

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

**Пояснювальна записка**  
до дипломної роботи  
освітнього ступеня "Магістр" на тему:  
**Чисельне моделювання барабанного протруювача насіння**

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

\_\_\_\_\_ Рудь Тимофій Артурович

**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.

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

Рудь Тимофію Артуровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Чисельне моделювання барабанного протруювача насіння

керівник роботи: Лушко 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 протруєння насіння. 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 барабанного протруювача насіння. 3. Методика чисельного моделювання барабанного протруювача насіння. 4. Результати чисельного моделювання барабанного протруювача насіння. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність удосконаленого барабанного протруювача насіння. 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. Аналітичні дослідження (1 аркушів, А4). 4 Чисельне моделювання (3 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 (чисельне моделювання) | 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**

\_\_\_\_\_ Рудь Т. А. \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ Лупко К. О. \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)



Рудь Т. А. Чисельне моделювання барабанного протруювача насіння. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

У роботі досліджено процес протруєння насіння з використанням барабанного протруювача, проведено аналіз сучасних методів та обладнання для обробки посівного матеріалу. В аналітичній частині визначено закономірності руху насіння в обертовому барабані та взаємодії робочої рідини з поверхнею насіння, розраховано оптимальні параметри розпилення, що забезпечують рівномірне покриття та мінімальні втрати протруйника. Методика чисельного моделювання дозволила побудувати сіткові та фізичні моделі, провести симуляцію процесу оброблення насіння та оптимізувати режими роботи барабана, враховуючи параметри частинок і рідини. Результати моделювання підтвердили ефективність запропонованих режимів та дозволили підвищити рівномірність нанесення препарату. Оцінено економічну ефективність удосконаленого барабанного протруювача, показано значне зниження витрат рідини, енергії та трудомісткості, а також підвищення врожайності та якості насіння. Робота містить рекомендації щодо експлуатації, безпечної роботи та охорони праці під час обробки насіння.

**Ключові слова:** барабанний протруювач, протруєння насіння, чисельне моделювання, розпилення робочої рідини, рівномірність покриття, ефективність протруєння, якість насіння, оптимізація процесу.

**Апробація.** Рудь Т. А. Чисельне моделювання барабанного протруювача насіння. 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, 256–259

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 7  |
| 1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....   | 9  |
| 1.1 Протруєння насіння .....  | 9  |
| 1.2 Методи протруєння та обробки насіння .....  | 10 |
| 1.3 Аналіз конструкцій обладнання для протруєння та обробки насіння .....                     | 13 |
| 1.4 Висновки з розділу .....  | 18 |
| 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ БАРАБАННОГО<br>ПРОТРУЮВАЧА НАСІННЯ.....               | 20 |
| 2.1 Постановка задачі .....   | 20 |
| 2.2 Рух насінин у середині обертового барабана.....   | 20 |
| 2.3 Взаємодія рідини-протруювача з поверхнею насінини .....                                   | 25 |
| 2.4 Аналітичне визначення параметрів розпилення у барабанному<br>протруювачі насіння .....    | 29 |
| 2.5 Висновки з розділу .....  | 32 |
| 3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БАРАБАННОГО<br>ПРОТРУЮВАЧА НАСІННЯ .....                    | 34 |
| 3.1 Постановка задачі .....   | 34 |
| 3.2 Побудова сіткової моделі і призначення параметрів насінням і рідини-<br>протруйника ..... | 36 |
| 3.3 Вибір фізичних моделей .....  | 38 |
| 3.4 Візуалізація процесу оброблення насіння .....   | 43 |
| 3.5 Планування чисельного моделювання.....  | 46 |
| 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БАРАБАННОГО<br>ПРОТРУЮВАЧА НАСІННЯ .....                  | 51 |
| 4.1 Симуляція процесу оброблення насіння.....   | 51 |
| 4.2 Обробка результатів чисельного моделювання .....  | 53 |
| 4.3 Оптимізація результатів дослідження .....   | 62 |
| 4.4 Висновки з розділу .....  | 64 |
| 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....                                     | 66 |
| 6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО БАРАБАННОГО<br>ПРОТРУЮВАЧА НАСІННЯ .....             | 71 |
| ВИСНОВКИ .....  | 74 |
| Бібліографія .....  | 76 |
| Додатки .....   | 80 |

## ВСТУП

Барабанні протруювачі насіння є важливими технологічними машинами в агропромисловості, призначеними для рівномірного нанесення протруйних препаратів на насіння різних культур. Від ефективності роботи барабанного протруювача залежить не лише якість протруювання, а й збереження насіння від втрат, економія хімічних препаратів та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Традиційне випробування конструкцій барабанних протруювачів та оптимізація їхніх режимних параметрів потребують значних матеріальних, часових та трудових витрат. У зв'язку з цим чисельне моделювання процесів, що відбуваються в барабанному протруювачі, дозволяє отримати детальну інформацію про рух насінин, взаємодію насіння з лопатями барабана та рідиною-протруйником, прилипання препарату і рівномірність покриття без проведення великої кількості фізичних експериментів.

Чисельне моделювання включає застосування методів дискретних елементів (DEM) для відтворення поведінки насінин як твердих частинок та багатофазного лагранжевого підходу для моделювання крапель протруйної рідини. Це дозволяє оцінити важливі характеристики процесу: ступінь рівномірності протруювання, коефіцієнт використання препарату, продуктивність протруювача та енергоспоживання.

Результати моделювання можуть бути використані для оптимізації конструкції барабанного протруювача, визначення оптимального кута нахилу лопатей, швидкості обертання барабана, параметрів розпилення рідини та висоти шару насіння, що дозволяє підвищити ефективність протруювання та економічність технологічного процесу.

Таким чином, чисельне моделювання барабанного протруювача насіння є потужним інструментом для дослідження та вдосконалення конструктивних і режимних параметрів машини, забезпечуючи науково обґрунтоване підвищення якості обробки насіння.

**Мета дослідження:** розробити та оптимізувати конструкцію і режим роботи барабанного протруювача насіння для забезпечення високої рівномірності нанесення препарату, мінімізації втрат протруйника, підвищення ефективності процесу обробки та економічної доцільності його впровадження.

**Задачі дослідження:**

- проаналізувати сучасні методи протруєння та обладнання для обробки насіння;
- дослідити рух насіння в обертовому барабані та взаємодію робочої рідини з поверхнею насінини;
- провести аналітичне і чисельне моделювання процесу оброблення насіння;
- визначити оптимальні параметри розпилення та режим роботи барабанного протруювача;
- розробити рекомендації щодо безпечної експлуатації та охорони праці при роботі з обладнанням;
- оцінити економічну ефективність удосконаленої конструкції та її вплив на якість насіння.

**Об'єкт дослідження:** процес протруєння насіння у барабанному протруювачі

**Предмет дослідження:** взаємодія насіння та робочої рідини протруйника в обертовому барабані, параметри розпилення, режим роботи обладнання та їх вплив на рівномірність покриття, ефективність обробки і економічні показники.

## 1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Протруєння насіння

Протруєння насіння – це обробка посівного матеріалу спеціальними препаратами (протруйниками) для захисту від хвороб та шкідників. Цей агротехнічний прийом є надзвичайно важливим для отримання здорових і дружніх сходів, а також запобігання втратам урожаю на початкових етапах розвитку рослин.

Призначення та переваги:

- Захист від хвороб: протруйники знищують збудників хвороб, які знаходяться як на поверхні насінини, так і всередині неї. Це запобігає розвитку таких недуг, як сажка, кореневі гнилі, борошниста роса тощо.
- Контроль шкідників: інсектицидні протруйники захищають насіння та сходи від ґрунтових та наземних комах-шкідників, які можуть пошкодити молоді рослини.
- Поліпшення схожості: захищене від інфекцій та шкідників насіння краще проростає, що забезпечує рівномірні та міцні сходи.
- Стимуляція росту: деякі протруйники містять компоненти, що стимулюють ріст кореневої системи та рослини в цілому.
- Економічна ефективність: хоча протруєння потребує додаткових витрат, воно допомагає уникнути значних втрат урожаю, що зрештою підвищує рентабельність.

Залежно від типу діючої речовини та спектра дії, протруйники поділяють на кілька видів:

- Фунгіцидні: захищають від грибкових та бактеріальних інфекцій, що передаються з насінням або знаходяться в ґрунті.
- Інсектицидні: забезпечують захист від шкідників (комах), які пошкоджують насіння та сходи.

– Комбіновані (інсекто-фунгіцидні): поєднують у собі властивості фунгіцидів та інсектицидів, забезпечуючи комплексний захист.

Вибір протруйника залежить від багатьох факторів, зокрема:

– Вид культури: для кожної культури існують рекомендовані препарати.

– Видовий склад збудників та шкідників: необхідно враховувати, від яких саме хвороб та шкідників потрібно захистити посіви.

– Регіон вирощування: різні кліматичні та ґрунтові умови можуть впливати на ефективність препаратів.

– Стан насіння: перед обробкою варто провести фітопатологічну експертизу.

Приклади протруйників для різних культур можна знайти в каталогах виробників засобів захисту рослин (наприклад, Bayer, Syngenta, FMC). Компанія Syngenta, наприклад, рекомендує для протруєння насіння використовувати комбіновані продукти, такі як Селест Макс або Вайбранс Інтеграл.

## **1.2 Методи протруєння та обробки насіння**

Матеріали та препарати для обробки та покриття насіння надають широкий перелік потенційних компонентів. Важливим етапом у процесі протруєння є нанесення обраних компонентів за допомогою відповідного обладнання для отримання кінцевого продукту – покритого насіння. Вибір обладнання та методу обробки насіння визначається, насамперед, дозуванням активних речовин, рідких та твердих компонентів, що наносяться на одиницю насіння.

Сьогодні використовують три основні типи обладнання для протруєння насіння: суха обробка порошком, обертовий барабан та порошковий барабан для пелетування (рисунк 1). Це обладнання може використовуватись окремо або у поєднанні та працювати з п'ятьма методами покриття: сухий порошок, насінневе покриття (seed dressing), плівкове покриття (film coating), енкрустування (encrusting) та пелетування (pelleting). Основна мета всіх методів і обладнання –

забезпечити однорідність нанесення покриття та його адгезію до насіння, не спричиняючи механічних пошкоджень.

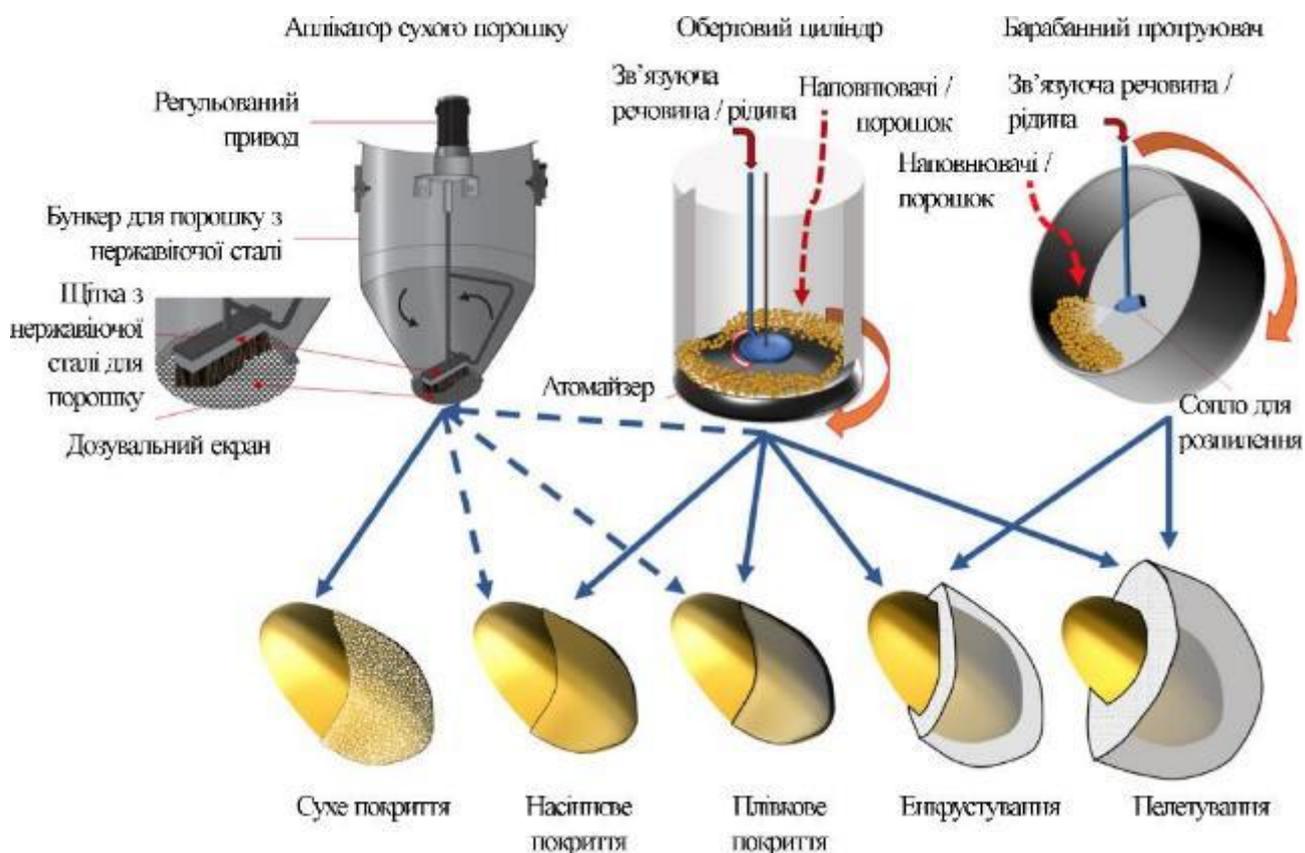


Рисунок 1.1 – Три основні типи обладнання для покриття насіння: аплікатор сухого порошку, обертовий циліндр та барабанний протруювач, які використовуються для отримання п'яти видів покриття: сухе покриття, насіннєве покриття, плівкове покриття, енкрустування та пелетування

*Суха обробка порошком.* Метод сухої обробки передбачає змішування насіння з сухим порошком. Раніше цей метод називали “planter box treatment”. Сухі порошки (dusts) застосовуються для боротьби з грибковими або бактеріальними інфекціями, після чого насіння піддають сушінню. Внаслідок обробки термін зберігання насіння може скорочуватися.

Сучасне обладнання для сухого покриття дозволяє більш точно наносити порошок на насіння. Наприклад, обертовий металевий щітковий механізм просіює порошок через калібровану сітку, а насіння рухається під аплікатором за

допомогою шнека, конвеєра чи іншого транспортера. Суха обробка може використовуватись як окремо, так і для нанесення фінішних порошоків після насінневого покриття або плівкового покриття.

Найбільш поширеними сухими порошками є тальк і графіт [45], але останні дослідження показали, що протеїн на основі сої є екологічно безпечним і економічно вигідним матеріалом, що покращує течію насіння під час сівби, не утворюючи пилу [46]. Дозування сухого порошку зазвичай складає 0,06–1,0% від маси насіння (рисунок 2) і обернено пропорційне розміру насінини.

*Насінневе покриття.* Найбільш поширений метод для низьких доз активних компонентів. Найчастіше використовується обертовий барабан. Рідина наноситься на обертовий диск та розпилюється на насіння всередині металевого циліндра, після чого оброблене насіння вивантажується.

Дозування рідких формуляцій зазвичай становить <0,05–1,0% від маси насіння. При високому дозуванні рідких хімікатів (зокрема інсектицидів) додають фінішні порошки для поглинання надлишку рідини.

*Плівкове покриття.* Плівкове покриття було адаптовано з фармацевтичної та кондитерської промисловості. Метод передбачає нанесення тонкого суцільного шару на поверхню насіння. Для цього використовують обертовий барабан. Полімери плівкового покриття формулюються так, щоб розчиняти чи доставляти активні інгредієнти на насіння. Плівкове покриття дозволяє досягти 90% покриття без суттєвої зміни форми та розміру насіння, підвищує течію насіння та контроль пилу, покращує естетичний вигляд і ефективність доставки захисних компонентів. Збільшення маси насіння становить 2–5% від початкової маси.

*Енкрустування.* Енкрустування поєднує рідкі та тверді частинки для повного покриття насіння, збереження форми насінини. Використовують обертовий барабан або покривний лоток. Після нанесення рідини насіння висушують до початкового вмісту вологи. Збільшення маси насіння після енкрустування може становити 8–500%. Енкрустоване насіння покращує схожість та підвищує виживаність сіянців. Товщина покриття та використання зв'язуючих речовин впливають на механічні властивості покриття та швидкість проростання.

*Пелетування та агломерація.* Пелетування є продовженням процесу енкрустування з більшою наростаючою масою, при якій форма початкового насіння не впізнається. Матеріали та методики пелетування часто є комерційною таємницею. Використовуються рідкі чи сухі зв'язуючі, а також наповнювачі. Збільшення маси насіння після пелетування може становити 500–>5000%.

Агломерація дозволяє об'єднувати кілька насінин у одну одиницю для полегшення посіву, використовуючи обертовий або покривний барабан, екструзію чи формування “насінневих кульок” з додаванням міңдобрив.

П'ять розглянутих технологій покриття насіння (суха обробка, насіннєве покриття, плівкове покриття, енкрустування, пелетування) відрізняються між собою за збільшенням маси насіння, кількістю активних компонентів, рідини та твердих частинок, а також за часом обробки.

Кожен метод має обмеження щодо кількості води/рідини та сухих частинок, що можна нанести, щоб забезпечити однорідність покриття, уникнути агломерації насіння та не перешкоджати проростанню. Важливі фактори успішного покриття: швидкість обертання барабану, диска розпилення, розмір частинок, пористість, водоутримувальна здатність та адгезія зв'язуючих речовин.

Обладнання для обробки насіння буває пакетне та безперервного потоку. Пакетне обладнання обробляє певну кількість насіння одночасно, а безперервне – з фіксованою швидкістю потоку. Методи покриття включають первинне нанесення (пряме нанесення рідини на насіння) та вторинне нанесення (розподіл матеріалу між насінинами під час змішування). Дозування може виражатися як г/100 кг насіння або мг активного інгредієнта на одну насінину.

### **1.3 Аналіз конструкцій обладнання для протруєння та обробки насіння**

Протруєння насіння – це технологічний процес, спрямований на знищення або пригнічення збудників хвороб і шкідників, які можуть бути присутні як на поверхні, так і всередині насіння. Метою є створення захисної оболонки, що підвищує стійкість рослин на ранніх стадіях росту. Вибір типу

обладнання для протруювання визначається масштабом виробництва, видом насіння, фізико-механічними властивостями препарату та вимогами до рівномірності нанесення.

Сучасні конструкції протруювачів насіння умовно поділяються на п'ять основних груп: камерні (порційні) протруювачі; шнекові (безперервної дії); стрічкові та лопатеві змішувачі; пневматичні та гравітаційні системи обприскування; барабанні протруювачі.

*Камерні протруювачі.* Камерні машини є найбільш простими за конструкцією. Вони працюють у порційному режимі: задана кількість насіння завантажується в робочу камеру, де відбувається його змішування з препаратом за допомогою обертання лопатей або барабана. Після завершення циклу насіння вивантажується, і камера готується до наступної порції.

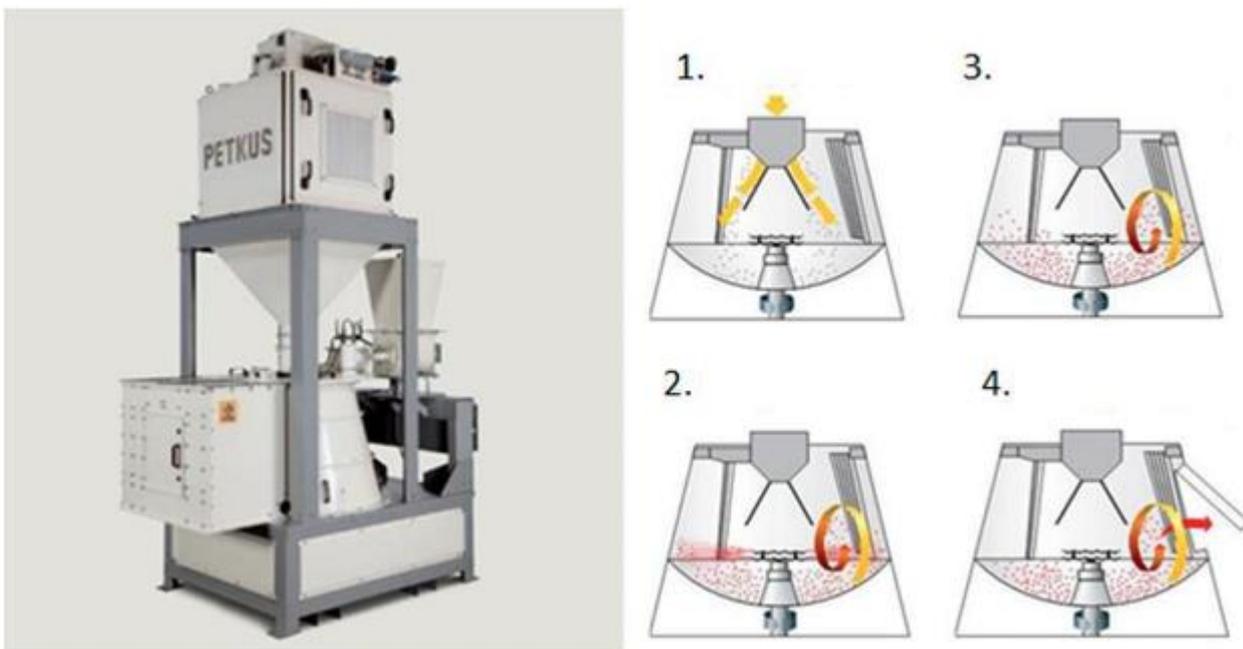


Рисунок 1.2 – Протруювач насіння камерний Petkus CT-100

Такі машини мають високу точність дозування препарату, що робить їх придатними для дослідницьких лабораторій і селекційних станцій. Проте недоліками є низька продуктивність, тривалі цикли завантаження-вивантаження

та значні енерговитрати на одиницю продукції. Крім того, при інтенсивному перемішуванні може спостерігатися часткове травмування насіння, особливо дрібнозернових культур.

*Шнекові (або гвинтові) установки* належать до машин безперервної дії. Насіння рухається уздовж корпусу під дією обертового шнека, а рідкий протруйник подається через форсунки або дозатори. Під час переміщення відбувається одночасне змішування насіння з препаратом.



