

Основне внесення виконується восени під основний обробіток ґрунту або навесні перед культивацією. Цей спосіб передбачає загортання добрив на глибину 15–25 см для створення запасу поживних речовин, які поступово засвоюються рослинами протягом усього вегетаційного періоду. Найчастіше застосовується для фосфорних і калійних добрив, що мають низьку рухливість у ґрунті. Внесення здійснюється розкиданням по поверхні поля із подальшим заорюванням плугами, фрезами або комбінованими ґрунтообробними агрегатами.

Передпосівне або припосівне внесення виконується безпосередньо перед сівбою або одночасно з нею, найчастіше за допомогою туковисівних апаратів сівалок. Його мета – створити локальні зони підвищеної концентрації поживних елементів у зоні проростання насіння. Такий спосіб є особливо ефективним для азотних і комплексних добрив (нітроамофоска, амофос), що забезпечують швидкий стартовий ріст рослин.

Локальне внесення передбачає розміщення добрив у безпосередній близькості до кореневої системи у вигляді стрічок або гнізд. Стрічкове внесення полягає у закладанні добрив вузькими смугами на певній глибині й відстані від рядків посіву. Гніздовий спосіб полягає у внесенні дозованої кількості добрива у кожен лунку або гніздо разом із насінням або під час садіння. Ці методи зменшують втрати поживних речовин і покращують їх засвоєння рослинами.

Підживлення проводиться протягом вегетації культур для компенсації дефіциту елементів живлення, що виникає внаслідок вимивання або інтенсивного росту рослин. Підживлення може бути кореневим (внесення добрив у ґрунт) або позакореневим (обприскування рослин розчином добрив по листку). Кореневе підживлення азотними добривами (аміачна селітра, карбамід) зазвичай здійснюють навесні та влітку, коли рослини мають найбільшу потребу в азоті. Позакореневе підживлення використовується для оперативного усунення нестачі мікроелементів – бору, цинку, марганцю, міді тощо.

За способом розподілу по площі поля розрізняють **суцільне внесення**, коли добрива рівномірно розкидаються по поверхні ґрунту на всій площі, і **місцеве (локальне)**, при якому поживні речовини концентруються у вузьких зонах біля

коренів. Суцільне внесення зручне при роботі на великих площах, але має меншу ефективність використання елементів живлення, тоді як локальне забезпечує економію добрив і підвищення їх засвоюваності, особливо на малородючих ґрунтах.

Для кожного способу важливо дотримуватися певних технологічних параметрів – норми внесення, глибини загортання, швидкості руху агрегату та рівномірності розподілу матеріалу. Раціональне поєднання різних способів внесення дозволяє досягти максимальної ефективності дії добрив і знизити їх негативний вплив на навколишнє середовище.

Таблиця 1.2 – Основні способи внесення мінеральних добрив та їх характеристика

№	Спосіб внесення	Характеристика процесу	Основні переваги	Рекомендовані види добрив
1	Основне	Розкидання добрив по поверхні поля з подальшим загортанням на глибину 15–25 см під час оранки або культивуації	Створює запас поживних речовин у ґрунті, забезпечує тривалу дію	Фосфорні, калійні, комбіновані добрива
2	Передпосівне (припосівне)	Внесення безпосередньо перед сівбою або одночасно із нею туковисівним апаратом	Забезпечує стартове живлення проростків, рівномірне розміщення у зоні насіння	Азотні, комплексні (нітроамофоска, амофос)
3	Локальне (стрічкове, гніздовим способом)	Розміщення добрив у смугах або лунках поруч із насінням або коренями	Підвищує коефіцієнт використання поживних елементів, знижує втрати	Азотно-фосфорні суміші, гранульовані добрива
4	Підживлення кореневе	Внесення добрив у міжряддя під час вегетації для компенсації дефіциту елементів	Дозволяє оперативно регулювати живлення рослин	Аміачна селітра, карбамід, КАС

№	Спосіб внесення	Характеристика процесу	Основні переваги	Рекомендовані види добрив
5	Підживлення позакореневе	Обприскування рослин розчинами добрив по листку	Швидке усунення дефіциту мікроелементів, висока ефективність	Борні, цинкові, мікроелементні добрива
6	Суцільне розкидання	Рівномірний розподіл добрив по всій площі поля з поверхневим або частковим загортанням	Простота і висока продуктивність	Будь-які гранульовані або кристалічні добрива
7	Комбіноване	Поєднання основного, припосівного та підживлювального способів	Забезпечує збалансоване живлення протягом усього періоду вегетації	Комплексні мінеральні добрива

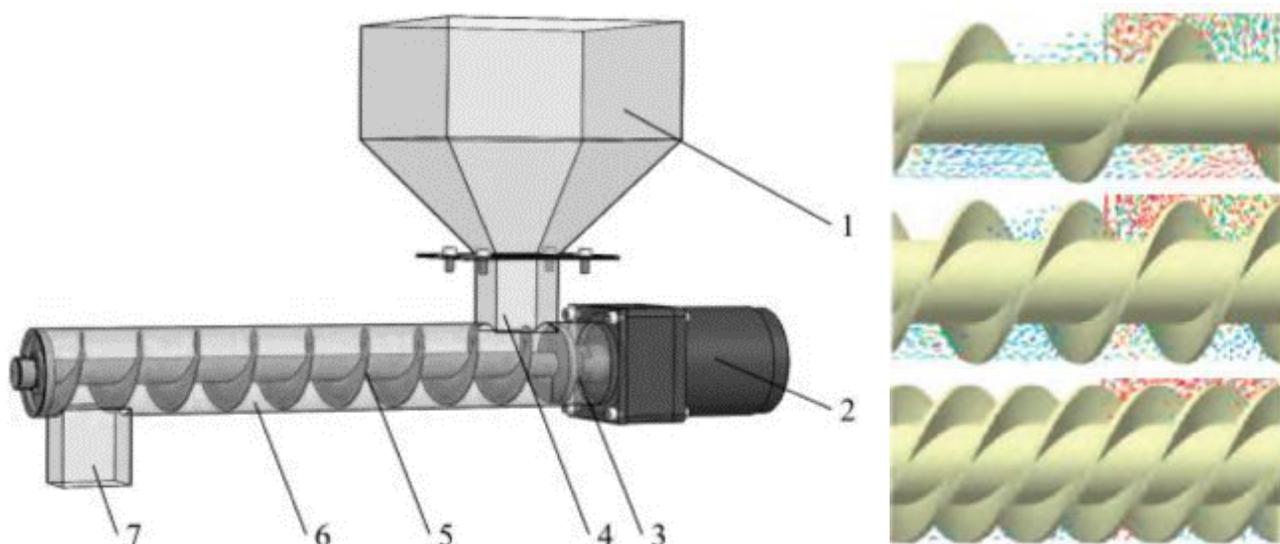
1.3 Стан досліджень точних дозаторів мінеральних добрив

Упродовж останніх років у світі активно проводяться дослідження точних дозаторів мінеральних добрив, спрямовані на підвищення рівномірності та стабільності подачі. Основні типи дозаторів поділяються на спіральні, шнекові (гвинтові), дискові, колісно-гребінчасті та пневматичні системи. Найбільшого поширення набули спіральні дозатори, які відрізняються простотою конструкції, універсальністю та невисокою вартістю.

Дослідження спіральних дозаторів. Принцип дії спірального дозатора полягає у переміщенні гранульованого або порошкоподібного добрива вздовж осі шнека під дією обертання спіральних лопатей. Такі пристрої мають невисокі вимоги до фізико-механічних властивостей добрив і забезпечують регулювання норми внесення. Недоліком є нерівномірність подачі при малих швидкостях обертання.

Зарубіжні дослідники (Mondal, Lyalin, Zimmermann) досліджували вплив кроку спіралі, діаметра, зазору між витками та частоти обертання на стабільність подачі добрив. Оптимальні параметри для різних моделей становлять: діаметр

спіралі 49–90 мм, крок 1,05–1,25 від діаметра, зазор 2,5–7,5 мм. Коефіцієнт варіації рівномірності подачі не перевищував 0,2–0,4 %.



1 – бункер для добрив; 2 – електродвигун; 3 – муфта; 4 – вхід для добрив; 5 – шнекова лопать; 6 – корпус; 7 – вихід для добрив

Рисунок 1.1 – Структурна схема шнекового туковисівного апарата

У Китаї значна увага приділяється моделюванню процесу подачі добрив методом дискретних елементів (DEM) у поєднанні з лабораторними та польовими випробуваннями. Дослідники (Zhao Liang, Wang Jie, Xiao Wenli, Liu Wenzheng, Fang Longyu) розробили низку конструкцій малогабаритних та багатошнекових дозаторів для гранульованих, органічних і комплексних добрив.

Отримано такі характерні оптимальні параметри: діаметр спіралі – 56–92 мм; крок – 24–56 мм; частота обертання – 39–60 об/хв; варіація рівномірності подачі – 6,8–12 %.

Для підвищення точності дозування оптимізовано кут і довжину вихідного отвору, зокрема визначено, що при куті 135° та довжині 1,5 кроку подача стає рівномірною (коефіцієнт варіації не перевищує 8 %).

Лі Хін запропонував спірально-двоходовий дозатор, у якому використано дві взаємопов'язані спіралі. Оптимізація параметрів за допомогою генетичного

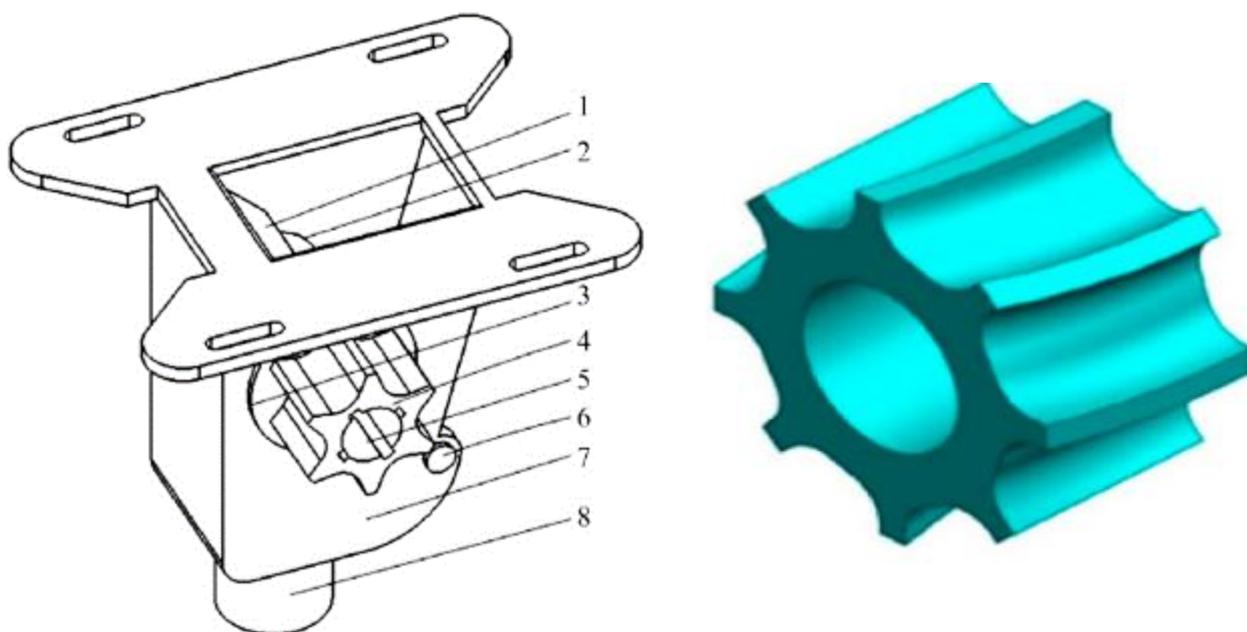
алгоритму показала, що така конструкція забезпечує рівномірність подачі на рівні 6,7 % і стабільну роботу при зміні швидкості обертання.

Отже, дослідження зосереджені на визначенні впливу основних геометричних параметрів — кроку, діаметра, кількості заходів спіралі, товщини та висоти лопатей, кута й довжини випускного отвору, а також частоти обертання вала. Комбінація чисельного моделювання (DEM), стендових і польових експериментів дала змогу створити базу для подальшої оптимізації точних спіральних дозаторів добрив, що відповідають вимогам сучасних систем прецизійного землеробства.

Таблиця 1.3 – Основні результати досліджень спіральних дозаторів добрив

Автори / країна	Метод дослідження	Оптимальні параметри	Рівномірність подачі, %	Особливості конструкції
Mondal et al. (Індія)	Стендові випробування	n = 15–21 об/хв	±0,8	Транспортування дрібних гранул
Lyalin et al. (РФ)	Багатофакторний експеримент	D = 49–90 мм, S = 1,05–1,25D	≤0,4	Оптимізація геометрії шнека
Zimmermann et al. (Німеччина)	Автоматизований стенд	Швидкість 4–10 км/год	—	Порівняння одно- і двошнекових систем
Zhao Liang et al. (КНР)	DEM + експеримент	D = 92 мм, S = 56 мм, n = 39 об/хв	12,3	Малогабаритний дозатор для гранул
Wang Jie (КНР)	DEM + польові випробування	3 кроки в зоні подачі	7,0	Змінний крок і діаметр секцій
Xiao Wenli (КНР)	DEM + експеримент	S = 24 мм, n = 40–60 об/хв	6,8	Чотиризаходовий дворядний шнек
Liu Wenzheng (КНР)	Кінематичний аналіз + DEM	D = 56 мм, S = 45 мм	2,3	Двостороння подача для картоплі
Li Xin (КНР)	DEM + генетичний алгоритм	a = 49,8 мм, S = 32,5 мм	6,7	Двоходовий спіральний дозатор
Fang Longyu (КНР)	DEM + експеримент	Кут 135°, L = 1,5S	8,2	Оптимізація випускного отвору

Стан досліджень туковисівних апаратів із комірчастим (гребінчастим) дозувальним колесом. Туковисівні апарати з комірчастим колесом працюють за принципом обертання колеса з виїмками, які захоплюють гранули добрив із бункера та транспортують їх до вихідного отвору (рис. 1.2). Такі апарати мають просту конструкцію та забезпечують високу продуктивність, проте чутливі до фізичних властивостей добрив — при роботі з вологими або порошкоподібними сумішами можливі коливання подачі та забивання комірок. Крім того, точність дозування і рівномірність розподілу можуть змінюватися залежно від швидкості обертання.



1 – заслінка для добрив; 2 – запобіжне колесо; 3 – опорне кільце; 4 – жолобчасте колесо; 5 – вал висіву добрив; 6 – висівний язичок; 7 – корпус висівного апарата;
8 – вихідний отвір для добрив

Рисунок 1.2 – Структурна схема туковисівного апарата з жолобчастим колесом.

Міжнародні дослідження зосереджені на моделюванні процесу подачі за допомогою методу дискретних елементів (DEM), стендових експериментах та вдосконаленні конструкції дозувального колеса. Зокрема, Vangura та ін. запропонували спіральне дозувальне колесо, яке забезпечує більш стабільну та рівномірну подачу порівняно з традиційним прямим. Sugirbay та ін. розробили

новий пін-роликовий апарат, який покращує рівномірність висіву при високих швидкостях. Lillerand досліджував апарат для точного внесення добрив у ложинових плантаціях, однак коефіцієнт варіації понад 10 % свідчить про потребу подальшої оптимізації.

Китайські вчені активно оптимізують параметри дозувального колеса (радіус, кут спіралі, глибину виїмок, кут вихідного патрубку тощо) з використанням DEM-моделювання, лабораторних і польових випробувань. Liang Yuchao визначив, що найвпливовішими параметрами є радіус шківів та відстань між центрами дуг, при цьому коефіцієнт рівномірності досягає 95 %. Zhou Bin виявив оптимальні параметри для калійних і комплексних добрив (швидкість 34,5 об/хв, довжина робочої ділянки 56 мм, глибина 36 мм), отримавши відхилення менше ніж 7 %. Yang Liu оптимізував подачу азотних, фосфорних і калійних добрив, досягнувши коефіцієнтів варіації 3,5–5,2 %, що відповідає національним стандартам точного висіву.

Подальші дослідження зосереджені на введенні спірального кута в конструкцію колеса. Song Xuefeng розробив спіральне колесо з ложкоподібним профілем, де коефіцієнт варіації не перевищував 9,3 %, а Wang Yubing підтвердив ефективність подвійного протилежного спірального колеса для різних типів добрив. Dun Guoqiang створив удосконалений шестеренчастий апарат зі зміщеними зубцями, що забезпечив рівномірність подачі з варіацією до 4,8 % і похибкою дозування 3,1 %.

Таблиця 1.4 – Основні параметри досліджень туковисівних апаратів з комірчастим колесом

Автори	Тип конструкції	Оптимальні параметри	Коефіцієнт варіації, %	Особливості
Bangura et al.	Спіральне колесо	–	< 10	Вища рівномірність порівняно з прямим колесом
Sugirbay et al.	Пін-роликовий дозатор	n = 55–90 об/хв	5–10	Зменшене забивання, стабільна робота

Автори	Тип конструкції	Оптимальні параметри	Коефіцієнт варіації, %	Особливості
Liang Yuchao et al.	Комірчасте колесо	$r = 27$ мм, 6 комірчок	91–95	Висока рівномірність подачі
Zhou Bin	Комірчасте колесо	$n = 34,5$ об/хв, $h = 36$ мм	8,7–10,6	Оптимізоване дозування калійних і комплексних добрив
Song Xuefeng et al.	Спіральне колесо (ложкоподібне)	$\alpha = 70^\circ$, $n = 21$ об/хв	$\leq 9,3$	Зменшення забивання, покращення точності
Dun Guoqiang et al.	Зміщені шестерні	3 пари зубців, $n = 60$ об/хв	$\leq 4,8$	Висока точність і стабільність дозування

Стан досліджень дискових туковисівних апаратів. Дискові туковисівні апарати працюють за принципом, коли частинки добрив із бункера потрапляють на диск із лопатями, який обертається з певною частотою. Під дією відцентрової сили добриво рівномірно розсіюється по поверхні ґрунту. Кількість внесеного добрива регулюють зміною швидкості обертання диска та висоти заслінки. Конструкція такого апарата включає розсіювальний диск із двома чи більше лопатями (рис. 1.3). Дискові системи застосовують переважно для гранульованих і порошкоподібних добрив, які мають добру сипкість і текучість. Вони характеризуються простою будовою, високою продуктивністю, рівномірним внесенням і низьким ризиком забивання, хоча можуть створювати підвищений опір руху добрив у процесі роботи.

