

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра харчових технологій

**П о я с н ю в а л ь н а   з а п и с к а**  
до кваліфікаційної роботи  
ступеня вищої освіти «Магістр»  
на тему:

## **Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів аеродинамічного сепаратора зернової суміші**

**Виконав:** здобувач вищої освіти 2 курсу,  
групи МГХТ-1-22  
освітньо-професійної програми «Харчові технології»  
зі спеціальності 181 «Харчові технології»

\_\_\_\_\_ Олександр ГУРІН

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Віталій КОШУЛЬКО

**Рецензент:** \_\_\_\_\_ Павло ЛУЦ

Дніпро 2023

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра харчових технологій

Ступінь вищої освіти: «Магістр»

Освітньо-професійна програма: «Харчові технології»

Спеціальність: 181 «Харчові технології»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. завідувача кафедри  
технології зберігання і переробки  
сільськогосподарської продукції,  
кандидат технічних наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Віталій КОШУЛЬКО

«09» листопада 2023 р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Гуріну Олександрю Олександровичу

1. Тема роботи: «Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів аеродинамічного сепаратора зернової суміші».

Керівник роботи: Кошулько Віталій Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом закладу вищої освіти від «09» листопада 2023 року № 3423.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи 08 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: 1. Технологія очищення та розділення зернової суміші.

2. Наукова, нормативна, технологічна, технічна та патентна документація.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Вступ. 1. Огляд літературних джерел. 2. Моделювання та оптимізація технологічного процесу. 3. Методика досліджень. 4. Експериментальні дослідження. 5. Практичне впровадження отриманих результатів 6. Охорона праці

та безпека в надзвичайних ситуаціях. 7 Організаційно–економічна частина  
Загальні висновки. Посилання. Додатки.

#### 5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Огляд літератури. 2. Мета та задачі досліджень. 3. Огляд літературних джерел.  
4. Моделювання та оптимізація технологічного процесу. 5. Методика досліджень.  
6. Експериментальні дослідження. 7. Практичне впровадження отриманих  
результатів. 8 Організаційно-економічна частина. 9. Загальні висновки.

#### 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|---|----------------|------------------|
|        |   | завдання видав | завдання прийняв |
| 1 – 4  | доцент КОШУЛЬКО Віталій                   | 09.11.2023     | 08.12.2023       |
| 5      | доцент КОШУЛЬКО Віталій                   | 09.11.2023     | 08.12.2023       |
| 6      | доцент КОШУЛЬКО Віталій                   | 09.11.2023     | 08.12.2023       |

7. Дата видачі завдання 09 листопада 2023 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи               | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1     | Вступ   | 09.11-10.11.23                | виконано |
| 2     | Огляд літератури                                  | 13.11-15.11.23                | виконано |
| 3     | Матеріали і методи дослідження                    | 16.11-17.11.23                | виконано |
| 4     | Експериментальна частина                          | 20.11-22.11.23                | виконано |
| 5     | Організаційно-економічна частина                  | 23.11-28.11.23                | виконано |
| 6     | Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | 29.11-30.11.23                | виконано |
| 7     | Загальний висновок та список використаних джерел  | 01.12-04.12.23                | виконано |
| 8     | Розробка та підготовка демонстраційного матеріалу | 07.12.2023                    | виконано |

**Здобувач вищої освіти** \_\_\_\_\_ Олександр ГУРІН  
( підпис )

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_ Віталій КОШУЛЬКО  
( підпис )

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи містить: 68 сторінки друкованого тексту, 20 рисунків, 12 таблиць та використано 42 літературних джерела.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності технологічного процесу аеродинамічної сепарації зернової суміші шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів відповідного обладнання.

Об'єкт дослідження – процес сепарації зернової суміші.

Предмет дослідження – встановлення закономірностей впливу сепарації зернової суміші на її показники якості.

На основі отриманих теоретичних та експериментальних даних був розроблений адаптивний аеродинамічний сепаратор, з урахуванням оптимальних режимних параметрів (подача насіння і швидкість повітря), використовуючи програмне забезпечення, яке базується на розробленому алгоритмі. Цей сепаратор дозволяє проводити процес сепарації насінневих сумішей соняшнику з високою продуктивністю та високою якістю, відповідно до властивостей аеродинаміки.

Ключові слова: ЗЕРНОВА СУМІШ, НАСІННЯ, СЕПАРАЦІЯ, ПОТІК ПОВІТРЯ, ПАРАМЕТРИ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, АЕРОДИНАМІЧНИЙ СЕПАРАТОР, ОБґРУНТУВАННЯ.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП  | 7  |
| 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ  | 9  |
| 1.1 Ознаки розділення компонентів зернової суміші                                      | 9  |
| 1.2 Розділення зернової суміші за аеродинамічними властивостями                        | 9  |
| 1.3 Раціональна технологія очищення та розділення зернової суміші                      | 11 |
| 1.4 Машини і засоби для сепарації зернової суміші                                      | 12 |
| 1.5 Висновки з розділу   | 18 |
| 2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ                                    | 20 |
| 2.1 Методика чисельного моделювання  | 20 |
| 2.2 Результати чисельного моделювання  | 25 |
| 2.3 Висновки з розділу   | 34 |
| 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ  | 35 |
| 3.1 Програма досліджень  | 35 |
| 3.2 Методика лабораторних досліджень аеродинамічних властивостей зернової суміші       | 35 |
| 3.3 Методика експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора зернової суміші   | 39 |
| 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ   | 43 |
| 4.1 Результати лабораторних досліджень аеродинамічних властивостей зернової суміші     | 43 |
| 4.2 Результати експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора зернової суміші | 45 |
| 4.3 Результати впровадження  | 48 |
| 4.4 Висновки з розділу   | 51 |
| 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ                                    | 53 |
| 5.1 Законодавство та державні стандарти в галузі охорони                               |    |

|   |           |
|---|-----------|
| праці та безпеки на зерноочисних підприємствах  | 53        |
| 5.2 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях на зерноочисних підприємствах і токах | 53        |
| 5.3 Розрахунок системи вентиляції для очищення повітря у виробничому приміщенні             | 54        |
| 5.4 Розрахунок системи освітлення у виробничому приміщенні                                  | 55        |
| 5.5 Висновки з розділу  | 56        |
| <b>6 ОРГАНІЗАЦІЙНО–ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b>   | <b>57</b> |
| 6.1 Організація проведення дослідження  | 57        |
| 6.2 Економічний розрахунок витрат на виконання науково-дослідних робіт                      | 58        |
| 6.3 Розрахунок вартості науково-дослідних робіт   | 61        |
| 6.4 Висновки з розділу  | 61        |
| <b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>  | <b>62</b> |
| <b>БІБЛЮГРАФІЯ</b>  | <b>64</b> |

## ВСТУП

Технологія обробки зернової суміші після збору є складною системою, яка має різноманітний вплив на якість кінцевого продукту, а саме на якість отриманого зерна [1].

У сучасний час розробка нових високопродуктивних і ефективних технічних засобів для очищення та розділення зерна не повністю задовольняє потреби агропромислових підприємств України [2].

Процес сепарації зернової суміші виконується за допомогою зерноочисних машин загального призначення, які використовують повітряно-решітно-трієрні робочі органи. Очищення та сортування зерна на цих машинах стикаються зі значними труднощами, а багаторазові проходження через робочі органи призводять до втрат основного зерна і його пошкоджень. Крім того, у часі процесу отримання високоякісного зерна ускладнюється через наявність насіння бур'янів та домішок, які поступово втрачають ознаки відокремлення від основного насіння. Недосконалість технологічних процесів на серійних технічних засобах призводить до необхідності використання спеціалізованих машин для додаткового очищення зернової суміші від важковідокремлюваних бур'янів та домішок. Це призводить до підвищення собівартості зерна, ускладнює процес налаштування технологічних ліній, зменшує продуктивність і не завжди гарантує отримання високоякісного насіння [3, 4, 5].

Отже, необхідно провести дослідження технологічних процесів очищення і розділення зернової суміші на теоретичному і експериментальному рівні і визначити оптимальні параметри технічних засобів для їх впровадження.

**Мета досліджень** полягає у підвищенні ефективності технологічного процесу аеродинамічної сепарації зернової суміші шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів відповідного обладнання.