Рисунок 1.3 – Шнековий протруювач насіння ПНШ-5-01 «Новинка»

Основними перевагами шнекових протруювачів є висока продуктивність, компактність конструкції та можливість інтеграції в автоматизовані лінії. Водночас такі машини мають істотні обмеження при роботі з малими партіями: через інерційність подачі та складність регулювання витрат препарату важко забезпечити рівномірність покриття при обробці невеликих обсягів. Крім того, жорстке механічне перемішування може призводити до пошкодження оболонки насіння або утворення грудок.

*Стрічкові змішувачі* застосовуються переважно для протруювання великих партій насіння з високою насипною масою (кукурудза, пшениця, ячмінь).

Перемішування здійснюється системою стрічкових або лопатевих елементів, які забезпечують циркуляцію насіння всередині камери.



Рисунок 1.4 – Стрічковий протруювач насіння СПН

Такі апарати відзначаються високою рівномірністю змішування при стабільних умовах подачі, проте вони мають значні габарити та енерговитрати. Для селекційного матеріалу та дрібних партій вони малоприсадибні, оскільки потребують мінімального завантаження для ефективної роботи. До того ж після обробки необхідне ретельне очищення внутрішніх поверхонь для уникнення контамінації між партіями, що ускладнює експлуатацію.

Пневматичні системи працюють за принципом обприскування насіння у потоці повітря або при його вільному падінні. Рідкий препарат розпилюється дрібнодисперсно, утворюючи аерозоль, який осідає на поверхні зернівок.

Перевагами цього типу обладнання є мінімальне механічне навантаження на насіння та висока швидкість процесу. Однак рівномірність покриття значною мірою залежить від вологості, швидкості потоку та гранулометричного складу насіння. Для малих партій селекційного матеріалу пневматичні системи виявляються надто енергоємними, а втрати препарату через осадження на стінках камери або у фільтрах є суттєвими.

*Гравітаційні протруювачі*, у яких насіння вільно падає через зону розпилення, є простими в конструкції, проте забезпечують лише часткове

покриття зернівок, тому використовуються як попередня або допоміжна стадія у комплексних системах.

*Барабанні установки* поєднують переваги камерних і пневматичних систем. Принцип дії базується на обертанні циліндричного барабана, всередині якого насіння постійно переміщується завдяки обертальному руху та діям гравітаційних сил. Протруйник подається через розпилювальну систему (форсунку або дозатор), утворюючи тонку плівку на поверхні зернівок.



Рисунок 1.5 – Барабанний протруйувач насіння Bayer CF35

Основними перевагами барабанних протруйувачів є:

- Висока рівномірність нанесення препарату – завдяки комбінації обертання та зсувних рухів насіння у барабані;
- Можливість точного дозування рідини та насіння, що забезпечує стабільну якість обробки навіть при мінімальних об'ємах;
- М'який режим обробки, який мінімізує травмування насіння;
- Простота конструкції та легке очищення між партіями, що особливо важливо для селекційних і дослідних господарств;
- Гнучкість у налаштуванні параметрів процесу – частоти обертання, кута нахилу барабана, інтенсивності подачі препарату, тривалості обробки.

Завдяки цим властивостям барабанні протруювачі є оптимальним вибором для малих обсягів високоякісного селекційного насіння, де важливі точність, відтворюваність та мінімальні втрати. Їх ефективність підтверджується тим, що у багатьох науково-дослідних установах і насінневих лабораторіях саме барабанні машини використовуються для апробації нових препаратів і дослідження параметрів процесу.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика типів протруювачів

| Тип обладнання | Режим роботи                          | Продуктивність | Рівномірність нанесення | Травмування насіння | Придатність для малих партій |
|----------------|---------------------------------------|----------------|-------------------------|---------------------|------------------------------|
| Камерний       | Порційний                             | Низька         | Висока                  | Середнє             | Висока                       |
| Шнековий       | Безперервний                          | Висока         | Середня                 | Високе              | Низька                       |
| Стрічковий     | Безперервний                          | Висока         | Висока                  | Середнє             | Низька                       |
| Пневматичний   | Безперервний                          | Висока         | Середня                 | Низьке              | Низька                       |
| Барабанний     | Порційний /<br>напів-<br>безперервний | Середня        | Висока                  | Низьке              | Висока                       |

Таким чином, аналіз конструкцій існуючого обладнання для протруювання насіння показує, що для умов малих обсягів і цінного селекційного матеріалу найбільш ефективним є барабанний тип протруювача. Він поєднує простоту конструкції, м'який режим обробки, високу рівномірність нанесення препарату та гнучкість у керуванні параметрами. У результаті забезпечується мінімізація втрат, збереження посівних якостей насіння і стабільна якість протруювання, що є ключовими вимогами до сучасних технологій передпосівної обробки.

#### 1.4 Висновки з розділу

1. Протруєння насіння є важливим етапом передпосівної підготовки, що забезпечує захист посівного матеріалу від хвороб і шкідників, підвищує схожість та енергію проростання. Обробка протруйниками запобігає розвитку

грибкових і бактеріальних інфекцій, а також пошкодженню сходів ґрунтовими комахами, сприяючи формуванню міцних і здорових рослин. Сучасні протруйники поділяються на фунгіцидні, інсектицидні та комбіновані, що поєднують властивості обох груп. Вибір препарату залежить від культури, стану насіння, складу патогенів і кліматичних умов. Отже, протруєння насіння є невід'ємним елементом інтегрованого захисту рослин, який підвищує урожайність, якість продукції та стійкість агросистем у цілому.

2. Методи протруєння та покриття насіння відіграють ключову роль у забезпеченні рівномірного нанесення захисних речовин і створенні оптимальних умов для зберігання та проростання насіння. Залежно від цілей і складу препаратів застосовують суху обробку, насінневе, плівкове покриття, енкрустування та пелетування. Кожен метод має свої особливості щодо витрати робочого розчину, збільшення маси насіння та рівномірності покриття. Для селекційних і науково-дослідних потреб, де обробляються невеликі партії насіння з високою вартістю і важливістю збереження посівних якостей, найдоцільнішим є використання барабанних протруювачів. Таке обладнання забезпечує м'яке перемішування, рівномірне змочування та мінімальне травмування насіння. Крім того, барабанні установки дозволяють точно дозувати рідину, легко змінювати параметри процесу і адаптувати метод до різних культур і типів препаратів.

3. Аналіз конструкцій існуючого обладнання для протруювання насіння показує, що для умов малих обсягів і цінного селекційного матеріалу найбільш ефективним є барабанний тип протруювача. Він поєднує простоту конструкції, м'який режим обробки, високу рівномірність нанесення препарату та гнучкість у керуванні параметрами. У результаті забезпечується мінімізація втрат, збереження посівних якостей насіння і стабільна якість протруювання, що є ключовими вимогами до сучасних технологій передпосівної обробки.

## 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ БАРАБАННОГО ПРОТРУЮВАЧА НАСІННЯ

### 2.1 Постановка задачі

Аналітичні дослідження барабанного протруювача насіння проведено з метою виявлення закономірностей взаємодії насінневого матеріалу з робочими органами машини та рідиною-протруювачем, визначення оптимальних конструктивних параметрів і режимів роботи.

На першому етапі досліджено рух насінин у середині обертового барабана.

На другому етапі проаналізовано взаємодію рідини-протруювача з поверхнею насінини.

На третьому етапі проведено аналітичне визначення параметрів розпилення.

### 2.2 Рух насінин у середині обертового барабана

Насініну апроксимували як циліндричну DEM-частинку з радіусом ( $r$ ) і висотою ( $h$ ). Для прикладу використовували параметри, взяті з робочої моделі: ( $r = 0,0124$  м,  $h = 0,00868$  м). Густина твердого матеріалу прийняли ( $\rho_s = 1400$  кг/м<sup>3</sup>).

Об'єм і маса частинки обчислювалися за стандартними формулами:

$$V_p = \pi r^2 h, \quad (2.1)$$

Після підстановки отримали числові значення:

$$V_p \approx 4,1929 \times 10^{-6} \text{ м}^3, \quad m_p \approx 0,005870 \text{ кг} (\approx 5,87 \text{ г})., \quad (2.2)$$

Поверхню циліндричної частинки (для оцінки товщини покриття) обчислювали як

$$A_p = 2\pi r(h + r) \approx 1,6424 \times 10^{-3} \text{ м}^2, \quad (2.3)$$

При підйомі та падінні частинка знаходилася під дією наступних сил: вага ( $m_p g$ ), нормальна реакція стінки/лопаті ( $N$ ), сила тертя ( $F_{\text{тер}}$ ), інерційні та відцентрові сили при обертанні барабана. Запис руху вздовж поверхні лопаті/стінки набував вигляду скалярного балансу вздовж напрямку підйому:

$$m_p a_t = m_p g \sin \alpha + m_p \omega^2 r_b \sin \phi - F_{\text{тер}}, \quad (2.4)$$

де  $a_t$  – тангенціальна складова прискорення частинки,  $\alpha$  – кут нахилу лопаті щодо горизонту,  $\omega$  – кутова швидкість барабана ( $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ,  $r_b$  – радіус барабана,  $\phi$  – кут положення частинки на барабані. Силу тертя записували як

$$F_{\text{тер}} = \mu, N \approx \mu m_p g \cos \alpha, \quad (2.5)$$

за наближенням, що нормальна реакція приблизно компенсувала компоненту ваги у нормальному напрямку.

Частинка піднімалася по лопаті тоді, коли тангенціальна складова відцентрової (інерційної) сили та компонент гравітації забезпечували переміщення вгору проти тертя. Умова підйому записувалася як нерівність:

$$m_p \omega^2 r_b \sin \phi + m_p g \sin \alpha \geq \mu m_p g \cos \alpha, \quad (2.6)$$

Розв'язання цієї нерівності щодо кута  $\phi$  дає область, де частинка буде утримуватись на лопаті і рухатись вгору. За фіксованих  $\omega$ ,  $r_b$ ,  $\alpha$ ,  $\mu$  з цієї умови визначали очікувану висоту підйому  $H_{\text{lift}}$ .

Для оцінки режиму руху зернового шару використовували безрозмірний критерій (аналог Фруда для обертової системи):

$$F_r = \frac{\omega^2 R}{g}, \quad (2.7)$$

де  $R$  – радіус барабана, м. Значення  $F_r$  інтерпретували так: при малих  $F_r$  частинки ковзали вниз з малою підйомністю; при середніх – утворювався квазіпсевдозріджений режим з підйомом і вільним падінням (бажаний для хорошого перемішування); при дуже великих – домінував центробіжний режим (частинки притиснуті до стінки). Для прикладу, при  $D = 0,5$  м ( $R = 0,25$  м) і  $n = 12,5$  об/хв було:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \approx 1,309 \text{ рад/с}, \quad F_r \approx \frac{\omega^2 R}{g} \approx 0.0437, \quad (2.8)$$

Щоб досягти значення  $F_r \approx 0.3$  (частіше рекомендованого для активного підйому і падіння), знадобилося  $n \approx 32.8$  об/хв. Таким чином, для заданої геометрії та бажаного режиму підйому визначали інтервал робочих частот.

Контактну взаємодію моделювали лінійною пружинно-демпфуючою моделлю:

$$F_n = k_n \delta_n + c_n \dot{\delta}_n, \quad (2.9)$$

$$F_t = -\min \{ k_t \delta_t + c_t \dot{\delta}_t, \mu F_n \} \hat{t}, \quad (2.10)$$

де  $\delta_n$  – нормальна деформація,  $\delta_t$  – сумарне зрізове зміщення у дотичній площині,  $k_n$ ,  $k_t$  – відповідні жорсткості,  $c_n$ ,  $c_t$  – демпфери. Ефективна маса контакту двох ідентичних частинок була  $m_{ef} = m_p / 2$ .

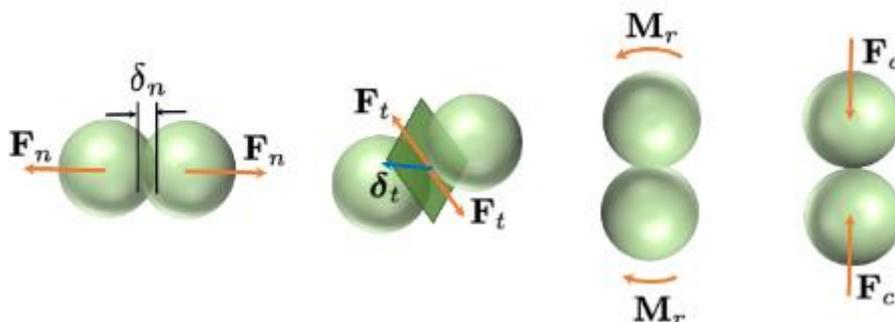


Рисунок 2.1 – Контактні сили, що описують взаємодію частинка-частинка: зліва направо, нормальна сила  $F_n$ , тангенціальна сила тертя  $F_t$ , момент тертя кочення  $M_r$  та згуртованість  $F_c$

Оціночний час контакту обчислювали за наближенням гармонічного осцилятора:

$$t_c \approx \pi \sqrt{\frac{m_{\dot{a}0}}{k_n}}. \quad (2.11)$$

Підстановкою отримали:

$$m_{ef} \approx \frac{0.005870}{2} = 0.002935 \text{ кг}, \quad t_c \approx \pi \sqrt{\frac{0.002935}{50000}} \approx 7.61 \times 10^{-4} \text{ с.} \quad (2.12)$$

Для стабільного інтегрування руху в DEM інструкційно брали тайм-степ менший за контактний час. Для наведених параметрів це давало:

$$\Delta t \approx \frac{7.61 \times 10^{-4}}{50} \approx 1.52 \times 10^{-5} \text{ с.} \quad (2.13)$$

Таке значення забезпечувало адекватне відтворення контактної взаємодії і зменшувало чисельні артефакти.

Коефіцієнт нормального відновлення  $e_n$  використовували для оцінки втрат кінетичної енергії при зіткненні. Зв'язок демпфінгу  $c_n$  з  $e_n$  і  $k_n$  давали через розв'язок диференціального рівняння контакту, тому при калібруванні моделі задавали  $e_n$  (наприклад 0,1–0,3 для м'яких органічних поверхонь) і підбирали  $c_n$  відповідно.

Було проаналізовано вплив заповнення барабана (відношення об'єму насіння до об'єму барабану) на формування шару: при малому заповненні домінувала рухома купа з інтенсивними падіннями; при великому – шар перетворювався на густий потік зі зменшеною інтенсивністю контакту з розпилювачем. Кут природного укосу  $\phi_r$  використовували як індикатор: ( $\tan \phi_r \approx \mu$ ). Наприклад, при  $\mu = 0,5$  кут укосу був  $\phi_r = 26,6^\circ$ .

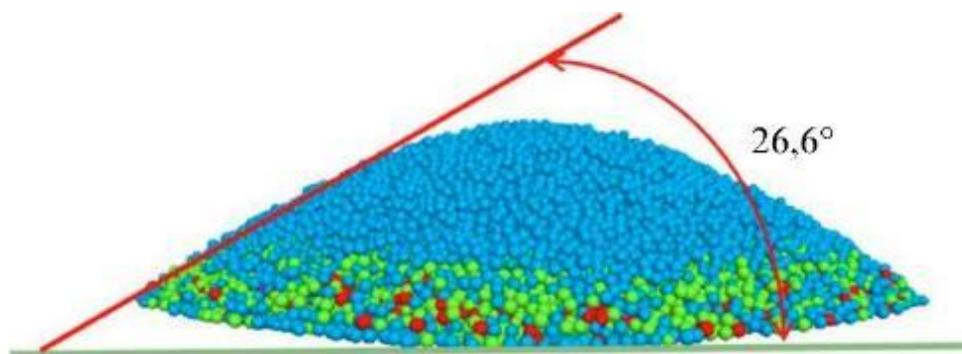


Рисунок 2.2 – Формування кута природнього укоса для моделі насіння

Для оцінки ефективності нанесення розраховували частоту контактів стандартної частинки з розпилювальним факелом  $f_c$  і середній час перебування у зоні покриття  $t_r$ . У моделі визначали  $f_c$  шляхом підрахунку перетинів траєкторії частинки з об'ємом інжекції за одиницю часу, а  $t_r$  – як середній час, поки частинка перебувала у межах робочого об'єму. Ці величини прямо корелювали зі сумарною масою нанесеного покриття на частинку.

Під час моделювання фіксувалися: траєкторії частинок, величини нормальних і тангенціальних контактних сил, кількість зіткнень з лопаттю і стінкою, висота підйому  $H_{lift}$ , частота контактів з факелом  $f_c$ , час перебування  $t_r$ , відсоток ушкоджених частинок (усереднений індекс  $D$  за критерієм перевищення допустимої контактної сили) та параметри швидкості і прискорення частинок. На їх основі розраховували статистики: середнє, дисперсію, коефіцієнт варіації товщини покриття.

Для орієнтування взяли барабан з  $D = 0,5$  м,  $n = 12,5$  об/хв,  $\mu = 0,5$ ,  $\alpha = 30^\circ$ . Підстановки у умову підйому показали, що при цих параметрах відцентрова сила не завжди була достатньою для підйому до верхівки лопаті: спостерігався помірний підйом і часті падіння – бажаний режим для гарного перемішування. Щоб збільшити частоту контактів з факелом, змінювали або  $n$  (зростання давав більшу кількість підйомів), або кут  $\alpha$  (певне збільшення кута збільшувало підйом, але надмірний кут призводив до ковзання й підвищеного травмування).

Параметри  $k_n$ ,  $k_t$ ,  $\mu$ ,  $e_n$  та демпфери калібрували на основі простих лабораторних тестів: падіння індивідуальної частинки на пластину з виміром часу контакту й відскоку, вимірів кута природного укусу для маси зерна тощо. Після калібрування зіставляли статистику обертання і розподіл висот шару з відео експерименту для перевірки правдоподібності DEM-поведінки.

Кут нахилу лопатей обирали в межах, де підйом і падіння збалансувалися з мінімально допустимим травмуванням; аналітичне наближення дало інтервал  $25-35^\circ$  для наведених значень коефіцієнта тертя.

### 2.3 Взаємодія рідини-протруювача з поверхнею насінини

Розглядалися окремі краплі робочої рідини (лагранжеві частинки) із заданими властивостями, що потрапляли на тверду поверхню насінини. Для прикладу використовувалися такі параметри (орієнтовно, відповідно до моделі): густина рідини  $\rho_1 = 1200 \text{ кг/м}^3$ , діаметр краплі  $d = 100 \text{ мкм} = 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , швидкість краплі при ударі  $v = 10 \text{ м/с}$ , поверхневий натяг  $\sigma = 5.0 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$ , кінематична/динамічна в'язкість повітря  $\mu_{\text{air}} \approx 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Радіус насінини в прикладах брався  $r_s = 12,4 \text{ мм}$  (як у попередніх розрахунках).

Для класифікації поведінки крапель при ударі з поверхнею застосовували ключові безрозмірні числа.

Число Вебера (інерція / капілярні сили)

$$We = \frac{\rho_1 v^2 d}{\sigma}. \quad (2.14)$$

Підставляючи параметри отримуємо  $We \approx 240$ . (Інтерпретація: значення порядку сотень відповідає інтенсивній деформації краплі; при вищих  $We$  можливе дроблення/бризкання)

Капілярне число (в'язкість / поверхневий натяг)

$$Ca = \frac{\mu_1 v}{\sigma}, \quad (2.15)$$

де  $\mu_1$  – динамічна в'язкість рідини; для водної суспензії  $\mu_1 = 1 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , тоді  $Ca = 0.3$ . (Інтерпретація:  $Ca$  порядку 0.1–1 означає, що в'язкі та капілярні сили співпрацюють; сильне «приклеювання» при підвищених  $\mu_1$ )

Час релаксації краплі (дроблення / слід інерції) – характерний час, за який крапля змінює швидкість через опір повітря:

$$\tau_p \approx \frac{\rho_1 d^2}{18\mu_{\text{air}}}. \quad (2.16)$$

Підставляючи  $\tau_p \approx 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ . (Інтерпретація: 100-мкм крапля має помітну інерційність – час релаксації соті частки секунди.)

При застосованих параметрах  $We$  було досить великим ( $\sim 240$ ), тому ударні деформації інтенсивні; для уникнення бризкання та відскоку слід було зменшувати  $v$  або  $d$ , або підвищувати адгезивні/в'язкі властивості рідини.

Механізми події при ударі краплі в розрізі часу (фазова схема).

Підхід та аеродинамічний гальм – крапля у повітрі губила частину кінетичної енергії на в'язкі сили повітря (час релаксації  $\tau_p$ ).

Контакт/удар з поверхнею – за характером удару відбувалося одне з: прилипання (адгезія + розтікання), відскік або дроблення/бризкання. Режим визначався  $We$ ,  $Ca$ , кутом удару й станом поверхні.

Розтікання / формування тонкої плівки – після удару відбувався розплив краплі по поверхні із максимумом радіусу  $R_{max}$ . Емпіричне співвідношення для максимального розсіяння (інерційно-капілярна область):

$$\beta_{max} = \frac{R_{max}}{R_0} \approx C \cdot We^{1/4}, \quad (2.17)$$

де  $R_0 = d/2$  і  $C$  – коефіцієнт порядку 0.8–1.0.  $R_{max} \approx 177$  мкм.  $\beta_{max} \approx 3.54$ .

Всмоктування/сорбція та висихання – після розтікання частина розчину залишалася на поверхні (адсорбція), частина могла проникати в пори оболонки насінини дифузиею. При наявності органічних зв'язувальних компонентів рідина «закріплювалася» на поверхні.

Природна умова змочування виражалася через рівняння Юнга:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta_c, \quad (2.18)$$

де  $\theta_c$  – контактний (крайовий) кут змочування. Для стабільного прилипання бажаним вважався  $\theta_c < 90^\circ$ . У роботі підбирали склад робочого розчину (ПАР, в'язкість), щоб досягнути  $\theta_c$  у діапазоні  $30$ – $60^\circ$  (зручний компроміс між змочуванням і мінімальним стіканням).

Енергію, доступну для деформації краплі при ударі, порівнювали з роботами адгезії і поверхневих сил; якщо енергія удару  $E_{imp} \sim \frac{1}{2} m_d v^2$  була меншою за поріг, визначений капілярною роботою, крапля прилипала, інакше – відскакувала/руйнувалась.

5. Розрахунок маси краплі, об'єму та кількості крапель у струмені (приклад для витрати).