Міжнародні дослідження спрямовані на вивчення впливу параметрів конструкції та режиму роботи (швидкість обертання, кут нахилу лопатей, кут викиду добрив) на рівномірність розподілу. Моделювання, стендові та польові експерименти дозволяють оптимізувати ці параметри для підвищення точності внесення.

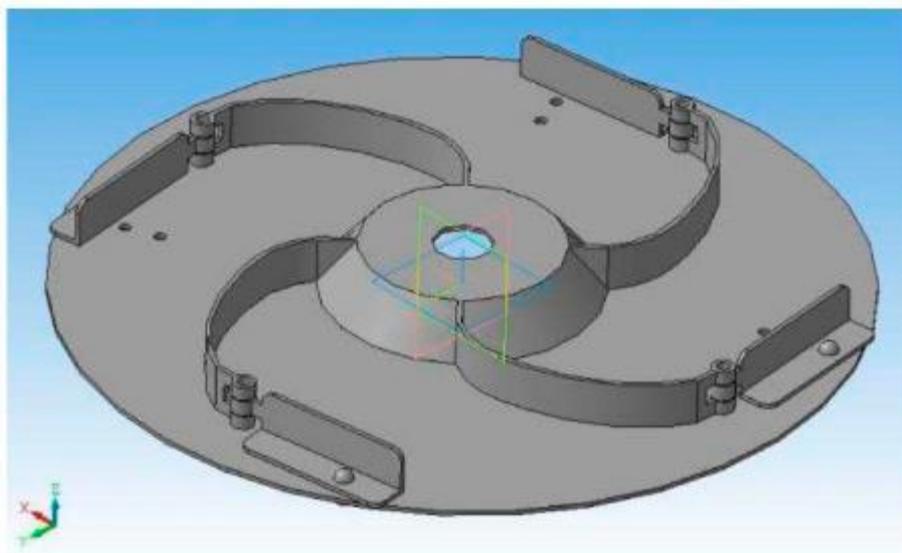


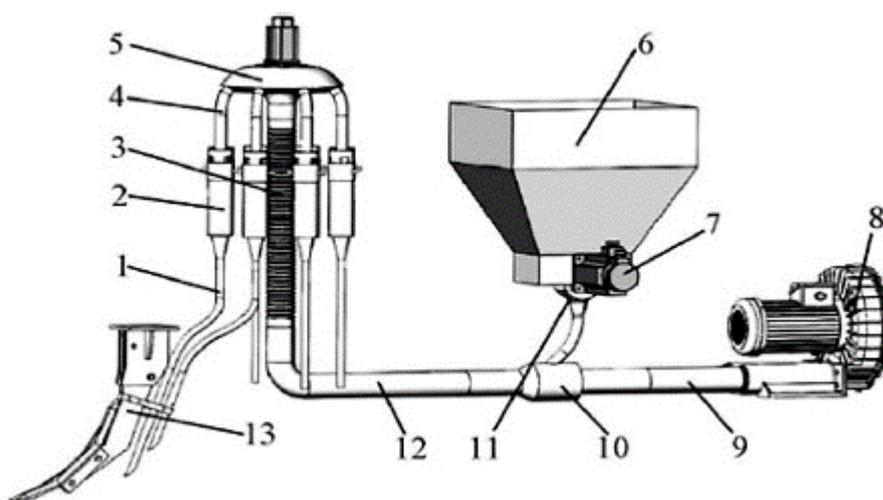
Рисунок 1.3 – Структурна схема дискового туковисівного апарата

Таблиця 1.5 – Основні результати досліджень дискових туковисівних апаратів

№	Автор(и)	Об'єкт дослідження	Основні результати
1	Przywara et al. [36]	Диск із різними кутами лопатей	Встановлено, що тип добрива, конфігурація лопатей і кутова швидкість визначають 91,7% варіації середнього радіуса розсіювання.
2	Bulgakov et al. [37]	Диск із нахиленою віссю	Збільшення частоти обертання з 600 до 800 об/хв підвищує дальність розсіювання з 10,5 до 24 м; кут нахилу 20° забезпечує найкращу рівномірність.
3	Sidneva et al. [38]	Диск зі спіральними лопатями	Покращено якість розподілу добрив у діапазоні швидкостей 4–16 км/год; оптимальний кут лопатей 0–20°.
4	Yang Liwei et al. [39]	Центробіжний дисковий апарат	Оптимальні параметри: висота розсіювання 68,8 см, кут подачі 60°, кут лопатей 29,6°; коефіцієнт варіації рівномірності – 9,95%.
5	Shang Wenhui et al. [40–41]	Боковий глибокорозкидний диск	Оптимальна швидкість 10–60 об/хв, довжина робочої зони 5–20 мм; варіація рівномірності 5,9–12,8%.
6	Fu Zuodong et al. [42]	Конічний диск із дворядним розкиданням	Найкращі результати при 8 лопатях, швидкості 15–45 об/хв і отворі 5–25 мм; варіація стабільності $\leq 3,9\%$.
7	Liu Xiaodong et al. [43–45]	Спірально-конічний центробіжний диск	Оптимальні параметри: нахил 30,4°, відхилення лопаті 3,2°, швидкість 130 об/хв; варіація стабільності $\leq 4,6\%$.

№	Автор(и)	Об'єкт дослідження	Основні результати
8	Song Shuaishuai et al. [46]	Диск зі спіральним живильником	Для садів бананів досягнуто 95,3% точності внесення; похибка моделювання $\leq 11\%$.
9	Cao Xin et al. [47–48]	Конічний диск із двобічною спіраллю	Оптимальні параметри: швидкість спіралі 5,3 об/хв, диска – 243,7 об/хв; коефіцієнт варіації рівномірності – 17,2%.

Стан досліджень пневматичних (повітряно-живильних) туковисівних апаратів. Пневматичні туковисівні апарати працюють за принципом механічної подачі добрив із подальшим транспортуванням їх потоком повітря високої швидкості. У змішувальній камері відбувається інтенсивне перемішування добрив з повітрям, після чого суміш рівномірно надходить у висівні трубопроводи. Така система забезпечує стабільний потік добрив, рівномірне змішування, високу продуктивність та спрощену конструкцію (рис. 1.4).



- 1 – труба подачі добрив; 2 – пристрій розділення повітря і добрив; 3 – гофрована труба; 4 – розподільний отвір; 5 – розподільник; 6 – бункер добрив;
 7 – електродвигун; 8 – вентилятор; 9 – повітропровід; 10 – змішувач повітря і добрив; 11 – механічний дозатор; 12 – подаюча труба;
 13 – сошник для глибокого внесення

Рисунок 1.4 – Структурна схема пневматичного туковисівного апарата

Сучасні дослідження у світі зосереджені на моделюванні пневмотранспортних систем із використанням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD), континуальної механіки та сполученого моделювання CFD–DEM, що дозволяє аналізувати рух частинок добрив у потоці повітря та оптимізувати конструкції апаратів для точного дозування.

Таблиця 1.6 – Основні результати досліджень пневматичних (повітряно-живильних) туковисівних апаратів

№	Автор(и)	Об'єкт дослідження	Основні результати
1	Konovalov et al. [50]	Пневмосівалка (MathCAD 8.0)	Розроблено лінійну математичну модель; відхилення швидкості повітря $\leq 14\%$, тиску $\leq 0,5\%$, похибка масового потоку – $1,15 \times 10^{-14} \%$.
2	Marcelo et al. [51]	Радіальні вентилятори (A1, B1)	CFD-моделювання при 4000 об/хв показало точність симуляції 95,7 %; середня похибка – 4,3 %.
3	Wang Lei et al. [52]	Повітряно-живильний розподільник добрив	Використано теорію Герца та CFD–DEM; купольний розподільник забезпечив найвищу стабільність, коефіцієнт варіації 6,35–7,52 %.
4	Jia Honglei et al. [53]	Центральний пневморозподільник для кукурудзи	Оптимальні параметри: кут випуску 45° , швидкість потоку 35 м/с, довжина гофри 568 мм; похибка внесення $\leq 2 \%$.
5	Xu Zheng et al. [54–55]	Повітророзподільний пристрій у системі подачі добрив	Оптимальний кут відкриття напрямної 48° ; варіація рівномірності 5,65 %; швидкість частинок карбаміду зросла на 93,6 %.

Отже, застосування CFD-DEM моделювання та теорії Герца дозволяє ефективно досліджувати й оптимізувати пневматичні системи подачі добрив. Параметри, такі як кут нахилу випускного отвору, швидкість повітряного потоку, довжина гофрованого шланга та кут відкриття напрямної, істотно впливають на рівномірність і точність дозування. Проведені дослідження забезпечують наукове

підґрунтя для подальшого вдосконалення конструкцій пневматичних туковисівних апаратів і підвищення ефективності внесення мінеральних добрив.

Отже, аналіз сучасних конструкцій дозувальних пристроїв для мінеральних добрив показує, що туковисівні апарати з комірчастим (гребінчастим) дозувальним колесом мають найкращі експлуатаційні характеристики. Завдяки простій та надійній конструкції, рівномірному заповненню комірок і стабільному висіву за різних режимів роботи, такі апарати забезпечують високу точність дозування, мінімальні втрати добрив і сталість подачі навіть при зміні гранулометричного складу матеріалу. Крім того, їхня енергетична ефективність і здатність до роботи з різними типами гранульованих добрив роблять комірчасті (гребінчасті) дозувальні системи найбільш перспективними для широкого застосування в сучасних агрегатах внесення мінеральних добрив.

1.4 Висновки з розділу

1. Раціональне внесення мінеральних добрив є одним із ключових чинників підвищення врожайності сільськогосподарських культур і збереження родючості ґрунтів. Дотримання нормативних вимог до якості добрив, умов їх зберігання, технічного стану обладнання та точності дозування забезпечує ефективне використання поживних речовин і мінімізує екологічні ризики. Оптимальні строки та способи внесення (суцільне, локальне, припосівне) мають визначатися на основі агрохімічного аналізу ґрунту і біологічних особливостей культур. Для досягнення високої рівномірності розподілу матеріалу, зниження втрат і підвищення енергоефективності процесу найдоцільніше застосовувати туковисівні апарати з комірчастим (гребінчастим) дозувальним колесом, які забезпечують стабільну подачу гранульованих добрив, точність дозування та простоту регулювання. Таким чином, впровадження технічно справних і конструктивно вдосконалених систем дозування є необхідною умовою для ефективного та екологічно безпечного внесення мінеральних добрив у сучасному агровиробництві.

2. Вибір способу внесення мінеральних добрив має вирішальне значення для забезпечення високої ефективності їх використання, підвищення врожайності культур та збереження родючості ґрунтів. Найдоцільнішими є комбіновані системи, що поєднують основне, припосівне та підживлювальне внесення, оскільки вони забезпечують збалансоване живлення рослин упродовж усього вегетаційного періоду. Серед технічних засобів для дозування добрив найвищу точність, рівномірність розподілу та стабільність подачі демонструють туковисівні апарати з комірчастим (гребінчастим) дозувальним колесом, які дозволяють ефективно реалізовувати як припосівне, так і локальне внесення. Застосування таких апаратів у поєднанні з оптимальними режимами роботи машин і дотриманням агротехнічних вимог сприяє зниженню втрат поживних речовин, підвищенню коефіцієнта їх засвоєння та забезпеченню екологічно безпечного внесення добрив у сучасному землеробстві.

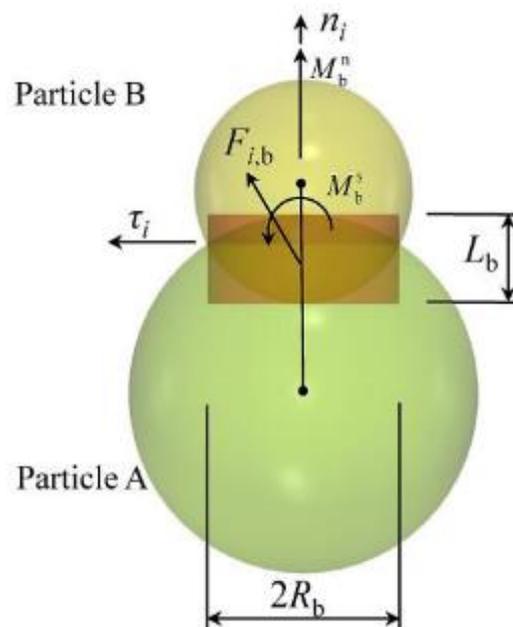
3. Аналіз сучасних конструкцій дозувальних пристроїв для мінеральних добрив показує, що туковисівні апарати з комірчастим (гребінчастим) дозувальним колесом мають найкращі експлуатаційні характеристики. Завдяки простій та надійній конструкції, рівномірному заповненню комірок і стабільному висіву за різних режимів роботи, такі апарати забезпечують високу точність дозування, мінімальні втрати добрив і сталість подачі навіть при зміні гранулометричного складу матеріалу. Крім того, їхня енергетична ефективність і здатність до роботи з різними типами гранульованих добрив роблять комірчасті (гребінчасті) дозувальні системи найбільш перспективними для широкого застосування в сучасних агрегатах внесення мінеральних добрив.

2 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДОЗУВАЛЬНОГО ПРИБОРУ ТУКОВИСІВНОГО АПАРАТА

2.1 Модель зв'язків у методі дискретних елементів (DEM)

Після того як Кандалл і Страк запропонували метод дискретних елементів (DEM) у 1979 році, його почали широко застосовувати в різних галузях промисловості. Цей алгоритм є ефективним чисельним методом моделювання, заснованим на концепції м'яких сфер, який дозволяє з високою точністю прогнозувати рух частинок порошоків і сипких матеріалів. Використання DEM значно поглибило розуміння закономірностей руху сипких мас у процесах сільськогосподарського виробництва.

Модель зв'язків зазвичай застосовується під час дослідження процесів руйнування матеріалів. На рисунку 2.1 подано схему зв'язкової моделі DEM.



$F_{i,b}$ – результуюча сила, з якою частинка А діє на частинку В; M_{nb} – нормальний і дотичний моменти відповідно; n_i , τ_i – нормальні та дотичні компоненти; L_b – перекриття частинок А і В; R_b – радіус зв'язку

Рисунок 2.1 – Схематичне зображення зв'язкової моделі DEM

Дві частинки з'єднані між собою у точці контакту. Характер зв'язку еквівалентний системі пружин, розміщених на площині перерізу частинок. Макромеханічні властивості такого контакту описуються мікросилами та моментами, що діють у точці контакту.

Під час моделювання сили, моменти, переміщення та швидкості між частинками обчислюються на основі другого закону Ньютона. Якщо зв'язок між частинками руйнується, то подальша взаємодія описується контактною моделлю Герца–Міндліна, а властивості зв'язку між частинками втрачаються.

Без урахування опору повітря основною зовнішньою силою, що діє на частинку, є сила тяжіння. Рівняння руху мають вигляд:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum (F_{ij}^n + F_{ij}^t) + G_i \quad (2.1)$$

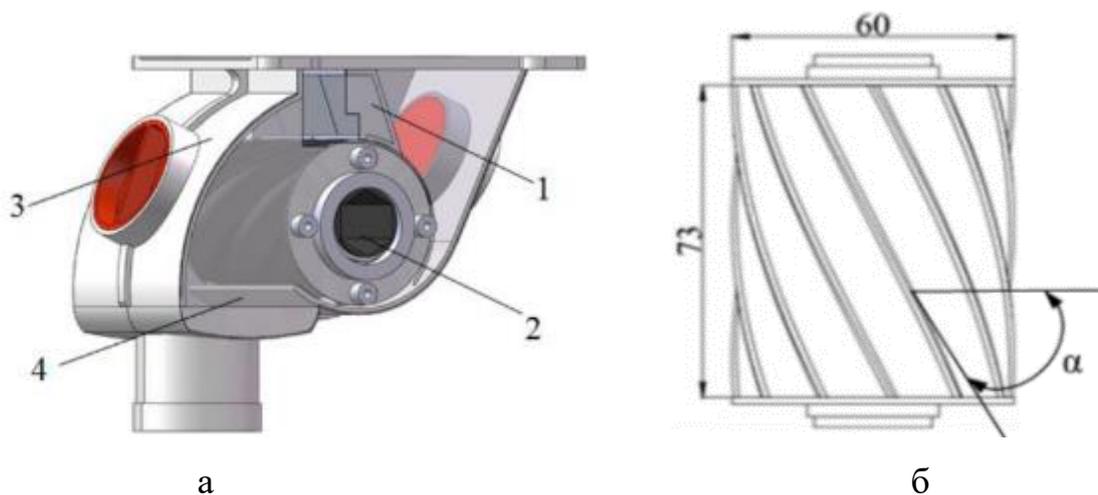
$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum (R_i \times F_{ij}^t - \tau_{ij}^r) \quad (2.2)$$

де v_i – лінійна швидкість частинки i , м/с; ω_i – кутова швидкість частинки i , рад/с; G_i – сила тяжіння, Н; I_i – момент інерції, кг·м²; F_{ij}^n – нормальна сила між частинками, Н; F_{ij}^t – дотична сила між частинками, Н; R_i – відстань від центра мас до точки контакту, мм; τ_{ij}^r – момент тертя кочення, Н·м.

2.2 Тривимірна модель спірального дозатора добрив

Конструкція спірального дозатора добрив складається з щіткового механізму, спірального робочого органу (GW), бункера для добрив та напрямного носика (рис. 2.2, а). Під час роботи електродвигун обертає спіральний орган, у пази якого потрапляють гранули добрива. Далі вони переміщуються до вихідного отвору (язичка), а потім через трубку надходять у ґрунт, завершуючи процес дозування.