Мета буда досягнута шляхом вирішення наступних **завдань**, що передбачені програмою досліджень:

- провести аналітичний огляд впливу способів сепарації зернової суміші на її якість та провести аналіз технічних засобів для аеродинамічної сепарації;
- провести чисельне моделювання та оптимізацію технологічного процесу аеродинамічної сепарації зернової суміші;
- провести експериментальні дослідження технологічного процесу аеродинамічної сепарації зернової суміші;
- провести практичне впровадження отриманих результатів;
- надати інформацію щодо охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях в насінносортових підприємствах;
- провести організаційно-економічну оцінку результатів досліджень

**Об’єкт дослідження** – процес сепарації зернової суміші.

**Предмет дослідження** – встановлення закономірностей впливу сепарації зернової суміші на її показники якості.



## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

### 1.1 Ознаки розділення компонентів зернової суміші

Сучасні технологічні лінії для очищення насінневого матеріалу олійних культур включають різні компоненти, такі як приймальні пристрої, транспортні засоби, робочі машини. У цьому процесі важливо враховувати технологічні етапи розділення насінневої суміші на основі різних властивостей [6, 7, 8, 9]:

- за властивостями аеродинаміки насіння, такими як у повітряних каналах і пневматичних колонках;
- за геометричними характеристиками, такими як ширина та товщина на решетах з круглими і прямокутними отворами, а також довжина на трієрах;
- за щільністю, яка враховується на пневматичних столах і у водносолевих розчинах;
- за властивостями поверхні і формою, як це відбувається на гірках і фрикційних сепараторах;
- за коефіцієнтом пружності, який враховується на відбивних сортувальних столах;
- за електрофізичними властивостями, як у сепараторах у поле коронного розряду так і діелектричних сепараторах;
- за кольором, за допомогою фотосепараторів.

Важливо забезпечити максимальний вихід високоякісного насінневого матеріалу, тому необхідно обґрунтувати мінімальну кількість технологічних обробок, достатню для отримання якісного насіння.

### 1.2 Розділення зернової суміші за аеродинамічними властивостями

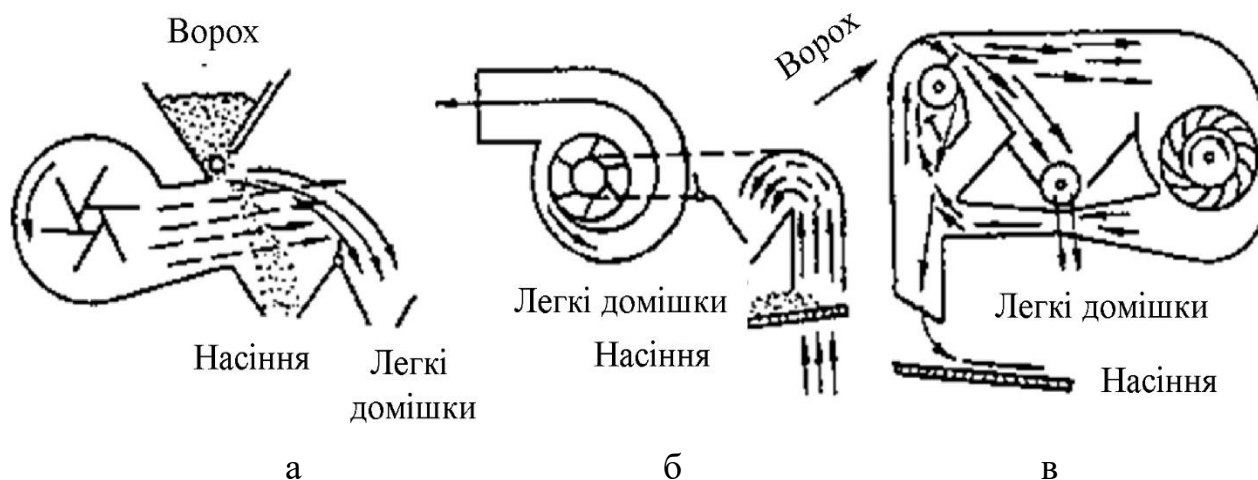
Метод розділення зерна за допомогою повітряного потоку ґрунтується на різницях у їх аеродинамічних характеристиках, таких як парусність, розмір, маса, стан і форма поверхні та інші [10].

Головним параметром є критична швидкість, при якій насінина (або зернина) залишається у плаваючому стані, тобто утримується в повітрі.

Інший важливий показник аеродинамічних властивостей – це коефіцієнт парусності, який визначає, наскільки насіння опирається потоку повітря.

Під час руху зернини (насінини) в потоці повітря виникає пневматичний опір, який залежить від форми зернини, стану поверхні, маси та його положення в потоці повітря. Чим вищий пневматичний опір, тим швидше насіння впаде.

Потік повітря створюється у спеціальних аспіраторах за допомогою нагнітальних або всмоктувальних вентиляторів різних конструкцій і може бути вертикальним або горизонтальним за напрямком (див. рисунок 1.1).



«а – напірний похилий потік; б – використання аспіратора з відцентровим вентилятором; в – використання аспіратора з діаметральним вентилятором»

Рисунок 1.1 – Розділення насіння за допомогою повітряного потоку, враховуючи їх аеродинамічні характеристики, може бути здійснене через

Розділення насіння може відбуватися при умові, коли критичні швидкості для домішки і зернини, які знаходяться у плаваючому стані, відрізняються одна від одної.

### 1.3 Раціональна технологія очищення та розділення зернової суміші

Очищення зернової суміші вимагає високої ефективності технологічних операцій [11]:

1. Технічні засоби повинні швидко, без зусиль і повністю очищатися від залишків домішок і зерна.
2. Машини повинні бути високопродуктивними та низькотрудомісткі.
3. Якість обмолоту має відповідати таким вимогам: чистота обмолоту – не менше 95 %; ступінь перетирання зернових домішок – не менше 95,5 %; відхід стебел – не більше 3 %; дроблення зерна – не більше 3 %.
4. Під час обмолоту і очищення необхідно дотримуватися санітарно-гігієнічних стандартів для обслуговуючого персоналу.
5. У процесі первинного очищення безповоротні втрати не повинні перевищувати 2,5 %, не допускаються пошкодження зерна, а частота виділення з купи зерна повинна бути не менше 95 %.
6. Після вторинного очищення якість виділення бур'янів, включаючи трудноотделяющуся бур'яни, повинна відповідати наступним вимогам: чистота насіння – не менше 98,0 %; засміченість очищених насіння – не більше 320 штук на кілограм; вихід зерно 1-го класу – не менше 85 %; дроблення зерна – не більше 1,2 %.

На основі проведеного аналізу патентно-інформаційних досліджень розроблена ефективна технологічна лінія для процесів очищення та розділення зернової суміші, яка включає в себе послідовне розділення компонентів сумішей відповідно до їх фізико-механічних властивостей (див. рисунок 1.2).