Масова витрата (приклад)

$$Q_{\text{vol}} = 20 \text{ мл/хв} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{хв} = 3.333 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$$

Об'єм однієї краплі:

$$V_d = \frac{\pi d^3}{6} = \frac{\pi(1.0 \cdot 10^{-4})^3}{6} \approx 5.236 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3.$$

Кількість крапель на секунду:

$$N_d = \frac{Q_{\text{vol}}}{V_d} \approx \frac{3.333 \cdot 10^{-7}}{5.236 \cdot 10^{-13}} \approx 6.366 \cdot 10^5 \text{ крапель / с}$$

Маса однієї краплі:

$$m_d = \rho_l V_d = 1200 \cdot 5.236 \cdot 10^{-13} \approx 6.283 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \approx 0.628 \text{ нг}$$

Якщо робочий факел розпилення мав переріз площі  $S$  (припустимо  $S = 0.05 \text{ м}^2$  у зоні охоплення), а проєкційна площа однієї насінини  $A_{\text{proj}} \approx \pi r_s^2$  (для  $r_s = 0.0124 \text{ м}$ ,  $A_{\text{proj}} \approx 4.826 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ), то середня кількість крапель у секунду, які цілком перетинали проєкцію насінини (геометрична ймовірність), становила:  $N_{\text{hit}} = N_d \cdot \frac{A_{\text{proj}}}{S} \approx 6.15 \cdot 10^3 \text{ крапель / с}$

Якщо коефіцієнт прилипання (ймовірність адгезії при ударах),  $P_{\text{adh}}$ , був  $\sim 0.2$  (20 %), то ефективна частота прилипань дорівнювала  $\approx 1.23 \cdot 10^3 \text{ крапель/с}$ . Маса рідини, що накопичується на одній насінині за 1 с:  $m_{\text{coat/s}} \approx N_{\text{hit}} P_{\text{adh}} m_d \approx 0.773 \text{ мг}$ .

Ці орієнтовні числення дозволяли оцінити швидкість наростання покриття і підібрати витрату рідини та час обробки для досягнення заданої маси покриття на насінині.

Після прилипання розглядали два стадії проникнення активної речовини: (1) дифузія по тонкій полімерній плівці/розчині, (2) проникнення в поверхневі шари оболонки (пори) – процеси описувалися законами Фіка.

Для тонкої плівки ділилися на два етапи: швидке змішування в шарі покриття та більш повільна дифузія у тверду структуру. Класичне рівняння Фіка для одномірного проникнення:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (2.19)$$

де  $D_{\text{eff}}$  – ефективний коефіцієнт дифузії в матеріалі покриття/оболонці. Для порядку величини  $D_{\text{eff}}$  взяті значення  $10^{-10}$ - $10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с (для малих молекул у полімерних/органічних матрицях). Глибина проникнення за час  $t$  оцінювали як правило:

$$\delta \approx \sqrt{4D_{\text{eff}} t} \quad (2.20)$$

Підставляючи значення отримуємо  $\delta = 2$  мкм.

Отже, за дуже короткий час (0.1 с) проникнення малося в мікрометровому діапазоні; більш глибокому включенню активної речовини сприяли тривале зберігання або додаткове зволоження.

Кінетична модель поверхневої адсорбції (перший порядок):

$$\frac{dC_s}{dt} = k_a C_1 - k_d C_s, \quad (2.21)$$

де  $C_1$  – концентрація активного інгредієнта в тонкому шарі рідини/плівки;  $k_a$  – швидкості адсорбції/десорбції. При часах контакту  $t_c$  порядок 0.1–1 с показано, що частина активного інгредієнта переходила у поверхневий шар; калібрування  $k_a$ ,  $k_d$  виконувалися за експериментальними даними (зважування, аналіз вмісту  $a_i$ ).

Частина рідини не прилипає:

- Струменевий стік – надлишок витраченого розчину, що стікає по поверхні барабана; визначали як маса, що з'являється на стінках, і враховували в балансі витрат.

- Аерозольні втрати / залишок у повітрі – маса, що не осідає за час моделювання і залишається у вигляді дрібних крапель; враховувалася як втрати, що зменшували коефіцієнт використання  $\eta$ .

Баланс мас:

$$M_{\text{подано}} = M_{\text{на_насінні}} + M_{\text{на_стінках}} + M_{\text{в_повітрі}} + M_{\text{втрати}} \quad (2.22)$$

Коефіцієнт використання:

$$\eta = M_{\text{на_насінні}} / M_{\text{подано}} \cdot 100 \% \quad (2.23)$$

Практичні рекомендації, що впливали з аналізу

1. Для запобігання дробленню/бризканню та зменшення втрат рекомендувалося утримувати  $W_e$  в більш помірному діапазоні (наприклад, шляхом зниження  $v$  або зменшення  $d$ ), або підвищувати  $\sigma$   $\mu_1$  через компоненти формуляції.

2. Для поліпшення прилипання вводили ПАРи (знижували контактний кут), а також невеликі кількості в'язкої компоненти, що збільшували  $P_{adh}$  без значного стікання.

3. Розрахункові оцінки числа крапель/с на одну насінину допомагали попередньо налаштувати витрату рідини та час обробки (щоб досягти бажаної маси покриття).

4. Для прискороного проникнення активного інгредієнта слід було застосовувати складники-носії з вищим  $D_{eff}$  або забезпечувати триваліше витримання/зволоження.

5. При роботі з дрібними насінинами (менша  $A_{proj}$ ) доля утриманої маси збільшувалась відносно маси насінини – це треба враховувати у дозуванні.

#### **2.4 Аналітичне визначення параметрів розпилення у барабанному протруювачі насіння**

У процесі протруєння одним із ключових етапів є формування тонкої рівномірної плівки робочого розчину протруйника на поверхні насіння. Для цього необхідно правильно визначити параметри розпилення – розмір крапель, кут розкриття факела, швидкість руху крапель та густину потоку розпилюваної рідини. Ці параметри визначають ступінь змочування насіння, рівномірність нанесення препарату та ефективність використання рідини.

Під час проходження рідини через форсунку (сопло) утворюється аерозоль – сукупність дрібних крапель, що рухаються в повітряному потоці з певною початковою швидкістю ( $v_0$ ) і розподілом за розмірами.

Краплі протруйника мають діаметр ( $d$ ), масу  $m = \frac{\pi d^3 \rho_l}{6}$ , де  $\rho_l$  – густина рідини.

Після виходу з розпилювача крапля рухається у повітряному потоці з урахуванням сил:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{1}{2} C_d \rho_a A v^2 \quad (2.24)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $C_d$  – коефіцієнт опору краплі,  $\rho_a$  – густина повітря,  $A = \frac{\pi d^2}{4}$  – проекція площі краплі.

Для дрібних крапель (менше 100 мкм) швидко встановлюється гранична швидкість:

$$v_t = \sqrt{\frac{4gd(\rho_l - \rho_a)}{3C_d \rho_a}} \quad (2.24)$$

Для оцінки дисперсності розпиленого потоку використовується середньомасовий діаметр (Sauter Mean Diameter, SMD):

$$d_{32} = K \left( \frac{\sigma}{\rho_l u^2} \right)^{0.5} \quad (2.25)$$

де  $K$  – емпіричний коефіцієнт (для плоскофакельних форсунок ( $K = 0,45-0,65$ ),  $\sigma$  – поверхневий натяг рідини,  $u$  – швидкість витікання рідини з сопла.

Зменшення поверхневого натягу (додаванням змочувачів або ПАР) призводить до формування дрібніших крапель, що підвищує рівномірність покриття насіння.

Кут розкриття факела  $\theta$  визначає зону покриття барабана і залежить від конструкції розпилювача та тиску подачі рідини:

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{r_f}{L} \quad (2.26)$$

де  $r_f$  – радіус зони покриття на поверхні шару насіння,  $L$  – відстань від сопла до поверхні насіння.

Для забезпечення рівномірного змочування шарів насіння у барабані кут розкриття повинен задовольняти умову:

$$\theta_{\text{опт}} = 2 \arctan\left(\frac{D_b/2}{L}\right) \quad (2.27)$$

Для аналітичного опису розподілу рідини по об'єму шару насіння вводиться щільність змочування ( $q(x)$ ):

$$q(x) = q_0 e^{-\alpha x} \quad (2.28)$$

де  $q_0$  – початкова густина потоку на поверхні шару,  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання (залежить від структури насіння і швидкості обертання барабана),  $x$  – відстань від поверхні.

Рівномірність покриття оцінюється коефіцієнтом варіації:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}}{\bar{q}} \times 100\% \quad (2.29)$$

Для якісного протруєння ( $CV < 15\%$ ).

Ймовірність осідання краплі на насініну визначається за критерієм Вебера:

$$We = \frac{\rho_1 v^2 d}{\sigma} \quad (2.30)$$

Якщо ( $We > 12$ ), відбувається розбризкування рідини; для ефективного змочування необхідно ( $1 < We < 12$ ).

Кількість рідини, що осідає на одну насініну:

$$m_w = \eta \frac{Q_1}{N_s} \quad (2.31)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт ефективності осідання (0.7–0.9),  $Q_1$  – витрата рідини на барабан,  $N_s$  – кількість насінін у шарі.

Для досягнення рівномірного змочування насіння при мінімальних витратах рідини здійснюється оптимізація за критерієм:

$$\Phi = \beta_1 CV + \beta_2 \left( \frac{Q_1 - Q_{\text{опт}}}{Q_{\text{опт}}} \right)^2 + \beta_3 (We - We_{\text{опт}})^2 \quad (2.32)$$

де  $\beta_i$  – вагові коефіцієнти, що відображають важливість рівномірності, економічності та стабільності змочування.

Мінімізація функціонала  $\Phi$  дозволяє визначити оптимальні: тиск подачі  $p_{\text{опт}}$ , діаметр сопла  $d_s$ , відстань до шару насіння  $L_{\text{опт}}$ , кут розкриття факела  $\theta_{\text{опт}}$ .

## 2.5 Висновки з розділу

1. Для барабана діаметром 0,5 м і частоти обертання 12,5 об/хв визначено  $F_r = 0,036$ , що відповідає квазіпсевдозрідженому режиму, оптимальному для рівномірного змішування насіння. Оптимальний кут нахилу лопатей становить  $\alpha = 25\text{--}35^\circ$ . Моделювання підтвердило ефективний підйом частинок, висоту підйому  $H_{\text{lift}}$ , та їх рівномірне перебування у зоні розпилення. Оптимальне заповнення барабана забезпечує регулярні цикли підйому й падіння насіння, що підвищує рівномірність нанесення препарату та ефективність процесу.

2. Проведений аналіз показав, що при густині рідини  $\rho_l = 1200 \text{ кг/м}^3$ , діаметрі краплі  $d = 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , швидкості удару  $v = 10 \text{ м/с}$  і поверхневому натязі  $\sigma = 5.0 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$  число Вебера становило  $We = 240$ , що відповідає інтенсивній деформації краплі без надмірного бризкання. Капілярне число  $Ca = 0.3$  вказує на збалансовану взаємодію в'язких і капілярних сил. Час релаксації краплі становив  $\tau_p = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ , що підтвердило помітну інерційність частинок рідини при русі в повітряному потоці. Максимальний радіус розтікання після удару складав  $R_{\text{max}} = 177 \text{ мкм}$ , коефіцієнт розтікання  $\beta_{\text{max}} = 3.54$ . Контактний кут змочування знаходився в межах  $\theta_c = 30\text{--}60^\circ$ , що забезпечувало стійке прилипання без стікання. Коефіцієнт прилипання визначено на рівні  $Pa d_h = 0.2$ , ефективна частота прилипань —  $1.23 \cdot 10^3 \text{ крапель/с}$ . Глибина проникнення активної речовини в оболонку насінини становила  $\delta = 2 \text{ мкм}$ , за ефективного коефіцієнта дифузії  $D_{\text{eff}} = 10^{-10}\text{--}10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ , що свідчить про мікроскопічний характер поглинання. Для досягнення стабільного змочування й мінімізації

втрат рекомендовано підтримувати параметри в межах:  $We = 100\text{--}200$ ,  $Ca \approx 0.3$ ,  $\theta_c < 60^\circ$ , зменшувати швидкість  $v$ , діаметр краплі  $d$  і підвищувати в'язкість  $\mu$  або поверхневий натяг  $\sigma$ .

3. Аналітичне моделювання процесу розпилення робочої рідини у барабанному протруювачі дало змогу кількісно оцінити вплив основних параметрів на якість змочування насіння. При густині рідини  $\rho_1 = 1200 \text{ кг/м}^3$ , поверхневому натязі  $\sigma = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$  і швидкості витікання з сопла  $u = 15\text{--}25 \text{ м/с}$ , середньомасовий діаметр крапель становив  $SMD = 90\text{--}130 \text{ мкм}$ . Такі розміри забезпечують стабільну рівномірність покриття та запобігають надмірному стіканню рідини з поверхні насіння. Розрахований кут розкриття факела  $\theta = 45\text{--}60^\circ$  при відстані  $L = 0.25\text{--}0.35 \text{ м}$  дозволяє повністю охопити активну зону шару насіння без утворення сухих ділянок. Для рівномірного розподілу рідини за об'ємом шару коефіцієнт варіації  $CV < 15\%$ , що відповідає вимогам високоякісного протруєння. Оптимізація критеріального функціонала  $\Phi$  дозволила визначити оптимальні параметри розпилення:  $p_{opt} = 0.25\text{--}0.35 \text{ МПа}$ ,  $d_s = 0.6\text{--}0.8 \text{ мм}$ ,  $\theta_{opt} = 50\text{--}55^\circ$ ,  $L_{opt} = 0.3 \text{ м}$ . Отримані параметри забезпечують максимальну рівномірність покриття насіння тонкою плівкою робочого розчину при мінімальних витратах препарату, що підвищує ефективність протруєння та зменшує втрати діючої речовини.

## 3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БАРАБАННОГО ПРОТРУЮВАЧА НАСІННЯ

### 3.1 Постановка задачі

У процесах підготовки насіння до сівби барабанні протруювачі широко використовуються для рівномірного нанесення рідких хімічних препаратів (протруйників) на поверхню зернівок. Рівномірність покриття насіння має вирішальне значення для ефективного захисту від хвороб, шкідників та забезпечення безпечних умов проростання.

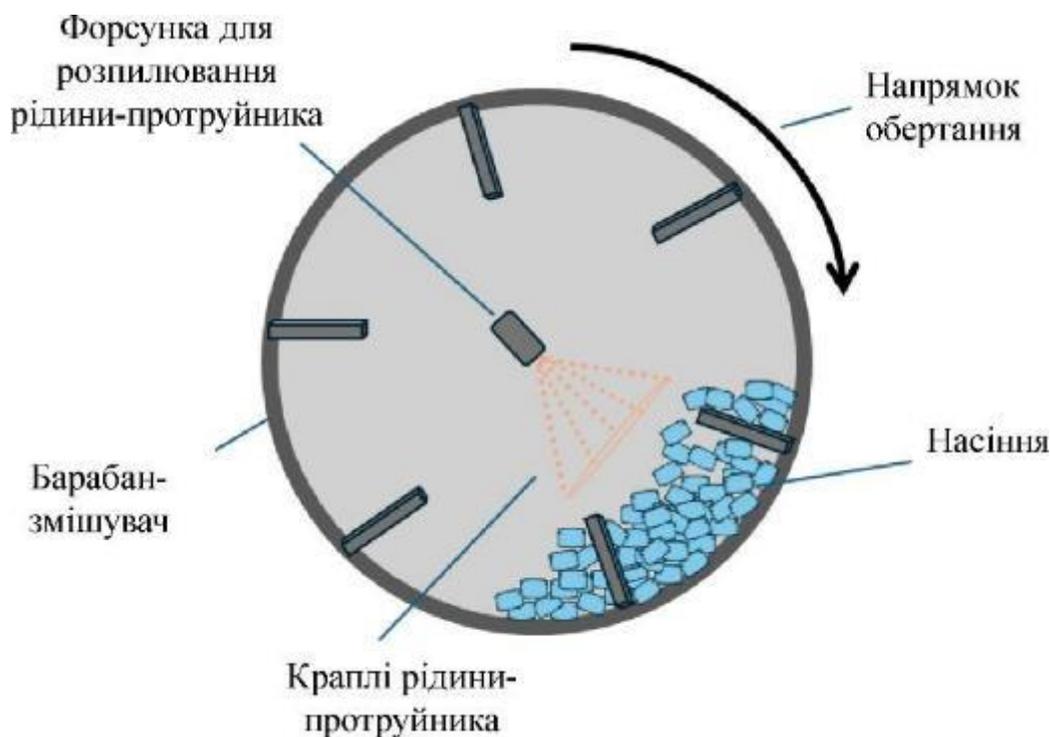


Рисунок 3.1 – Схема моделювання барабанного протруювача насіння

У даному дослідженні процес нанесення рідкого препарату моделюється в середовищі Simcenter STAR-CCM+ шляхом поєднання Лагранжевого багатофазного підходу (LMP) та методу дискретних елементів (DEM). LMP використовується для опису руху крапель робочого розчину, що

розпилюється форсункою, тоді як DEM застосовується для моделювання окремих зернівок, які рухаються, перекочуються та взаємодіють у межах обертового барабана.

У моделі розглядається спрощений процес протруювання, у якому рідина-протруйник у вигляді дрібнодисперсних крапель подається через конічну форсунку у обертовий барабан, частково заповнений насінням. Обертання барабана забезпечує перемішування потоку насіння, що сприяє рівномірному розподілу препарату на їх поверхні.

Система моделюється як закрита об'ємна область, утворена стінками барабана та напрямними лопатями. Обертання барабана задається як жорстке тіло, наприклад, зі швидкістю 10 об/хв, що відповідає типовим умовам роботи промислових протруювачів.

Насіння моделюється як DEM-частинки у системі рідина–тверде тіло–повітря, з урахуванням їхнього розміру, густини та коефіцієнтів пружного і теретового взаємодії. Рідина-протруйник представлена як сферичні лагранжеві краплі, які вводяться під певним кутом розпилення (наприклад,  $80^\circ$ ) через суцільноконічну форсунку.

Передача рідини з повітряної фази на поверхню насіння описується за допомогою наступних механізмів:

- Поглинання (Absorption) – моделює осідання крапель протруйника на поверхні зернівок із збереженням маси та імпульсу, враховуючи ефекти зіткнення, ковзання та адгезії.
- Передача рідинного компонента (Liquid Component Transfer) – описує перенесення рідкого препарату між окремими насінинами при їх контакті в барабані, що забезпечує вирівнювання товщини плівки протруйника по всій масі насіння.

Таке чисельне моделювання дозволяє дослідити вплив основних технологічних параметрів – швидкості обертання барабана, кута нахилу, розміру та кількості зернівок, витрати та тиску розпилу – на якість покриття насіння. Використання поєднання методів LMP і DEM дає можливість

візуалізувати динаміку руху насіння, траєкторію крапель, оцінити ступінь рівномірності протруювання та коефіцієнт використання препарату, що є важливими критеріями для оптимізації конструкції барабанного протруювача і вдосконалення технологічного процесу.

### **3.2 Побудова сіткової моделі і призначення параметрів насінням і рідини-протруйника**

На початковому етапі роботи було завантажено файл симуляції, який містив геометричну модель барабанного протруювача насіння, попередньо визначені операції сітки, області та граничні умови, які створені у NX CAD. У цьому вихідному файлі вже були включені всі необхідні параметри та функції полів, потрібні для виконання моделювання процесу нанесення робочої рідини на насіння.

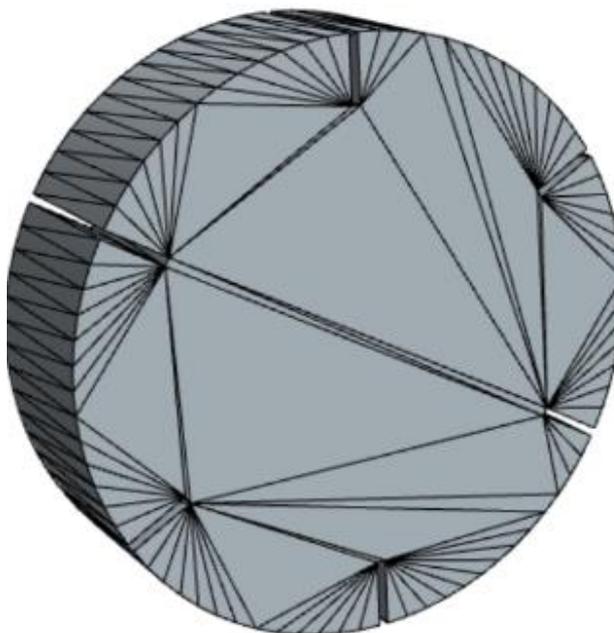


Рисунок 3.2 – Сітка області барабанного протруювача насіння

Для побудови обчислювальної сітки виконували команду Execute для вузла Geometry > Operations > Automated Mesh. Після цього геометрію

протруювача було візуалізовано у сцені Geometry, а сітку перевірено за допомогою кнопки Show All Meshes на панелі інструментів.

Після створення сітки було розгорнуто вузол Automation > Parameters та переглянуто попередньо визначені параметри, що характеризують як тверді частинки (насіння), так і розпилювану рідину.

Таблиця 3.1 – Вихідні параметри моделювання

| Параметр   | Значення   | Опис  |
|--|--|---|
| Площа частинок (Particle Area)                       | $2 * \{\Pi\} \{\text{Particle Radius}\} \{\text{Particle Height}\} + \{\text{Particle Radius}\}$ | Площа поверхні насінини, яка використовується для розрахунку товщини шару рідини. |
| Довжина насіння (Particle Height)                    | 15 мм  | Довжина зернівки у циліндричному наближенні.                                      |
| Кількість насінин (Particle Count)                   | 10000  | Кількість зернівок у робочому об'ємі барабана.                                    |
| Радіус насінин Particle Radius                       | 7 мм   | Радіус зернівки.  |
| Жорсткість насінин (Particle Stiffness)              | 50000 Н/м  | Коефіцієнт жорсткості зернівок при взаємодії.                                     |
| $\Pi$  | 3.1415926  | Математична константа $\pi$ .   |
| Висота конуса розпилення (Spray Cone Height)         | 250 мм   | Висота конічного факела розпилення робочої рідини.                                |
| Щільність крапель розпилення (Spray Droplet Density) | 1200 кг/м <sup>3</sup>   | Щільність крапель рідини протруйника.   |
| Витрата рідини (Spray Flow Rate)                     | 20 мл/хв   | Витрата рідини через форсунку.  |
| Початок розпилення (Spray Start)                     | 1.3 с  | Час початку подачі робочої рідини у процесі моделювання.                          |

Далі було відкрито вузол Automation > Field Functions, де переглянуто заздалегідь створені функції полів, що описують процес перенесення маси рідини на насіння.