У дослідженні використано спіральний робочий орган діаметром 60 мм, довжиною 73 мм, з кутом підйому спіралі α , який визначається як кут між дотичною до гвинтової лінії та площиною, перпендикулярною осі гвинта (рис. 2, б).



а – тривимірний модель дозатора добрив; б – спіральний робочий орган; 1 – жорстка щітка; 2 – спіральний робочий орган; 3 – бункер добрив; 4 – напрямний язичок

Рисунок 2.2 – Конструкційна схема спірального дозатора добрив

Кількість поданого добрива має вирішальне значення для росту рослин. Недостатня норма призводить до дефіциту поживних речовин, тоді як надлишок — до пригнічення сходів і «опіку» рослин. Кількість добрива q , поданого спіральним органом за один оберт, визначається виразом:

$$q = \pi d L \gamma \left(\frac{\alpha_0 f_q}{t} + \lambda \right) \quad (2.3)$$

де d – зовнішній діаметр спіралі, мм; L – ефективна довжина робочої частини, мм; γ – густина добрива, кг/м³; f_q – площа поперечного перерізу спірального пазу, мм²; t – крок спіралі, мм; α_0 – коефіцієнт заповнення спірального пазу; λ – коефіцієнт переміщення частинок поза пазом.

2.3 Геометрична модель блоку добрив

Мінеральні добрива – це важливий елемент для забезпечення високої врожайності сільськогосподарських культур. Незважаючи на те, що форма гранул різних видів добрив може дещо відрізнятися, здебільшого вони мають майже сферичну форму. У даному дослідженні як об'єкт обрано карбамід –

поширене азотне добриво з вираженими гігроскопічними властивостями, яке застосовується як основне або підживлювальне.

Зразки карбаміду були виміряні цифровим штангенциркулем (точність 0,01 мм). Для статистичної достовірності було відібрано 500 випадкових гранул, для яких визначено розміри за трьома осями – довжина, ширина та висота (рис. 3, а).

За отриманими даними обчислено еквівалентний діаметр D кожної гранули за формулою (2.4).

$$D = \sqrt[3]{LWT} \quad (2.4)$$

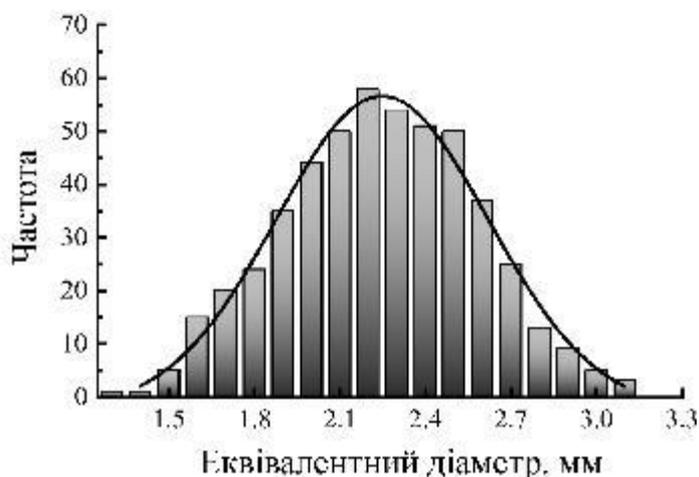
$$\varphi = \frac{D}{L} \quad (2.5)$$

де L, W, T – довжина, ширина та висота частинки, мм.

Побудовано гістограму розподілу діаметрів (рис. 3, б), де коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,98$, що свідчить про відповідність нормальному розподілу. Більшість частинок мають розміри, близькі до середнього значення.



а



б

Рисунок 2.3 – Процес вимірювання частинок добрив і розподіл їх еквівалентного діаметра

Отже, у моделюванні частинки добрив були спрощені до сферичної форми з однаковим еквівалентним діаметром. Середні значення виміряних розмірів становили: довжина – 2,314 мм, ширина – 2,172 мм, висота – 2,121 мм.

За формулою (2.4) визначено еквівалентний діаметр $D = 2,201$ мм, а за формулою (2.5) обчислено сферичність частинок $\phi = 95,12\%$, що підтверджує доцільність використання рівновеликих сфер у моделі.

На початкових етапах роботи дозатора гранули стикаються зі стінками, що викликає їхнє часткове руйнування на менші фрагменти. Тому під час моделювання основну увагу приділено поведінці дрібнодисперсних частинок, що утворюються внаслідок руйнування, а також оптимізації обчислювальних витрат.

Для цього у середовищі NX CAD побудовано кубічну модель блоку добрив розміром $16 \times 10 \times 8$ мм (довжина \times ширина \times висота), яку потім імпортовано до програмного пакета Simcenter Star-CCM+. За допомогою методу «дошового заповнення» модель блоку була заповнена 182 частинками діаметром 2.201 мм (рис. 2.4).

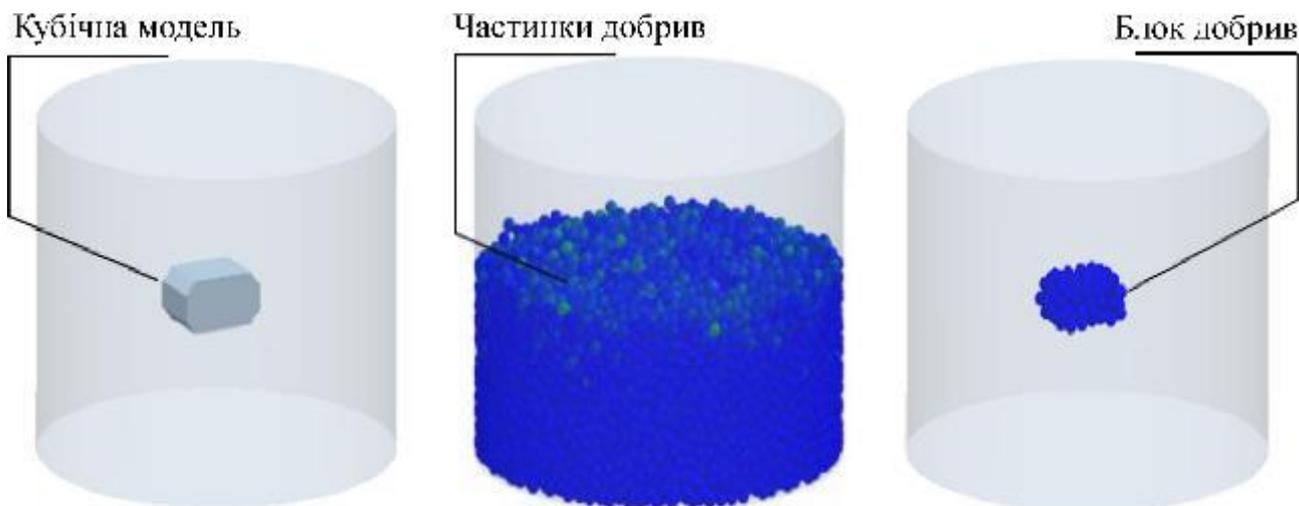


Рисунок 2.4 – Процес заповнення моделі блоку добрив частинками у середовищі Simcenter Star-CCM+

2.4 Калібрування параметрів моделі

Точність моделювання методом дискретних елементів (DEM) значною мірою залежить від правильності вибору фізико-механічних параметрів матеріалу. До таких параметрів належать коефіцієнт відновлення після удару, коефіцієнт тертя (статичного, динамічного і кочення), модуль пружності, модуль зсуву та

міцність зв'язку між частинками. Неправильне калібрування цих величин може призвести до суттєвих відхилень результатів від реального процесу.

Калібрування проводили шляхом поєднання експериментальних досліджень та чисельного підбору параметрів до узгодження з експериментальними результатами. У лабораторних умовах визначали такі властивості гранул сечовини: густину матеріалу – 1320 кг/м³; кут природного укусу – 29,8°; коефіцієнт відновлення після удару (між гранулами) – 0,45; коефіцієнт тертя гранула–гранула – 0,35; коефіцієнт тертя гранула–стінка – 0,40.

Для встановлення кута природного укусу експеримент проводили у спеціальній прозорій коробці, поступово висипаючи добриво через воронку та вимірюючи кут нахилу отриманого насипу. Отримані дані використовували як орієнтир для підбору параметрів у Simcenter Star-CCM+.

В моделі Simcenter Star-CCM+ параметри мікрорвзаємодії (модуль Юнга, коефіцієнти тертя, коефіцієнт відновлення) варіювали у межах, що забезпечують збіг моделювання з експериментально визначеним кутом укусу. Остаточні прийняті параметри наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні параметри, використані в моделі DEM

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці вимірювання
Густина частинок	γ	1320	кг/м ³
Модуль Юнга частинок	E_p	5.0×10^6	Па
Модуль Юнга стінки	E_w	1.0×10^7	Па
Коефіцієнт Пуассона	ν	0.25	–
Коефіцієнт відновлення (частинка–частинка)	e_{p-p}	0.45	–
Коефіцієнт відновлення (частинка–стінка)	e_{p-w}	0.40	–
Коефіцієнт тертя ковзання (частинка–частинка)	μ_{p-p}	0.35	–
Коефіцієнт тертя ковзання (частинка–стінка)	μ_{p-w}	0.40	–
Коефіцієнт тертя кочення	μ_r	0.01	–

Отримана комбінація параметрів забезпечила мінімальну похибку (менше 3%) між змодельованим і експериментальним значенням кута природного укусу. Таким чином, встановлені параметри можуть вважатися достовірними для подальших досліджень динаміки частинок сечовини у спіральному дозаторі добрив.

На даний момент не існує єдиної загальноприйнятої методики калібрування параметрів зв'язкової моделі. Згідно з науковими публікаціями, більшість дослідників застосовують феноменологічний підхід до калібрування параметрів. Суть цього методу полягає в тому, що, якщо результати чисельного експерименту мають однакові закономірності зміни зовнішніх характеристик із фізичним експериментом, а тренди механічних характеристик (наприклад, залежність «сила–час» або «сила–деформація») збігаються, то набір параметрів моделі вважають адекватним і здатним відтворювати реальні фізико-механічні властивості матеріалу.

У даному дослідженні калібрування параметрів зв'язкової моделі проводилося відповідно до стандарту ASAE S368.4 DEC2000 (R2008), який регламентує метод одновісного стискання сипких або гранульованих матеріалів.

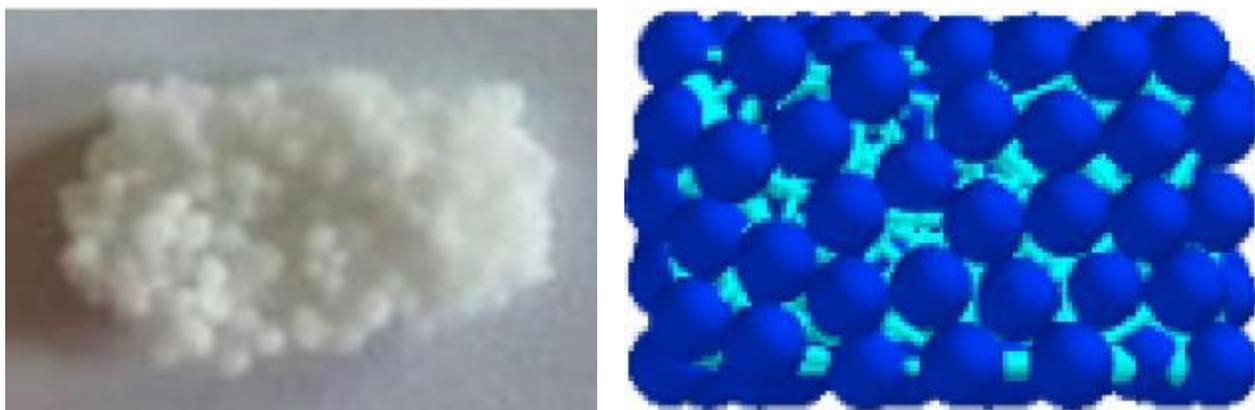
Зв'язкова модель DEM характеризується п'ятьма основними параметрами: коефіцієнтом нормальної жорсткості на одиницю площі; коефіцієнтом тангенціальної жорсткості на одиницю площі; критичною нормальною напругою розриву; критичною тангенціальною напругою розриву; радіусом зони зв'язку.

Комбінація цих параметрів визначає макроскопічну поведінку матеріалу під дією навантажень, зокрема його опір стисканню, деформаційні властивості та характер руйнування.

Для калібрування було відібрано зразки блоку добрив прямокутної форми розмірами $16 \times 10 \times 8$ мм (довжина \times ширина \times висота) з партії гранульованої сечовини, отриманої із природного насипу (рис. 2.5, а). Випробування проводили на текстурному аналізаторі із точністю вимірювання

сили 0,1 г. Зразок стискали у напрямку висоти з постійною швидкістю переміщення індентора 5 мм/хв, автоматично реєструючи зміну сили та часу. Експерименти виконували при температурі 25 °С і відносній вологості 48%.

Після проведення фізичних випробувань у середовищі Simcenter Star-CCM+ було побудовано чисельну модель блоку добрив із урахуванням зв'язків між частинками (рис. 2.5, б). Під час моделювання виконували віртуальне одновісне стискання, спостерігаючи за процесом руйнування частинок і реєструючи зміну сили у функції часу. Калібрування параметрів зв'язків проводили до досягнення відповідності між експериментальною та змодельованою кривими навантаження.



а

б

Рисунок 2.5 – Матеріал блоку добрива (а) та модель зчеплення (б)

Результати порівняння експериментальної та розрахункової залежностей сили від часу наведено на рисунку 2.6. Як видно з графіка, форма й характер обох кривих майже збігаються, а різниця між експериментальними та змодельованими даними не перевищує 5%. Це свідчить про високу точність калібрування і адекватність використаних параметрів зв'язкової моделі для опису механічних властивостей блоку добрив.

Після калібрування було отримано такі значення параметрів bond model (табл. 2.1), що забезпечують збіг експериментальної та чисельної кривих руйнування. Отримані параметри забезпечують адекватне відтворення процесу

деформації та руйнування блоку добрив при навантаженні, що підтверджується співставленням результатів моделювання та фізичних випробувань. Таким чином, калібрована зв'язкова модель може бути використана для подальшого аналізу процесу подрібнення гранул у спіральному дозаторі та для оцінки впливу конструктивно-технологічних параметрів на інтенсивність руйнування добрив.

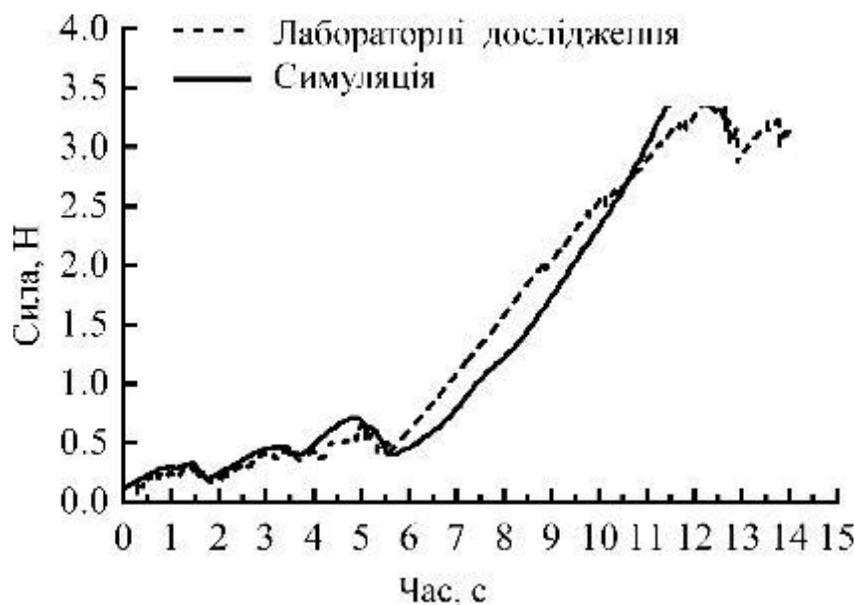


Рисунок 2.6 – Порівняння експериментальної та змодельованої залежностей «сила – час» при одновісному стисканні блоку добрив

2.5 Налаштування параметрів моделювання та методика аналізу

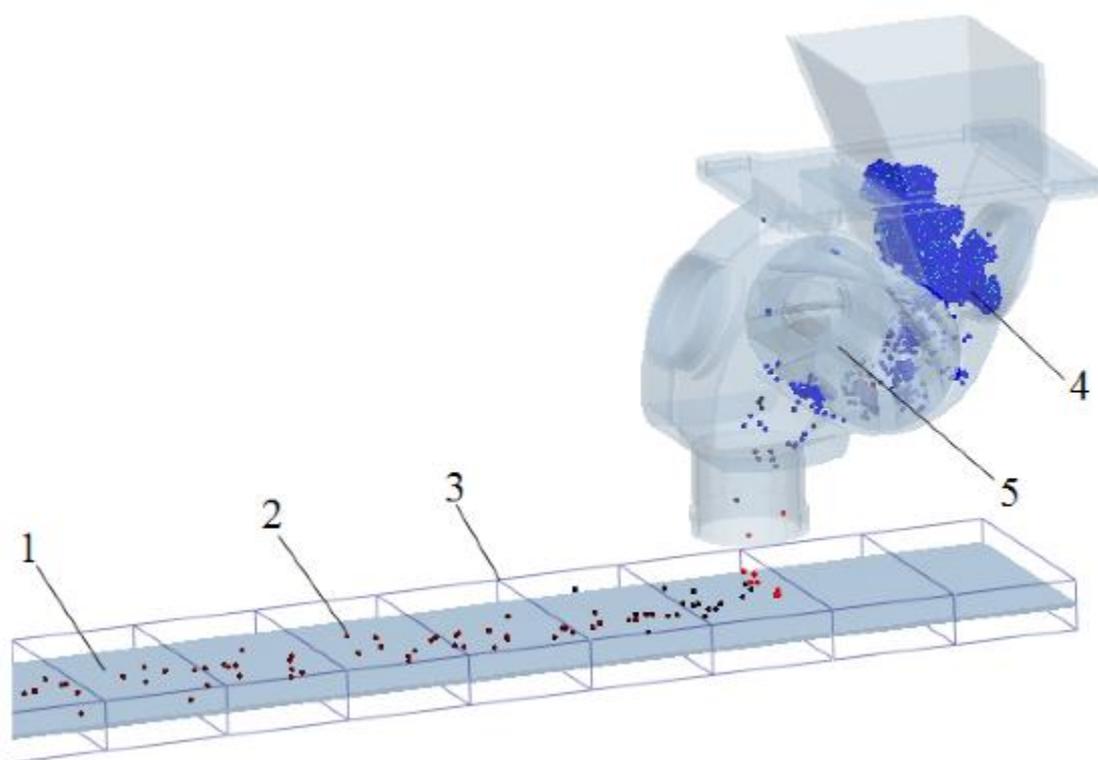
У даному дослідженні розсіювач добрив і його основні елементи виготовлені з біорозкладного полілактиду (PLA). На основі даних із літературних джерел визначено механічні параметри контактної взаємодії між гранулами карбаміду, матеріалом PLA та поверхнею ґрунту, наведені в таблиці 2.2.