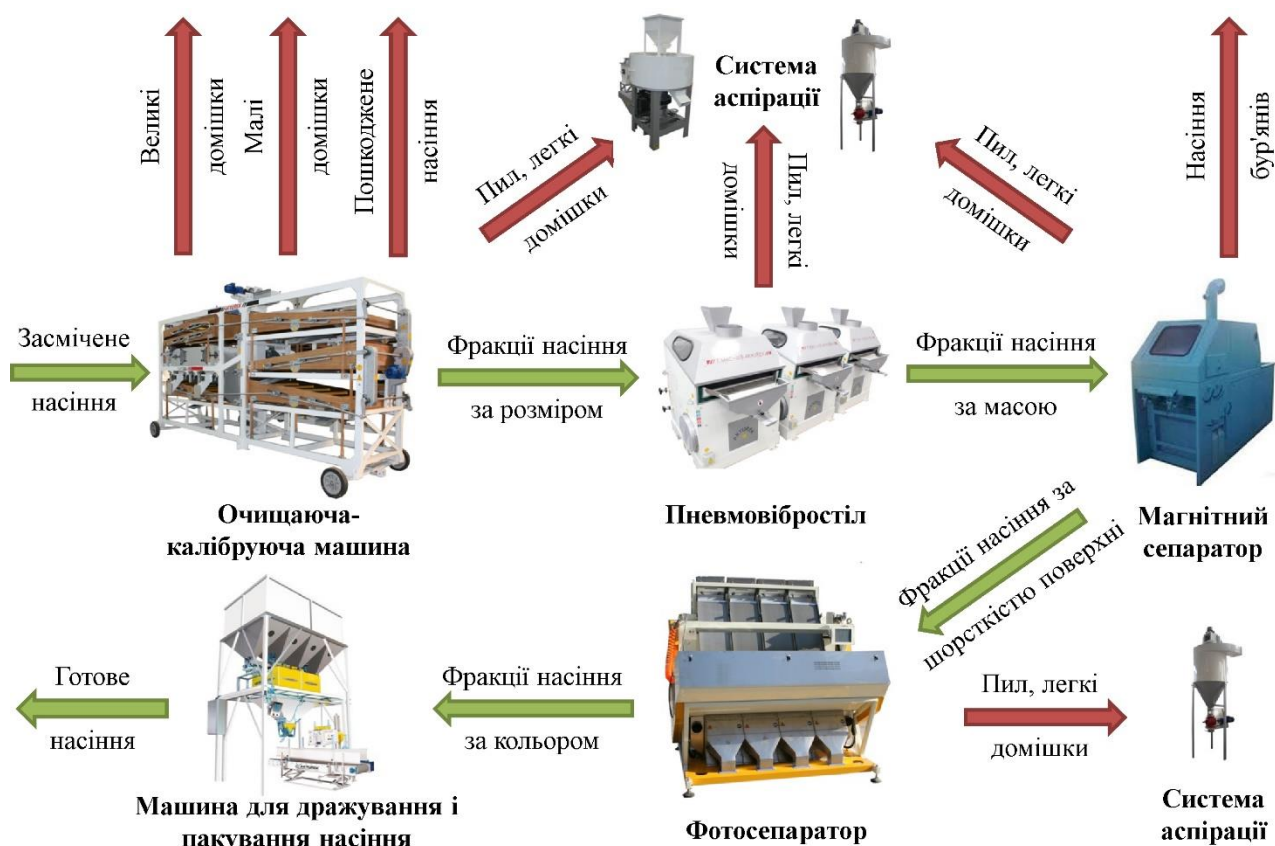


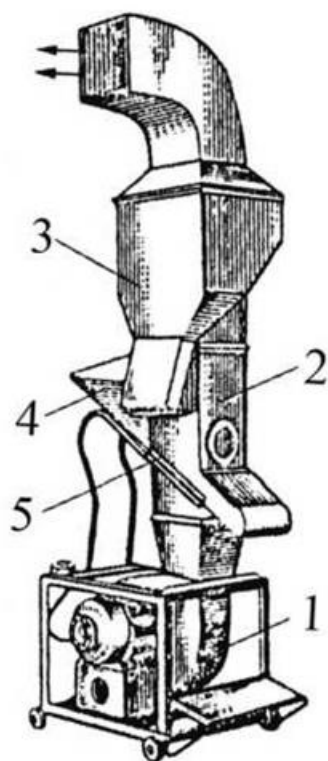
Рисунок 1.2 – Технологічна лінія процесів сепарації зернової суміші

#### 1.4 Машини і засоби для сепарації зернової суміші

Пневматична зерноочисна колонка ОПС-2 (див. рис. 1.3) призначена для видалення домішок з різних видів культур, таких як зернові, зернобобові, круп'яні та інші, використовуючи їх аеродинамічні властивості. Її продуктивність становить 2-4 тонни на годину, має потужність приводу 4.5 кВт і важить 266 кг.

Пневматична зерноочисна колона ОПС-2 складається з відцентрового вентилятора 1, робочого повітропроводу 2 перетином 330 x 340 мм, камери осадження 3, приймального бункера 4 і рами на чотирьох роликах. У каналах під кутом 300° встановлені рамки з різними розмірами осередків: 0,9 x 0,9 мм для дрібного насіння, 2,1 x 2,1 мм для зернових і 3,1 x 3,1 мм для бобових. Над робочим каналом розташована осаджувальна камера з повітророзподільником. У

нижній частині розташована труба для відведення легких домішок, а у верхній - фільтрована труба для відведення пилу та легких домішок. [4, 5]



«1 – вентилятор; 2 – повітряний канал; 3 – осаджувальна камера; 4 – приймальний бункер; 5 – сітка» [4, 5].

Рисунок 1.3 – Пневматична зерноочисна колонка ОПС-2

Мобільний ворохоочисник ОВП-20А (зображений на рис. 1.4–1.5) призначений для очищення вороху, який виходить після роботи комбайна, за допомогою комбінації повітряного потоку і сіток.

Очисник вороху (див. рис. 1.4) складається з наступних компонентів: завантажувальний транспортер 1, приймальна камера з повітряними каналами 2, вентилятор 3, інерційний пиловідокремлювач 4, пневмотранспортер 5, верхній і нижній решітні стани 6, відвантажувальний транспортер 7 та ходова частина 8 з механізмом переміщення.

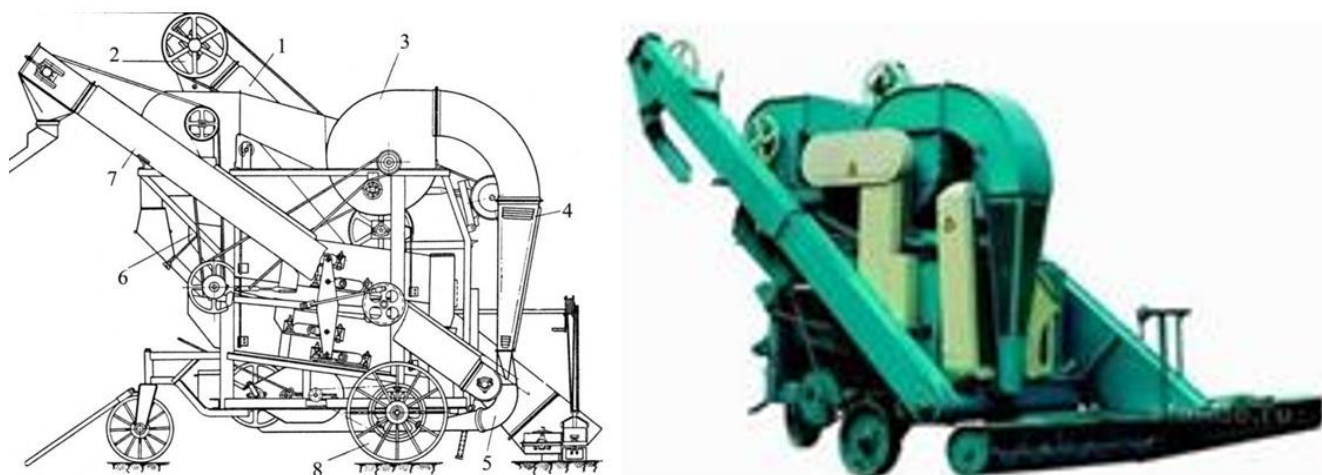


Рисунок 1.4 – Горохоочисник ОВП-20А

Рама очисника опирається на три колеса, що дозволяє йому рухатися зі швидкістю від 0,1 до 0,3 метра на хвилину і переміщатися вздовж потоку зі швидкістю від 2,7 до 6,1 метра на хвилину.

Завантажувальний транспортер складається з нахилених скребкових конвеєрів і двох з'єднаних шарніром скребкових живильників, які можуть копіювати форму поверхні вороху. Конвеєр подає зернову купу в приймальну камеру 1, де шнек 2 рівномірно розподіляє зерно. На корпусі шнека є регульований розвантажувальний лоток, з якого вивантажуються надлишки зерна.

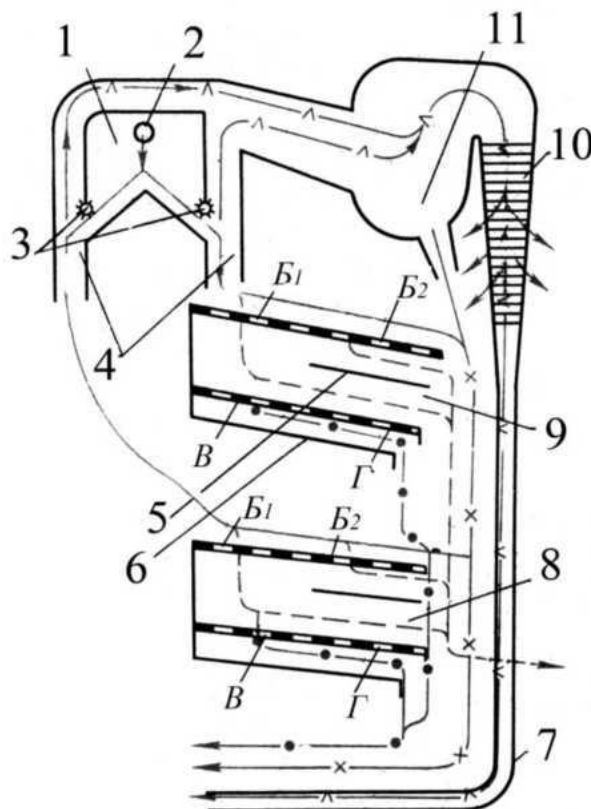
На дні приймальної камери розташовані ребристі подавальні ролики, які спрямовують зернову купу в повітряну канавку 4. Під кожним роликом розташований регульований клапан.