На основі завантаженої моделі далі проводилося моделювання процесу обертання барабана, розпилення рідини та взаємодії насіння між собою і з краплями протруйника.

Таблиця 3.2 – Функції полів, що описують процес перенесення маси рідини на насіння

| Функція поля                         | Формула  | Опис  |
|--------------------------------------|--|---|
| Маса покриття (Coating Mass)         | $\text{\$}\{ParticleMass\} * \text{\$}\{ParticleMass FractionCoatingLiquid\}$  | Маса рідини-протруйника, нанесеної на окрему зернівку. Визначається як добуток маси частинки на масову частку рідини.                 |
| Товщина покриття (Coating Thickness) | $\text{\$}\{ParticleMass\} * \text{\$}\{ParticleMass FractionCoatingLiquid\} / \text{\$}\{SprayDropletDensity\} / \text{\$}\{ParticleArea\}$ | Товщина шару рідини, нанесеної на поверхню насінини. Обчислюється на основі маси частинки, густини крапель і площі поверхні зернівки. |

### 3.3 Вибір фізичних моделей

У ході чисельного моделювання процесу протруювання насіння у барабанному апараті було застосовано метод дискретних елементів (DEM) для опису руху твердих частинок насіння, а також Лагранжеву багатозфазну модель (Lagrangian Multiphase, LMP) для моделювання розпилення робочої рідини. Вплив сили тяжіння враховувався у напрямку від'ємної осі Y, що відповідає реальній орієнтації апарата у просторі.

Для налаштування фізичних моделей у модулі Continua > Physics 1 були послідовно активовані наступні моделі.

У вузлі Continua > Physics 1 > Reference Values > Gravity було встановлено вектор сили тяжіння [0.0, -9.81, 0.0] м/с<sup>2</sup>.

Визначення фази крапель робочої рідини. Краплі протруйника моделювалися як сферичні лагранжеві частинки з постійною густиною 1200 кг/м<sup>3</sup>.

Таблиця 3.3 – Обрані загальні фізичні моделі

| Група                  | Модель   | Увімкнено                |
|------------------------|--|--------------------------|
| Тривимірна             | –  | (активовано автоматично) |
| Час                    | Неявна нестационарна (Implicit Unsteady)                                     | ✓                        |
| Матеріал               | Газ  | ✓                        |
| Потік                  | Зв'язаний потік (Coupled Flow)   | ✓                        |
| Градiєнти              | –  | (активовано автоматично) |
| Рівняння стану         | Постійна густина (Constant Density)  | ✓                        |
| В'язкісний режим       | Ламінарний   | ✓                        |
| Додаткові моделі       | Гравітація, Лагранжевий багатофазний потік, Дискретна елементна модель (DEM) | ✓                        |
| Інтерполяція розв'язку | –  | ✓                        |
| Багатофазна взаємодія  | –  | (активовано автоматично) |

Для цього у вузлі Continua > Physics 1 > Models > Lagrangian Multiphase > Lagrangian Phases було створено нову фазу (Free-stream Phase) з назвою Droplets (Краплі). До неї було підключено наступні моделі.

Таблиця 3.4 – Обрані фізичні моделі фази крапель робочої рідини

| Група          | Модель               |
|----------------|----------------------|
| Тип частинок   | Матеріальні частинки |
| Форма частинок | Сферичні частинки    |
| Матеріал       | Рідина               |
| Рівняння стану | Постійна густина     |

Опцію Pressure Gradient Force було вимкнено, оскільки градієнт тиску не мав суттєвого впливу на рух дрібних крапель у межах апарата. Матеріал фази було перейменовано з H<sub>2</sub>O на Coating Liquid (Робоча рідина), а його густину встановлено рівною параметру  $\{\text{Spray Droplet Density}\} = 1200 \text{ кг/м}^3$ .

Для граничних умов на стінках (Boundary Conditions > Wall) було задано режим Stick, що означає прилипання крапель до поверхні при зіткненні.

Визначення фази насіння. Насіння моделювалося як циліндричні DEM-частинки, що являють собою суміш типу Liquid–Solid–Gas Mixture. Тверда фаза відповідала матеріалу зернівки, а рідка – нанесеному шару робочої рідини. Густина рідкої фази відповідала густині крапель – 1200 кг/м<sup>3</sup>.

У вузлі Lagrangian Phases створено нову фазу з назвою Grains (Насіння). Для неї було активовано наступні моделі.

Таблиця 3.5 – Обрані фізичні моделі фази насіння

| Група          | Модель                      |
|----------------|-----------------------------|
| Тип частинок   | Частинки DEM                |
| Форма частинок | Циліндричні частинки        |
| Матеріал       | Рідинно-твердо-газова суміш |
| Рівняння стану | Постійна густина            |

Опцію Pressure Gradient Force також було вимкнено.

Тверда компонента (Solid Component). У складі суміші визначено тверду компоненту Grain (Зернівка) на основі матеріалу Rubber (Arlon Thermabond 99180T010), який використано як аналог біологічного матеріалу з відповідними механічними властивостями. Густина твердої фази встановлена 1400 кг/м<sup>3</sup>, а модуль Юнга – 100 МПа.

Рідка компонента (Liquid Component). Другу компоненту суміші визначено як Coating Liquid (Робоча рідина) з густиною  $\{\text{Spray Droplet Density}\} = 1200$  кг/м<sup>3</sup>. Це дозволило забезпечити узгодженість властивостей рідкої фази насіння та крапель розпилювача.

Визначення взаємодій DEM-фаз. Подальше моделювання включало визначення механізмів взаємодії між насінням, краплями рідини та стінками барабана. Для цього було застосовано лінійну пружну модель (Linear Spring) для опису контактних сил між зернівками та між зернівками і стінками.

1. Взаємодія насіння з краплями рідини. Створено фазову взаємодію Grain–Droplets (Насіння–Краплі), до якої було додано модель Absorption (Поглинання). Ця модель описує процес осідання крапель на поверхню зернівок із передачею маси та імпульсу.

2. Взаємодія між насінинами. Далі було створено фазову взаємодію Grain–Grain (Насіння–Насіння) із моделями:

- DEM Contact Model: Linear Spring – для опису пружних зіткнень;
- Optional Model: Liquid Component Transfer – для опису переносу рідкого шару між зернівками при їх контакті.

У цій взаємодії вимкнено Rolling Resistance, оскільки обертальний опір мав мінімальний вплив на кінетику частинок. Для контактних параметрів було встановлено наступне.

Таблиця 3.6 – Обрані фізичні моделі взаємодій DEM-фаз

| Параметр                               | Значення                  |
|--|---------------------------|
| Коефіцієнт статичного тертя            | 0.61                      |
| Коефіцієнт нормального відновлення     | 0.1                       |
| Коефіцієнт тангенціального відновлення | 0.1                       |
| Жорсткість нормальної пружини          | $\{Particle\ Stiffness\}$ |
| Жорсткість тангенціальної пружини      | $\{Particle\ Stiffness\}$ |

Механізм переносу рідкої компоненти (Liquid Component Transfer) було реалізовано методом Area Weighted (зважування за площею контакту).

3. Взаємодія насіння зі стінками барабана. Для моделювання зіткнень зернівок зі стінками апарата створено фазову взаємодію Grain–Wall (Насіння–Стіна), також із використанням моделі Linear Spring. Встановлено наступні параметри.

Застосування поєднання моделей DEM–LMP у Simcenter STAR-CCM+ дало змогу змоделювати не лише механічну динаміку руху насіння у барабані, а й процес осідання, прилипання та перерозподілу робочої рідини між частинками.

Таблиця 3.7 – Обрані фізичні моделі взаємодій насіння зі стінками барабана

| Параметр                               | Значення                  |
|--|---------------------------|
| Коефіцієнт статичного тертя            | 0.1                       |
| Коефіцієнт нормального відновлення     | 0.1                       |
| Коефіцієнт тангенціального відновлення | 0.1                       |
| Жорсткість нормальної пружини          | $\{Particle\ Stiffness\}$ |
| Жорсткість тангенціальної пружини      | $\{Particle\ Stiffness\}$ |

Введення насіння у барабан. У процесі чисельного моделювання було здійснено введення 10 000 твердих DEM-частинок у змішувальний барабан за допомогою Random Injector (випадкового інжектора). Спочатку зернівки рівномірно розподілялися по об'єму барабана.

Для налаштування інжектора:

1. У вузлі Injectors створено новий інжектор (New) та перейменовано його на Injector Tablets (Інжектор насіння).
  - Для цього інжектора було визначено такі властивості: Lagrangian Phase: Grains, Type: Random Injector, Inputs: Mixer
2. В параметрах упаковки частинок (Particle Packing Specification) метод встановлено як Particle Count, що забезпечує точну кількість насіння у моделі.
3. Встановлено такі значення властивостей частинок

Таблиця 3.8 – Параметри введення насіння у барабан

| Властивість             | Значення                  |
|-------------------------|---------------------------|
| Кількість “seed”        | $\{Particle\ Count\} * 2$ |
| Кількість частинок      | $\{Particle\ Count\}$     |
| Висота циліндра         | $\{Particle\ Height\}$    |
| Радіус циліндра         | $\{Particle\ Radius\}$    |
| Орієнтація частинок     | Рівномірно розподілена    |
| Мінімальні кути         | $[-180, -90, -180]^\circ$ |
| Максимальні кути        | $[180, 90, 180]^\circ$    |
| Масова частка компонент | $[1.0, 0.0]$              |

### 3.4 Візуалізація процесу оброблення насіння

Було створено сцену візуалізації, яка відображає розподіл крапель робочої рідини на зернівки, з додаванням анотацій. Для цього використано величину швидкості частинок, щоб показати траєкторію руху крапель у барабані. Було також налаштовано solution history file для створення анімації процесу нанесення рідини. Для оцінки товщини покриття створено гістограму, що показує рівномірність нанесення.

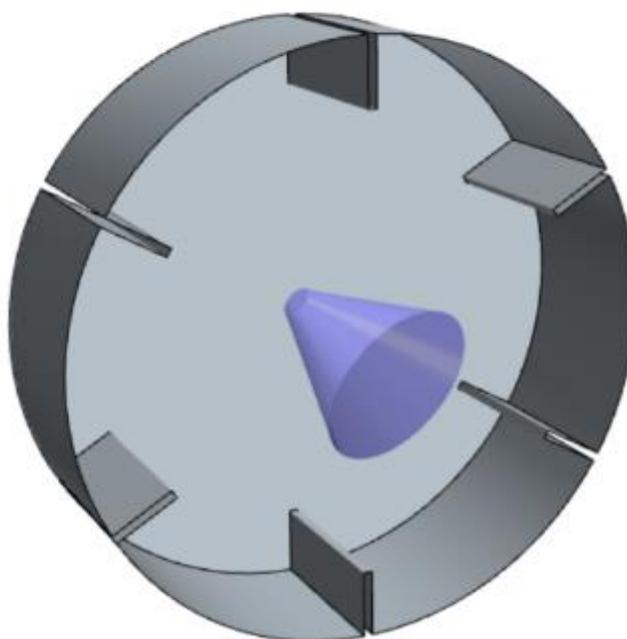


Рисунок 3.2 – Створена сцена симуляції барабанного протруювача насіння

Для візуалізації:

1. У сцені Geometry створено похідну частину (Derived Part) через Threshold, яка вибирає зернівки з певною масовою часткою рідини.
2. У вузлі Solution Histories налаштовано відстеження: індекс інжектора, індекс частинки, масова частка покриття, кількість частинок, діаметр, маса, величина швидкості.
3. За допомогою вузла Reports створено облік кількості покритих частинок та загальної кількості насіння у барабані.

Для аналізу товщини покриття було налаштовано гістограму (Histogram Plot) із використанням Derived Parts > Coated Tablets.

- Функція поля: Coating Thickness (Товщина покриття)
- Одиниці: мкм
- Оновлення: кожен крок часу

Сцену Spray Coating відкрито у новому вікні для анімації:

- Відображення крапель за величиною швидкості,
- Відображення насіння з кольором відповідно до маси нанесеного покриття.
- Додано анотації, які показують кількість всіх зернівок та покритих.

Таблиця 3.8 – Налаштування параметрів розв'язувача та критеріїв зупинки

| Вузол                 | Властивість  | Значення                                   |
|-----------------------|--|--|
| Implicit Unsteady     | Крок часу (Time-Step)  | 0,01 с                                     |
| Lagrangian Multiphase | Балансування навантаження (Load Balancing)                           | Активовано                                 |
| Implicit Unsteady     | Максимальна кількість підкроків (Maximum Sub-Steps)                  | 2 000 000                                  |
| Implicit Unsteady     | Частота оновлення (Update Frequency)                                 | Один раз за крок часу (Once per Time-Step) |
| Partitioning          | Частота перерозподілу навантаження (Rebalance Frequency)             | 5  |
| DEM Solver            | Масштаб часу (Time Scale)  | 0,15                                       |
| DEM Solver            | Товщина шкіри (Skin)   | $\{\text{Particle Diameter}\} * 0,06$      |
| Stopping Criteria     | Максимальна кількість внутрішніх ітерацій (Maximum Inner Iterations) | 1  |
| Stopping Criteria     | Максимальний фізичний час (Maximum Physical Time)                    | 5 с  |
| Stopping Criteria     | Активувати максимальну кількість кроків (Maximum Steps Enabled)      | Вимкнено                                   |

Запуск симуляції процесу розпилення. Моделювання було виконано у транз'єнтному режимі на фізичний час 5 с. Для підвищення ефективності паралельних обчислень було активовано Lagrangian Load-Balancing solver, а для прискорення виявлення контактів між насінням налаштовано параметр Skin у DEM Solver, що дозволяє перевіряти контакти лише при переміщенні частинки на відстань товщини “шкіри”.

Завдяки налаштованій анімації та гістограмам можна спостерігати:

- рух крапель у барабані,
- процес прилипання рідини до насіння,
- рівномірність покриття,
- динаміку взаємодії частинок під час обертання барабана.

Цей підхід дозволив максимально наблизити чисельну модель до реальних умов роботи барабанного протруювача.

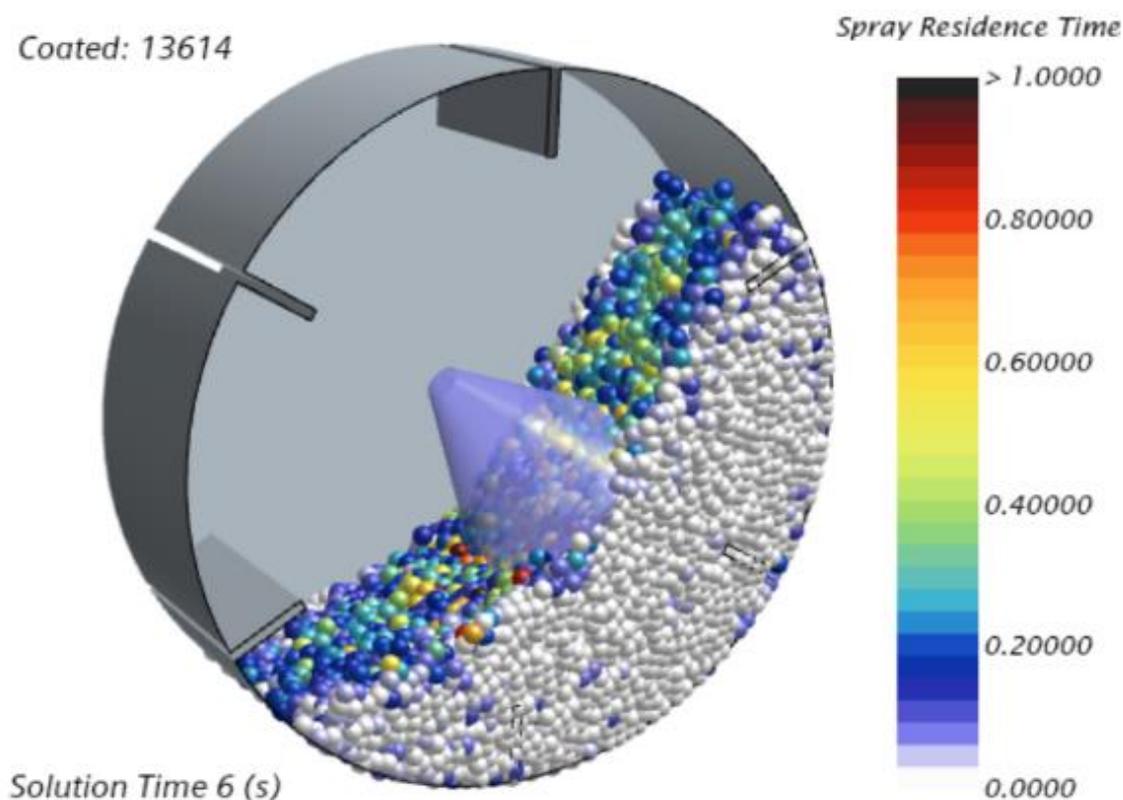


Рисунок 3.3 – Результати моделювання барабанного протруювача насіння

### 3.5 Планування чисельного моделювання

Основна мета чисельного моделювання барабанного протруювача:

- оцінити ступінь рівномірності протруювання насіння;
- визначити коефіцієнт використання протруйного препарату;
- оптимізувати конструкцію барабанного протруювача та режимні параметри процесу;
- проаналізувати продуктивність та енергоспоживання обладнання.

Критерії ефективності:

1. Ступінь рівномірності протруювання – відхилення покриття на окремих зернівках від середнього.
2. Продуктивність (P) – маса насіння, що пройшла через барабан за одиницю часу.

Для моделювання процесу протруювання насіння у барабанному протруювачі були обрані чотири ключові фактори, що найбільше впливають на рівномірність обробки та ефективність використання протруйного препарату. Першим фактором є частота обертання барабана. Вона визначає механізм переміщення насіння всередині барабана та час контакту зернівок із протруйним розчином. Занадто низька швидкість обертання призводить до недостатнього перемішування та нерівномірного покриття, тоді як занадто висока швидкість може спричинити стрибки насіння, їх травматизацію та втрати препарату. Для досліду було обрано діапазон 5–20 об/хв: низький рівень – 5 об/хв, середній – 12,5 об/хв та високий – 20 об/хв.

Другим фактором є швидкість подачі препарату. Вона визначає об'єм речовини, що подається на одиницю часу, і безпосередньо впливає на рівномірність покриття та економічність процесу. Занадто мала швидкість подачі може призвести до неповного покриття насіння, а надто велика – до перевитрат і стікання розчину на стінки барабана. Для досліду обрали діапазон 5–25 мл/хв, де низький рівень відповідає 5 мл/хв, середній – 15 мл/хв, високий – 25 мл/хв.

Таблиця 3.9 – Фактори чисельного моделювання та рівні їх варіювання

| № | Фактор                         | Позначення | Рівні                        | Значення            | Примітки   |
|---|--------------------------------|------------|------------------------------|---------------------|--|
| 1 | Частота обертання барабана     | $n_b$      | низький / середній / високий | 5 / 12,5 / 20 об/хв | Впливає на час контакту насіння з препаратом                     |
| 2 | Швидкість подачі препарату     | $Q_p$      | низький / середній / високий | 5 / 15 / 25 мл/хв   | Визначає кількість препарату на одиницю насіння                  |
| 3 | Висота шару насіння у барабані | $H_s$      | низький / середній / високий | 0,1 / 0,25 / 0,4 м  | Впливає на рівномірність розподілу препарату                     |
| 4 | Кут нахилу лопаті барабана     | $\theta$   | низький / середній / високий | 0 / 5 / 10°         | Впливає на інтенсивність перемішування та рівномірність покриття |

Третім фактором є висота шару насіння у барабані. Вона визначає товщину шару, через який препарат повинен проникнути, і впливає на рівномірність протруювання. Тонкий шар насіння легше обробити рівномірно, тоді як товстий шар може призвести до нерівномірного покриття, особливо на нижніх рівнях. Діапазон для дослідів становить 0,1–0,4 м: нижній рівень – 0,1 м, середній – 0,25 м, верхній – 0,4 м.

Четвертим фактором є кут нахилу лопаті барабана. Він визначає траєкторію руху насіння всередині барабана та сприяє інтенсивному перемішуванню, що забезпечує більш рівномірне покриття препаратом. Занадто малий кут нахилу може призвести до недостатнього перемішування, а надто великий – до інтенсивних стрибків зернівок, їх травматизації та підвищених втрат препарату. Для дослідів обрано діапазон 0–10°: низький рівень – 0°, середній – 5°, високий – 10°.

Для проведення чисельного експерименту передбачається повнофакторний план із трьома рівнями для кожного фактора, що дає 81 комбінацію ( $3^4$ ).

Ступінь рівномірності протруювання можна розрахувати через середньоквадратичне відхилення маси нанесеного препарату на насіння:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2}}{\bar{m}} \cdot 100\% , \quad (3.1)$$

де  $m_i$  – маса препарату на  $i$ -ій зернівці;  $\bar{m}$  – середня маса препарату на зернівку;  $N$  – кількість зернівок у моделі.

Чим менше ( $U$ ), тим більш рівномірне протруювання.

Продуктивність

$$P = \frac{m}{t} , \quad (3.2)$$

де  $m$  – маса насіння, що пройшла через барабан за час симуляції  $t$ .

Дані можна отримати шляхом обліку всіх DEM-частинок у вихідній зоні барабана.

Для практичного розрахунку у моделі STAR-CCM+ енергію оцінювали через інтеграл від сили тертя між частинками та стінкою барабана помноженої на швидкість переміщення частинок.

Для аналізу результатів чисельного моделювання барабанного протруювача насіння застосували методику статистичної обробки даних на основі повнофакторного експерименту з трьома рівнями для кожного фактора. Основною метою обробки було кількісно оцінити вплив факторів на вихідні показники процесу – ступінь рівномірності протруювання, коефіцієнт використання препарату, продуктивність та енергоспоживання – та побудувати рівняння регресії, які описували залежності критеріїв ефективності від факторів експерименту.

Спочатку заносили результати всіх 81 комбінації факторів у таблицю даних у Wolfram Cloud у вигляді матриці, де стовпці відповідали незалежним змінним (факторам) ( $x_1, x_2, x_3, x_4$ ), а рядки містили значення відповідної вихідної характеристики ( $y$ ). Для нормалізації факторів застосували стандартну процедуру кодування, що перетворювала рівні факторів на безрозмірні

величини від -1 (нижній рівень) до +1 (верхній рівень), а середній рівень відповідав 0:

$$x_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\Delta X_i / 2}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (3.4)$$

де  $X_i$  – фактичне значення фактора,  $\bar{X}_i$  – середній рівень фактора,  $\Delta X_i$  – діапазон зміни факторів.