У моделюванні прийнято такі значення параметрів: коефіцієнт Пуассона для частинок добрив – 0,25, для PLA – 0,43; модуль пружності частинок добрив

– $8,55 \times 10^7$ Па, для PLA – $1,3 \times 10^9$ Па; густина частинок добрив – 1320 кг/м³, густина PLA – 1240 кг/м³.

Таблиця 2.2 – Параметри контактної взаємодії матеріалів

Параметри контакту	Добриво– Добриво	Добриво– PLA	Добриво– Ґрунт
Коефіцієнт відновлення (ударної пружності)	0,11	0,41	0,02
Коефіцієнт статичного тертя	0,37	0,32	1,25
Коефіцієнт кочення (тертя кочення)	0,16	0,18	1,24



1 – ґрунт; 2 – частинки добрив; 3 – статистичні зони; 4 – блок добрива; 5 – шнековий робочий орган (GW)

Рисунок 2.2 – Схема моделювання робочого процесу апарата для внесення добрив

Швидкість обертання шнекового робочого органу (GW) встановлювалася відповідно до даних експериментального плану, а часовий крок інтегрування становив 2×10^{-6} с; загальна тривалість моделювання – 10 с.

Для підвищення швидкості розрахунку та зменшення обсягу даних моделювання, у симуляції розсіювач генерував 20 блоків добрива.

Відповідно до принципу відносного руху тіл, у моделюванні швидкість руху ґрунтової поверхні встановлювалася 0,75 м/с, тоді як сам розсіювач залишався нерухомим. Рух траєкторії частинок під час падіння не враховувався, тому висоту нижнього краю розсіювача над поверхнею ґрунту прийнято 30 мм.

Поверхня ґрунту мала розміри 400 мм у ширину та 2 м у довжину. Для подальшої обробки результатів після моделювання кожні 200 мм уздовж напрямку руху створювалася зона статистичного збору даних.

Для оцінювання рівномірності подачі добрив і ступеня їх подрібнення в роботі застосовано два показники:

- коефіцієнт варіації рівномірності подачі добрив,
- ступінь руйнування блоку добрива (відсоток розриву зв'язків між частинками).

Ці критерії використовуються відповідно до вимог Технічних умов на оцінку якості машин для внесення добрив (NY/T 1003-2006) і дозволяють кількісно оцінити роботу шнекового розсіювача при різних конструктивних параметрах.

Коефіцієнт варіації рівномірності подачі добрив характеризує відхилення маси добрив у рівновіддалених зонах по довжині робочої ділянки та є показником стабільності роботи дозувального пристрою. Якщо прийняти, що існує n статистичних зон, у кожній з яких загальна маса добрив становить m_i , то коефіцієнт варіації σ розраховується за формулами:

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum m_i \quad (2.6)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \bar{m})^2}{n - 1}} \quad (2.7)$$

$$\sigma = \frac{S}{\bar{m}} \times 100\% \quad (2.8)$$

де m – середня маса добрив у кожному інтервалі, г; m_i – маса добрив у i -й зоні, г; n – кількість статистичних зон (у цьому дослідженні $n = 40$); S –

середньоквадратичне відхилення маси добрив, г; σ – коефіцієнт варіації рівномірності подачі, %.

Ступінь руйнування блоку добрива є показником, що характеризує ефективність подрібнення. Якщо цей показник високий – блок добрива руйнується повністю; якщо низький – залишається значна кількість нероздроблених частин. Ступінь руйнування ϵ визначається за формулою:

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum m_i \quad (2.9)$$

де M – загальна маса блоку добрива, г; m – сумарна маса окремих частинок після руйнування, г.

Отримані показники дозволяють кількісно оцінити вплив геометричних і кінематичних параметрів шнекового розсіювача на якість дозування та ступінь подрібнення гранул, а також оптимізувати конструкцію для забезпечення рівномірного внесення добрив у польових умовах.

2.6 Результати чисельного моделювання

На рисунку 2.3 наведено результати моделювання процесу роботи спірального добриворозподільного пристрою у різні моменти часу. Коли $t = 0,12$ с, у розрахунковій області утворюються частинки блоку добрива, які починають падати зі швидкістю 0,6 м/с (рисунок 2.3, а). При $t = 3,15$ с блок добрива повністю контактує зі стінками бункера та спіральним колесом (GW) (рисунок 2.3, б) і поступово починає руйнуватися. Коли $t = 6,7$ с, блок добрива захоплюється обертанням спірального колеса і зазнає інтенсивного подрібнення внаслідок стискання; кількість розірваних зчеплень між частинками різко зростає (рисунок 2.3, в). При $t = 10,0$ с більшість блоків добрива вже зруйновані, і окремі частинки добрива під дією спіралі виходять через випускний канал (рисунок 2.3, г).

У межах дослідження було проведено багатофакторні та багаторівневі чисельні експерименти шляхом зміни робочих і конструктивних параметрів спірального колеса відповідно до схеми планування експерименту.

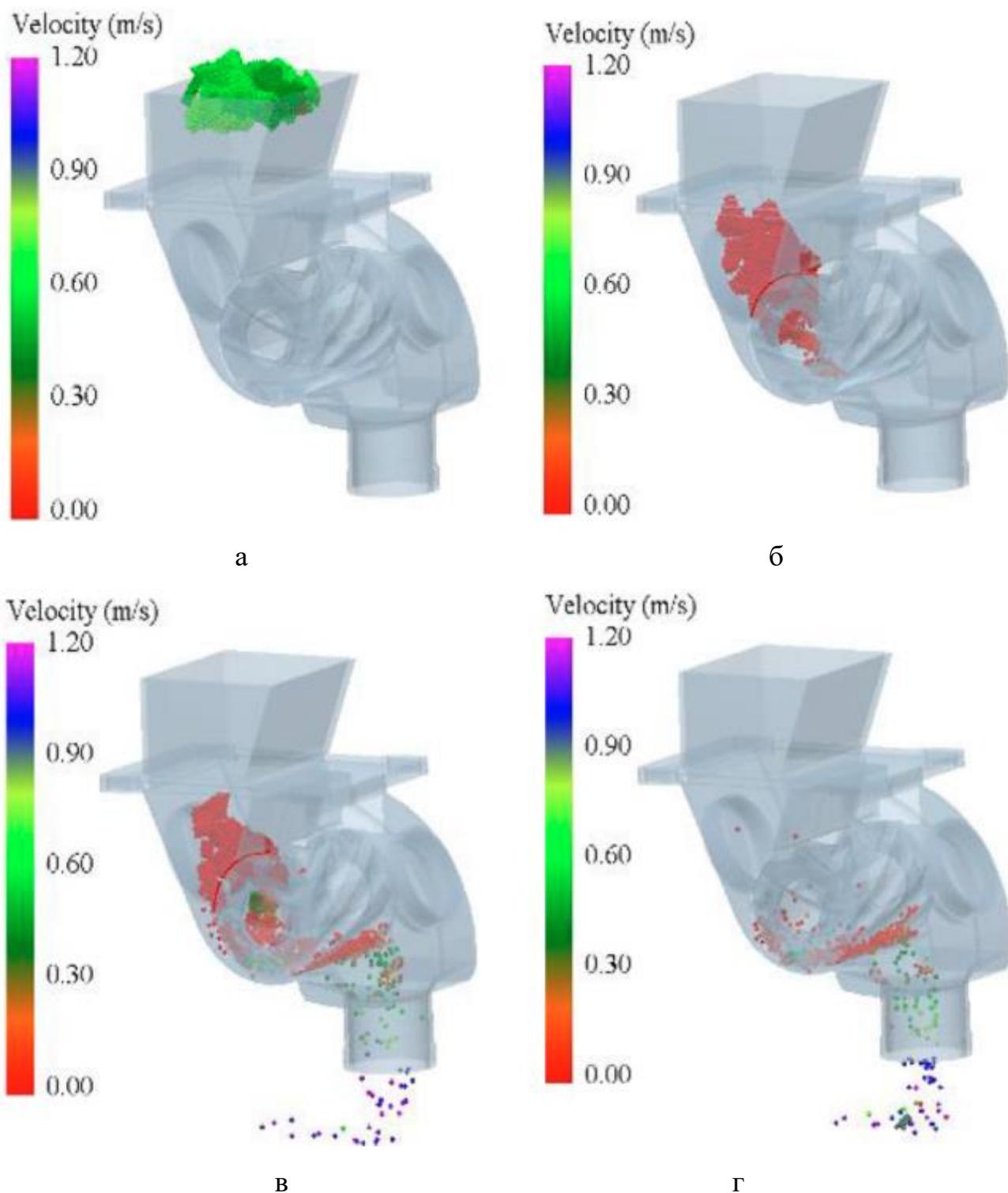


Рисунок 2.3 – Процес руйнування блоків добрива в ході моделювання

2.7 Висновки з розділу

У результаті проведеного дослідження розроблено комплексну методику чисельного моделювання процесу подачі та руйнування гранульованих добрив у спіральному дозаторі з використанням методу дискретних елементів (DEM).

1. Обґрунтовано вибір DEM як основного інструменту для аналізу руху частинок сипких матеріалів. Використання моделі зв'язків дозволило врахувати як механічну взаємодію між окремими гранулами, так і процес їхнього руйнування при навантаженні, що забезпечує адекватне відтворення реального фізичного процесу в дозаторі.

2. Побудовано тривимірну геометричну модель спірального дозатора добрив, яка враховує основні конструктивні елементи (спіральний робочий орган, щітковий механізм, бункер і напрямний канал) та дозволяє дослідити динаміку руху гранул і блоків добрив під час транспортування та дозування.

3. Виконано статистичний аналіз розмірів гранул карбаміду та визначено їх еквівалентний діаметр (2,201 мм) і сферичність (95,12%), що обґрунтовує доцільність спрощення частинок до рівновеликих сфер у моделі. Це дало змогу зменшити обчислювальні витрати при збереженні високої точності розрахунків.

4. Проведено калібрування фізико-механічних параметрів моделі шляхом порівняння результатів фізичного експерименту з чисельним моделюванням. Отримано комбінацію параметрів (модуль Юнга, коефіцієнти тертя, жорсткість і міцність зв'язків), яка забезпечила розбіжність не більше 5% між експериментальною та розрахунковою кривими «сила–час», що підтверджує достовірність обраних значень.

5. Розроблено та реалізовано модель контактної взаємодії матеріалів (добриво–добриво, добриво–PLA, добриво–грунт), у якій визначено коефіцієнти тертя, відновлення та кочення, що дозволило адекватно описати процеси переміщення, прилипання й подрібнення частинок під час роботи дозатора.

6. У результаті чисельного експерименту встановлено закономірності процесу руйнування блоків добрив:

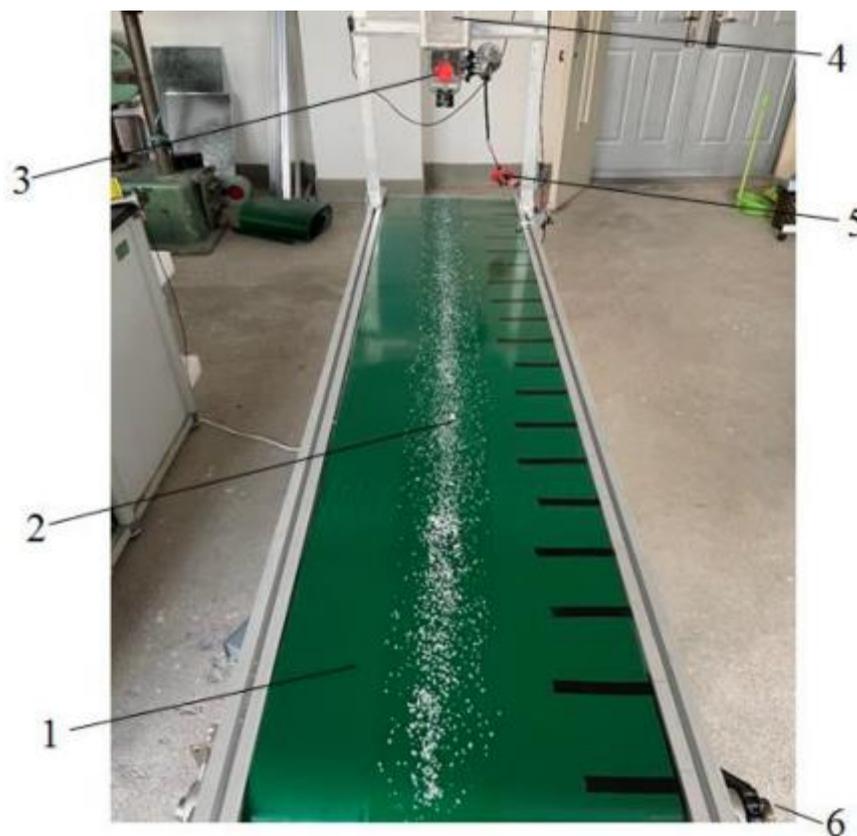
- на початковій стадії ($t = 0,12-3,15$ с) відбувається формування контакту частинок зі стінками бункера та спіраллю;
- у проміжній фазі ($t = 6,7$ с) спостерігається активне руйнування й різке збільшення кількості зруйнованих зв'язків;
- на завершальній стадії ($t = 10,0$ с) відбувається повне подрібнення блоків і рівномірне виведення гранул через випускний канал.

7. Запропоновано методику оцінювання ефективності роботи дозатора за допомогою двох показників: коефіцієнта варіації рівномірності подачі добрив та ступеня руйнування блоку добрива. Це дозволяє кількісно оцінювати стабільність подачі й інтенсивність подрібнення матеріалу при різних конструктивно-технологічних параметрах.

3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДОЗУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ТУКОВИСІВНОГО АПАРАТА

3.1 Стенд для проведення експериментальних досліджень

Експериментальна установка являє собою стенд для дослідження процесу дозованого вивантаження мінеральних добрив, створений на базі розробленої конструкції (рис. 3.1). Основне призначення стенду – відтворення в лабораторних умовах реального процесу подачі сипких матеріалів гвинтовим дозатором на рухому стрічку транспортера з можливістю регулювання та контролю основних параметрів подачі.



- 1 – транспортер; 2 – добрива; 3 – SGWFD; 4 – бункер добрив;
5 – регулятор швидкості обертання гвинтового механізму;
6 – приводний двигун транспортера

Рисунок 3.1 – Верифікація експериментального стенду

Конструкція стенду включає такі основні вузли: гвинтовий робочий орган (GW) для дозованої подачі добрив із бункера, ємність-бункер для сипкого матеріалу, електродвигун приводу GW, регулятор частоти обертання гвинта, датчик відстеження обертів TCRT500, мікроконтролер Arduino UNO R3, стрічковий транспортер, широтно-імпульсний регулятор (PWM) та систему керування швидкістю руху транспортера.

Для зручності проведення експериментів окремі елементи стенду розміщені на металевій рамі, що забезпечує жорсткість, стійкість і можливість швидкої заміни окремих компонентів.

Під час роботи стенду сипкий матеріал із бункера рівномірно подається гвинтовим дозатором на поверхню транспортера. Швидкість руху стрічки визначається за допомогою оптичного датчика TCRT500, який формує сигнал, пропорційний частоті обертання веденого вала. Отриманий сигнал передається до PWM-регулятора, що керує приводним двигуном транспортера та забезпечує синхронізацію швидкості руху стрічки з частотою обертання дозатора добрив. Така схема керування дозволяє досягти стабільного дозування навіть при зміні навантаження або властивостей сипкого матеріалу.

Робочий орган дозатора виконаний у вигляді гвинта зі шнековими лопатями ковшоподібного профілю з кутом підйому спіралі 70° . Для виготовлення гвинта застосовано технологію 3D-друку, що забезпечує високу точність геометрії, повторюваність параметрів і можливість швидкої модифікації конструкції при оптимізації форми лопатей (рис. 3.2).

У процесі дослідження як сипкий матеріал використовували гранули сечовини, які є типовими для механізмів розподілу азотних добрив. Такий вибір обумовлений стабільною формою та розміром частинок, що дозволяє забезпечити відтворюваність експериментальних результатів і коректне порівняння з результатами чисельного моделювання зв'язкової моделі.



Рисунок 3.2 – Робочий орган дозатора

Щоб запобігти відскоку частинок добрив після їхнього падіння на поверхню транспортера, робочу стрічку попередньо покривали тонким шаром мийного засобу, який зменшує коефіцієнт пружного відскоку і сприяє рівномірнішому розподілу гранул.

3.2 Методика проведення експериментальних досліджень

Проведення експериментальних досліджень здійснювалося з метою визначення впливу конструктивно-технологічних параметрів спірального гвинтового робочого органа на рівномірність подачі гранульованих добрив і ступінь руйнування їхніх зчеплень під час транспортування.