Повітряні канали 4 призначені для очищення зерна від легких домішок. Канали з'єднані з вентилятором через корпус зі спеціальним вікном, яке можна заслінити рухомою заслінкою для регулювання швидкості повітряного потоку в каналах. Потік повітря відокремлює легкі домішки і направляє їх у відстійну камеру 11, де деякі з них відділяються, а найлегші потрапляють в пневмотранспортер 7.

Очисник вороху обладнаний ідентичними верхніми (позначені як 9) та нижніми (позначені як 8) решітними станами, які функціонують синхронно.

Приймальна камера поділяє зерно на дві однакові частини, які направляються на решітні стани.

В решітних станах розміщені рамки з решітками позначеними як Б1, Б2, В і Г (детально представлено на рис. 1.5). Решітні стани рухаються в коливальний рух. Для компенсації інерційних сил, решітні стани рухаються у протилежних напрямках.



- «1 – приймальна камера; 2 – розподільний шнек; 3 – живильні валики;  
 4 – повітряні канали; 5 – верхня скатна дошка; 6 – нижня скатна дошка;  
 7 – пневмотранспортер; 8 – нижній решітний стан; 9 – верхній решітний стан;  
 10 – інерційний пиловідокремлювач; 11 – відстійна камера» [6, 7]

Рисунок 1.5 – Технологічна схема процесу очистки вороху на ОВП-20А

Комплект решіт в комплекті з очисником містить решітки з прямокутними отворами шириною від 1,5 до 5,0 мм, а також решітки з круглими отворами діаметром від 3,6 до 10 мм. Фракції зерна, які утворюються під час роботи

решітних станів, рухаються вниз по нахиленим дошкам 5 і 6, а потім потрапляють у лотки.

Знизу до решітних станів прилягають щітки, які виконують зворотно-поступальний рух, щоб виштовхувати зерно з отворів решіт.

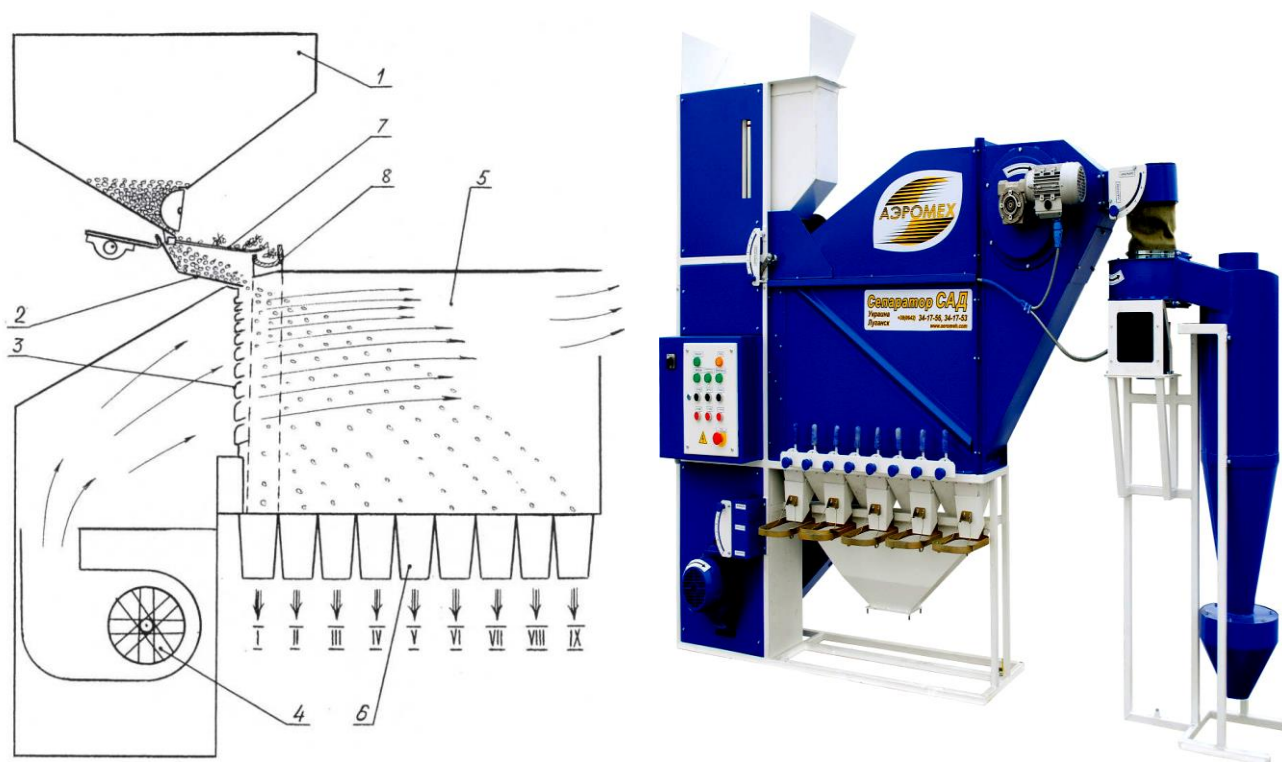
При середньому рівні забрудненості, продуктивність горохоочисника залежить від типу культури та її вологості, і може досягати 15 тонн на годину. Ширина захвату живильників становить 6,3 метра. Габаритні розміри в міліметрах такі: довжина – 4300 мм, ширина у робочому положенні – 6400 мм, висота – 3400 мм.

На очиснику вороху встановлені три електродвигуни. Потужність двигуна, який приводить рух робочих органів, складає 6,5 кВт; двигуна для завантажувального транспортера – 2,7 кВт; двигуна для механізму переміщення – 1,1 кВт. Загальна потужність становить 10,9 кВт.

На сьогодні існує широкий вибір аеродинамічних сепараторів. Для надання загальної представленості про цю категорію обладнання, розглянемо кілька типових конструкцій, таких як аеродинамічні сепаратори «Сад», «Алмаз», і СПС (продемонстровано на рисунку 1.6 і).

Аеродинамічний сепаратор «Сад» складається з бункера 1, до якого подається зернова суміш, що розділяється, вібралотка 2, каскадного генератора повітряного струменя 3, який подається від джерела стисненого повітря 4 до генератора 3, і сепараційної камери 5. Під сепараційною камерою 5 розташовані колектори для різних фракцій (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX). На початку вібралотка 2, між ним і виходом із бункера 1 розташована скальперна гребінка 7, під якою розташований колектор для великих домішок. Колектор для великих домішок виконаний у вигляді двосхилого каналу 8 і з'єднаний з колектором для першої фракції 6 (I). [10, 12].





1 – контейнер; 2 – вібраційний скринька; 3 – генератор послідовності повітряних потоків; 4 – джерело надходження повітря; 5 – камера сепарації; 6 – судини для збору фракцій; 7 – гребінець для видалення крупних домішок; 8 – контейнер для збору великих домішок.

Рисунок 1.6 – Схема конструкції та зовнішній вигляд сепараторів аеродинамічних «Алмаз», «Сад», СПС і подібних

До недоліків таких сепараторів можна віднести низьку точність сепарації і точність калібрування для неоднорідних за аеродинамічними характеристиками (наприклад, за питомою витратою повітря) зернових або насінневих сумішей. Це пов'язано з наявністю постійних коливань швидкості повітря в сепараційній камері, що призводить до потрапляння небажаних (таких, що не видаляються) часток зернової чи насінневої суміші до колектора фракції, що видаляється. Крім того, такі сепаратори мають обмежену продуктивність через значну неоднорідність зернового або насінневого матеріалу, що розділяється на фракції. Це створює необхідність постійно налаштовувати швидкість повітряного потоку в

аеродинамічному просторі і постачати вихідний матеріал для забезпечення високої точності сепарації. Постійна необхідність налаштовувати параметри сепаратора призводить до зниження продуктивності машини і збільшення складності виконання зазначеного процесу.

### 1.5 Висновки з розділу

1. В результаті аналізу патентно-інформаційних досліджень була розроблена ефективна технологічна лінія для процесів очищення і розділення зернової суміші. Ця лінія включає в себе ряд етапів, що дозволяють розділити компоненти зернових сумішей з урахуванням їх фізико-механічних характеристик:

- за аеродинамічними властивостями, що використовуються у пневматичних колонках і подібних повітряних каналах;
- за розмірними характеристиками на решетах із круглими або прямокутними отворами, а також на трієрах;
- за щільністю, яка враховується на пневматичних столах і у водносолевих розчинах;
- за властивостями поверхні і формою, використовуючи гірки та фрикційні сепаратори;
- за коефіцієнтом пружності на відбивних сортувальних столах;
- за електрофізичними властивостями у сепараторах із коронним розрядом та діелектричних сепараторах;
- за кольором, використовуючи фотосепаратори.