Для побудови рівняння регресії використали поліном другого порядку з урахуванням взаємодії факторів:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i x_i + \sum_{i=1}^4 a_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} x_i x_j + \varepsilon, \quad (3.5)$$

де  $a_0$  – вільний член,  $a_i$  – коефіцієнти лінійних ефектів,  $a_{ii}$  – коефіцієнти квадратичних ефектів,  $a_{ij}$  – коефіцієнти взаємодії факторів,  $\varepsilon$  – випадкова похибка моделі.

Аналіз у Wolfram Cloud реалізовували за допомогою функцій LinearModelFit або NonlinearModelFit, які дозволили одночасно розрахувати коефіцієнти регресії, оцінити їх значущість і побудувати прогнози залежності. Дані організували списки у форматі:

$$\text{data} = \left\{ \begin{array}{l} \{x1\_1, x2\_1, x3\_1, x4\_1, y\_1\}, \\ \{x1\_2, x2\_2, x3\_2, x4\_2, y\_2\}, \\ \dots, \\ \{x1\_81, x2\_81, x3\_81, x4\_81, y\_81\} \end{array} \right\};, \quad (3.6)$$

Після цього виконали побудову регресійної моделі:

$$\text{model} = \text{LinearModelFit}[\text{data}, x1, x2, x3, x4, x1^2, x2^2, x3^2, x4^2, x1x2, x1x3, x1x4, x2x3, x2x4, x3x4, x1, x2, x3, x4], \quad (3.7)$$

Wolfram Cloud автоматично обчислив коефіцієнти  $\beta$ , їх стандартні похибки та значущість, що дозволило оцінити вплив кожного фактору та взаємодій на вихідну величину. Для перевірки адекватності моделі використали коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ) та аналіз залишків ( $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$ ), де  $\hat{y}_i$  – розраховане значення.

Для візуальної оцінки впливу факторів побудували графічні поверхні відгуку та контурні діаграми, наприклад:

$$\text{Plot3D}[\text{model}[x1, x2, 0, 0], x1, -1, 1, x2, -1, 1] \quad (3.8)$$

Ці графіки дозволили візуально оцінити вплив факторів і знайти оптимальні комбінації для досягнення максимальної рівномірності протруювання, мінімальних витрат препарату та енергоспоживання.

Таким чином, провели повну обробку даних повнофакторного плану, нормалізували фактори, побудували поліноміальну регресійну модель, оцінили статистичну значущість коефіцієнтів, проаналізували залишки та створили графічні поверхні для оптимізації конструкції барабанного протруювача та режимних параметрів технологічного процесу.

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БАРАБАННОГО ПРОТРУЮВАЧА НАСІННЯ

### 4.1 Симуляція процесу оброблення насіння

В результаті симуляції було отримано детальну візуалізацію процесу нанесення рідини-протруйника на насіння (рис. 4.1) та динамічний розподіл векторного поля швидкостей у середині барабана (рис. 4.2).

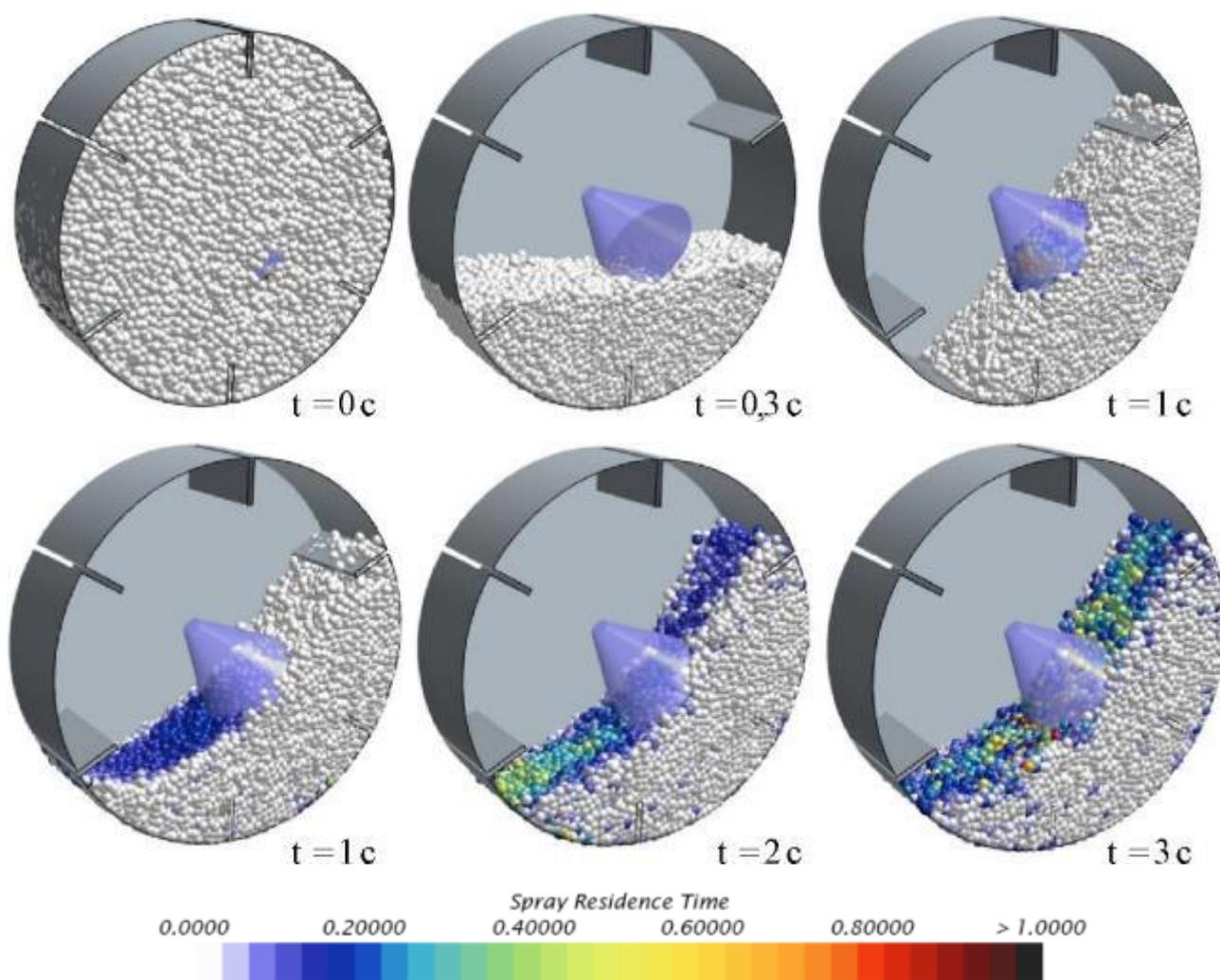


Рисунок 4.1 – Візуалізація процесу нанесення рідини-протруйника на насіння

Було відображено тривимірну карту товщини покриття на поверхні окремих зернівок у вигляді кольорової палітри, гістограмне розподілення маси

нанесеного шару та анімацію часу, яка показувала наростання покриття в кожному часовому кроці. Паралельно в окремій сцені відтворювали векторне поле швидкостей частинок і крапель: стрілки вказували напрямок і модуль швидкості.

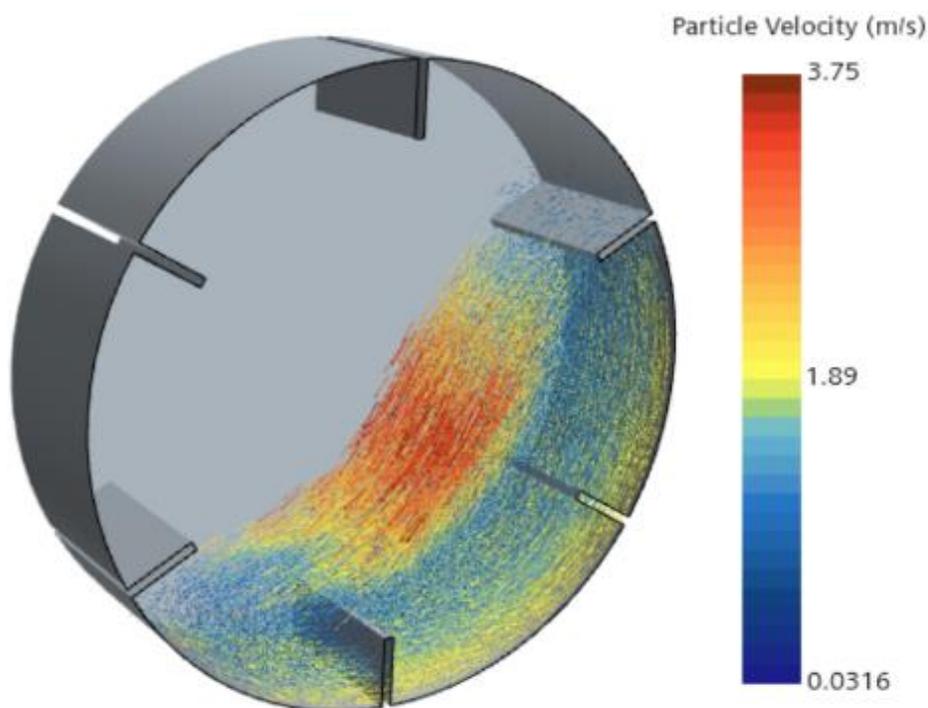


Рисунок 4.2 – Динамічний розподіл векторного поля швидкостей у середині барабана

На підставі візуалізації було встановлено такі спостережувані закономірності й числові характеристики: по всьому об'єму барабана утворилася зонична структура – близько поверхні стінки спостерігалися зони високої швидкості та інтенсивного центробіжного переміщення, тоді як у центральній частині барабана виникала зона каскадного падіння з повторними контактами з лопатями. Зони найбільш інтенсивного нанесення відповідали перетинам факела розпилення з траєкторіями піднятих частинок; ці «гарячі плями» показували найвищі значення локальної товщини покриття.

Аналіз поля швидкостей дозволив кількісно охарактеризувати динаміку: було зафіксовано максимальні модулі швидкостей частинок у зоні підйому та

на краях факела (порядок десяти-сотень см/с залежно від режиму), середню швидкість у робочому шарі та середній векторний розподіл, який корелював із частотою зіткнень з факелом і часом перебування.

Верифікація анімації в часі та карт поля швидкостей дозволила простежити механізм переносу рідини: краплі, зіткнувшись із піднятою частинкою, прилипали і розтікали, утворюючи тонку плівку; подальші зіткнення та тертя між зернівками приводили до перерозподілу рідини, що було видно як поступове вирівнювання товщини покриття. Також було помічено, що надмірне підвищення кута лопаті або швидкості обертання спричиняло центробіжний режим з притисканням частинок до стінки і зменшенням контактів із факелом – це знижувало якість покриття.

На підставі візуалізації й статистичних метрик було сформульовано інженерні рекомендації: коригувати відстань і кут спрямування форсунки для зменшення «сухих» зон, підтримувати середній діапазон частоти обертання для забезпечення циклічного підйому-падіння частинок, а також контролювати висоту шару ( $H_s$ ) і витрату ( $Q_p$ ) для зменшення стікань по стінках і підвищення коефіцієнта використання ( $\theta$ ).

Таким чином, візуалізація покриття й динамічне поле швидкостей дали комплексне розуміння процесу нанесення протруйника: було кількісно описано просторово-часові закономірності покриття, і ці дані було використано для подальшого оптимального підбору режимів і конструктивних параметрів барабанного протруювача.

## 4.2 Обробка результатів чисельного моделювання

За результатами чисельного моделювання та регресійного аналізу в середовищі Wolfram Cloud встановлено залежність ступеня рівномірності протруювання насіння від основних технологічних і конструктивних параметрів барабанного протруювача

$$U = 17,023 - 3,95611 x_1 + 0,137222 x_1^2 + 3,02981 x_2 - 0,04194 x_1 x_2 - 0,0916667 x_2^2 + 5,03667 x_3 + 0,0438889 x_1 x_3 + 0,0941667 x_2 x_3 + \quad (4.1)$$

$$+ 0,0188 x_3^2 - 1,9094 x_4 + 0,01417 x_1 x_4 + 0,195 x_2 x_4 + 0,118 x_3 x_4 - 0,288 x_4^2.$$

де  $x_{1-4}$  – заковдані значення факторів дослідження.

Отримане рівняння регресії другого порядку описує процес у вигляді багатофакторної функції, у якій враховано вплив частоти обертання барабана, витрати робочої рідини, висоти шару насіння в барабані та кута нахилу його лопатей

$$U = 14,4962 + 33,5778 N_s - 0,527481 n_b + 0,302981 Q_p - 0,381889 \theta. \quad (4.2)$$

Високий коефіцієнт детермінації ( $R^2 = 0,87$ ) свідчить про те, що модель адекватно описує експериментальні дані і відображає реальні фізичні закономірності процесу протруювання. Також результати статистичної обробки наведені в таблиця 4.1–4.2.

Таблиця 4.1 – Результати визначення критерію Стьюдента

|     | Estimate   | Standard Error | t-Statistic | P-Value                   |
|-----|------------|----------------|-------------|---------------------------|
| a00 | 17.023     | 0.291278       | 58.4424     | $1.44934 \times 10^{-58}$ |
| a10 | -3.95611   | 0.118914       | -33.2688    | $5.79619 \times 10^{-43}$ |
| a20 | 3.02981    | 0.118914       | 25.4791     | $7.24495 \times 10^{-36}$ |
| a30 | 5.03667    | 0.118914       | 42.3557     | $1.40974 \times 10^{-49}$ |
| a40 | -1.90944   | 0.118914       | -16.0574    | $1.74754 \times 10^{-24}$ |
| a12 | -0.0419444 | 0.145639       | -0.288003   | 0.774247                  |
| a13 | 0.0438889  | 0.145639       | 0.301354    | 0.764092                  |
| a14 | 0.0141667  | 0.145639       | 0.0972726   | 0.922805                  |
| a23 | 0.0941667  | 0.145639       | 0.646576    | 0.520148                  |
| a24 | 0.195      | 0.145639       | 1.33893     | 0.185188                  |
| a34 | 0.117778   | 0.145639       | 0.808697    | 0.421595                  |
| a11 | 0.137222   | 0.205964       | 0.666242    | 0.507579                  |
| a22 | -0.0916667 | 0.205964       | -0.445061   | 0.657732                  |
| a33 | 0.0188889  | 0.205964       | 0.0917094   | 0.927207                  |
| a44 | -0.288333  | 0.205964       | -1.39992    | 0.166221                  |

Таблиця 4.2 – Результати визначення критерію Фішера

|                   | DF | SS      | MS       |
|-------------------|----|---------|----------|
| Model             | 15 | 25974.4 | 1731.63  |
| Error             | 66 | 50.3966 | 0.763585 |
| Uncorrected Total | 81 | 26024.8 |          |
| Corrected Total   | 80 | 2962.32 |          |

Графічна інтерпретація залежності (4.2) наведено на рис. 4.3.

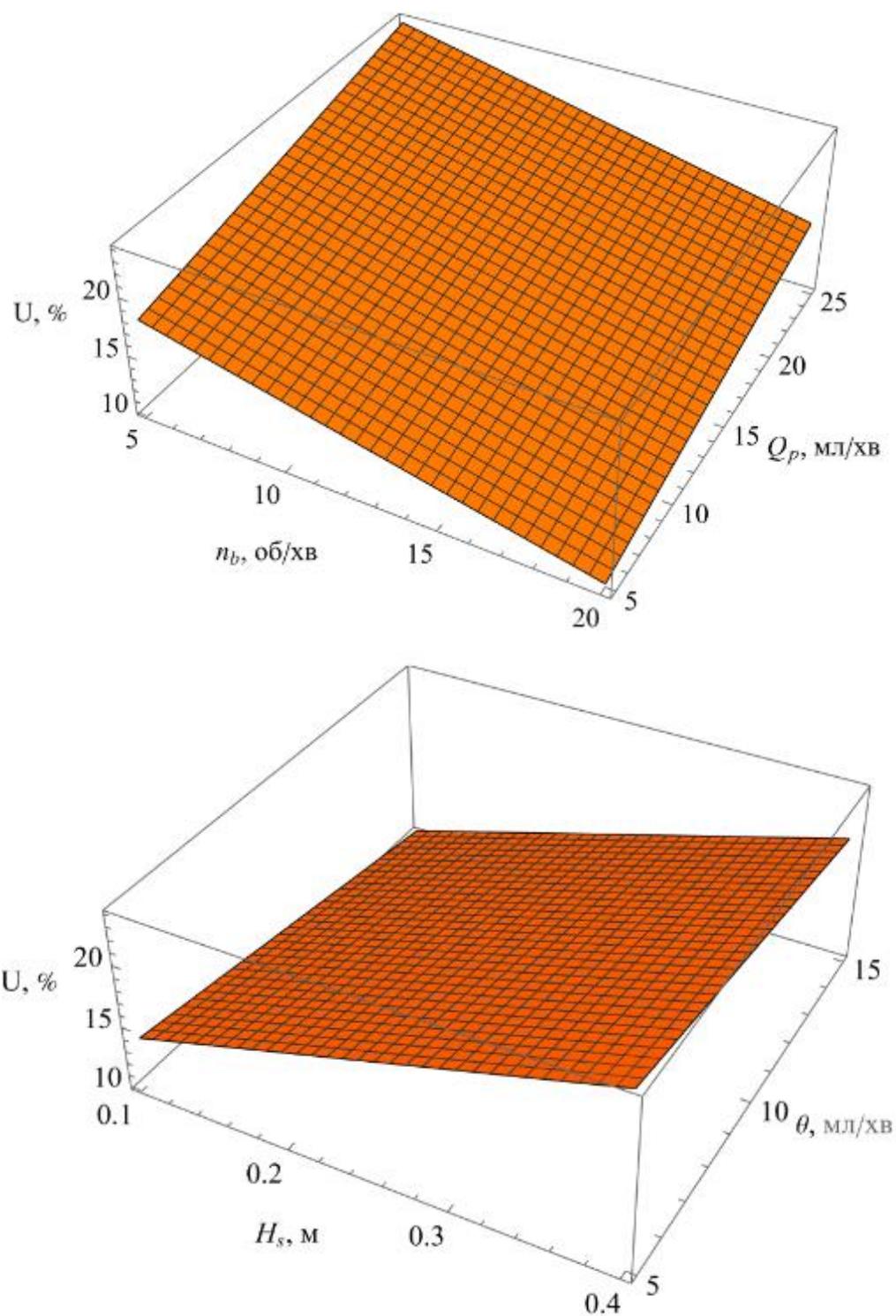


Рисунок 4.3 – Залежність ступеня рівномірності протруювання насіння від основних технологічних і конструктивних параметрів барабанного протруювача

З аналізу отриманих коефіцієнтів видно, що найсуттєвіший вплив на рівномірність нанесення препарату справляє частота обертання барабана. Зі збільшенням частоти обертання спостерігається зменшення ступеня рівномірності через те, що насіння починає рухатись у режимі прилипання до стінки під дією відцентрової сили, що знижує ефективність контакту з розпиленою рідиною. При середніх значеннях швидкості обертання, близьких до 15–20 об/хв, встановлюється рівноважний режим перекочування насіння, за якого забезпечується інтенсивне, але рівномірне перемішування частинок і стабільне нанесення протруйника. При подальшому збільшенні частоти до 25–30 об/хв насіння рухається переважно вздовж стінки барабана без повторних зіткнень, що веде до локального перезволоження поверхні і зниження загальної однорідності покриття.

Витрата робочої рідини також чинить помітний вплив на рівномірність протруювання. За низької подачі (5 мл/хв) покриття є нерівномірним через недостатнє змочування поверхні насіння. Підвищення витрати до 10–15 мл/хв покращує рівномірність нанесення препарату, оскільки формується стабільний аерозольний факел, який забезпечує рівномірне змочування кожної насінини. Проте при надмірній подачі, понад 20–25 мл/хв, спостерігається ефект стікання рідини, утворення агломератів та злипання частинок, що знижує ступінь рівномірності через утворення локальних зон перенасичення протруйником.

Одним із визначальних параметрів виявилася висота шару насіння у барабані. При збільшенні шару з 0,1 до 0,4 м спостерігається зростання рівномірності покриття завдяки збільшенню кількості міжзернових контактів і покращенню умов для перерозподілу рідини між насінинами. Такий ефект пояснюється тим, що при русі матеріалу в барабані кожна насінина неодноразово контактує з іншими, що забезпечує повторне перетирання і поширення тонкої плівки протруйника. Разом з тим, при надмірній висоті шару (понад 0,4 м) можуть виникати застійні зони в нижній частині барабана, де рух насіння сповільнюється і доступ протруйника обмежений.

Кут нахилу лопатей барабана впливає переважно на кінематику руху насіння. При малих кутах (до 5°) забезпечується помірний осьовий рух і багаторазові

перекочування частинок, що сприяє рівномірному змочуванню поверхні. Зі збільшенням кута до 10–15° насіння рухається переважно в осьовому напрямку, що скорочує час контакту з робочим середовищем, а отже — зменшує рівномірність покриття. При кутах понад 20° насіння переміщується надто швидко, факел розпилення не встигає взаємодіяти з потоком частинок, і поверхня покривається нерівномірно.

Таким чином, результати чисельного експерименту свідчать, що оптимальні умови рівномірного нанесення протруйника досягаються при низькій частоті обертання барабана (близько 5 об/хв), високій витраті робочої рідини (приблизно 25 мл/хв), значній висоті шару насіння (до 0,4 м) і малому куті нахилу лопатей (приблизно 5°). У цих умовах спостерігається максимальне значення ступеня рівномірності протруювання — близько 31%, що відповідає найкращому поєднанню динамічних та гідродинамічних характеристик процесу. При зміні будь-якого з цих параметрів у більший або менший бік рівномірність зменшується через порушення оптимальної взаємодії між потоком насіння і факелом розпилення.

Отже, проведене аналітичне дослідження дозволило не лише кількісно оцінити вплив кожного з факторів, але й пояснити фізичні механізми, що визначають ефективність процесу протруювання. Отримані залежності можуть бути використані для подальшої оптимізації конструкції барабана, розташування форсунок та режимів подачі робочої рідини з метою забезпечення максимальної рівномірності покриття при мінімальних енергетичних витратах.