Перед початком кожного дослідження проводили підготовку стенду. Відстань між вихідним отвором дозатора та поверхнею транспортера встановлювали на рівні 30 мм, що забезпечувало оптимальні умови для рівномірного розподілу частинок добрив по ширині стрічки та запобігало надмірному розсіюванню гранул у повітрі. Після монтажу та перевірки працездатності системи керування стенд запускали в холостому режимі тривалістю 30 с для стабілізації роботи

привідних механізмів, синхронізації частоти обертання дозатора з рухом стрічки транспортера та усунення інерційних коливань у системі.

Після досягнення усталеного режиму роботи швидкість руху стрічки регулювали до 0,75 м/с, а частоту обертання гвинтового дозатора – до 21 об/хв. Після цього у бункер завантажували попередньо сформовані блоки гранульованих добрив і розпочинали відлік часу. Тривалість одного експериментального циклу становила 10 с, що забезпечувало достатній обсяг даних для оцінювання рівномірності подачі та руйнування зв'язків між гранулами.

Конструктивні параметри транспортера складали: довжина стрічки – 2 м, ширина – 0,4 м. Для визначення просторової рівномірності розподілу добрив поверхню транспортера умовно поділяли на 10 вимірювальних зон по 20 мм кожна, що дозволяло виконувати поелементний аналіз маси добрив, які потрапили у відповідну ділянку.

Кожен експериментальний варіант проводили триразово для підвищення достовірності отриманих результатів, після чого обчислювали середні значення параметрів. Для кількісної оцінки ефективності процесу застосовували такі показники:

- коефіцієнт варіації рівномірності подачі добрив, який характеризує ступінь однорідності потоку матеріалу;
- ступінь руйнування зв'язків у блоці гранул, що свідчить про ефективність механічної дії спірального робочого органа.

Обидва показники визначали за допомогою розрахункових залежностей (2.8) і (2.9).

Для планування експерименту було використано метод Бокса–Бенкена, який дозволяє мінімізувати кількість дослідів при одночасному забезпеченні можливості побудови адекватної регресійної моделі другого порядку. Цей підхід є оптимальним для досліджень із трьома змінними факторами та дозволяє визначити як індивідуальний, так і комбінований вплив кожного з них на результати процесу.

У даному дослідженні, з урахуванням принципу роботи спірального добриворозподільного пристрою (SGWFD), як фактори експерименту були обрані:

- X_1 – швидкість обертання спірального колеса, об/хв;
- X_2 – форма його поперечного перерізу;
- X_3 – кут підйому спіралі, градусів.

Як показники відгуку приймалися:

- Y_1 – коефіцієнт варіації рівномірності висіву добрив;
- Y_2 – ступінь руйнування зчеплень частинок добрива.

Отримані параметри та кодування факторів наведено в таблиці 3.1.

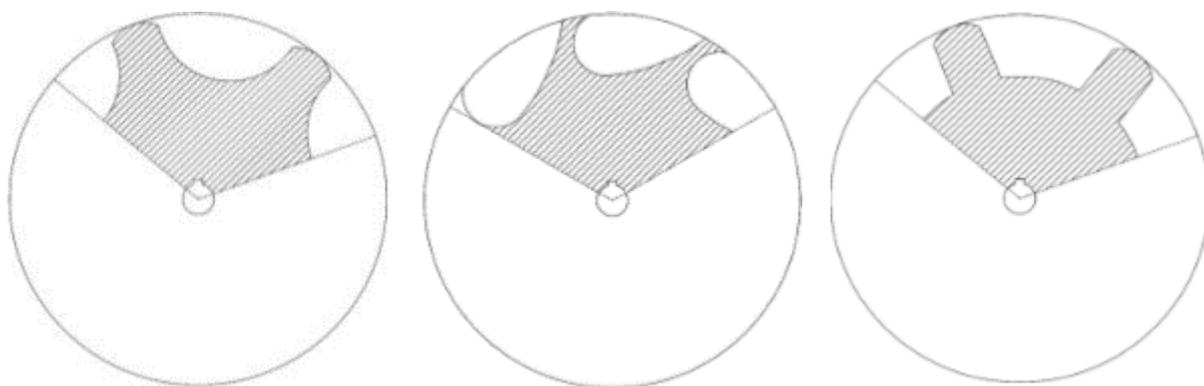


Рисунок 3.3 – Форма поперечного перерізу спірального колеса подачі добрив

Таблиця 3.1 – Кодування факторів експерименту

Кодування		Фактор	
X_1 (об/хв)		Швидкість GW	
X_2		Форма перерізу GW	
X_3 (°)		Кут спіралі	
Кодовий рівень	X_1	X_2	X_3
-1	15	Аркова	60°
0	20	Ложкоподібна	65°
1	25	Трапецієподібна	70°

Діапазони варіювання факторів було визначено на основі попередніх теоретичних досліджень та результатів чисельного моделювання потоку

частинок у дозаторі. Зокрема, швидкість обертання спірального колеса змінювалася в межах 15–25 об/хв, форма поперечного перерізу спіралі реалізовувалася у трьох варіантах: дугоподібна, ковшоподібна та трапецієподібна (рис. 3.3), а кут підйому спіралі варіювався від 60° до 70°.

3.3 Методика статистичної обробки даних

Статистичну обробку результатів експериментів проводили для визначення достовірності отриманих залежностей та побудови адекватних математичних моделей процесу подачі добрив. Для цього застосовували регресійний аналіз, t-критерій Стьюдента, F-критерій Фішера та методи оптимізації в середовищі Wolfram Cloud.

На початковому етапі здійснювали попередню підготовку даних: усереднювання трьох паралельних вимірювань, розрахунок середніх значень показників відгуку, оцінку дисперсії повторюваності та перевірку відсутності викидів. Далі проводили **регресійний аналіз** для отримання рівнянь другого порядку, що описують вплив факторів (X_1 , X_2 , X_3) на показники (Y_1) (коефіцієнт варіації рівномірності подачі) та (Y_2) (ступінь руйнування зв'язків у блоці добрив).

Аналітична форма рівняння регресії мала вигляд:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2, \quad (3.1)$$

де b_i – коефіцієнти регресії, які визначали методом найменших квадратів.

Метод найменших квадратів передбачає мінімізацію суми квадратів відхилень експериментальних значень від розрахованих:

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (3.2)$$

де Y_i – експериментальне значення, \hat{Y}_i – розраховане за моделлю. Мінімізація цієї суми дає систему нормальних рівнянь для визначення коефіцієнтів b_i , яку розв'язували у Wolfram Cloud за допомогою функцій `LinearModelFit[]` або `Fit[]`.

Після визначення коефіцієнтів здійснювали оцінку їх статистичної значущості за t-критерієм Стьюдента, який обчислювали за формулою:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{b_i}}, \quad (3.3)$$

де S_{b_i} – стандартна похибка коефіцієнта b_i , що визначається як:

$$S_{b_i} = S_y \sqrt{(X^T X)^{-1}_{ii}}, \quad (3.4)$$

а S_y – середньоквадратичне відхилення залишків моделі:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N - k}}, \quad (3.5)$$

де N – кількість експериментів, k – кількість коефіцієнтів у рівнянні.

Розраховані значення t_i порівнювали з табличним критичним значенням $t_{кр}$ при рівні значущості $\alpha = 0,05$ і ступенях вільності $f = N - k$. Якщо $|t_i| > t_{кр}$, коефіцієнт вважали статистично значущим. Нестатистично значущі члени видаляли з моделі, що забезпечувало її спрощення.

Після уточнення рівняння проводили перевірку адекватності моделі за F-критерієм Фішера. Розрахункове значення критерію визначали як:

$$F_{розр} = \frac{S_{ад}}{S_{відтв}}, \quad (3.6)$$

де $S_{ад}$ – дисперсія адекватності, $S_{відтв}$ – дисперсія відтворюваності (всередині повторів).

Дисперсію адекватності обчислювали за формулою:

$$S_{ад} = \frac{n}{N - k} \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2, \quad (3.7)$$

де n – кількість повторів досліду, \bar{Y} – середнє експериментальне значення.

Дисперсія відтворюваності:

$$S_{\text{відтв}} = \frac{\sum \sum (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{N(n-1)}. \quad (3.8)$$

Порівняння $F_{\text{розр}}$ із табличним $F_{\text{кр}}$ при рівні значущості $\alpha = 0,05$ давало змогу зробити висновок про адекватність моделі: якщо $F_{\text{розр}} < F_{\text{кр}}$, то модель адекватна експериментальним даним.

На наступному етапі результати регресійного аналізу використовували для побудови поверхонь відгуку та контурних графіків у середовищі Wolfram Cloud за допомогою функцій `Plot3D[]`, `ContourPlot[]` та `Manipulate[]`. Це дозволяло візуалізувати взаємозв'язки між двома факторами при фіксованому третьому та визначити області оптимальних режимів роботи пристрою.

Оптимізацію проводили за одним або двома критеріями. Для однокритеріальної задачі (наприклад, мінімізації коефіцієнта варіації Y_1) використовували функцію:

$$\text{FindMinimum}[Y_1(X_1, X_2, X_3), \{X_1, X_2, X_3\}], \quad (3.9)$$

а для двокритеріальної оптимізації (мінімізація Y_1 і максимізація Y_2) застосовували метод вагових коефіцієнтів, формуючи узагальнену цільову функцію:

$$F = w_1 \cdot \frac{Y_{1\min}}{Y_1} + w_2 \cdot \frac{Y_2}{Y_{2\max}}, \quad (3.10)$$

де w_1 і w_2 – ваги критеріїв, що визначають їхню відносну важливість.

Таким чином, реалізація статистичної обробки у Wolfram Cloud забезпечила комплексний підхід: від обчислення коефіцієнтів регресії та їх перевірки за критеріями Стьюдента і Фішера – до візуалізації результатів і визначення оптимальних параметрів процесу. Це дозволило отримати достовірні рівняння регресії, підтвердити адекватність моделі та обґрунтувати оптимальні режими роботи спірального добриворозподільного пристрою.

3.4 Висновки з розділу

1. Розроблено методику експериментальних досліджень спірального гвинтового дозувального пристрою, спрямовану на визначення впливу

конструктивно-технологічних параметрів на рівномірність подачі гранульованих добрив і ступінь руйнування міжчастинкових зв'язків.

2. Описано конструкцію експериментального стенду, який забезпечує відтворення реальних умов роботи дозатора завдяки регулюванню швидкості обертання гвинта, руху транспортера та синхронізації системи керування на базі Arduino UNO R3. Робочий орган виготовлено методом 3D-друку, що дозволило дослідити різні форми поперечного перерізу спіралі.

3. Планування експерименту за методом Бокса–Бенкена дало змогу мінімізувати кількість дослідів і побудувати адекватну регресійну модель. Статистичну обробку результатів виконано в Wolfram Cloud із використанням регресійного аналізу, t-критерію Стьюдента для оцінки значущості коефіцієнтів і F-критерію Фішера для перевірки адекватності моделі. Критерії розраховували за співвідношеннями $|t_i| > t_{кр}$ – для значущості коефіцієнтів, $F_{розр} < F_{кр}$ – для адекватності моделі.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Побудова та перевірка регресійної моделі

Відповідно до визначених факторів експерименту, комбінація їхніх рівнів утворює 17 груп дослідів, що забезпечує можливість повного виявлення впливу основних і квадратичних факторів, а також їхніх парних взаємодій. Кожен дослід проводився за однакових умов, а вимірювання параметрів здійснювалися з високою точністю для мінімізації похибок. Статистичні результати експериментальних даних наведено в таблиці 4.1, де X_1 , X_2 і X_3 — це закодовані значення факторів експерименту (швидкість обертання спірального колеса, форма його поперечного перерізу та кут підйому спіралі відповідно), а Y_1 і Y_2 — показники відгуку, що характеризують коефіцієнт варіації рівномірності подачі добрив і ступінь руйнування зв'язків між гранулами.

Таблиця 4.1 – Статистичні дані експерименту за методом поверхні відгуку

№	X_1	X_2	X_3	$Y_1, \%$	$Y_2, \%$
1	1,0	-1,0	0,0	9,58	96,48
2	-1,0	0,0	-1,0	11,15	94,49
3	-1,0	-1,0	0,0	12,52	96,83
4	0,0	1,0	1,0	9,46	96,85
5	-1,0	0,0	1,0	13,12	97,55
6	0,0	0,0	0,0	8,34	96,27
7	0,0	0,0	0,0	8,04	96,56
8	-1,0	1,0	0,0	12,91	95,65
9	1,0	0,0	-1,0	9,93	94,32
10	1,0	1,0	0,0	10,78	95,27
11	0,0	1,0	-1,0	9,38	94,25
12	0,0	0,0	0,0	8,11	96,38
13	0,0	0,0	0,0	7,87	96,56
14	1,0	0,0	1,0	9,81	96,45
15	0,0	0,0	0,0	8,19	96,54
16	0,0	-1,0	1,0	9,13	97,95
17	0,0	-1,0	-1,0	8,59	94,63

Обробку, перевірку адекватності та побудову регресійних рівнянь виконано за допомогою програмного пакета Wolfram Cloud, який забезпечує проведення регресійного аналізу, обчислення критеріїв Стюдента та Фішера, побудову поверхонь відгуку і визначення оптимальних поєднань факторів. Отримані експериментальні дані були апроксимовані квадратичною моделлю, що враховує як основні ефекти факторів, так і їхні взаємодії та квадратичні члени.

Результати дисперсійного аналізу показали, що для моделі коефіцієнта варіації рівномірності подачі добрив (Y_1) значення $p < 0.0001$, що свідчить про високу статистичну значущість моделі. Водночас відсутність значущої невідповідності ($p > 0.05$) підтверджує адекватність побудованого рівняння регресії. Це означає, що модель достовірно описує взаємозв'язок між досліджуваними факторами і може бути використана для прогнозування рівномірності подачі добрив у реальних умовах роботи дозатора.

$$Y_1 = 8.10 - 1.20X_1 + 0.34X_2 + 0.31X_3 + 2.60X_1^2 + 0.74X_2^2 + 0.29X_3^2 + 0.21X_1X_2 - 0.52X_1X_3 - 0.12X_2X_3 \quad (4.1)$$

$$Y_2 = 96.46 - 0.25X_1 - 0.49X_2 + 1.39X_3 - 0.32X_1^2 - 0.095X_2^2 - 0.44X_3^2 - 0.0075X_1X_2 - 0.23X_1X_3 - 0.18X_2 \quad (4.2)$$

Аналіз коефіцієнтів рівняння показав, що найбільший вплив на Y_1 мають основні фактори X_1 , X_2 , X_3 , при цьому квадратичні члени X_1^2 і X_2^2 впливають дуже значуще, X_3^2 — значуще, а взаємодія X_1X_3 — високозначуща. Відповідно, ступінь впливу факторів на варіацію подачі добрив можна розташувати в порядку: $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$, тобто швидкість обертання гвинтового колеса \rightarrow форма його поперечного перерізу \rightarrow кут підйому спіралі.

Для моделі ступеня руйнування зв'язків у блоці добрив (Y_2) також отримано $p < 0.0001$, що підтверджує її високу статистичну значущість, а показник невідповідності ($p > 0.05$) свідчить про адекватність моделі.

Таблиця 4.2 Дисперсійний аналіз рівнянь регресії
(скорочено наведено головні результати)

Індекс експерименту	Джерела варіації	Сума квадратів	Ступені вільності	Середній квадрат	F-критерій	p-значення
Коефіцієнт варіації рівномірності висіву добрив	Модель	47.13	9	5.23	95.96	<0.0002**
	X ₁	11.46	1	11.46	210.32	<0.0002**
	X ₂	0.96	1	0.94	17.34	0.0043**
	X ₃	0.76	1	0.74	13.76	0.0077**
	X ₁ X ₂	0.18	1	0.16	3.17	0.1187
	X ₁ X ₃	1.98	1	1.08	20.01	0.0028**
	X ₂ X ₃	0.05	1	0.05	1.05	0.3382
	X ₁ ²	28.43	1	28.41	520.98	<0.0002**
	X ₂ ²	2.32	1	2.32	42.32	0.0002**
	X ₃ ²	0.35	1	0.35	6.52	0.0381*
	Залишок (похибка)	0.37	7	0.05	–	–
	Недостатність апроксимації	0.25	3	0.08	2.73	0.1779
	Чиста похибка	0.12	4	0.02	–	–
	Загальна сума	47.51	16	–	–	–
Ступінь руйнування гранул добрив	Модель	19.62	9	2.17	58.56	<0.0002**
	X ₁	0.48	1	0.48	13.15	0.0085**
	X ₂	1.92	1	1.92	51.32	0.0003**
	X ₃	15.47	1	15.47	415.88	<0.0002**
	X ₁ X ₂	0.000224	1	0.000224	0.006042	0.9403
	X ₁ X ₃	0.22	1	0.22	5.54	0.0506
	X ₂ X ₃	0.14	1	0.14	3.47	0.1042
	X ₁ ²	0.43	1	0.43	11.41	0.0117*
	X ₂ ²	0.05	1	0.05	1.01	0.3461
	X ₃ ²	0.84	1	0.84	22.38	0.0022**
	Залишок (похибка)	0.25	7	0.03	–	–
	Недостатність апроксимації	0.18	3	0.05	3.68	0.1197
	Чиста похибка	0.06	4	0.01	–	–
	Загальна сума	19.88	16	–	–	–

Примітка: ** – вказує на статистично значущий вплив ($p \leq 0,01$); * – вказує на помітний вплив ($p \leq 0,05$).

Найбільш вагомий вплив на показник Y_2 мають основні фактори X_1 , X_2 , X_3 , при цьому член X_3^2 є дуже значущим, X_1^2 — значущим, тоді як решта взаємодій виявилися несуттєвими. Послідовність впливу факторів на ступінь руйнування зв'язків між частинками визначено як: $X_3 \rightarrow X_2 \rightarrow X_1$, тобто кут підйому спіралі \rightarrow форма поперечного перерізу \rightarrow швидкість обертання гвинта.