2. Також, під час аналізу технічного обладнання технологічних процесів очищення та розділення зернової суміші, було проведено порівняння споживаної енергії вітчизняних і закордонних машин і установок. Показники споживаної енергії варіюються від 0,1 до 3,5 кВт·год/т в залежності від типу робочого органу.

Огляд наукової та технічної літератури свідчить про кілька ключових напрямків розвитку насіннеочисних машин:

- покращення приводних пристроїв;
- оптимізація динамічного режиму робочих органів для різних видів руху;
- ефективне використання ознак поділу, які враховуються при розділенні;
- автоматизація завантаження та регулювання оптимальних режимів роботи окремих робочих органів;
- підвищення стабільності динамічних характеристик машини на основних та перехідних режимах роботи;
- зменшення вібрації несучих конструкцій та оптимізація жорсткості рамної конструкції.

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

### 2.1 Методика чисельного моделювання

Система диференційних рівнянь, що описує процес переміщення насіння в повітряному потоці, не може бути розв'язана аналітичними методами. В дослідженнях були запропоновані методи розв'язання подібних систем за допомогою методу кінцевих елементів [12, 13, 14, 15, 16]. Ці методи були втілені у програмі STAR-CCM+ для моделювання [17, 18].

Деякі з типових математичних моделей структури потоку матеріалу включають моделі ідеального змішування і ідеального витиснення, дифузійні та комбіновані моделі [19, 20, 21].

Стратегії аналізу складності фізико-механічних систем включають якісний аналіз на ранніх стадіях.

У попередніх дослідженнях розглядалися структурні схеми першого рівня ефектів фізико-механічних систем. У зв'язку з цим було зазначено, що під час якісного аналізу структур процесів проводиться розмежування між семантичним і математичним аспектами. Крім того, у рамках математичного аспекту було проведено якісний аналіз математичних підходів, які можуть бути використані для створення фізико-математичних моделей цього процесу [22, 23]. Таким чином, актуальним є проведення чисельного моделювання процесу міграції олійних культур під впливом повітряних потоків і визначення фізико-математичних моделей цього процесу.

Під час чисельного моделювання процесу використовують метод кінцевих елементів, де визначають початкові положення і швидкості насіння, а потім, застосовуючи фізичні закони взаємодії, обчислюють сили, які діють на кожне насіння в різний момент часу. Для кожного насіння розв'язується задача Коші на певному відрізку часу, результатом якої є початкові дані для наступного кроку. Під час моделювання використовуються різні фізичні моделі, включно з k-ε

моделями турбулентності розділеного потоку, гравітаційними полями, ван-дер-ваальсовими моделями реального газу, моделями дискретних елементів і моделями багатофазної взаємодії [24, 25].

Метод дискретних елементів ґрунтується на законах збереження імпульсу і моменту імпульсу для лагранжевих моделей багатофазних середовищ. Однак для створення фізико-математичних моделей необхідно припустити, що насіння можна представити у вигляді однакових еліпсоїдів із постійною густиною та ефективним діаметром [26].

Для моделювання були використані фізико-механічні властивості насіння, такі як [26]:

- «Коефіцієнт Пуассона – 0,5»;
- «Модуль Юнга – 0,2 МПа»;
- «Щільність – від 200 до 1000 кг/м<sup>3</sup>»;
- «Коефіцієнт тертя спокою – 0,8»;
- «Нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5»;
- «Дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5»;
- «Коефіцієнт опору кочення – 0,3».

Властивості для середовища включали [26]:

- «Середовище – повітря»;
- «Динамічна в'язкість –  $1,85508 \cdot 10^{-5}$  Па·с»;
- «Турбулентне число Прандтля – 0,9»;
- «Прискорення вільного падіння – 9,8 м/с<sup>2</sup>»;
- «Температура – 293 К»;
- «Тиск – 101325 Па».

Розмір для комірки змодельованої сітки складав 0,002 м.

Для виконання числового моделювання було розроблено схему процесу переміщення насіння під впливом повітряного потоку (рис. 2.1).

В якості параметрів для чисельного моделювання були вибрані такі технічні характеристики: ефективний діаметр насіння ( $D_p$ ), швидкість подачі повітря ( $V$ ), та обсяг подачі насіння ( $Q$ ). Межі змінних представлені в табл. 2.1, яка показує

різні рівні впливу факторів на числове моделювання процесу руху насіння в повітряному потоці.

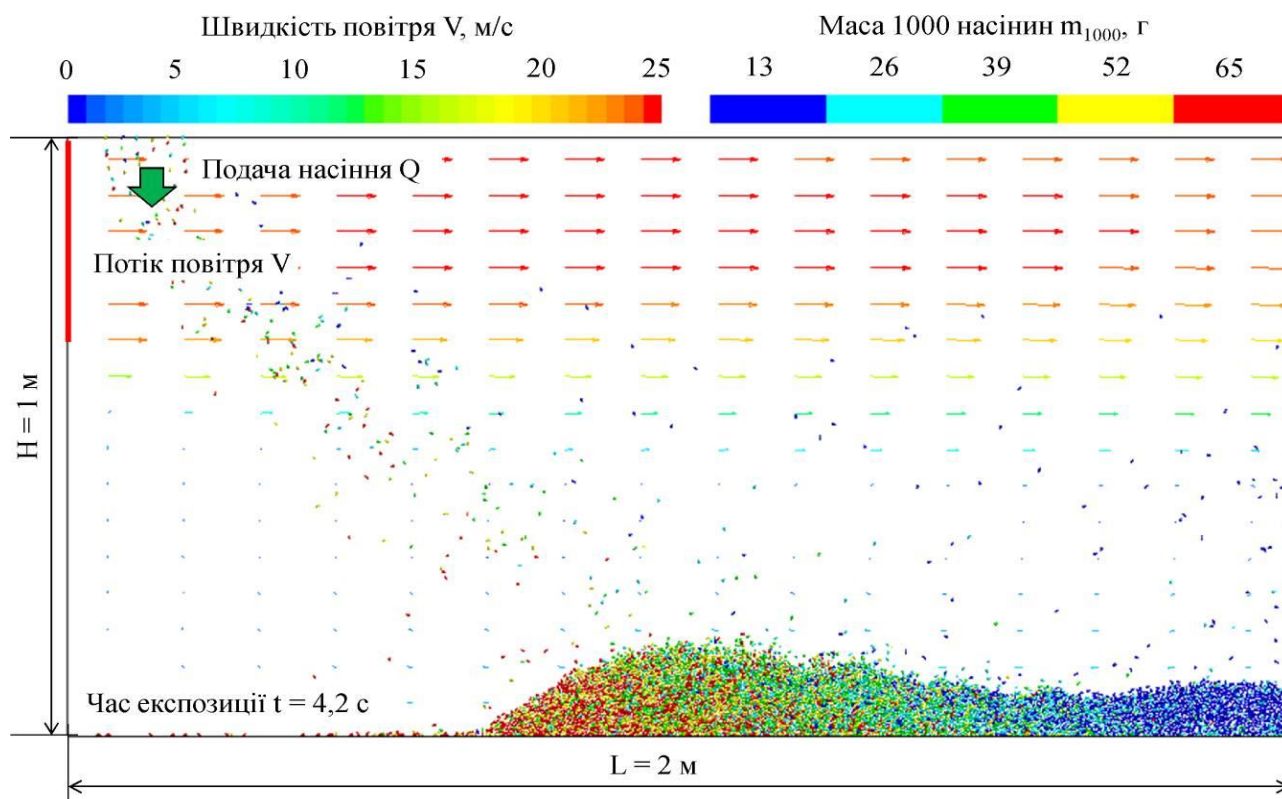


Рисунок 2.1 – Схема для обчислення процесу руху насіння під впливом повітряного потоку

Таблиця 2.1 – Фактори числового моделювання процесу руху насіння в повітряному потоці і їх рівні варіацій

| Рівні факторів | Фактори |         |        |
|----------------|---------|---------|--------|
|                | D, мм   | Q, кг/с | V, м/с |
| (+)            | 8       | 0,08    | 26     |
| (0)            | 6       | 0,06    | 20     |
| (-)            | 3       | 0,04    | 14     |
| $\Delta$       | 2       | 0,02    | 6      |