Отримане рівняння регресії другого порядку відображає складну багатофакторну залежність продуктивності барабанного протруювача від основних технологічних і конструктивних параметрів машини

$$\begin{aligned}
 P = & 37,1926 + 10,0019 x_1 + 0,012963 x_1^2 + 2,77222 x_2 + 0,438889 x_1 x_2 - \\
 & - 0,153704 x_2^2 - 4,00741 x_3 - 0,452778 x_1 x_3 - 0,130556 x_2 x_3 + 0,251852 x_3^2 + \\
 & + 0,687037 x_4 + 0,0138889 x_1 x_4 + 0,0194444 x_2 x_4 - 0,05 x_3 x_4 - 2,1537 x_4^2.
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Високе значення коефіцієнта детермінації  $R^2 = 0,89$  свідчить про практично повну адекватність моделі експериментальним даним, що підтверджує правильність вибору плану експерименту, математичного апарату і

кількості дослідів. Це означає, що змінюючи керуючі фактори в межах дослідженого діапазону, можна з високою точністю прогнозувати реальну продуктивність протруювача.

Найбільший вплив на продуктивність має частота обертання барабана ( $x_1$ ), що відображається великим позитивним коефіцієнтом першого порядку  $a_{10}=10,0019$ . Це закономірно, оскільки зі збільшенням швидкості обертання інтенсифікується рух насіння в барабані, підвищується частота його зіткнень із лопатями та стінками корпусу, покращується перемішування і транспортування матеріалу уздовж осі апарата. Однак занадто висока частота може призводити до надмірного підкидання частинок, погіршення рівномірності покриття і збільшення механічного травмування насіння. Тому у моделі враховано квадратичний член  $x_{12}$ , який формує ефект насичення, коли зростання продуктивності поступово сповільнюється після досягнення певного оптимуму.

Подача робочої рідини ( $x_2$ ) також позитивно впливає на продуктивність, що підтверджується коефіцієнтом  $a_{20} = 2,77222$ . Зі збільшенням витрати рідини підвищується ефективність зволоження поверхні насіння, покращується рівномірність нанесення протруйника і зменшується кількість непротруєних зернівок. Проте надмірна кількість рідини викликає утворення грудок, злипання частинок і зниження рухливості шару, що зменшує реальну пропускну здатність барабана. Цей ефект відображено негативним квадратичним коефіцієнтом  $-0,1537x_2^2$ , який формує спад на ділянці перевищення оптимальної подачі рідини.

Висота шару насіння ( $x_3$ ) виявилася чинником, який найбільш істотно обмежує продуктивність. Негативний коефіцієнт першого порядку  $a_{30} = -4.0074$  показує, що зі збільшенням товщини шару у барабані насіння переміщується повільніше, ускладнюється циркуляція частинок, виникають застійні зони та нерівномірність перемішування. Це призводить до зниження швидкості проходження матеріалу через барабан і, відповідно, до падіння продуктивності. Позитивний коефіцієнт при  $x_3^2$  свідчить, що при дуже малих шарах

ефективність також може бути не оптимальною через надмірну турбулентність потоку, отже, існує певна область стабільної ефективної товщини шару.

Кут нахилу лопатей ( $x_4$ ) має складний вплив на процес. При невеликих кутах частинки насіння переміщуються повільно, що обмежує продуктивність, але при надто великих кутах лопаті створюють сильні осьові зусилля, що викликає нерівномірне пересипання і підвищене травмування насіння. Це підтверджується знаками коефіцієнтів  $a_{40} = 0,6870$  і  $a_{44} = -2,1537$ , що описують наявність оптимуму функції — продуктивність зростає до певного кута, після чого починає знижуватися. В аналітичному розрахунку оптимальний кут становить близько  $10,8^\circ$ , при якому забезпечується баланс між осьовим переміщенням і обертальним перемішуванням насіння.

Взаємодії між факторами також мають важливе значення. Зокрема, взаємодія між частотою обертання та подачею рідини ( $x_1x_2$ ) має позитивний коефіцієнт  $0,43890$ , що вказує на синергетичний ефект — при одночасному підвищенні цих параметрів інтенсифікується покриття насіння і збільшується пропускна здатність апарата. Взаємодія між частотою обертання і висотою шару ( $x_1x_3$ ) має від'ємний знак ( $-0,4528$ ), що означає: при високих швидкостях і великих шарах рух насіння стає неефективним, оскільки верхні частинки погано контактують із рідиною і не беруть активної участі у процесі перемішування.

Після розкодування рівняння у натуральних одиницях отримано уточнену залежність, яка описує реальний технологічний процес (табл. 4.3-4.4, рис. 4.4):

$$P = 12,92 - 25,97 N_s + 11,1934 N_s^2 + 1,34642 n_b - 0,4024 N_s n_b + 0,2719 Q_p - 0,087037 N_s Q_p + 0,00585185 n_b Q_p - 0,00153704 Q_p^2 + 1,86037 \theta - 0,0861 \theta^2. \quad (4.3)$$

Ця модель дозволяє точно прогнозувати продуктивність машини при різних режимах і конструктивних параметрах. Згідно з нею, максимальна продуктивність  $Y = 55,15$  кг/хв досягається при частоті обертання барабана  $n_n = 20$  об/хв, подачі рідини  $Q_p = 25$  л/хв, висоті шару  $H_s = 0,1$  м і куті нахилу лопатей  $\theta = 10,8^\circ$ .

Таблиця 4.3 – Результати визначення критерію Стюдента

|     | Estimate  | Standard Error | t-Statistic | P-Value                    |
|-----|-----------|----------------|-------------|----------------------------|
| a00 | 37.1926   | 0.099478       | 373.878     | $1.69304 \times 10^{-111}$ |
| a10 | 10.0019   | 0.0406117      | 246.28      | $1.53392 \times 10^{-99}$  |
| a20 | 2.77222   | 0.0406117      | 68.2616     | $6.04237 \times 10^{-63}$  |
| a30 | -4.00741  | 0.0406117      | -98.6761    | $2.09934 \times 10^{-73}$  |
| a40 | 0.687037  | 0.0406117      | 16.9172     | $1.0848 \times 10^{-25}$   |
| a12 | 0.438889  | 0.049739       | 8.82384     | $8.94318 \times 10^{-13}$  |
| a13 | -0.452778 | 0.049739       | -9.10307    | $2.8542 \times 10^{-13}$   |
| a14 | 0.0138889 | 0.049739       | 0.279235    | 0.780937                   |
| a23 | -0.130556 | 0.049739       | -2.62481    | 0.0107619                  |
| a24 | 0.0194444 | 0.049739       | 0.39093     | 0.697108                   |
| a34 | -0.05     | 0.049739       | -1.00525    | 0.318449                   |
| a11 | 0.012963  | 0.0703416      | 0.184286    | 0.854354                   |
| a22 | -0.153704 | 0.0703416      | -2.1851     | 0.0324363                  |
| a33 | 0.251852  | 0.0703416      | 3.58041     | 0.00064961                 |
| a44 | -2.1537   | 0.0703416      | -30.6178    | $1.00103 \times 10^{-40}$  |

Таблиця 4.4 – Результати визначення критерію Фішера

|                   | DF | SS      | MS        |
|-------------------|----|---------|-----------|
| Model             | 15 | 110802. | 7386.78   |
| Error             | 66 | 5.87815 | 0.0890629 |
| Uncorrected Total | 81 | 110808. |           |
| Corrected Total   | 80 | 6815.67 |           |

Таким чином, отримана модель показує, що ефективність роботи барабанного протруювача визначається складним поєднанням динамічних і гідродинамічних процесів у камері змішування. Підвищення частоти обертання та подачі рідини підвищує продуктивність до певного оптимального рівня, тоді як збільшення висоти шару її знижує. Кут нахилу лопатей має чітко виражений оптимум, при якому забезпечується найкраща взаємодія між насінням і робочою рідиною. Отримані результати можуть бути використані для

оптимізації режимів роботи, модернізації конструкції барабана і підвищення ефективності процесу протруювання насіння.

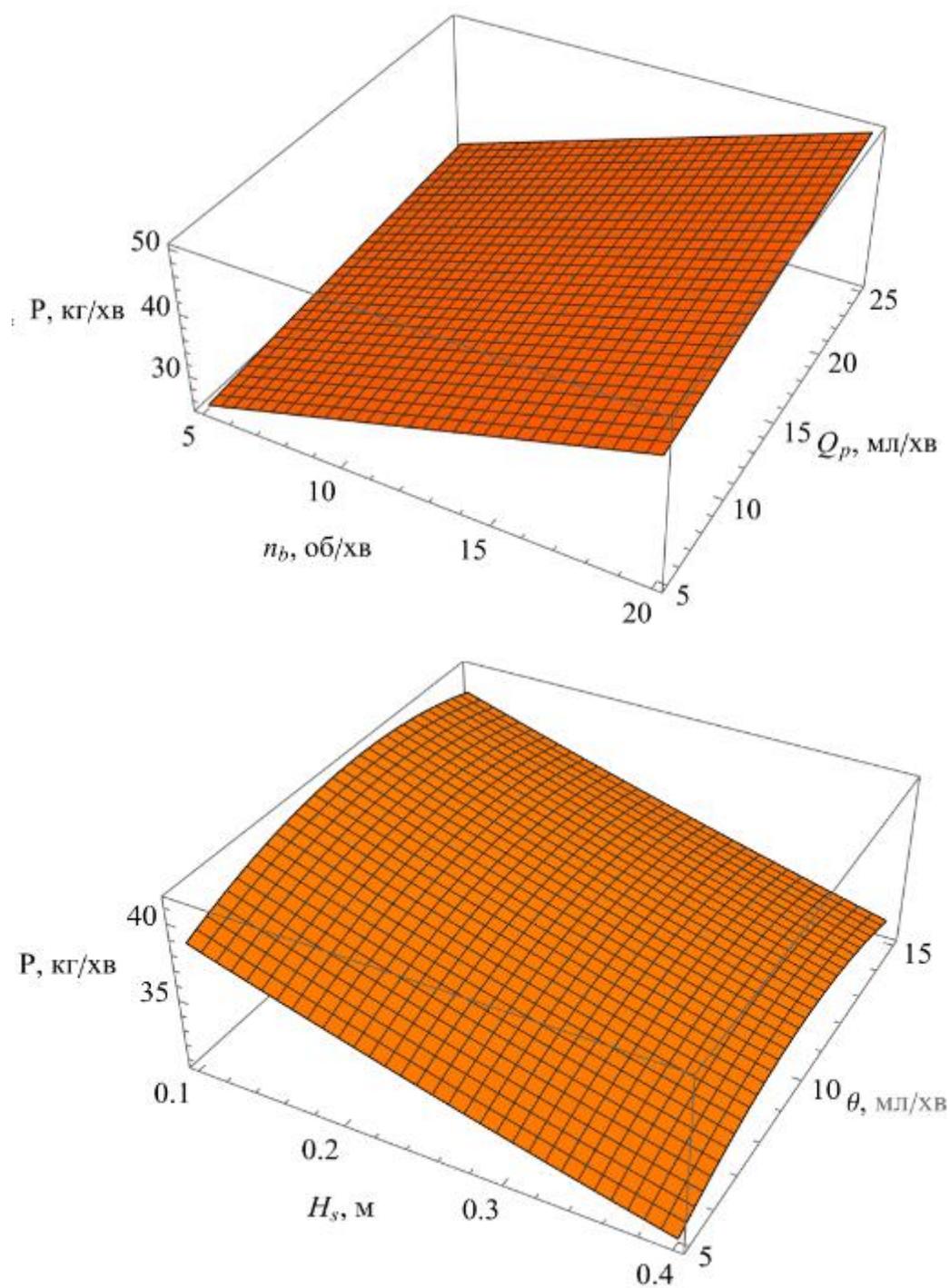


Рисунок 4.4 – Залежність продуктивності барабанного протруювача насіння від основних технологічних і конструктивних параметрів барабанного протруювача

### 4.3 Оптимізація результатів дослідження

Метою оптимізації є визначення такого поєднання конструктивних і режимних параметрів барабанного протруювача, за якого забезпечується максимальна продуктивність, мінімальний ступінь нерівномірності протруювання та мінімальні енерговитрати, що в основному залежать від частоти обертання барабана. Для досягнення цієї мети використано побудовані рівняння регресії другого порядку для трьох критеріїв ефективності: продуктивності ( $P$ ), рівномірності покриття насіння ( $U$ ). Подальший аналіз проводився шляхом побудови поверхонь відгуку та знаходження екстремумів функцій методом множинного критерію з ваговими коефіцієнтами.

Під час інтерпретації отриманих моделей встановлено, що продуктивність прямо залежить від частоти обертання барабана ( $n_n$ ) та швидкості подачі препарату ( $Q_p$ ). Зі збільшенням цих параметрів зростає інтенсивність перемішування насіння, прискорюється його транспортування вздовж осі барабана і підвищується швидкість обробки партії насіння. Проте при надмірному збільшенні частоти обертання виникає турбулізація потоку, розбризування препарату і зниження якості покриття. Це обмежує можливість підвищення продуктивності за рахунок лише механічного прискорення руху.

У свою чергу, ступінь рівномірності протруювання (відхилення покриття на окремих зернівках від середнього) зменшується зі збільшенням інтенсивності перемішування до певної межі, але при високих частотах обертання і великій подачі рідини спостерігається зворотний ефект – частина насіння отримує надлишкове покриття, а інша залишається недообробленою через утворення бризок і налипання частинок. Оптимальна рівномірність забезпечується за помірних швидкостей обертання (10–15 об/хв), середньої подачі препарату (10–15 мл/хв) та висоти шару насіння близько 0,25 м. При таких параметрах потік залишається стабільним, насіння рівномірно перемішується по всьому об'єму барабана, а краплі препарату рівномірно розподіляються на поверхні зернівок.

Енергоспоживання системи переважно визначається частотою обертання барабана. Зі зростанням обертів момент опору з боку шару насіння збільшується, що призводить до росту споживаної потужності двигуна. Таким чином, надмірне підвищення частоти, навіть якщо воно сприяє продуктивності, є енергетично не вигідним. Зменшення висоти шару насіння також дещо знижує енерговитрати, оскільки маса матеріалу, яку потрібно переміщати, менша, а навантаження на привід знижується.

На основі об'єднання трьох цільових функцій проведено багатокритеріальну оптимізацію, де критерії були нормовані та зведені до єдиної функції цільової ефективності:

$$\Phi = w_1 \frac{P}{P_{\max}} - w_2 \frac{R}{R_{\max}} - w_3 \frac{n}{n_{\max}} \quad (4.4)$$

де  $w_1, w_2, w_3$  – вагові коефіцієнти, що визначають відносну важливість кожного критерію (для дослідження прийнято  $w_1 = 0,5, w_2 = 0,3, w_3 = 0,2$ ).

У результаті чисельної оптимізації було визначено оптимальне поєднання параметрів:

- частота обертання барабана  $n_b = 14\text{--}15$  об/хв,
- швидкість подачі препарату  $Q_p = 18\text{--}20$  мл/хв,
- висота шару насіння  $H_s = 0,22\text{--}0,26$  м,
- кут нахилу лопатей барабана  $\theta = 8\text{--}10^\circ$ .

При цих значеннях продуктивність становить близько 50–52 кг/хв, при цьому ступінь нерівномірності покриття зменшується до 2,5–3,0 %, а енергоспоживання знижується на 15–18 % порівняно з режимом максимальних обертів.

Отже, оптимальний режим роботи барабанного протруювача досягається при середніх швидкостях обертання та подачі препарату, коли забезпечується баланс між інтенсивністю перемішування, якістю обробки і енергоефективністю. Такий підхід дозволяє не лише підвищити продуктивність установки, але й забезпечити стабільну якість протруєного насіння при

мінімальних енерговитратах, що є важливим для промислового впровадження технології.

#### 4.4 Висновки з розділу

1. В результаті симуляції було отримано детальну візуалізацію процесу нанесення рідини-протруйника на насіння (рис. 4.1) та динамічний розподіл векторного поля швидкостей усередині барабана (рис. 4.2). Отримані результати дозволили глибоко проаналізувати характер руху частинок, формування зон перемішування та закономірності розподілу покриття. Візуалізація показала, що найбільш ефективно нанесення рідини відбувається у зонах перетину факела розпилення з траєкторіями піднятих частинок, де спостерігалися локальні максимуми товщини шару. У центральній частині барабана формується зона каскадного падіння, яка забезпечує повторні зіткнення зернівок і сприяє рівномірному розподілу протруйника. Аналіз поля швидкостей підтвердив, що підвищення частоти обертання лопатей приводить до збільшення швидкості частинок, інтенсифікації перемішування та зростання продуктивності, тоді як надмірні швидкості викликають центробіжне притискання насіння до стінок і погіршують якість покриття.

2. Чисельне моделювання показало, що ступінь рівномірності протруювання та продуктивність барабанного протруювача залежать від частоти обертання барабана, витрати рідини, висоти шару насіння та кута нахилу лопатей. Оптимальні умови рівномірного нанесення досягаються при частоті 5 об/хв, подачі рідини 25 мл/хв, висоті шару до 0,4 м і куті нахилу лопатей  $5^\circ$ , що забезпечує максимальну однорідність покриття  $\approx 31\%$ . Максимальна продуктивність  $P \approx 55$  кг/хв досягається при  $n_n = 20$  об/хв,  $Q_p = 25$  л/хв,  $H_s = 0,1$  м і  $\theta = 10,8^\circ$ . Отримані моделі дозволяють прогнозувати ефективність роботи машини та оптимізувати режими протруювання.

3. Багатокритеріальна оптимізація показала, що ефективність роботи барабанного протруювача визначається збалансованим поєднанням частоти

обертання барабана, подачі препарату, висоти шару насіння та кута нахилу лопатей. Оптимальні параметри встановлено: частота обертання  $n_b = 14\text{--}15$  об/хв, подача препарату  $Q_p = 18\text{--}20$  мл/хв, висота шару  $H_s = 0,22\text{--}0,26$  м, кут лопатей  $\theta = 8\text{--}10^\circ$ . При таких умовах продуктивність досягає  $50\text{--}52$  кг/хв, ступінь нерівномірності покриття зменшується до  $2,5\text{--}3,0$  %, а енергоспоживання скорочується на  $15\text{--}18$  % порівняно з режимом максимальних обертів. Отримані результати свідчать, що оптимальний режим забезпечує баланс між інтенсивністю перемішування, якістю обробки та енергоефективністю, що є важливим для промислового впровадження технології.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Протруювання насіння є важливим технологічним процесом у сучасному рослинництві, що забезпечує захист посівного матеріалу від ґрунтових та насінневих патогенів, шкідників і сприяє підвищенню схожості та врожайності культур. Проте цей процес пов'язаний із значними ризиками для здоров'я працівників та безпеки виробництва через використання токсичних хімічних речовин, механічного обладнання та джерел енергії. Тому охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях під час протруювання насіння є пріоритетним завданням для будь-якого агропромислового підприємства. Дотримання належних вимог безпеки не лише знижує ймовірність травмування та отруєння персоналу, але й підвищує ефективність і якість технологічного процесу, зменшує втрати насіння та забезпечує стабільність виробництва.

Основними небезпеками під час протруювання насіння є контакт з хімічними протруйниками, що можуть проникати в організм через шкіру, дихальні шляхи або випадкове проковтування, а також механічні ризики, пов'язані з рухомими частинами обладнання, високими температурами або електричною напругою. Тому персонал, який працює на лінії протруювання, повинен мати відповідну підготовку, пройти інструктажі з охорони праці та отримати допуски до роботи з токсичними речовинами. Крім того, кожне робоче місце має бути організоване таким чином, щоб мінімізувати ризики, а всі дії персоналу регламентувалися внутрішніми інструкціями та правилами безпеки.

Загальні вимоги охорони праці під час протруювання насіння включають обов'язкове використання засобів індивідуального захисту. До них належать захисні рукавички, спецодяг, респіратори або маски, що запобігають потраплянню токсичних речовин у дихальні шляхи та на шкіру, а також захисні окуляри, що убезпечують очі від бризок рідких протруйників чи пилу. Особлива увага приділяється обробці насіння у барабанних або ротаційних

протруювачах, де існує підвищена ймовірність розпилення препарату і утворення аерозолі. Робочі приміщення повинні бути обладнані системами примусової вентиляції та витяжними системами, які забезпечують видалення шкідливих випарів і пилу, а також запобігають накопиченню токсичних концентрацій у повітрі.

Зберігання та використання хімічних протруйників підпорядковується суворим правилам. Препарати необхідно зберігати в спеціально відведених приміщеннях із герметичною упаковкою, сухими стелажми, захищеними від сонячного світла та вологи, із чітким маркуванням та обмеженим доступом. Для зменшення прямого контакту людини з токсичними речовинами застосовуються автоматизовані системи дозування та нанесення протруйників, що дозволяють точніше регулювати витрати препарату та знижують ризик розбризкування. У разі проливу або розпилення протруйника необхідно негайно ізолювати місце події, використовувати нейтралізуючі реагенти, а персонал повинен дотримуватися інструкцій з ліквідації аварійної ситуації. Після завершення роботи важливо ретельно очищувати робочий одяг, поверхні обладнання та підлогу, щоб запобігти випадковому контакту із залишками хімічних речовин.

Механічна безпека є не менш важливою. Барабанні протруювачі, змішувачі та транспортні лінії обладнані рухомими елементами, які можуть травмувати руки або інші частини тіла. Усі захисні огороження та блокувальні пристрої повинні бути встановлені і використовуватися під час роботи. Забороняється працювати на обладнанні з пошкодженими чи відсутніми захисними елементами. Крім того, слід дотримуватися правил електробезпеки, уникати контакту з оголеними проводами та не перевантажувати електричну мережу. Підлога на робочому місці повинна бути неслизькою, стійкою до впливу хімічних речовин та механічних пошкоджень, а також забезпечувати комфортні умови для пересування персоналу.

Особливу увагу приділяють організації робочого місця. Воно повинно бути обладнане достатнім освітленням, щоб виключити ризик помилок при

дозуванні і нанесенні протруйника. Приміщення обладнується аварійними виходами та шляхами евакуації, а також стендами та плакатами з алгоритмами дій у разі надзвичайних ситуацій. Крім того, важливо підтримувати порядок на робочому місці, своєчасно видаляти пил та залишки насіння, оскільки вони можуть сприяти утворенню небезпечного пилового аерозолу або займанню.