Таким чином, результати статистичного аналізу підтверджують, що побудовані регресійні моделі є статистично достовірними, адекватними та інформативними. Вони коректно відображають вплив конструктивно-технологічних параметрів спірального гвинтового дозатора на процес подачі гранульованих добрив, що дозволяє застосовувати ці рівняння для оптимізації режимів роботи та вдосконалення конструкції дозувального пристрою.

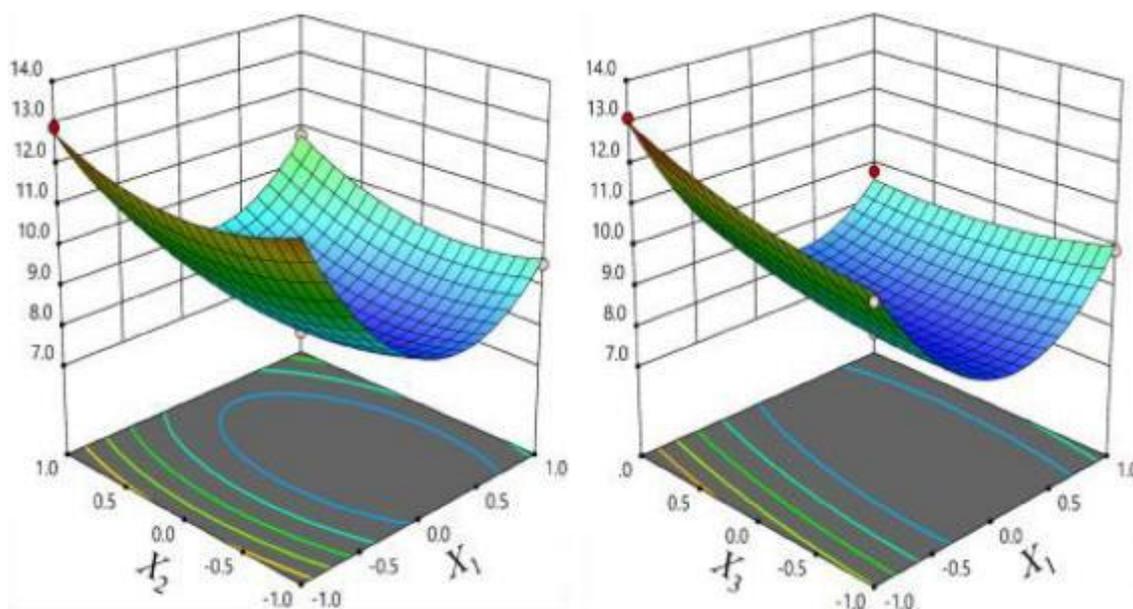
4.2 Аналіз взаємодії факторів моделі

Діаграми поверхонь відгуку, що відображають взаємозв'язок між окремими факторами, побудовано на основі рівнянь (4.1) та (4.2) з використанням інструментів тривимірної візуалізації у середовищі Wolfram Cloud. Побудовані графічні моделі дають змогу наочно простежити характер впливу досліджуваних факторів на цільові показники та визначити області оптимальних поєднань параметрів.

Інтенсивність взаємодії між факторами оцінювали за формою поверхні відгуку та характером ізоліній: якщо контури мають круглу форму, це свідчить про незначну або відсутню взаємодію між двома факторами; натомість еліптична форма контурів відображає виражену взаємодію, коли зміна одного фактора суттєво змінює ефект іншого. Такий підхід дозволяє візуально визначити, які пари факторів формують синергійний або компенсаційний вплив на показник відгуку, що є важливим для подальшої оптимізації конструктивно-технологічних параметрів.

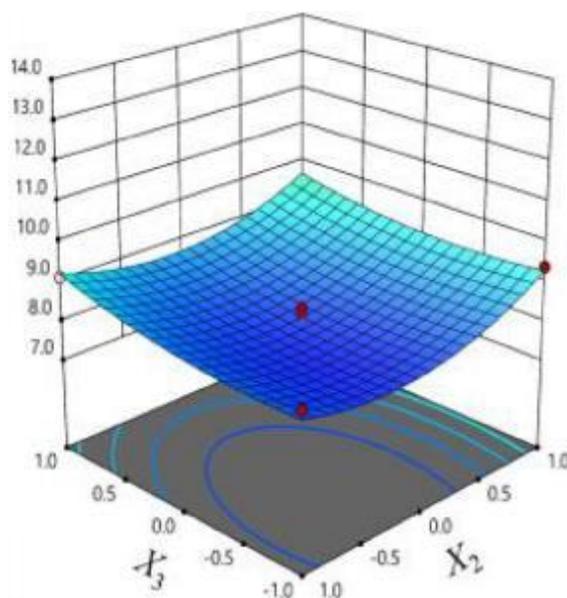
Із рисунка 4.1 (а) видно, що при фіксованій формі поперечного перерізу гвинтового колеса (GW) коефіцієнт варіації рівномірності подачі добрив

спочатку зменшується, а потім зростає зі збільшенням швидкості обертання GW. Мінімального значення коефіцієнт варіації досягає при швидкості 21 об/хв, що вказує на існування оптимального режиму обертання, за якого подача гранул є найбільш стабільною.



а) $Y_1 = f(X_1, X_2, 0)$

б) $Y_1 = f(X_1, 0, X_3)$



в) $Y_1 = f(0, X_2, X_3)$

Рисунок 4.1 – Вплив взаємодії окремих факторів на коефіцієнт варіації рівномірності подачі добрив

Як видно з рисунка 4.1 (б), якщо кут підйому спіралі зафіксований, то зі

збільшенням швидкості GW коефіцієнт варіації також спочатку зменшується, а потім підвищується, причому амплітуда зміни показника є значно вираженішою. Це свідчить про те, що швидкість обертання має нелінійний вплив на рівномірність подачі, який може бути пов'язаний із гідродинамічними процесами переміщення частинок у каналах спіралі.

При фіксованій швидкості обертання GW збільшення кута підйому спіралі майже не впливає на коефіцієнт варіації подачі добрив. Така поведінка пояснюється тим, що кут підйому впливає переважно на траєкторію переміщення частинок, але не суттєво змінює швидкість або рівномірність потоку при сталому режимі обертання.

Аналіз форми поверхонь відгуку та щільності контурних ліній (рис. 4.1, в) підтверджує, що взаємодія між формою поперечного перерізу GW та кутом підйому спіралі не має істотного впливу на варіацію рівномірності подачі добрив. Це узгоджується з результатами дисперсійного аналізу, який показав відсутність статистично значущого ефекту для відповідного перехресного члена.

Отже, можна зробити висновок, що при фіксованій формі поперечного перерізу гвинтового колеса зміна кута підйому спіралі не спричиняє істотних змін у рівномірності подачі гранульованих добрив, а визначальним фактором залишається саме швидкість обертання GW, що має вирішальне значення при налаштуванні режимів дозування.

Під час аналізу взаємодії факторів, що впливають на ступінь руйнування зв'язків частинок добрив, встановлено, що при фіксованій формі поперечного перерізу гвинтового елемента (GW) збільшення швидкості його обертання практично не впливає на ступінь руйнування гранул. Це свідчить про те, що механічна енергія, передана частинкам за рахунок підвищення швидкості, не є визначальним фактором у процесі їх деструкції. Взаємодія між швидкістю GW та формою його поперечного перерізу не є статистично значущою, що узгоджується з результатами дисперсійного аналізу (рис. 4.2, а). Така залежність пояснюється тим, що форма поперечного перерізу визначає

переважно характер зсуву частинок, тоді як швидкість обертання лише частково впливає на силу взаємодії між ними.

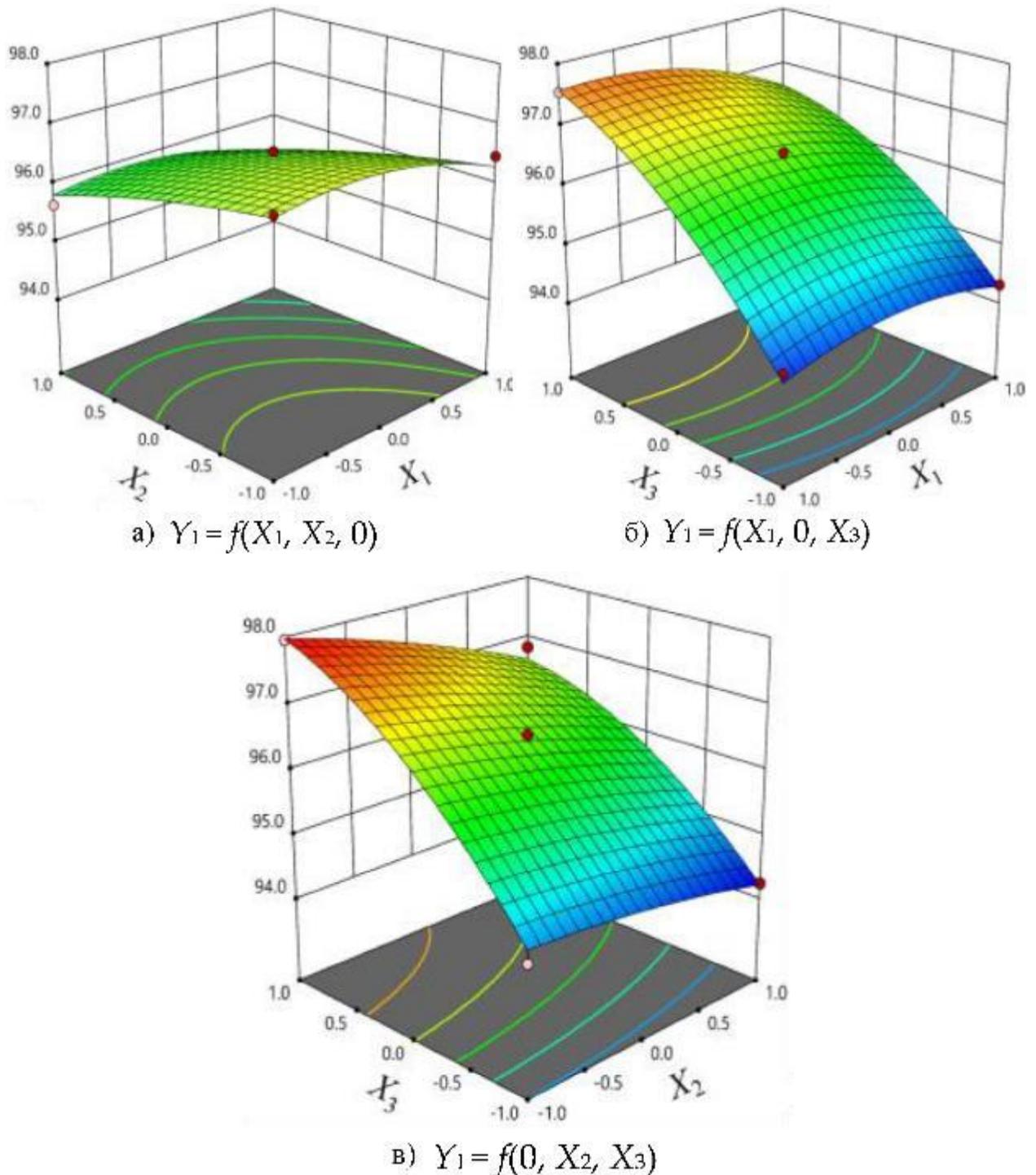


Рисунок 4.2 – Вплив взаємодії окремих факторів на ступінь руйнування зв'язків частинок добрив

На рисунку 4.2 (б) показано, що при фіксованому куті підйому спіралі

вплив швидкості обертання GW на ступінь руйнування зчеплень є незначним, тоді як при фіксованій швидкості збільшення кута підйому спіралі призводить до помітного зростання ступеня руйнування. Це зумовлено зміною траєкторії руху частинок — при більшому куті підйому зростає компонент осьової швидкості та збільшується кількість ударних взаємодій між гранулами, що інтенсифікує процес деструкції.

З рисунка 4.2 (в) видно, що коли форма поперечного перерізу GW є дугоподібною, а кут підйому спіралі становить 70° , ступінь руйнування зв'язків досягає максимального значення. Така комбінація параметрів забезпечує оптимальний режим зсуву та ударного впливу, за якого гранули добрив зазнають рівномірного навантаження і частково руйнуються без надмірного подрібнення. При фіксованій формі перерізу збільшення кута підйому спіралі викликає підвищення інтенсивності руйнування гранул, що також підтверджується аналізом впливу геометрії спіральної канавки на зміну колової швидкості частинок. Зростання кута підйому підвищує відцентрову складову руху гранул, посилюючи сили тертя та зсуву в міжчастинкових контактах, що в кінцевому підсумку сприяє ефективнішому розриву структурних зв'язків у матеріалі.

4.3 Оптимізація

Відповідно до наведених результатів експериментальних досліджень, для підвищення ефективності процесу подачі добрив у гвинтовому механізмі SGWFD, за умови обмежень на основні експериментальні фактори, було проведено оптимізацію робочих параметрів. Як критерії оптимізації прийнято два цільові показники: мінімальне значення коефіцієнта варіації рівномірності подачі добрив (що характеризує стабільність подачі матеріалу) та максимальний ступінь руйнування зв'язків між частинками добрив (який відображає ефективність деструкції злиплих фракцій). Для цього побудовано квадратичне рівняння регресії, що описує залежність зазначених показників

ефективності від основних впливових факторів — швидкості обертання гвинта X_1 , форми його поперечного перерізу X_2 та кута підйому спіралі X_3 .

Математична постановка задачі оптимізації мала вигляд:

$$\begin{cases} \min Y_1 (X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2 (X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (4.3)$$

де Y_1 – коефіцієнт варіації рівномірності подачі, а Y_2 – ступінь руйнування зчеплень частинок добрив.

Обмеження для факторів вибрано в межах нормованих кодованих значень, що відповідають реальним технологічним інтервалам параметрів експерименту.

Оптимізацію рівнянь регресії (4.1) і (4.2) було виконано за допомогою чисельних методів у середовищі Wolfram Cloud, яке забезпечує автоматизований пошук екстремумів багатофакторних функцій із урахуванням заданих обмежень. Для пошуку оптимальних значень застосовано метод множників Лагранжа та перевірку локальної стійкості рішень через аналіз власних значень матриці Гессе.

У результаті оптимізації отримано такі показники: коефіцієнт варіації рівномірності подачі добрив становив 8,56%, що свідчить про високу стабільність дозування матеріалу, а ступінь руйнування зв'язків між частинками – 97,67%, що підтверджує ефективність деструкції агломератів.

Оптимальна комбінація робочих параметрів визначена як:

- швидкість обертання гвинтового елемента – 21 об/хв,
- форма поперечного перерізу – черпакоподібна,
- кут підйому спіралі – 70°.

Отримані результати свідчать про узгодженість регресійних моделей із експериментальними даними та про досягнення високого рівня ефективності

роботи гвинтового живильника добрив у межах заданих технологічних обмежень.

У результаті статистичної обробки даних встановлено, що

- коефіцієнт варіації рівномірності подачі добрив становив 9,23%,
- ступінь руйнування зв'язків частинок у блоці добрив – 94,28%.

Порівняно з результатами чисельного моделювання, відносна похибка становила 7,3% та 3,6% відповідно.

Отримані результати підтверджують, що при оптимальних робочих параметрах гвинтовий дозатор забезпечує високу ефективність руйнування блоків добрив та їх рівномірну подачу, що свідчить про надійність і точність розробленої моделі.

4.4 Висновки з розділу

1. У результаті експериментальних і статистичних досліджень побудовано та перевірено регресійні моделі, що описують вплив конструктивно-технологічних параметрів спірального гвинтового дозатора (SGWFD) на рівномірність подачі та ступінь руйнування гранульованих добрив.

2. Експерименти за планом Бокса–Бенкена дозволили оцінити основні, квадратичні та взаємодіючі ефекти факторів. Дисперсійний аналіз у Wolfram Cloud підтвердив високу статистичну значущість моделей ($p < 0,0001$) і адекватність апроксимації ($p > 0,05$).

3. Найбільший вплив на коефіцієнт варіації подачі мають швидкість обертання гвинта і форма поперечного перерізу, тоді як на ступінь руйнування гранул – кут підйому спіралі. Поверхні відгуку показали, що суттєвою є лише взаємодія між швидкістю обертання та кутом підйому.

4. У результаті оптимізації з використанням методів пошуку екстремумів у Wolfram Cloud визначено оптимальні параметри: швидкість обертання – 21 об/хв, форма перерізу – черпакоподібна, кут підйому – 70° . За таких умов

коефіцієнт варіації подачі становить 8,56%, а ступінь руйнування зв'язків між гранулами – 97,67%.

5. Результати моделювання узгоджуються з експериментальними даними (похибка не перевищує 7%), що підтверджує достовірність моделей. Отримані залежності можуть бути використані для оптимізації режимів подачі та вдосконалення конструкцій дозаторів добрив.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Під час внесення мінеральних добрив дозувальним пристроєм туковисівного апарата необхідно суворо дотримуватись вимог Закону України «Про охорону праці», Правил охорони праці в сільському господарстві, ДСН 3.3.6.042-99 щодо гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони, а також Правил пожежної безпеки в агропромисловому комплексі. До роботи допускаються лише працівники, які пройшли медичний огляд, навчання, інструктаж і мають навички безпечної експлуатації туковисівних апаратів. Усі механізми перед початком роботи мають бути справними, очищеними від залишків добрив і заземленими. Обслуговування та очищення дозувального пристрою допускається лише після повної зупинки приводу. Під час роботи з гранульованими або порошкоподібними добривами обов'язкове використання засобів індивідуального захисту — респіратора, захисних окулярів, гумових рукавиць і спецодягу. Забороняється усувати забивання дозатора або проводити регулювання при працюючому механізмі. Під час завантаження бункера слід уникати утворення пилу, використовуючи вологе завантаження або місцеві відсмоктувачі.