Чисельне моделювання було проведено шляхом використання повного факторного експерименту, в рамках якого було виконано загалом 27 дослідів. Структура цього експерименту може бути знайдена у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Планування чисельного моделювання процесу переміщення зерна

| №  | $D_p$ , мм | $Q$ , кг/с | $V$ , м/с |
|----|------------|------------|-----------|
| 1  | 3          | 0,02       | 14        |
| 2  | 3          | 0,02       | 20        |
| 3  | 3          | 0,02       | 26        |
| 4  | 3          | 0,04       | 14        |
| 5  | 3          | 0,04       | 20        |
| 6  | 3          | 0,04       | 26        |
| 7  | 3          | 0,08       | 14        |
| 8  | 3          | 0,08       | 20        |
| 9  | 3          | 0,08       | 26        |
| 10 | 6          | 0,02       | 14        |
| 11 | 6          | 0,02       | 20        |
| 12 | 6          | 0,02       | 26        |
| 13 | 6          | 0,04       | 14        |
| 14 | 6          | 0,04       | 20        |
| 15 | 6          | 0,04       | 26        |
| 16 | 6          | 0,08       | 14        |
| 17 | 6          | 0,08       | 20        |
| 18 | 6          | 0,08       | 26        |
| 19 | 8          | 0,02       | 14        |
| 20 | 8          | 0,02       | 20        |
| 21 | 8          | 0,02       | 26        |

| №  | $D_p$ , мм | $Q$ , кг/с | $V$ , м/с |
|----|------------|------------|-----------|
| 22 | 8          | 0,04       | 14        |
| 23 | 8          | 0,04       | 20        |
| 24 | 8          | 0,04       | 26        |
| 25 | 8          | 0,08       | 14        |
| 26 | 8          | 0,08       | 20        |
| 27 | 8          | 0,08       | 26        |

Таблиця 2.3 – Маса зернин для заданого ефективного діаметра, г

| $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | 210  | 410  | 610   | 810   | 1010  |
|----------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| $D_p$ , мм                 |      |      |       |       |       |
| 3                          | 3,1  | 6,1  | 9,1   | 12,2  | 15,4  |
| 6                          | 13,2 | 26,2 | 39,2  | 52,3  | 65,5  |
| 8                          | 36,1 | 72,1 | 108,3 | 144,4 | 180,6 |

Потік насіння був поділений на п'ять фракцій, кожна з яких мала однакову кількість насіння, а також однаковий ефективний діаметр і щільність, які знаходилися в діапазоні від 200 до 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Під час поділу насіння за допомогою повітряного потоку кожену фракцію можна описати розподілом, який має форму нормального розподілу з визначеним середнім значенням і стандартним відхиленням  $\sigma$  (див. рисунок 2.2). Для такого нормального розподілу області  $x \in [\bar{x} - 2\sigma; \bar{x} + 2\sigma]$  спостерігається ймовірність 95,45%.

Згідно з рисунком 2.2, найкраще розділення (95,45%) досягається при виконанні такої умови:

$$2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5 \leq \bar{x}_5 - \bar{x}_1, \quad (2.1)$$



та

$$\theta = \frac{\bar{x}_5 - \bar{x}_1}{2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5} \rightarrow \max. \quad (2.2)$$

де  $\theta$  – це коефіцієнт заповнення.

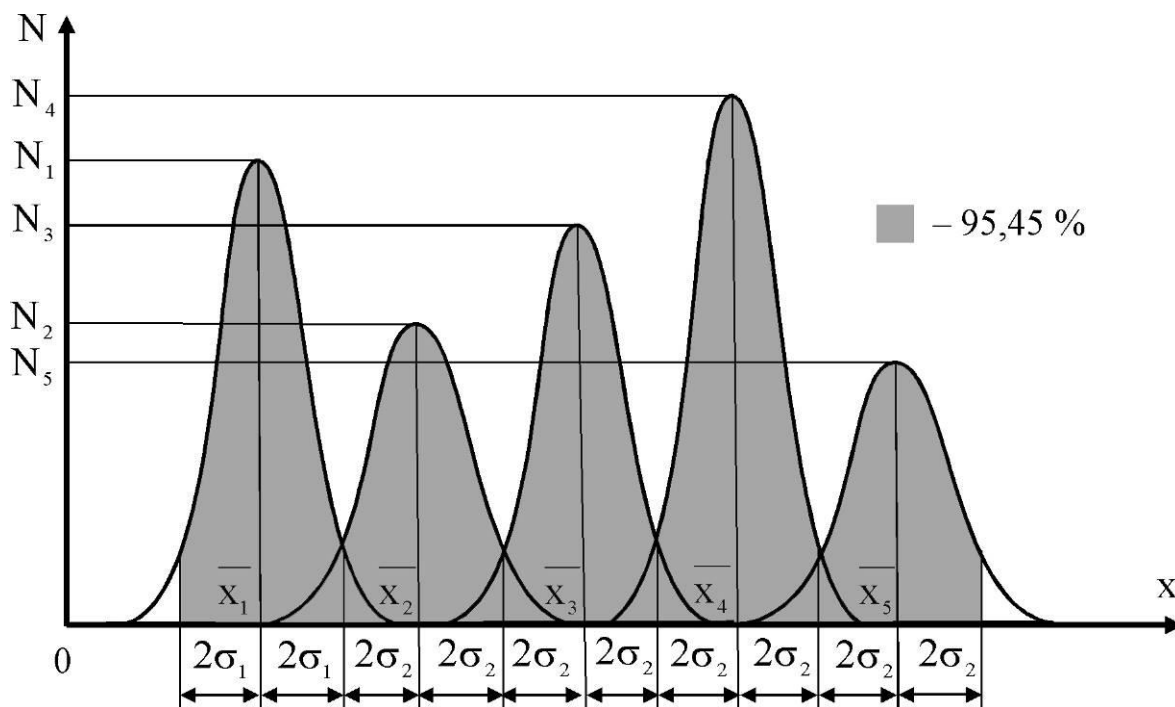


Рисунок 2.2 – Нормальний розподіл фракцій по ширині області

## 2.2 Результати чисельного моделювання

В якості параметрів для чисельного моделювання були вибрані такі технічні характеристики: ефективний діаметр насіння ( $D_p$ ), швидкість подачі повітря ( $V$ ), та обсяг подачі насіння ( $Q$ ) [27, 28, 29]. Межі змінних представлені в таблиці 2.3 яка показує різні рівні впливу факторів на чисельне моделювання процесу переміщення насіння в повітряному потоці.

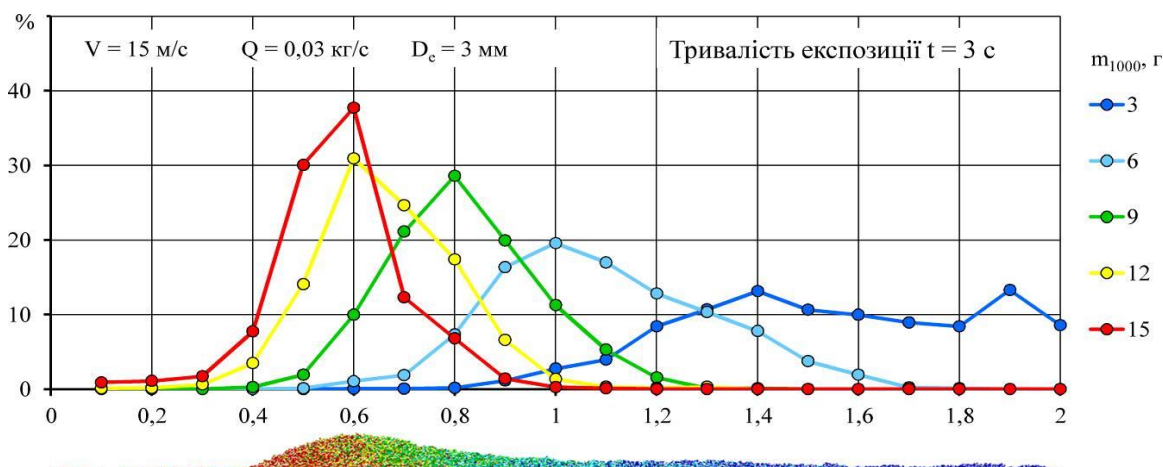


Рисунок 2.3 – Розподіл насіння з ефективним діаметром  $D_e = 3$  мм вздовж ділянки, сформованої впливом повітряного потоку.

Для кожного проведеного дослідження та для кожної фракції насіння було розраховано значення критерію  $\chi^2$ , який дозволив визначити, чи відповідає розподіл насіння вздовж довжини ділянки нормальному розподілу. Загальні дані для кожного дослідження, включаючи середні значення, середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  і коефіцієнт заповнення  $\theta$ , були зібрані і занесені в таблицю 2.4.