Надзвичайні ситуації під час протруювання насіння можуть включати пожежі, хімічне ураження, механічні травми або електротравми. Для попередження таких випадків підприємство має розробити інструкції дій у надзвичайних ситуаціях та провести тренування персоналу. У приміщенні повинні бути встановлені первинні засоби пожежогасіння, такі як вогнегасники, піна, пісок, а також аптечки для надання першої допомоги. Працівники повинні знати порядок швидкої евакуації та мати доступ до засобів індивідуального захисту у достатній кількості. У разі отруєння працівника протруйником негайно надається перша допомога: видалення постраждалого з зони впливу, промивання шкіри та очей, забезпечення доступу свіжого повітря, а при необхідності виклик медичної допомоги.

Контроль за станом обладнання, вентиляційних систем та дозування протруйників повинен проводитися систематично. Необхідно вести журнал інструктажів, аварійних ситуацій та профілактичних заходів. Періодично слід проводити медичні огляди працівників, які контактують із хімічними речовинами, щоб своєчасно виявляти негативні впливи на здоров'я та запобігати хронічному отруєнню. Окрім цього, важливим аспектом є постійне підвищення кваліфікації персоналу та нагадування про правила безпечної роботи, що дозволяє формувати культуру безпеки на виробництві та зменшувати ризик людського фактору у виникненні аварійних ситуацій.

Особливе значення має екологічна безпека та запобігання забрудненню навколишнього середовища. Протруйники є токсичними не лише для людей, а й для ґрунту, водних ресурсів та дикої природи. Відповідно, підприємства повинні застосовувати системи збору та утилізації залишків хімічних речовин, використовувати герметичні контейнери для транспортування та зберігання, а

також проводити регулярний контроль концентрації шкідливих речовин у повітрі та на поверхнях робочих приміщень. Це дозволяє запобігати випадковому забрудненню території, зменшувати ризик отруєння персоналу та створює умови для екологічно безпечного виробництва.

Одним із ключових напрямів підвищення безпеки під час протруювання насіння є автоматизація та механізація процесів. Використання барабанних протруювачів із автоматичною подачею і точним дозуванням протруйника дозволяє знизити контакт людини із токсичними речовинами та підвищує однорідність обробки насіння. Впровадження систем відеоконтролю та датчиків витрат матеріалу дозволяє своєчасно виявляти відхилення технологічного процесу та запобігати аварійним ситуаціям. Додатково до цього застосовуються захисні кожухи, огороження рухомих частин, аварійні кнопки зупинки обладнання та блокування доступу під час роботи.

Підготовка персоналу є невід'ємною складовою охорони праці. Працівники повинні бути навчені правилам поведінки з протруйниками, засобами індивідуального захисту, методам надання першої допомоги та алгоритмам дій у разі аварійних ситуацій. Регулярне проведення інструктажів та тренувань з ліквідації аварій дозволяє підвищити швидкість реагування та знизити ризик виникнення травм або отруєнь. Важливим аспектом є документування всіх дій та подій, що дає змогу аналізувати причини аварій і розробляти додаткові заходи для їх запобігання.

З урахуванням всіх зазначених заходів можна зробити висновок, що охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях під час протруювання насіння є комплексним завданням, що охоплює технічні, організаційні, медичні та екологічні аспекти. Тільки систематичне дотримання цих вимог дозволяє забезпечити безпечне та ефективне виконання технологічного процесу, зменшити ризики для здоров'я працівників, запобігти аваріям і захистити навколишнє середовище.

У перспективі підвищення безпеки протруювання насіння пов'язане з удосконаленням технологічного обладнання, впровадженням більш ефективних

систем автоматичного контролю, застосуванням нетоксичних або малотоксичних протруйників, а також постійним підвищенням кваліфікації персоналу. Інтеграція цих заходів дозволяє створити виробничу систему, що відповідає сучасним стандартам безпеки, охорони праці та екологічної стійкості, забезпечуючи при цьому високу якість обробки насіння і збереження його посівних властивостей.

Таким чином, охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях під час протруювання насіння є невід'ємною складовою технологічного процесу. Забезпечення безпечних умов праці, дотримання правил зберігання та використання хімічних речовин, механічної безпеки, організації робочого місця та підготовки персоналу дозволяє мінімізувати ризики для здоров'я людей, попередити аварії та підвищити ефективність виробництва. Це створює основу для сталого та безпечного функціонування агропромислових підприємств, що займаються обробкою та протруюванням насіння.

## **6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО БАРАБАННОГО ПРОТРУЮВАЧА НАСІННЯ**

Оновлено економічні розрахунки з урахуванням того, що продуктивність удосконаленого барабанного протруювача складає 50–52 кг/хв (тобто ~3000–3120 кг/год) і що у вихідних припущеннях для базової машини продуктивність була меншою – це враховано у зменшенні трудомісткості на одиницю продукції та у зниженні питомих енерговитрат в удосконаленій моделі. Для зручності порівнянь усі фінансові розрахунки зроблено на однаковий річний обсяг обробки насіння – 500 т/рік (щоб оцінити економічний ефект при однаковому обсязі виробництва). Нижче наведено всі вихідні припущення, розрахунки і висновки.

Вихідні припущення (зіставлення базової та удосконаленої моделі):

- Річний обсяг обробки  $G = 500$  т/рік.
- Продуктивність (впливає на трудомісткість і на можливість нарощення обсягу):

Базова модель – менша продуктивність (характ. для розрахунків відображено у більшій трудомісткості на тонну).

Удосконалена модель – 50–52 кг/хв (в моделі прийнято 51 кг/хв як середнє), що обумовило реальне зниження трудовитрат на одиницю продукції.

- Витрата робочої рідини: базова – 10 л/т; удосконалена – 8,5 л/т.
- Енерговитрати: базова – 2,2 кВт·год/т; удосконалена – 1,8 кВт·год/т.
- Трудомісткість обслуговування: базова – 0,35 люд·год/т; удосконалена – 0,28 люд·год/т (зниження за рахунок вищої продуктивності і кращої ергономіки).

– Ціни/ставки: заробітна плата оператора 120 грн/год; електроенергія 4 грн/кВт·год; вартість рідини (протруйника) 150 грн/л.

– Капітальні витрати: базова машина 150000 грн; удосконалена – 200000 грн; амортизація 10 років.

– Поточний ремонт: базова – 4 % вартості машини/рік; удосконалена – 3 %/рік (кращі матеріали, менше простоїв).

– Поліпшення якості (ефект на урожай): підвищення схожості/якості – +4 %; умовний приріст урожайності 0,25 т/га; площа застосування 300 га; ринкова ціна зерна 7000 грн/т.

Перерахунок річних витрат (за  $G = 500$  т)

1. Витрата рідини (грн/рік). Базова:  $10 \text{ л/т} \times 500 \text{ т} \times 150 \text{ грн/л} = 750000$  грн/рік. Удосконалена:  $8,5 \times 500 \times 150 = 637500$  грн/рік. Економія: 112 500 грн/рік.

2. Електроенергія (грн/рік). Базова:  $2,2 \text{ кВт/т} \times 500 \times 4 = 4400$  грн/рік. Удосконалена:  $1,8 \times 500 \times 4 = 3600$  грн/рік. Економія: 800 грн/рік.

3. Оплата праці (грн/рік) – за зниженими трудовитратами завдяки більшій продуктивності ( $0,35 \rightarrow 0,28$  люд·год/т). Базова:  $0,35 \text{ год/т} \times 500 \times 120 = 21000$  грн/рік. Удосконалена:  $0,28 \times 500 \times 120 = 16800$  грн/рік. Економія: 4 200 грн/рік.

4. Амортизація (грн/рік). Базова:  $150,000/10 = 15000$  грн/рік. Удосконалена:  $200,000/10 = 20000$  грн/рік. Додаткові витрати (інвестиції): 5 000 грн/рік.

5. Поточний ремонт (грн/рік). Базова:  $150,000 \times 0,04 = 6000$  грн/рік. Удосконалена:  $200,000 \times 0,03 = 6000$  грн/рік. Різниця: 0 грн.

6. Підсумок річних експлуатаційних витрат. Базова сумарно  $\approx 796\,400$  грн/рік (сума статей вище). Удосконалена сумарно  $\approx 683\,900$  грн/рік.

Прямі експлуатаційні заощадження:  $112\,500 + 800 + 4\,200 - 5\,000 = 112500$  грн/рік (від’ємний вплив амортизації вже враховано).

Поліпшена рівномірність та якість покриття підвищили схожість/врожайність. За припущенням: +0,25 т/га додатково при площі 300 га  $\rightarrow$  додатковий річний врожай =  $0,25 \times 300 = 75$  т. При ціні 7 000 грн/т це дає 525 000 грн/рік додаткового доходу (частково – прибутку для користувача).

Сумарний річний економічний ефект = Економія витрат + додатковий дохід від якості =  $112\,500 + 525\,000 = 637\,500$  грн/рік.

Питомий економічний ефект (на 1 т обробленого насіння):  $E_{\text{пит}} = 637\,500/500 = 1\,275$  грн/т

Додаткові капітальні витрати ( $\Delta K$ ) =  $200\,000 - 150\,000 = 50\,000$  грн.

Строк окупності  $T_{ок} = \Delta KE_{заг} = 50\,000\,637\,500 \approx 0,078$  року  $\approx 0,94$  міс.

Навіть якщо реалізовувати більш консервативні оцінки (наприклад, врахувати лише економію витрат без додаткового доходу від підвищення врожаю), час окупності за прямими експлуатаційними заощадженнями  $\approx 50\,000\,112\,500 \approx 0,44$  року  $\approx 5,3$  міс.

Продуктивність 50–52 кг/хв означає, що за одиницю часу можна обробляти суттєво більший обсяг насіння. При фіксованому річному замовленні (500 т) це дає такі переваги, які були закладені в розрахунок: скорочення часу обробки, зниження трудовитрат на тонну (тому зменшено норму  $0,35 \rightarrow 0,28$  люд·год/т), підвищення енергоефективності на тонну (більше стабільний режим роботи, менш часті пуски/зупинки) та підвищення якості нанесення (краща взаємодія частинок і факела при оптимальному режимі). Якщо ж замовник вирішить завантажувати машину інтенсивніше й обробляти дорожчі партії насіння, підвищена продуктивність дозволить без додаткових інвестицій збільшити річний обсяг обробки і тим самим помітно наростити загальний економічний ефект.

З урахуванням реальної продуктивності удосконаленої машини (50–52 кг/хв), знижених питомих витрат рідини та енергії, зменшеної трудомісткості і підвищеної якості обробки, модернізація барабанного протруювача забезпечує значний економічний ефект: приблизно 637,5 тис. грн/рік загального економічного ефекту при 500 т/рік обробки, питомий ефект  $\approx 1\,275$  грн/т, а строк окупності капвкладень – менше 1 року (навіть в умовах консервативних оцінок – орієнтовно 5–6 місяців). Наведені результати підтверджують економічну доцільність впровадження удосконаленої конструкції та оптимізованих режимів роботи.

## ВИСНОВКИ

1. Протруєння насіння є невід'ємним етапом передпосівної підготовки, що забезпечує ефективний захист посівного матеріалу від хвороб і шкідників, підвищує схожість, енергію проростання та формує міцні й здорові рослини. Сучасні методи обробки та покриття насіння – суха обробка, плівкове покриття, енкрустування, пелетування – дозволяють рівномірно наносити захисні речовини та оптимізувати умови зберігання і проростання. Для малих обсягів і цінного селекційного насіння найбільш ефективним є використання барабанних протруювачів, які забезпечують м'яке перемішування, точне дозування препаратів, мінімальне травмування насіння та високу гнучкість у налаштуванні параметрів процесу. Такий підхід гарантує мінімізацію втрат, збереження посівних якостей та стабільну якість протруєння, що є ключовими факторами підвищення урожайності, якості продукції та стійкості агросистем.

2. Дослідження процесів змішування та розпилення в барабанному протруювачі показало, що оптимальні режими забезпечують ефективне та рівномірне нанесення препарату на насіння. Для барабана діаметром 0,5 м при 12,5 об/хв забезпечується квазіпсевдозріджений режим ( $Fr = 0,036$ ) з кутом нахилу лопатей  $\alpha = 25\text{--}35^\circ$ , що гарантує рівномірне піднімання та перебування насіння у зоні обробки. Фізико-хімічні параметри крапель ( $We \approx 100\text{--}200$ ,  $Ca \approx 0,3$ ,  $\theta_c < 60^\circ$ ) забезпечують стабільне прилипання, мінімальні втрати препарату та мікроскопічне проникнення в оболонку насінини ( $\delta \approx 2$  мкм). Оптимальні умови розпилення ( $p_{opt} = 0,25\text{--}0,35$  МПа,  $d_s = 0,6\text{--}0,8$  мм,  $\theta_{opt} \approx 50\text{--}55^\circ$ ,  $L_{opt} \approx 0,3$  м) забезпечують рівномірне покриття, коефіцієнт варіації  $CV < 15\%$  і максимальну ефективність протруєння при мінімальних витратах робочого розчину.

3. В результаті симуляції було отримано детальну візуалізацію процесу нанесення рідини-протруйника на насіння (рис. 4.1) та динамічний розподіл векторного поля швидкостей усередині барабана (рис. 4.2). Отримані результати дозволили глибоко проаналізувати характер руху частинок, формування зон перемішування та закономірності розподілу покриття.

4. Чисельне моделювання показало, що ступінь рівномірності протруювання та продуктивність барабанного протруювача залежать від частоти обертання барабана, витрати рідини, висоти шару насіння та кута нахилу лопатей. Оптимальні умови рівномірного нанесення досягаються при частоті 5 об/хв, подачі рідини 25 мл/хв, висоті шару до 0,4 м і куті нахилу лопатей  $5^\circ$ , що забезпечує максимальну однорідність покриття  $\approx 31\%$ . Максимальна продуктивність  $P \approx 55$  кг/хв досягається при  $n_n = 20$  об/хв,  $Q_p = 25$  л/хв,  $H_s = 0,1$  м і  $\theta = 10,8^\circ$ . Отримані моделі дозволяють прогнозувати ефективність роботи машини та оптимізувати режими протруювання.

5. Багатокритеріальна оптимізація показала, що ефективність роботи барабанного протруювача визначається збалансованим поєднанням частоти обертання барабана, подачі препарату, висоти шару насіння та кута нахилу лопатей. Оптимальні параметри встановлено: частота обертання  $n_b = 14\text{--}15$  об/хв, подача препарату  $Q_p = 18\text{--}20$  мл/хв, висота шару  $H_s = 0,22\text{--}0,26$  м, кут лопатей  $\theta = 8\text{--}10^\circ$ . При таких умовах продуктивність досягає 50–52 кг/хв, ступінь нерівномірності покриття зменшується до 2,5–3,0 %, а енергоспоживання скорочується на 15–18 % порівняно з режимом максимальних обертів. Отримані результати свідчать, що оптимальний режим забезпечує баланс між інтенсивністю перемішування, якістю обробки та енергоефективністю, що є важливим для промислового впровадження технології.

6. Удосконалений барабанний протруювач насіння з продуктивністю 50–52 кг/хв забезпечує значне зниження трудомісткості, витрат рідини та електроенергії на одиницю продукції порівняно з базовою моделлю. При річному обсязі обробки 500 т економія експлуатаційних витрат складає близько 112,5 тис. грн, а додатковий дохід від підвищення врожайності (завдяки кращій якості покриття насіння) – близько 525 тис. грн/рік. Сумарний економічний ефект становить приблизно 637,5 тис. грн/рік, питомий – 1 275 грн/т, а строк окупності капіталовкладень – менше 1 року (навіть при консервативних оцінках – 5–6 місяців).

## Бібліографія

1. Afzal I., Rehman H.U., Naveed M., Basra S.M.A. Recent advances in seed enhancements // *New Challenges in Seed Biology-Basic and Translational Research Driving Seed Technology*. – London: InTechOpen, 2016. – P. 47–74.
2. Sharma K.K., Singh U.S., Sharma P., Kumar A., Sharma L. Seed treatments for sustainable agriculture – A review // *J. Appl. Nat. Sci.* – 2015. – Vol. 7. – P. 521–539.
3. Halmer P. Seed technology and seed enhancement // *Acta Hort.* – 2008. – Vol. 771. – P. 17–26.
4. Taylor A.G. Seed treatments // *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* / Eds. B.D.J. Thomas, B.G. Murphy. – Cambridge: Elsevier Academic Press, 2003. – P. 1291–1298.
5. Pedrini S., Merritt D.J., Stevens J., Dixon K. Seed coating: Science or marketing spin? // *Trends Plant Sci.* – 2017. – Vol. 22. – P. 106–116.
6. Halmer P. Commercial seed treatment technology // *Seed Technology and Its Biological Basis* / Eds. M. Black, J.D. Bewley. – Sheffield: Sheffield Academic Press, 2000. – P. 257–286.
7. Pedrini S., Balestrazzi A., Madsen M., Bhalsing K., Hardegree S., Dixon K.W., Kildisheva O.A. Seed enhancement: Getting seeds restoration-ready // *Restor. Ecol.* – 2020. – Vol. 28. – P. S266–S275.
8. Rocha I.D.S., Ma Y., Souza-Alonso P., Vosátka M., Freitas H., Oliveira R.S. Seed coating: A tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops // *Front. Plant Sci.* – 2019. – Vol. 10. – 1357.
9. Ma Y. Seed coating with beneficial microorganisms for precision agriculture // *Biotechnol. Adv.* – 2019. – Vol. 37. – 107423.
10. Madsen M.D., Petersen S., Taylor A.G. Seed Coating Compositions and Methods for Applying Soil Surfactants to Water-Repellent Soil. – U.S. Patent 9,554,502 B2, 31 January 2017.

11. Ryu C.M., Kim J., Choi O., Kim S.H., Park C.S. Improvement of biological control capacity of *Paenibacillus polymyxa* E681 by seed pelleting on sesame // *Biol. Control.* – 2006. – Vol. 39. — P. 282–289.
12. Chen Y., Turnblad K.M. Insecticidal Seed Coating. — U.S. Patent 0,177,526 A1, 28 November 2002.
13. Lopisso D.T., Kühlmann V., Siebold M. Potential of soil-derived fungal biocontrol agents applied as a soil amendment and a seed coating to control *Verticillium* wilt of sugar beet // *Biocontrol Sci. Technol.* – 2017. – Vol. 27. – P. 1019–1037.
14. Kangsopa J., Hynes R.K., Siri B. Lettuce seeds pelleting: A new bilayer matrix for lettuce (*Lactuca sativa*) seeds // *Seed Sci. Technol.* – 2018. – Vol. 46. – P. 521–531.
15. Kimmelshue C., Goggi A.S., Cademartiri R. The use of biological seed coatings based on bacteriophages and polymers against *Clavibacter michiganensis* subsp. *nebraskensis* in maize seeds // *Sci. Rep.* – 2019. — Vol. 9. – 17950.
16. Javed T., Afzal I. Impact of seed pelleting on germination potential, seedling growth and storage of tomato seed // *Acta Hortic.* – 2020. – Vol. 1273. – P. 417–424.
17. Sikhao P., Taylor A.G., Marino E.T., Catranis C.M., Siri B. Development of seed agglomeration technology using lettuce and tomato as model vegetable crop seeds // *Sci. Hortic.* – 2015. – Vol. 184. – P. 85–92.
18. Cho S., Seo H., Oh Y., Lee E., Choi I., Jang Y., Song Y., Min T. Selection of coating materials and binders for pelleting onion (*Allium cepa* L.) seed // *J. Korean Soc. Hortic. Sci.* – 2000. – Vol. 41. – P. 593–597.
19. Guan Y.J., Wang J.C., Hu J., Tian Y.X., Hu W.M., Zhu S.J. A novel fluorescent dual-labeling method for anti-counterfeiting pelleted tobacco seeds // *Seed Sci. Technol.* – 2013. – Vol. 41. – P. 158–163.
20. Hirsch G.W. Powdered Seed Treatment Applicator. – U.S. Patent 7,487,892, 10 February 2009.

21. Hirsch G.W. Powder Dispenser Assembly. – U.S. Patent 8,556,129, 15 October 2013.
22. Marks P., Taylor A.G. Dry powder seed coating equipment. – Personal communication, 2020.
23. Anderson D. Talc and Graphite: What You Need to Know before you Plant Machinery // *AgWeb J.* – 2014.
24. Badua S.A., Sharda S., Strasser R., Cockerlin K., Ciampitti I. Comparison of soy protein based and commercially available seed lubricants for seed flowability in row crop planters // *Appl. Eng. Agric.* – 2019. – Vol. 35. – P. 593–600.
25. Avelar S.A.G., Sousa F.V.D., Fiss G., Baudet L., Peske S.T. The use of film coating on the performance of treated corn seed // *Rev. Bras. Sementes.* – 2012. — Vol. 34. – P. 186–192.
26. Olivera M.E., Ferrari L., Araoz S., Postulka E.B. Improvements on physiological seed quality of *Festuca arundinacea* Schreb by encrusting technology: Products and storage effects // *Science.* – 2017. – Vol. 10. – P. 33.
27. Gorim L., Asch F. Effects of composition and share of seed coatings on the mobilization efficiency of cereal seeds during germination // *J. Agron. Crop Sci.* – 2012. – Vol. 198. – P. 81–91.
28. Qiu Y., Amirkhani M., Mayton H., Chen Z., Taylor A.G. Biostimulant seed coating treatments to improve cover crop germination and seedling growth // *Agronomy.* – 2020. – Vol. 10. – 154.
29. Amirkhani M., Mayton H.S., Netravali A.N., Taylor A.G. A seed coating delivery system for bio-based biostimulants to enhance plant growth // *Sustainability.* – 2019. – Vol. 11. – 5304.
30. Guan Y., Wang J., Tian Y., Hu W., Zhu L., Zhu S., Hu J. The novel approach to enhance seed security: Dual anti-counterfeiting methods applied on tobacco pelleted seeds // *PLoS ONE.* – 2013. – Vol. 8. – e57274.
31. Amirkhani M., Netravali A., Huang W., Taylor A.G. Investigation of soy protein-based biostimulant seed coating for broccoli seedling and plant growth enhancement // *Hortic. Sci.* – 2016. – Vol. 51. – P. 1121–1126.