Туковисівний апарат повинен бути обладнаний захисними кожухами на обертових елементах, огороженнями привідних ременів і ланцюгів, а також системою аварійного вимкнення, доступною для оператора. Перед початком роботи перевіряють герметичність з'єднань, стан ущільнювачів і відсутність сторонніх предметів у робочій камері. Роботу починають із пробного пуску без навантаження, перевіряючи плавність обертання. Під час експлуатації не допускається перевантаження бункера, а оператор повинен перебувати на безпечній відстані від обертових частин. У разі появи сторонніх шумів або вібрації агрегат негайно зупиняють.

Мінеральні добрива мають токсичні та подразнюючі властивості, тому робоче приміщення має бути забезпечене ефективною вентиляцією з кратністю

повітрообміну не менше трьох–п'яти разів на годину. Для зменшення запиленості рекомендується періодичне зволоження підлоги та поверхонь, а також щоденне очищення дозувальних вузлів від залишків матеріалу. У разі потрапляння добрив на шкіру чи слизові оболонки їх необхідно негайно змити великою кількістю води, при подразненні очей — звернутися до медпункту.

Більшість мінеральних добрив є негорючими, проте при контакті з органічними речовинами або паливно-мастильними матеріалами можливе самонагрівання та займання. Тому не допускається зберігання добрив поблизу джерел відкритого вогню та мастильних матеріалів. Поруч із робочою зоною повинні бути вогнегасники порошкового або вуглекислотного типу та ємності з піском. Зварювальні роботи дозволяється проводити лише після повного очищення обладнання від залишків добрив і поза межами бункера.

У разі виникнення аварійної ситуації, займання або поломки приводу необхідно негайно зупинити подачу живлення, вимкнути головний привід, вивести персонал із небезпечної зони, повідомити керівника робіт і службу цивільного захисту. У разі займання використовують вогнегасники або засипають осередок піском, а при розсипанні добрив — локалізують їх, не допускаючи потрапляння у водойми чи дренажні системи. Після ліквідації наслідків проводять перевірку технічного стану апарата, оцінюють справність електричних систем і заземлення, а також повторний інструктаж персоналу.

Дотримання вимог охорони праці, використання засобів індивідуального захисту та виконання правил експлуатації дозувального пристрою забезпечують безпечне внесення мінеральних добрив, запобігають травматизму, аваріям і надзвичайним ситуаціям у виробничих умовах.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО ДОЗУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ТУКОВИСІВНОГО АПАРАТА

Ефективність технічного впровадження оцінюється через економічні показники – економію матеріалів, додатковий прибуток від росту врожайності, а також період окупності капіталовкладень. Нижче наведено послідовні розрахунки з поясненнями.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані (виходимо з фактичних/типових значень)

Показник	Позначення	Одиниця виміру	Базовий апарат	Удосконалений апарат
Норма внесення добрив	N	кг/га	150	150
Нерівномірність внесення	Δ	%	15	7
Втрати добрив через нерівномірність	W	%	10	3
Вартість 1 т мінеральних добрив	С _д	грн/т	25 000	25 000
Площа обробітку	S	га	1000	1000
Вартість удосконалення апарата	K	грн	–	120 000
Вартість базового апарата	K ₀	грн	80 000	–
Ціна продукту (урожаю)	С _у	грн/т	8 000	8 000
Базова врожайність	У _б	т/га	6,0	6,0

Розрахунок економії від зменшення втрат добрив. Пояснення: спочатку оцінюємо безпосередню економію коштів на добривах внаслідок зниження втрат (вкладення в точніше дозування зменшують витрати на марні втрати).

$$E_d = \frac{(W_b - W_y) \cdot N \cdot S \cdot C_d}{100 \cdot 1000} \quad (6.1)$$

Підстановка:

$$E_d = \frac{(10 - 3) \cdot 150 \cdot 1000 \cdot 25000}{100 \cdot 1000} = 26250 \text{ грн.}$$

Оцінка додаткового прибутку від підвищення врожайності. Точніше й рівномірніше внесення добрив зазвичай дає приріст врожайності. Щоб забезпечити заданий строк окупності 30 днів, підбираємо потрібний приріст врожайності та показуємо розрахунок.

Формула для додаткового прибутку:

$$E_y = S \cdot Y_6 \cdot \frac{\Delta Y}{100} \cdot C_y \quad (6.2)$$

де ΔY – прогнозований (або необхідний) відсоток приросту врожайності.

Сумарна річна економія $E_{\text{заг}} = E_d + E_y$ забезпечила строк окупності $T = 30$ днів. Строк окупності (роки) визначається як:

$$T = \frac{\Delta K}{E_{\text{заг}}} \quad (6.3)$$

де $\Delta K = K - K_0 = 120\,000 - 80\,000 = 40\,000$ грн.

Перетворимо бажаний T у роках: $T = 30/365 \approx 0,08219$ року. Отже потрібна річна економія:

$$E_{\text{заг}} = \frac{\Delta K}{T} = \frac{40000}{0,08219} \approx 486111 \text{ грн} \quad (6.4)$$

Віднімаємо раніше пораховану економію на добривах, щоб знайти потрібний E_y :

$$E_y = E_{\text{заг}} - E_d = 486111 - 26250 = 459861 \text{ грн} \quad (6.5)$$

Тепер знайдемо відповідний ΔY :

$$\Delta Y = \frac{E_y}{S \cdot Y_6 \cdot C_y} \cdot 100 = \frac{459861}{1000 \cdot 6,0 \cdot 8000} \cdot 100 \approx 0,958 \% \quad (6.6)$$

Для досягнення строку окупності 30 днів при інших незмінних параметрах достатньо підвищити врожайність приблизно на 0,96% (менше 1%). Це показує, що навіть невеликий приріст урожайності дає значний економічний ефект на великих площах (1000 га).

Загальна річна економія (підсумок). Підсумовуємо прямі і опосередковані вигоди.

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{д}} + E_{\text{у}} = 26250 + 459861 = 486111 \text{ грн.} \quad (6.6)$$

Ця величина – очікуваний річний економічний ефект від впровадження удосконаленого пристрою (економія добрив + додатковий прибуток від підвищеної врожайності).

Розрахунок річного економічного ефекту з урахуванням нормативного коефіцієнта. Для внутрішньогосподарських розрахунків застосовують нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень $E_{\text{н}}$ (наприклад, 0,15), щоб оцінити нормований ефект від вкладених коштів. Тут приведено приклад обчислення, але він не впливає на строк окупності у прямому вигляді (строк окупності рахується як $\Delta K / E_{\text{заг}}$.

Нехай $E_{\text{н}}=0,15$. Тоді:

$$E = E_{\text{заг}} - \Delta K \cdot E_{\text{н}} = 486111 - 40000 \cdot 0,15 = 480111 \text{ грн} \quad (6.7)$$

Пояснення: нормативний скоригований річний ефект $\approx 480,111$ грн.

Розрахунок строку окупності (фінальний). Строк окупності – це час, за який додаткові річні вигоди компенсують додаткові капіталовкладення.

$$T = \frac{\Delta K}{E_{\text{заг}}} = \frac{40000}{486111} \approx 0,08219 \text{ рока} \approx 30 \text{ днів.} \quad (6.8)$$

При підставлених вихідних даних строк окупності становить **30 днів** — тобто інвестиція окупиться менше ніж за місяць.

ВИСНОВКИ

1. Раціональне внесення мінеральних добрив є важливим чинником підвищення врожайності культур і збереження родючості ґрунтів. Ефективність процесу визначається якістю добрив, технічним станом обладнання, точністю дозування та вибором способу внесення. Найдоцільнішим є комбіноване внесення (основне, припосівне, підживлювальне) з урахуванням агрохімічного стану ґрунту й біологічних особливостей культур. Найвищу точність і рівномірність розподілу забезпечують туковисівні апарати з комірчастим (гребінчастим) дозувальним колесом, що характеризуються простою конструкцією, стабільною подачею та енергоефективністю. Використання таких систем є запорукою ефективного й екологічно безпечного внесення мінеральних добрив у сучасному землеробстві.

2. Розроблено методику чисельного моделювання процесу подачі та руйнування гранульованих добрив у спіральному дозаторі з використанням методу дискретних елементів (DEM). Обґрунтовано вибір DEM для аналізу руху частинок і руйнування гранул, створено тривимірну модель дозатора, що враховує основні конструктивні елементи. Визначено еквівалентний діаметр і сферичність гранул карбаміду, проведено калібрування параметрів моделі, що забезпечило розбіжність не більше 5% між експериментом і розрахунком. Реалізовано модель контактної взаємодії матеріалів (добриво–добриво, добриво–PLA, добриво–ґрунт) для адекватного опису руху й подрібнення частинок. Встановлено етапи руйнування блоків добрив і запропоновано показники оцінювання ефективності дозатора — коефіцієнт варіації подачі та ступінь руйнування блоку, що дає змогу оцінити стабільність роботи при різних режимах.

3. Розроблено методику експериментальних досліджень спірального дозувального пристрою для визначення впливу конструктивно-технологічних параметрів на рівномірність подачі добрив і руйнування міжчастинкових зв'язків. Створено експериментальний стенд із регулюванням швидкості

обертання гвинта та системою керування на базі Arduino UNO R3; робочий орган виготовлено методом 3D-друку. Планування експерименту за методом Бокса–Бенкена та обробка результатів у Wolfram Cloud забезпечили побудову адекватної регресійної моделі з перевіркою значущості коефіцієнтів за критеріями Стюдента та Фішера.

4. Побудовано та перевірено регресійні моделі, що описують вплив конструктивно-технологічних параметрів спірального гвинтового дозатора на рівномірність подачі й ступінь руйнування гранул добрив. Експерименти за планом Бокса–Бенкена та дисперсійний аналіз у Wolfram Cloud підтвердили високу значущість і адекватність моделей. Встановлено, що на рівномірність подачі найбільше впливають швидкість обертання гвинта та форма перерізу, а на руйнування гранул — кут підйому спіралі. Оптимальні параметри: швидкість 21 об/хв, форма черпакоподібна, кут підйому 70° , за яких коефіцієнт варіації подачі становить 8,56%, а руйнування — 97,67%. Результати моделювання узгоджуються з експериментом (похибка $\leq 7\%$), що підтверджує достовірність і практичну придатність моделей.

5. Розрахунок економічної ефективності впровадження удосконаленого дозувального пристрою туковисівного апарата показав, що навіть незначне підвищення рівномірності внесення мінеральних добрив забезпечує відчутний економічний ефект. Зменшення втрат добрив із 10% до 3% дає пряму економію матеріальних ресурсів, а додатковий прибуток від приросту врожайності лише на 0,96% дозволяє повністю компенсувати капіталовкладення у модернізацію (40 тис. грн) за 30 днів роботи. Таким чином, впровадження вдосконаленого дозатора є високоефективним технічним рішенням, що забезпечує швидку окупність, підвищення економічної віддачі використання добрив і сприяє раціональному веденню агровиробництва.

Бібліографія

1. Bangura, K., Gong, H., Deng, R., Tao, M., Liu, C., Cai, Y., Liao, K., Liu, J., Qi, L. Simulation analysis of fertilizer discharge process using the Discrete Element Method (DEM). *PLoS ONE*, 2020, 15, e0235872.
2. Bulgakov, V., Adamchuk, O., Pascuzzi, S., Santoro, F., Olt, J. Experimental research into uniformity in spreading mineral fertilizers with fertilizer spreader disc with tilted axis. *Agron. Res.*, 2021, 19, 28–41.
3. Cao, X. Design and Experimental Research on Centrifugal Cone-Disc Fertilizer Discharge Device. Master's Thesis, Hunan Agricultural University, Changsha, China, 2021.
4. Cao, X., Xie, F.P., Wang, X.S., Liu, D.W., Wu, B. Design and experiment of bidirectional spiral fertilizer feeding centrifugal cone-disc fertilizer discharge device. *J. Hunan Agric. Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2021, 47, 338–343.
5. Dun, G.Q., Sheng, Q.B., Ji, X.X., Jiang, X.B., Zhao, Y., Zhou, C. Optimization and test of staggered gear fertilizer discharger. *Chin. J. Agric. Eng.*, 2023, 39, 20–27.
6. Fang, L.Y. Design and Test of Electric-Driven Spiral Fertilizer Discharge Device. Master's Thesis, South China Agricultural University, Guangzhou, China, 2020.
7. Fogal, M.L.D.F., Micheli, G.B., Scalon, V.L., Padilha, A. Numerical-experimental comparison of radial fans applied in pneumatic transport of agricultural fertilizer spreaders. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, 2020, 25, 58–64.
8. Gong, S., Hao, W.Y. Research on the development status of precision fertilization technology. *Mod. Agric. Res.*, 2022, 28, 136–138.
9. Hu, X.W., Mao, W. Research status and development trends of fertilization machinery. *Mod. Agric. Equip.*, 2023, 44, 25–29+50.

10. Jia, H.L., Tan, H.W., Wen, X.Y., Wang, G., Yuan, H.F., Huang, D.Y. Design and test of pneumatic centralized and precise mixing fertilization device. *J. Agric. Mach.*, 2022, 53 (Suppl. S2), 109–119+203.
11. Konovalov, V., Kravtsov, A., Zaitsev, V., Petrov, A., Petrova, S. Pneumatic system of a seeder with pneumatic sowing. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2019, 403, 012131.
12. Li, X., Jiang, X.B., Ji, X.X., Dun, G.Q., Zhao, Y., Du, J.X. Optimal design and experiment of spiral double-wheel fertilizer distributor based on genetic algorithm. *J. Henan Agric. Univ.*, 2023, 57, 1026–1034.
13. Li, Z.P., Liang, C.Y., Li, P., Wang, P.Y., Zou, L.W., Zhang, R.D. Research status and prospects of precision fertilization technology. *Trop. Agric. Eng.*, 2022, 46, 47–50.
14. Liang, Y.C. Design and Research on Electric Fertilizer Discharge and Monitoring System of Layered Fertilizer Spreader. Master's Thesis, Shihezi University, Shihezi, China, 2022.
15. Liang, Y.C., Tang, Z.H., Ji, C., Zheng, X., Liu, J.B., Li, Q.C., Zhang, L.Y. Optimization and experiment of structural parameters of outer groove wheel fertilizer discharger. *Agric. Mech. Res.*, 2023, 45, 7–14.
16. Lillerand, T., Reinvee, M., Virro, I., Olt, J. Feasibility analysis of fluted roller dispenser application for precision fertilization. *Acta Tech. Corviniensis-Bull. Eng.*, 2023, 16, 71–76.
17. Liu, H.N. Design and Test of Air-Delivered Centralized Fertilizer Discharger for Granular Fertilizers. Master's Thesis, Sichuan Agricultural University, Yaan, China, 2021.
18. Liu, W.Z., He, J., Li, H.W., Wei, Z.C., Zhang, Z.G., Li, X.Q. Design and test of double-side deep fertilization device for potato mini seed potato planting machine. *J. Agric. Mach.*, 2020, 51, 56–65.
19. Liu, X.D. Design and Test of Precision Fertilization System for Rapeseed Direct Seeding Machine. Ph.D. Thesis, Huazhong Agricultural University, Wuhan, China, 2022.

20. Liu, X.D., Ding, Y.C., Shu, C.X., Wang, K.Y., Liu, W.P., Wang, X.P. Analysis and test of disturbance and anti-blocking mechanism of spiral cone centrifugal fertilizer discharger. *J. Agric. Mach.*, 2020, 51, 44–54.
21. Liu, X.D., Hu, R., Wang, D.H., Lu, B., Wang, W.C., Ding, Y.C. Optimization and experiment of fertilizer discharger based on granular fertilizer movement model. *J. Agric. Mach.*, 2021, 52, 85–95.
22. Lyalin, E.A., Trutnev, M.A., Trutnev, N.V. Parameters of the spiral-screw device for dosing mineral fertilizers with different consumption characteristics. *Perm Agrar. J.*, 2022, 4, 14–22.
23. Mondal, D., Nabendu, G. Study on filling factor of short length screw conveyor with flood-feeding condition. *Mater. Today Proc.*, 2018, 5, 1286–1291.
24. Przywara, A., Santoro, F., Kraszkiwicz, A., Pecyna, A., Pascuzzi, S. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. *Agriculture*, 2020, 10, 467.
25. Shang, W.H. Design and Experimental Study of Disc Ejection Type Deep Side Fertilization Device for Paddy Fields. Master's Thesis, Northeast Agricultural University, Haerbin, China, 2021.
26. Sidneva, I., Kurdjumov, V. The results of research for improving the working tool of the mineral fertilizer spreader. *Наука в Центральной России*, 2022, 10, 42.
27. Song, S.S., Duan, J.L., Zou, X.J., Yang, Z., Ou, Z.W., Wang, B. Optimization and experiment of variable fertilizer discharger parameters based on banana root distribution morphology. *J. Agric. Eng.*, 2020, 36, 11–18.
28. Song, X.F., Dai, F., Zhang, X.K., Gao, W.J., Li, X.Z., Zhang, F.W., Zhao, W.Y. Simulation and Experiment of Fertilizer Discharge Characteristics of Spiral Grooved Wheel with Different Working Parameters. *Sustainability*, 2023, 15, 11309.
29. Sugirbay, A.M., Zhao, J., Nukeshev, S.O., Chen, J. Determination of pin-roller parameters and evaluation of the uniformity of granular fertilizer

application metering devices in precision farming. *Comput. Electron. Agric.*, 2020, 179, 105835.

30. Wang, B.T. Working Process Simulation and Parameter Optimization of External Groove Wheel Fertilizer Discharger Based on Discrete Element Method. Master's Thesis, Northwest A&F University, Xianyang, China, 2017.

31. Wang, J. Design and Experimental Study of Subsoiling Fertilizer Spreader in Yunnan Mountains. Master's Thesis, Kunming University of Science and Technology, Kunming, China, 2020.

32. Wang, J.F., Fu, Z.D., Weng, W.X., Wang, Z.T., Wang, J.W., Yang, D.Z. Design and experiment of double-row fertilizer distributor for deep side fertilization of paddy fields with conical disk push plate. *J. Agric. Mach.*, 2023, 54, 53–62+106.