Застосовуючи програмний пакет Wolfram Cloud, було проведено апроксимацію отриманих даних і отримані рівняння, які відображають залежність середнього значення і відхилення  $\sigma$  від факторів для кожної фракції насіння з ефективним діаметром  $D_e = 3$  мм.

$$\bar{x}(m_{1000} = 3 \text{ г}) = -1,899 - 0,1945 Q - 12,4 Q^2 + 0,386 V + 0,04352 Q V - 0,01016 V^2, R = 0.985; \quad (2.3)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 6 \text{ г}) = -3,680 + 3,318 Q - 1,35 Q^2 + 0,4852 V - 0,2365 Q V - 0,01087 V^2, R = 0.997; \quad (2.4)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 12 \text{ г}) = -0,1200 + 17,07 Q - 112,74 Q^2 - 0,0004998 V - 0,02913 Q V + 0,001469 V^2, R = 0.914; \quad (2.6)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 9 \text{ г}) = -2,400 + 4,635 Q - 8,296 Q^2 + 0,3027 V - 0,2088 Q V - 0,005895 V^2, R = 0.996; \quad (2.5)$$

Таблиця 2.4 – Висновки, отримані в результаті чисельного моделювання впливу повітряного потоку на рух насіння

| №                                       | D <sub>e</sub> , мм | Q, кг/с | V, м/с | σ, м  |       |       |       |       | $\bar{x}$ , м |       |       |       |       | θ, %  |
|---|---------------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |                     |         |        | 3,1   | 6,1   | 9,1   | 12,2  | 15,4  | 3,1           | 6,1   | 9,1   | 12,2  | 15,4  |       |
| m <sub>1000</sub> , Г                   |                     |         |        | 3,1   | 6,1   | 9,1   | 12,2  | 15,4  | 3,1           | 6,1   | 9,1   | 12,2  | 15,4  |       |
| 1                                       | 3                   | 0,03    | 15     | 0,291 | 0,214 | 0,15  | 0,142 | 0,13  | 1,602         | 1,147 | 0,869 | 0,716 | 0,623 | 0,344 |
| 2                                       | 3                   | 0,03    | 20     | 0,23  | 0,252 | 0,16  | 0,184 | 0,204 | 1,835         | 1,635 | 1,269 | 0,63  | 0,936 | 0,279 |
| 3                                       | 3                   | 0,03    | 25     | 0,358 | 0,342 | 0,317 | 0,244 | 0,18  | 1,421         | 1,57  | 1,476 | 1,278 | 1,195 | 0,049 |
| 4                                       | 3                   | 0,06    | 15     | 0,316 | 0,24  | 0,177 | 0,16  | 0,141 | 1,621         | 1,134 | 0,874 | 0,732 | 0,644 | 0,306 |
| 5                                       | 3                   | 0,06    | 20     | 0,209 | 0,252 | 0,19  | 0,192 | 0,192 | 1,735         | 1,568 | 1,296 | 1,146 | 1,04  | 0,21  |
| 6                                       | 3                   | 0,06    | 25     | 0,287 | 0,343 | 0,338 | 0,302 | 0,269 | 1,462         | 1,512 | 1,417 | 1,317 | 1,227 | 0,048 |
| 7                                       | 3                   | 0,09    | 15     | 0,338 | 0,262 | 0,2   | 0,178 | 0,165 | 1,566         | 1,117 | 0,867 | 0,735 | 0,643 | 0,261 |
| 8                                       | 3                   | 0,09    | 20     | 0,203 | 0,262 | 0,234 | 0,214 | 0,203 | 1,734         | 1,552 | 1,302 | 1,143 | 1,03  | 0,194 |
| 9                                       | 3                   | 0,09    | 25     | 0,253 | 0,331 | 0,358 | 0,35  | 0,311 | 1,411         | 1,399 | 1,348 | 1,279 | 1,195 | 0,042 |
| Маса 1000 насінин m <sub>1000</sub> , Г |                     |         |        | 13,2  | 26,2  | 39,2  | 52,3  | 65,5  | 13,2          | 26,2  | 39,2  | 52,3  | 65,5  |       |
| 10                                      | 5                   | 0,03    | 15     | 0,351 | 0,191 | 0,137 | 0,108 | 0,098 | 1,224         | 0,75  | 0,575 | 0,473 | 0,418 | 0,309 |
| 11                                      | 5                   | 0,03    | 20     | 0,306 | 0,24  | 0,183 | 0,176 | 0,145 | 1,541         | 1,15  | 0,883 | 0,74  | 0,647 | 0,273 |
| 12                                      | 5                   | 0,03    | 25     | 0,27  | 0,287 | 0,22  | 0,199 | 0,247 | 1,667         | 1,552 | 1,245 | 1,075 | 0,991 | 0,177 |

|                                  |   |      |    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|---|------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 13                               | 5 | 0,06 | 15 | 0,36  | 0,224 | 0,177 | 0,166 | 0,148 | 1,154 | 0,723 | 0,554 | 0,45  | 0,39  | 0,235 |
| 14                               | 5 | 0,06 | 20 | 0,303 | 0,268 | 0,207 | 0,194 | 0,172 | 1,59  | 1,143 | 0,881 | 0,75  | 0,651 | 0,261 |
| 15                               | 5 | 0,06 | 25 | 0,217 | 0,289 | 0,237 | 0,214 | 0,216 | 1,729 | 1,501 | 1,236 | 1,068 | 0,978 | 0,198 |
| 16                               | 5 | 0,09 | 15 | 0,377 | 0,257 | 0,219 | 0,205 | 0,188 | 1,145 | 0,756 | 0,571 | 0,459 | 0,418 | 0,191 |
| 17                               | 5 | 0,09 | 20 | 0,352 | 0,313 | 0,248 | 0,237 | 0,205 | 1,537 | 1,106 | 0,874 | 0,736 | 0,645 | 0,209 |
| 18                               | 5 | 0,09 | 25 | 0,223 | 0,295 | 0,28  | 0,255 | 0,246 | 1,765 | 1,496 | 1,242 | 1,076 | 0,97  | 0,188 |
| Маса 1000 насінин $m_{1000}$ , Г |   |      |    | 36,1  | 72,1  | 108,3 | 144,4 | 180,6 | 36,1  | 72,1  | 108,3 | 144,4 | 180,6 |       |
| 19                               | 7 | 0,03 | 15 | 0,343 | 0,184 | 0,138 | 0,129 | 0,113 | 0,978 | 0,586 | 0,433 | 0,357 | 0,31  | 0,25  |
| 20                               | 7 | 0,03 | 20 | 0,343 | 0,233 | 0,173 | 0,155 | 0,131 | 1,319 | 0,873 | 0,657 | 0,564 | 0,485 | 0,266 |
| 21                               | 7 | 0,03 | 25 | 0,269 | 0,271 | 0,22  | 0,195 | 0,207 | 1,519 | 1,188 | 0,959 | 0,809 | 0,717 | 0,221 |
| 22                               | 7 | 0,06 | 15 | 0,317 | 0,218 | 0,192 | 0,18  | 0,161 | 0,973 | 0,628 | 0,486 | 0,401 | 0,342 | 0,194 |
| 23                               | 7 | 0,06 | 20 | 0,38  | 0,273 | 0,237 | 0,206 | 0,187 | 1,299 | 0,84  | 0,639 | 0,525 | 0,455 | 0,215 |
| 24                               | 7 | 0,06 | 25 | 0,308 | 0,321 | 0,252 | 0,215 | 0,213 | 1,613 | 1,214 | 0,942 | 0,782 | 0,714 | 0,218 |
| 25                               | 7 | 0,09 | 15 | 0,355 | 0,279 | 0,26  | 0,239 | 0,217 | 0,952 | 0,656 | 0,55  | 0,472 | 0,427 | 0,127 |
| 26                               | 7 | 0,09 | 20 | 0,419 | 0,321 | 0,27  | 0,247 | 0,227 | 1,273 | 0,845 | 0,643 | 0,539 | 0,483 | 0,173 |
| 27                               | 7 | 0,09 | 25 | 0,372 | 0,35  | 0,303 | 0,272 | 0,247 | 1,568 | 1,192 | 0,932 | 0,785 | 0,697 | 0,179 |

$$\bar{x}(m_{1000} = 15 \text{ г}) = -1,624 + 5,713 Q - 36,77 Q^2 + 0,1888 V - 0,0337 Q V - 0,003249 V^2, R = 0.996; \quad (2.7)$$

$$\sigma(m_{1000} = 3 \text{ г}) = 1,484 + 3,51 Q + 9,12 Q^2 - 0,1352 V - 0,2542 Q V + 0,003722 V^2, R = 0.996; \quad (2.8)$$

$$\sigma(m_{1000} = 6 \text{ г}) = 0,452 + 2,362 Q - 1,061 Q^2 - 0,03758 V - 0,09845 Q V + 0,001336 V^2, R = 0.979; \quad (2.9)$$

$$\sigma(m_{1000} = 9 \text{ г}) = 0,7928 + 0,9468 Q + 2,102 Q^2 - 0,08183 V - 0,01408 Q V + 0,002471 V^2, R = 0.976; \quad (2.10)$$

$$\sigma(m_{1000} = 12 \text{ г}) = 0,5261 - 1,450 Q + 0,7617 Q^2 - 0,04548 V + 0,1161 Q V + 0,001309 V^2, R = 0.973; \quad (2.11)$$

$$\sigma(m_{1000} = 15 \text{ г}) = 0,1097 - 2,064 Q - 1,848 Q^2 + 0,001628 V + 0,160 Q V - 0,00001099 V^2, R = 0.945; \quad (2.12)$$

Графічна інтерпретація залежностей (2.3)-(2.12) представлені на рисунку 2.4.