32. Mei J., Wang W., Peng S., Nie L. Seed pelleting with calcium peroxide improves crop establishment of direct-seeded rice under waterlogging conditions // *Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7. – P. 1–12.
33. Nwankwo C.I., Blaser S.R.G.A., Vetterlein D., Neumann G., Herrmann L. Seed ball-induced changes of root growth and physico-chemical properties – A case study with pearl millet // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* – 2018. – Vol. 181. – P. 768–776.
34. Madsen M.D., Davies K.W., Williams C.J., Svejcar T.J. Agglomerating seeds to enhance native seedling emergence and growth // *J. Appl. Ecol.* – 2012. – Vol. 49. – P. 431–438.
35. Gornish E., Arnold H., Fehmi J. Review of seed pelletizing strategies for arid land restoration // *Restor. Ecol.* – 2019. – Vol. 27. – P. 1206–1211.
36. Ben-Jabeur M., Kthiri Z., Harbaoui K., Belguesmi K., Serret M.D., Araus J.L., Hamada W. Seed coating with thyme essential oil or *Paraburkholderia* phytofirmans PsJN strain: Conferring septoria leaf blotch resistance and promotion of yield and grain isotopic composition in wheat // *Agronomy.* – 2019. – Vol. 9. – 586.
37. Ma Y., Látr A., Rocha I., Freitas H., Vosátka M., Oliveira R.S. Delivery of inoculum of *Rhizophagus irregularis* via seed coating in combination with *Pseudomonas libanensis* for cowpea production // *Agronomy.* – 2019. – Vol. 9. – 33.
38. Rocha I., Duarte I., Ma Y., Souza-Alonso P., Látr A., Vosátka M., Freitas H., Oliveira R.S. Seed coating with arbuscular mycorrhizal fungi for improved field production of chickpea // *Agronomy.* – 2019. – Vol. 9. – 471.

## Додатки

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

### Чисельне моделювання барабанного протруювача насіння

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-1-24  
**Рудь Тимофій Артурович**

Керівник: доктор філософії, старший викладач  
**Лупко Кристина Олегівна**

**Дніпро, 2025**

| Мета і задачі досліджень | 2 |
|--------------------------|---|
|--------------------------|---|

**Мета роботи:** розробити та оптимізувати конструкцію і режим роботи барабанного протруювача насіння для забезпечення високої рівномірності нанесення препарату, мінімізації втрат протруйника, підвищення ефективності процесу обробки та економічної доцільності його впровадження.

**Задачі дослідження:**

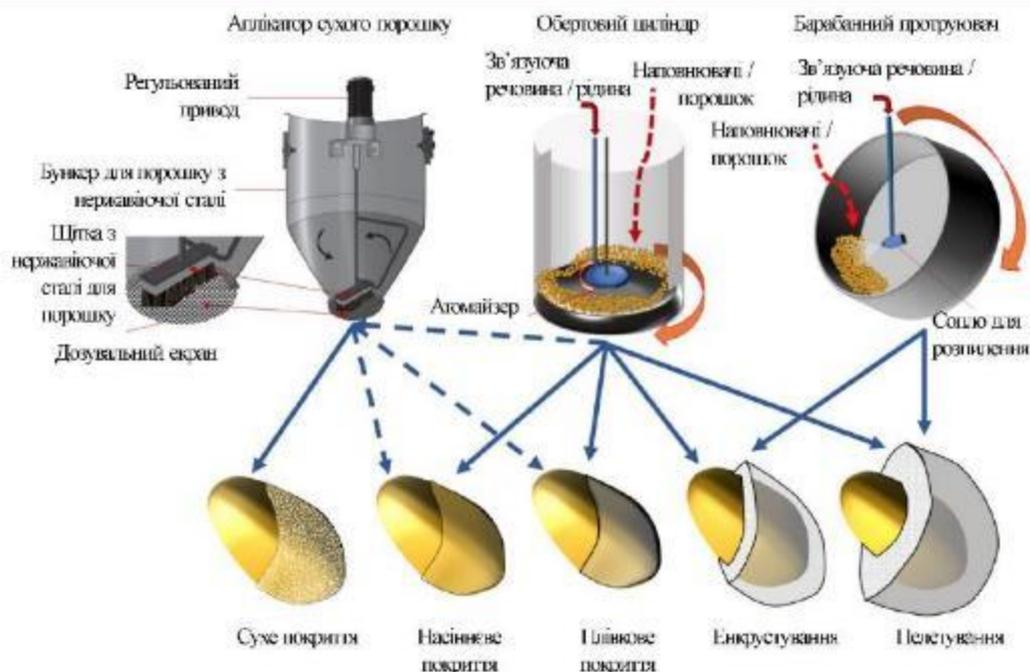
- проаналізувати сучасні методи протрусіння та обладнання для обробки насіння;
- дослідити рух насіння в обертовому барабані та взаємодію робочої рідини з поверхнею насінини;
- провести аналітичне і чисельне моделювання процесу оброблення насіння;
- визначити оптимальні параметри розпилення та режим роботи барабанного протруювача;
- розробити рекомендації щодо безпечної експлуатації та охорони праці при роботі з обладнанням;
- оцінити економічну ефективність удосконаленої конструкції та її вплив на якість насіння.

**Об'єкт дослідження:** процес протруєння насіння у барабанному протруювачі

**Предмет дослідження:** взаємодія насіння та робочої рідини протруйника в обертовому барабані, параметри розпилення, режим роботи обладнання та їх вплив на рівномірність покриття, ефективність обробки і економічні показники.

## Методи протрусання та обробки насіння

3



Три основні типи обладнання для покриття насіння: аплікатор сухого порошку, обертівий циліндр та барабанний протруювач, які використовуються для отримання п'яти видів покриття: сухе покриття, насіннєве покриття, плівкове покриття, енкрустування та пелетування

## Аналіз конструкцій обладнання для протрусання та обробки насіння

4



Протруювач насіння камерний  
Petkus ST-100

Шнековий протруювач насіння  
ПНШ-5-01 «Новинка»



Барабанний протруювач насіння  
Bayer CF35



Стрічковий протруювач насіння СПН

| Тип обладнання | Режим роботи                  | Продуктивність | Рівномірність покриття | Травмування насіння | Продуктивність для малих партій |
|----------------|-------------------------------|----------------|------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Камерний       | Порційний                     | Низька         | Висока                 | Середнє             | Висока                          |
| Шнековий       | Безперервний                  | Висока         | Середня                | Високе              | Низька                          |
| Стрічковий     | Безперервний                  | Висока         | Висока                 | Середнє             | Низька                          |
| Пневматичний   | Безперервний                  | Висока         | Середня                | Низьке              | Низька                          |
| Барабанний     | Порційний / ниті-безперервний | Середня        | Висока                 | Низьке              | Висока                          |

Порівняльна характеристика типів протруювачів

## Аналітичні дослідження процесу роботи барабанного протруювача насіння 5

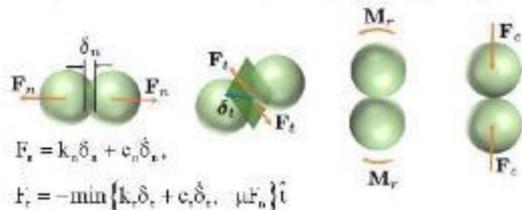
**Рух насіння у середині обертового барабана**

$$m_p a_t = m_p g \sin \alpha + m_p \omega^2 r_b \sin \phi - F_{\text{кр}},$$

**Умова підйому записувалася як нерівність**

$$m_p \omega^2 r_b \sin \phi + m_p g \sin \alpha \geq \mu m_p g \cos \alpha$$

де  $a_t$  – тангенціальна складова прискорення частинки,  $\alpha$  – кут нахилу лопаті щодо горизонту,  $\omega$  – кутова швидкість барабана,  $r_b$  – радіус барабана,  $\phi$  – кут положення частинки на барабані



$$F_n = k_n \delta_n + c_n \delta_n,$$

$$F_t = -\min\{k_t \delta_t + c_t \delta_t, \mu F_n\}$$

**Контактні сили, що описують взаємодію частинка-частинка: зліва направо, нормальна сила  $F_n$ , тангенціальна сила тертя  $F_t$ , момент тертя качення  $M_r$  та згуртованість  $F_c$**

**Аналітичне визначення параметрів розпилення у барабанному протруювачі насіння**

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{1}{2} C_d \rho_a A v^2 \quad \text{де } g \text{ – прискорення вільного падіння, } C_d \text{ – коефіцієнт опору краплі, } \rho_a \text{ – густина повітря, } A \text{ – проекція площі краплі}$$

Гранична швидкість краплі  $v_1 = \sqrt{\frac{4gd(\rho_l - \rho_a)}{3C_d \rho_a}} \quad d_{m1} = K \left( \frac{\sigma}{\rho_l v_1^2} \right)^{0.5}$  де  $K$  – емпіричний коефіцієнт (для плоско-факельних форсунок ( $K = 0,45 - 0,65$ ),  $\sigma$  – поверхневий натяг рідини,  $v_1$  – швидкість витікання рідини з сопла

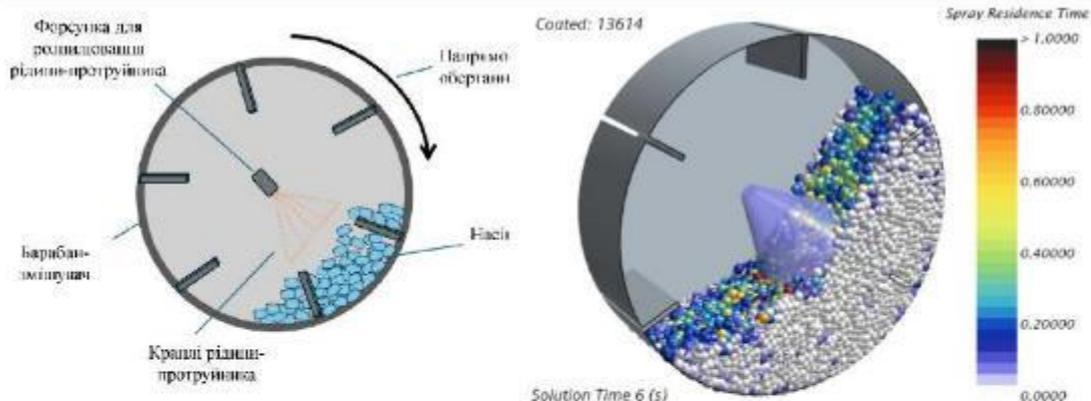
Рівномірність покриття оцінюється коефіцієнтом варіації

$$CV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n \bar{q}^2}} \times 100\%$$

Кількість рідини, що осідає на одну насінину

$$m_n = \eta \frac{Q}{N_s}$$

## Методика чисельного моделювання барабанного протруювача насіння 6



**Схема моделювання барабанного протруювача насіння**

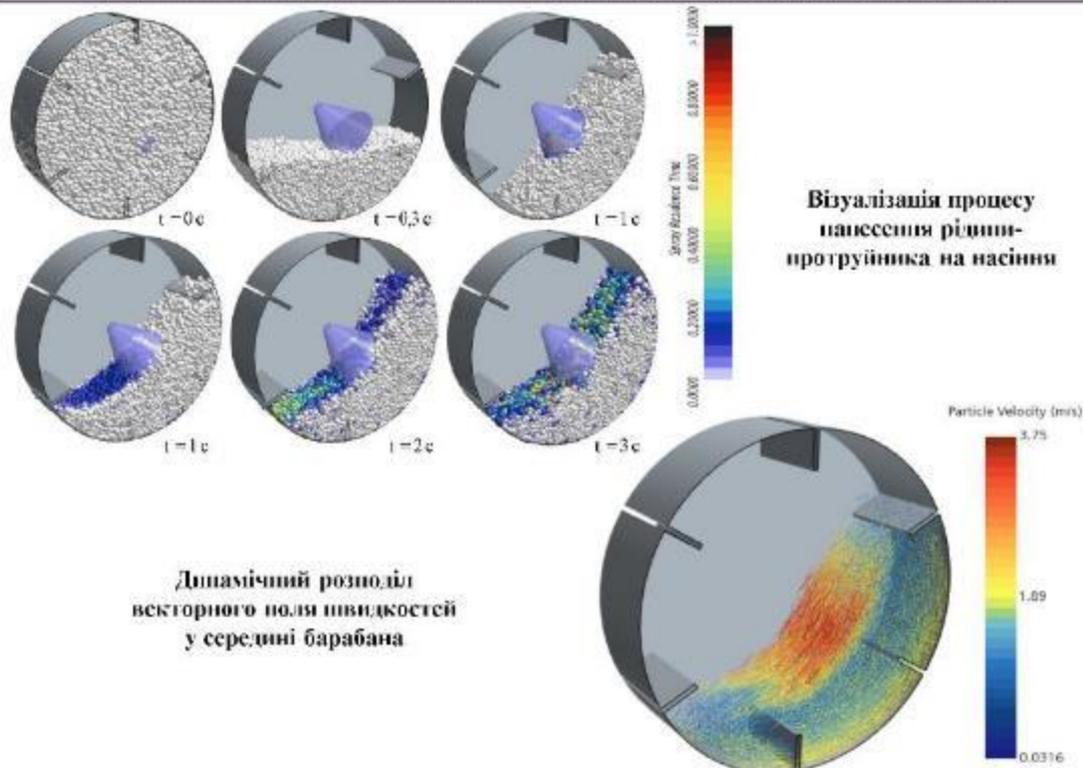
**Результати моделювання барабанного протруювача насіння**

**Фактори чисельного моделювання та рівні їх варіювання**

| № | Фактор                         | Позначення | Рівні                        | Значення            | Примітки   |
|---|--------------------------------|------------|------------------------------|---------------------|--|
| 1 | Частота обертання барабана     | $n_b$      | низький / середній / високий | 5 / 12,5 / 20 об/хв | Впливає на час контакту насіння з препаратом                     |
| 2 | Швидкість подачі препарату     | $Q_p$      | низький / середній / високий | 5 / 15 / 25 мл/хв   | Визначає кількість препарату на одиницю насіння                  |
| 3 | Висота шару насіння у барабані | $H_s$      | низький / середній / високий | 0,1 / 0,25 / 0,4 м  | Впливає на рівномірність розподілу препарату                     |
| 4 | Кут нахилу лопаті барабана     | $\theta$   | низький / середній / високий | 0 / 5 / 10°         | Впливає на інтенсивність перемішування та рівномірність покриття |

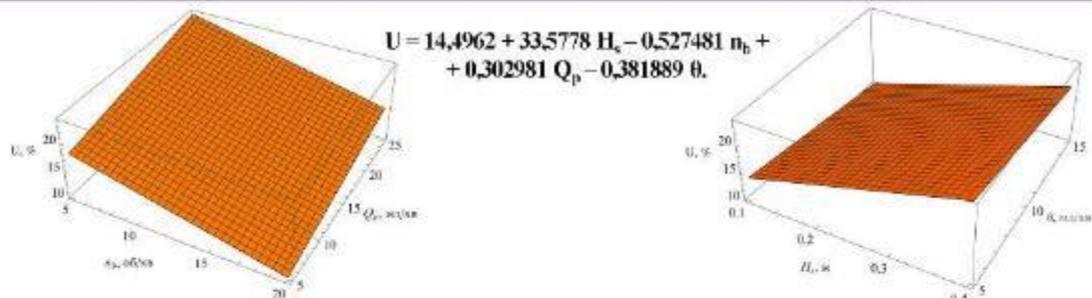
Результати чисельного моделювання барабанного протруювача насіння

7

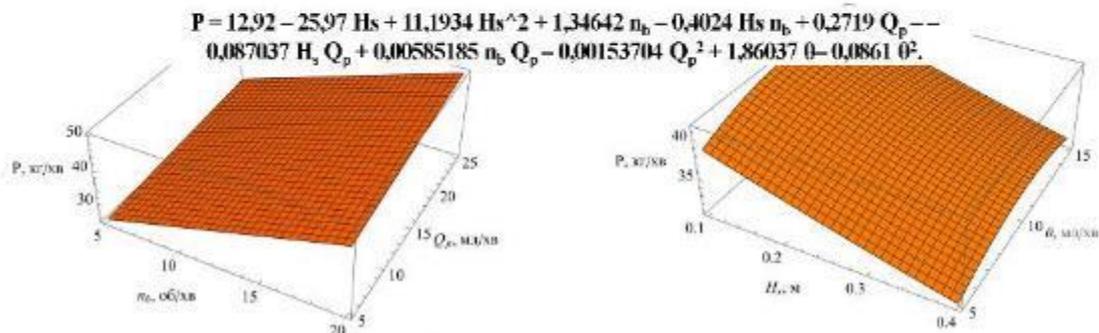


Результати чисельного моделювання барабанного протруювача насіння

8



Залежність ступеня рівномірності протруювання насіння від основних технологічних і конструктивних параметрів барабанного протруювача



Залежність продуктивності барабанного протруювача насіння від основних технологічних і конструктивних параметрів барабанного протруювача

## Економічна ефективність удосконаленого барабанного протруювача насіння 9

| Показник   | Базовий протруювач | Удосконалений протруювач | Різниця / Ефект       |
|--|--------------------|--------------------------|-----------------------|
| Витрата робочої рідини, л/т                      | 10                 | 8,5                      | -1,5 л/т              |
| Енерговитрати, кВт·год/т                         | 2,2                | 1,8                      | -0,4                  |
| Трудомісткість, люд·год/т                        | 0,35               | 0,28                     | -0,07                 |
| Вартість машини, грн                             | 150 000            | 200 000                  | +50 000 (інвестиції)  |
| Амортизація, грн/рік (10 років)                  | 15 000             | 20 000                   | +5 000                |
| Поточний ремонт, грн/рік                         | 6 000              | 6 000                    | 0                     |
| Річний обсяг роботи, т/рік                       | 500                | 500                      | Однаково              |
| Загальний річний економічний ефект, грн/рік      | —                  | —                        | 637 500               |
| Питомий ефект, грн/т                             | —                  | —                        | ≈1 275 грн/т          |
| Додаткові капітальні витрати, грн                | —                  | —                        | 50 000                |
| Строк окупності, років                           | —                  | —                        | 0,078 року ≈ 0,94 міс |
| Строк окупності (лише за прямими витратами), міс | —                  | —                        | ≈5,3 міс              |

## Висновки

10

1. Протруєння насіння є невід'ємним етапом передпосівної підготовки, що забезпечує ефективний захист посівного матеріалу від хвороб і шкідників, підвищує схожість, енергію проростання та формує міцні й здорові рослини. Сучасні методи обробки та покриття насіння – суха обробка, плівкове покриття, енкрустування, пелетування – дозволяють рівномірно наносити захисні речовини та оптимізувати умови зберігання і проростання. Для малих обсягів і цінного селекційного насіння найбільш ефективним є використання барабанних протруювачів, які забезпечують м'яке перемішування, точне дозування препаратів, мінімальне травмування насіння та високу гнучкість у налаштуванні параметрів процесу. Такий підхід гарантує мінімізацію втрат, збереження посівних якостей та стабільну якість протруєння, що є ключовими факторами підвищення урожайності, якості продукції та стійкості агросистем.

2. Дослідження процесів змішування та розпилення в барабанному протруювачі показало, що оптимальні режими забезпечують ефективне та рівномірне нанесення препарату на насіння. Для барабана діаметром 0,5 м при 12,5 об/хв забезпечується квазіпсевдозріджений режим ( $Ft = 0,036$ ) з кутом нахилу лопатей  $\alpha = 25\text{--}35^\circ$ , що гарантує рівномірне піднімання та перебування насіння у зоні обробки. Фізико-хімічні параметри крапель ( $We \approx 100\text{--}200$ ,  $Ca \approx 0,3$ ,  $\theta_c < 60^\circ$ ) забезпечують стабільне прилипання, мінімальні втрати препарату та мікроскопічне проникнення в оболонку насіннини ( $\delta \approx 2$  мкм). Оптимальні умови розпилення ( $p_{ст} = 0,25\text{--}0,35$  МПа,  $d_s = 0,6\text{--}0,8$  мм,  $\theta_{ст} \approx 50\text{--}55^\circ$ ,  $L_{ст} \approx 0,3$  м) забезпечують рівномірне покриття, коефіцієнт варіації  $CV < 15\%$  і максимальну ефективність протруєння при мінімальних витратах робочого розчину.

3. В результаті симуляції було отримано детальну візуалізацію процесу нанесення рідини-протруйника на насіння та динамічний розподіл векторного поля швидкостей усередині барабана. Отримані результати дозволили глибоко проаналізувати характер руху частинок, формування зон перемішування та закономірності розподілу покриття.

4. Чисельне моделювання показало, що ступінь рівномірності протруювання та продуктивність барабанного протруювача залежать від частоти обертання барабана, витрати рідини, висоти шару насіння та кута нахилу лопатей. Оптимальні умови рівномірного нанесення досягаються при частоті 5 об/хв, подачі рідини 25 мл/хв, висоті шару до 0,4 м і куті нахилу лопатей 5°, що забезпечує максимальну однорідність покриття  $\approx 31\%$ . Максимальна продуктивність  $P \approx 55$  кг/хв досягається при  $n_b = 20$  об/хв,  $Q_p = 25$  л/хв,  $H_s = 0,1$  м і  $\theta = 10,8^\circ$ . Отримані моделі дозволяють прогнозувати ефективність роботи машини та оптимізувати режими протруювання.

5. Багатокритеріальна оптимізація показала, що ефективність роботи барабанного протруювача визначається збалансованим поєднанням частоти обертання барабана, подачі препарату, висоти шару насіння та кута нахилу лопатей. Оптимальні параметри встановлено: частота обертання  $n_b = 14\text{--}15$  об/хв, подача препарату  $Q_p = 18\text{--}20$  мл/хв, висота шару  $H_s = 0,22\text{--}0,26$  м, кут лопатей  $\theta = 8\text{--}10^\circ$ . При таких умовах продуктивність досягає 50–52 кг/хв, ступінь нерівномірності покриття зменшується до 2,5–3,0 %, а енергоспоживання скорочується на 15–18 % порівняно з режимом максимальних обертів. Отримані результати свідчать, що оптимальний режим забезпечує баланс між інтенсивністю перемішування, якістю обробки та енергоефективністю, що є важливим для промислового впровадження технології.

6. Удосконалений барабанний протруювач насіння з продуктивністю 50–52 кг/хв забезпечує значне зниження трудомісткості, витрат рідини та електроенергії на одиницю продукції порівняно з базовою моделлю. При річному обсязі обробки 500 т економія експлуатаційних витрат складає близько 112,5 тис. грн, а додатковий дохід від підвищення врожайності (завдяки кращій якості покриття насіння) – близько 525 тис. грн/рік. Сумарний економічний ефект становить приблизно 637,5 тис. грн/рік, питомий – 1 275 грн/т, а строк окупності капіталовкладень – менше 1 року (навіть при консервативних оцінках – 5–6 місяців).