33. Wang, J.F., Shang, W.H., Weng, W.X., Wang, J.W., Wang, Q., Chen, X.S. Design and experiment of disc ejection type deep side fertilization device for paddy fields. *J. Agric. Mach.*, 2021, 52, 62–72.

34. Wang, L., Liao, Q.X., Liao, Y.T., Gao, L.P., Xiao, W.L., Chen, H. Effect of the structural type of the distribution device of the air-feed fertilizer discharge system on the fertilizer discharge performance. *Chin. J. Agric. Eng.*, 2021, 37, 24–34+315.

35. Wang, Q., Wang, Y.L., Er, S.Z. Current Situation and Development Ideas of Orchard Machinery and Equipment in China. *Farm Mach.*, 2019, 109–111.

36. Wang, Y.B. Design and Experiment of Deep Lateral Fertilizer Spreader in Tea Gardens. Master's Thesis, Huazhong Agricultural University, Wuhan, China, 2022.

37. Wang, Y.B., Liang, F., Xu, F., Deng, W.H., Yu, Y.Z. Discrete element simulation and experiment of opposed double helix outer sheave fertilizer discharger. *Inmateh-Agric. Eng.*, 2022, 68, 617–628.

38. Wu, Y.T., Yang, Y.Z., Yin, Z.H., Li, Q. Research status and prospects of fertilizer discharge devices for orchard fertilization equipment. *Agric. Technol. Equip.*, 2023, 47–48.

39. Xiao, W.L. Design and Experiment of Rapeseed Mechanical Direct Seeding Precision Deep Fertilization System. Ph.D. Thesis, Huazhong Agricultural University, Wuhan, China, 2023.
40. Xiao, W.L., Liao, Y.T., Shan, Y.Y., Li, M.L., Wang, L., Liao, Q.X. Design and test of four-head spiral double-row fertilizer distributor for rapeseed direct seeding machine. *J. Agric. Mach.*, 2021, 52, 68–77.
41. Xu, H.M., Xu, Z., Yang, H., Wang, Q.C., Zhang, G.Z. Development of germination-promoting top dressing machine for regenerated rice. *J. Agric. Eng.*, 2022, 38, 12–20.
42. Xu, Z. Design and Experiment of Ratoon Rice Bud Promotion and Top Dressing Machine. Master's Thesis, Huazhong Agricultural University, Wuhan, China, 2022.
43. Xue, Z., Zhao, L., Wang, F.H., Wang, S., Song, G., Wang, G. Research on fertilizer discharge performance of spiral fertilizer discharger based on EDEM. *Agric. Mech. Res.*, 2020, 42, 87–95.
44. Xue, Z., Zhao, L., Wang, F.H., Wang, S., Wang, G., Pan, R. Performance simulation test of spiral fertilizer discharger based on discrete element method. *J. Hunan Agric. Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2019, 45, 548–553.
45. Yang, H.K., Zhang, L.X., Dong, W.C., Fang, Y., Hu, D.B., Yang, D.J. Analysis and test of the fertilizer discharge device of the dual-variable fertilizer spreader based on the discrete element method. *Mech. Des. Res.*, 2019, 35, 179–183.
46. Yang, L. Design and Experiment of Electric Driven Nitrogen, Phosphorus and Potassium Fertilizer Application Device. Master's Thesis, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, China, 2019.
47. Yang, L.F. Promote soil testing and formulated fertilization technology to promote sustainable agricultural development. *Heilongjiang Grain*, 2023, 110–112.
48. Yang, L.W., Chen, L.S., Zhang, J.Y., Sun, H., Liu, H.J., Li, M.Z. Fertilizer spreading uniformity test of centrifugal disc fertilizer spreader. *J. Agric. Mach.*, 2019, 50, 108–114.

49. Yang, W.W., Fang, L.Y., Luo, X.W., Li, H., Ye, Y.Q., Liang, Z.H. Experimental study on the influence of spiral fertilizer discharge outlet parameters on fertilizer discharge performance. *Chin. J. Agric. Eng.*, 2020, 36, 1–8.
50. Zhang, H.T., Xie, H.Y., Jia, C.Y. Research status and development trends of organic fertilizer spreader fertilizer dischargers. *Agric. Mech. Res.*, 2022, 44, 262–268.
51. Zhang, M.Q., Tang, Y.R., Zhang, H., Lan, H.P., Niu, H. Parameter Optimization of Spiral Fertilizer Applicator Based on Artificial Neural Network. *Sustainability*, 2023, 15, 1744.
52. Zhao, L. Simulation and Experiment of Mango Fertilizer Spreader Spiral Fertilizer Discharger Based on Discrete Elements. Master's Thesis, Kunming University of Science and Technology, Kunming, China, 2020.
53. Zhao, X.T., Li, F., Li, H.G., Yuan, H.Y., Zhao, W.G. Research on air-blown collector-discharge fertilizer distributor. *Agric. Technol.*, 2021, 41, 61–63.
54. Zhou, B. Research on Optimization of Key Components of Zaoyuan Ditching and Fertilization Equipment. Master's Thesis, Tarim University, Alaer, China, 2022.
55. Zimmermann, G.G., Jasper, S.P., Savi, D., Moreno, F.G. Distribution of granulated fertilizers in dispensers mounted with single and double helicoidal. *Ciência Rural*, 2024, 54, e20220358.

Додатки

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

Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів дозувального пристрою туковисівного апарата

Виконав: студент 2 курсу, групи МІАІ-3-24
Шевчук Сергій Сергійович

Керівник: доктор філософії, старший викладач
Лупко Кристина Олегівна

Дніпро, 2025

Мета і задачі досліджень.

2

Мета роботи – підвищення точності та рівномірності подачі гранульованих мінеральних добрив шляхом удосконалення конструкції дозувального пристрою туковисівного апарата та обґрунтування його конструктивно-режимних параметрів на основі чисельного моделювання і експериментальних досліджень.

Завдання дослідження:

- Проаналізувати сучасний стан і напрями розвитку технічних засобів для дозування та внесення мінеральних добрив, визначити основні вимоги до їх роботи.
- Провести чисельне моделювання процесу подачі та руйнування гранульованих добрив методом дискретних елементів (DEM), визначити закономірності руху частинок і характер міжчастинкових взаємодій.
- Побудувати регресійні моделі, що описують вплив конструктивно-технологічних параметрів на рівномірність подачі та ступінь руйнування гранул.
- Виконати оптимізацію параметрів дозувального пристрою з використанням критеріїв точності подачі та мінімізації руйнування гранул.
- Оцінити економічну ефективність впровадження удосконаленого дозувального пристрою в агротехнічну практику.

Об'єкт дослідження – процес дозування гранульованих мінеральних добрив у туковисівному апараті під час припосівного та локального внесення.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів спірального гвинтового дозувального пристрою (форма поперечного перерізу, швидкість обертання гвинта, кут підйому спіралі) на рівномірність подачі та ступінь руйнування гранул добрив.

Вимоги до внесення мінеральних добрив

3

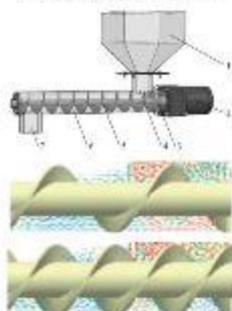
Показник / Вимога	Норма або умова	Примітка
Відхилення фактичної норми внесення від заданої	Не більше $\pm 5\%$	Для рівномірного розподілу по площі
Вологість гранульованих добрив під час внесення	Не більше 1,5–2,0 %	Для запобігання злипанню і нерівномірності дозування
Швидкість руху агрегату	4–8 км/год	Залежить від типу розкидача і виду добрива
Висота розташування розкидного диска або апарата	0,4–0,6 м від поверхні ґрунту	Забезпечує рівномірність покриття
Санітарно-захисна зона від водойм та доріг	Не менше 20–50 м	Залежно від типу добрива та рельєфу місцевості
Час внесення відносно погодних умов	Без опадів, при швидкості вітру < 5 м/с	Для уникнення змиву або знесення добрива
Технічний стан дозувального пристрою	Повна справність, відсутність підтікання та замічення	Перевіряється перед кожним виїздом у поле
Наявність індивідуальних засобів захисту у персоналу	Обов'язкова	Рукавички, респіратори, окуляри, спецодяг
Тип внесення	Суцільне, локальне, прикосівне	Вибір залежно від культури та ґрунтових умов

Способи внесення мінеральних добрив

4

Спосіб внесення	Характеристика процесу
Основне	Розкидання добрив по поверхні поля з подальшим загортанням на глибину 15–25 см під час оранки або культивування
Передпосівне (припосівне)	Внесення безпосередньо перед сівбою або одночасно із нею туковисівним апаратом
Локальне (стрічкове, гніздовим способом)	Розміщення добрив у смугах або лунках поруч із насінням або садіннями
Підживлення кроневе	Внесення добрив у міжряддя під час вегетації для компенсації дефіциту елементів
Підживлення позакороневе	Обприскування рослин розчинами добрив по листку
Суцільне розкидання	Рівномірний розподіл добрив по всій площі поля з поверхневим або частковим загортанням
Комбіноване	Поєднання основного, припосівного та підживлювального способів

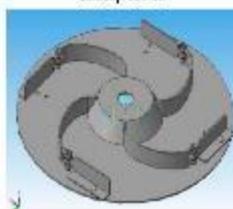
Спіральні дозатори



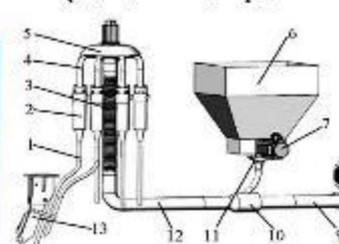
Туковисівні апарати із дозувальним колесом



Дискові туковисівні апарати



Пневматичний туковисівний апарат

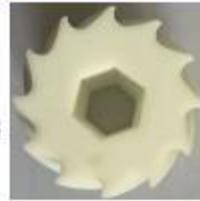


Методика експериментальних досліджень дозувального пристрою

7

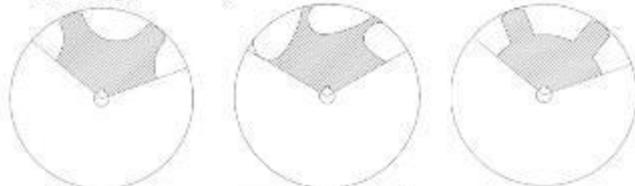


1 – транспортер; 2 – добрива; 3 – SGWFD; 4 – бункер добрив; 5 – регулятор швидкості обертання гвинтового механізму; 6 – приводний двигун транспортера
Експериментальний стенд



Робочий орган дозатора

Для кількісної оцінки ефективності процесу застосовувати такі показники:
-коefficient варіації рівномірності подачі добрив, який характеризує ступінь однорідності потоку матеріалу;
-ступінь руйнування зв'язків у блоці гранул, що свідчить про ефективність механічної дії спірального робочого органа.



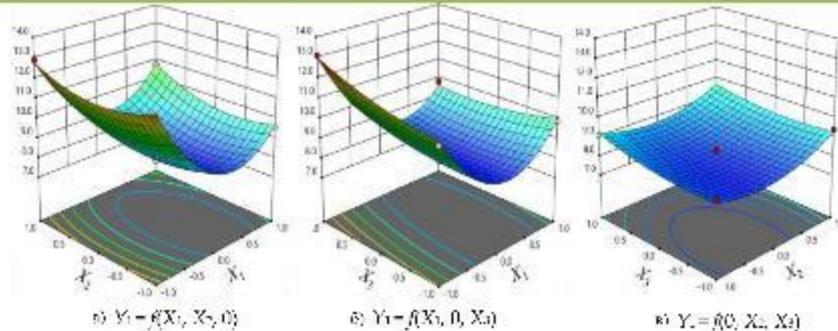
Форма поперечного перерізу спірального колеса по дії добрив

Кодування факторів експерименту

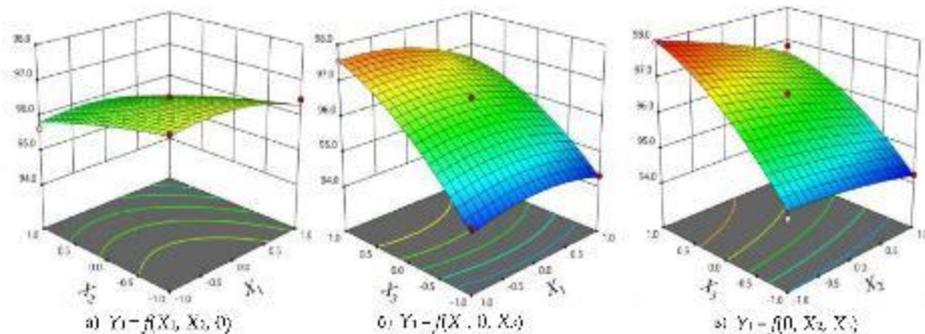
Кодування	Фактор		
X_1 (об/хв)	Швидкість GW		
X_2	Форма перерізу GW		
X_2 (°)	Кут спіралі		
Кодовий рівень	X_1	X_2	X_2
1	15	Аркова	60°
0	20	Ложкоподібна	65°
1	25	Трапецієподібна	70°

Результати чисельного моделювання і експериментальних досліджень

8



Вплив взаємодії окремих факторів на coefficient варіації рівномірності подачі добрив



Вплив взаємодії окремих факторів на ступінь руйнування зв'язків частинок добрив

Екопомічна ефективність удосконаленого дозувального пристрою

9

Показник	Одиниця виміру	Базовий апарат	Удосконалений апарат
Норма внесення добрив	кг/га	150	150
Нерівномірність внесення	%	15	7
Втрати добрив через нерівномірність	%	10	3
Площа обробітку	га	1000	1000
Вартість добрив	грн/т	25 000	25 000
Важливість врожайності	т/га	6,0	6,0
Вартість урожаю	грн/т	8 000	8 000
Вартість базового апарата	грн	80 000	–
Вартість удосконаленого апарата	грн	–	120 000
Додаткові капіталовкладення	грн	–	40 000
Економія добрив від зниження втрат	грн/рік	–	26 250
Необхідна річна економія для окупності за 30 днів	грн/рік	–	486 111
Потрібний приріст урожайності	%	–	≈0,96 %
Додатковий прибуток від приросту врожайності	грн/рік	–	459 861
Сумарна річна економія	грн/рік	–	486 111
Нормований економічний ефект ($R_n = 0,15$)	грн/рік	–	480 111
Строк окупності	дні	–	≈30

Висновки

10

1. Рациональне внесення мінеральних добрив є важливим чинником підвищення врожайності культур і збереження родючості ґрунтів. Ефективність процесу визначається якістю добрив, технічним станом обладнання, точністю дозування та вибором способу внесення. Найдоцільшим є комбіноване внесення (основне, припосівне, підживлювальне) з урахуванням агрохімічного стану ґрунту й біологічних особливостей культур. Найвищу точність і рівномірність розподілу забезпечують туковисівні апарати з комірчастим (гребінчастим) дозувальним колесом, що характеризуються простою конструкцією, стабільною подачею та енергоефективністю. Використання таких систем є запорукою ефективного й екологічно безпечного внесення мінеральних добрив у сучасному землеробстві.

2. Розроблено методику чисельного моделювання процесу подачі та руйнування гранульованих добрив у спіральному дозаторі з використанням методу дискретних елементів (DEM). Обґрунтовано вибір DEM для аналізу руху частинок і руйнування гранул, створено тривимірну модель дозатора, що враховує основні конструктивні елементи. Визначено еквівалентний діаметр і сферичність гранул карбаміду, проведено калібрування параметрів моделі, що забезпечило розбіжність не більше 5% між експериментом і розрахунком. Реалізовано модель контактної взаємодії матеріалів (добриво–добриво, добриво–PI.A, добриво–ґрунт) для адекватного опису руху й подрібнення частинок. Встановлено етапи руйнування блоків добрив і запропоновано показники оцінювання ефективності дозатора — коефіцієнт варіації подачі та ступінь руйнування блоку, що дає змогу оцінити стабільність роботи при різних режимах.

3. Розроблено методику експериментальних досліджень спірального дозувального пристрою для визначення впливу конструктивно-технологічних параметрів на рівномірність подачі добрив і руйнування міжчастинкових зв'язків. Створено експериментальний стенд із регулюванням швидкості обертання гвинта та системою керування на базі Arduino UNO R3, робочий орган виготовлено методом 3D-друку. Планування експерименту за методом Бокса-Бенкена та обробка результатів у Wolfram Cloud забезпечили побудову адекватної регресійної моделі з перевіркою значущості коефіцієнтів за критеріями Стюдента та Фішера.

4. Побудовано та перевірено регресійні моделі, що описують вплив конструктивно-технологічних параметрів спірального гвинтового дозатора на рівномірність подачі й ступінь руйнування гранул добрив. Експерименти за планом Бокса-Бенкена та дисперсійний аналіз у Wolfram Cloud підтвердили високу значущість і адекватність моделей. Встановлено, що на рівномірність подачі найбільше впливають швидкість обертання гвинта та форма перерізу, а на руйнування гранул — кут підйому спіралі. Оптимальні параметри: швидкість 21 об/хв, форма черпакоподібна, кут підйому 70°, за яких коефіцієнт варіації подачі становить 8,56%, а руйнування — 97,67%. Результати моделювання узгоджуються з експериментом (похибка $\leq 7\%$), що підтверджує достовірність і практичну придатність моделей.

5. Розрахунок економічної ефективності впровадження удосконаленого дозувального пристрою туковисівного апарата показав, що навіть незначне підвищення рівномірності внесення мінеральних добрив забезпечує відчутний економічний ефект. Зменшення втрат добрив із 10% до 3% дає пряму економію матеріальних ресурсів, а додатковий прибуток від приросту врожайності лише на 0,96% дозволяє повністю компенсувати капіталовкладення у модернізацію (40 тис. грн) за 30 днів роботи. Таким чином, впровадження вдосконаленого дозатора є високоефективним технічним рішенням, що забезпечує швидку окупність, підвищення економічної віддачі використання добрив і сприяє раціональному веденню агропромислства.