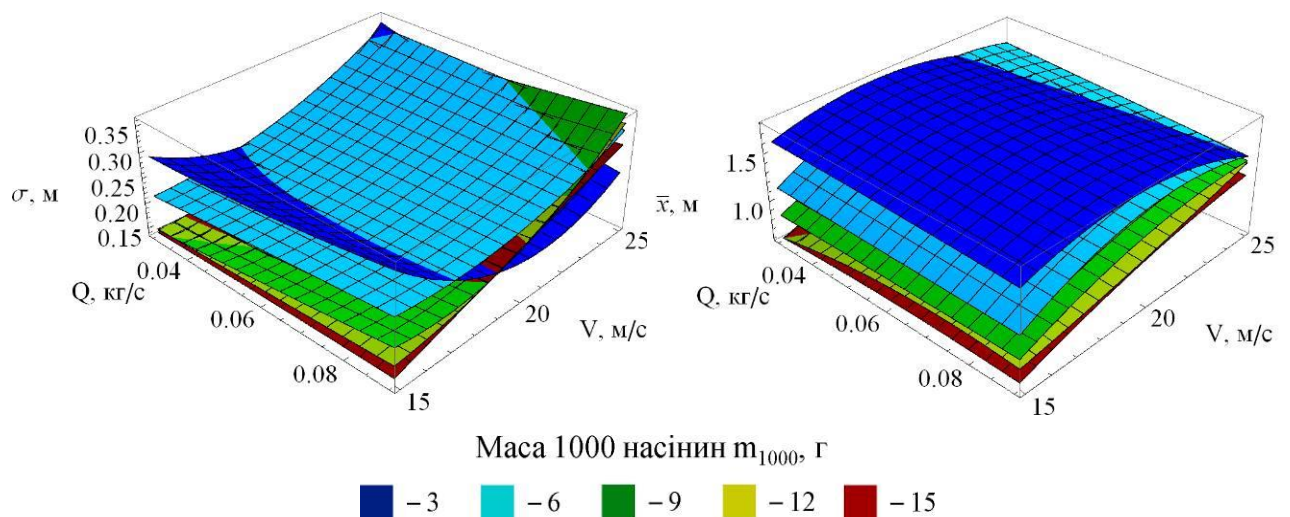


Рисунок 2.4 – Взаємозв'язки середнього значення і середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  від параметрів досліджень для кожної фракції насіння з ефективним діаметром  $De = 3$  мм.

Також були отримані рівняння, що показують взаємозв'язок середнього значення і відхилення  $\sigma$  від параметрів досліджень з ефективним діаметром  $D_e = 5$  мм:

$$\bar{x}(m_{1000} = 3 \text{ г}) = -0,9615 - 4,369 Q - 12,23 Q^2 + 0,2106 V + 0,2957 Q V - 0,004345 V^2, R = 0.997; \quad (2.13)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 6 \text{ г}) = -0,5203 - 0,1450 Q + 14,1 Q^2 + 0,08903 V - 0,1039 Q V - 0,00013626 V^2, R = 0.989; \quad (2.14)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 9 \text{ г}) = -0,049271 - 1,1351 Q + 8,7193 Q^2 + 0,02847 V + 0,0002060 Q V + 0,0009738 V^2, R = 0.997; \quad (2.15)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 12 \text{ г}) = -0,0351522 - 1,1811 Q + 4,40695 Q^2 + 0,0197504 V + 0,0245 Q V + 0,00100 V^2, R = 0.997; \quad (2.16)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 15 \text{ г}) = 0,2488 - 0,5676 Q + 9,250 Q^2 - 0,0158 V - 0,03389 Q V + 0,001874 V^2, R = 0.988; \quad (2.17)$$

$$\sigma(m_{1000} = 3 \text{ г}) = 0,14911 - 0,12787 Q + 22,536 Q^2 + 0,028255 V - 0,1214 Q V - 0,00083935 V^2, R = 0.967; \quad (2.18)$$

$$\sigma(m_{1000} = 6 \text{ г}) = -0,278666 + 2,314 Q + 3,804 Q^2 + 0,0388755 V - 0,0975633 Q V - 0,00065945 V^2, R = 0.951; \quad (2.19)$$

$$\sigma(m_{1000} = 9 \text{ г}) = -0,0276755 + 0,831333 Q + 8,75555 Q^2 + 0,0106244 V - 0,0364655 Q V - 0,0000401644 V^2, R = 0.958; \quad (2.20)$$

$$\sigma(m_{1000} = 12 \text{ г}) = -0,242544 + 1,86733 Q + 5,8034 Q^2 + 0,028594441 V - 0,0686654 Q V - 0,000454744 V^2, R = 0.956; \quad (2.21)$$

$$\sigma(m_{1000} = 15 \text{ г}) = 0,0505955 + 2,55455 Q + 10,9755 Q^2 - 0,00778555 V - 0,152555 Q V + 0,000652955 V^2, R = 0.978; \quad (2.22)$$

На рисунку 2.5 наведено візуальну ілюстрацію взаємозв'язків, які визначаються в рівняннях (2.13)-(2.22).

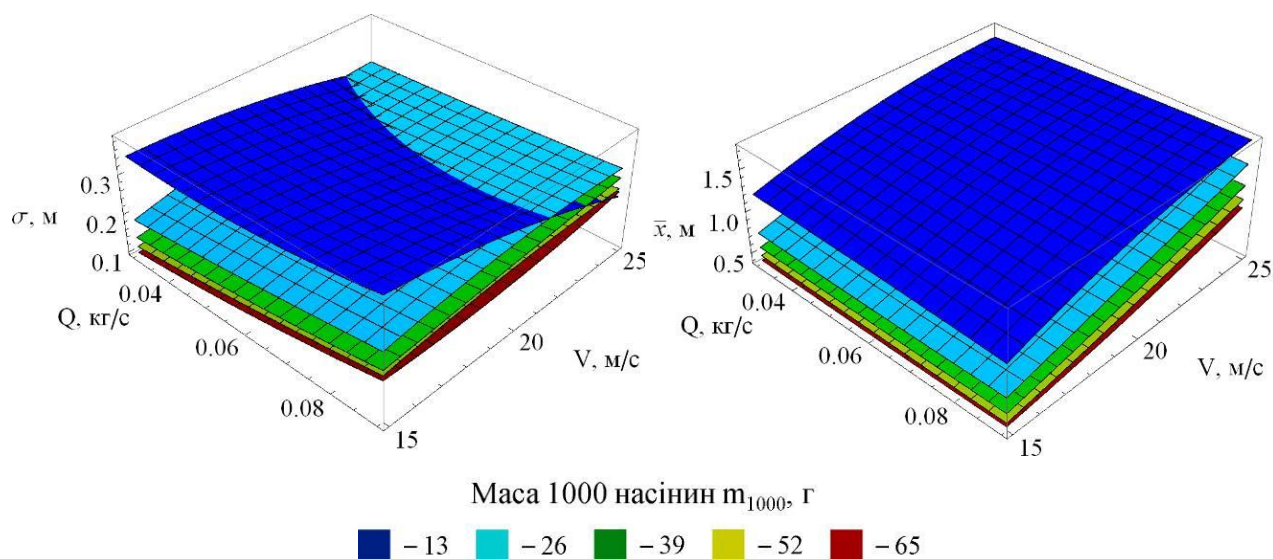


Рисунок 2.5 – Залежності середнього значення і середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  від варіаційних факторів у випадку кожної фракції насіння з ефективним діаметром  $D_e = 5$  мм

Також були визначені рівняння, що описують залежність середнього значення та середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  від варіаційних факторів для фракцій насіння з ефективним діаметром  $D^e = 7$  мм.

$$\bar{x}(m_{1000} = 3 \text{ г}) = -0,315744 + 0,990939 Q - 29,8032 Q^2 + 0,100344 V + 0,123133 Q V - 0,00119634 V^2, R = 0.995; \quad (2.23)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 6 \text{ г}) = 0,4710444 + 2,96654 Q - 4,32555 Q^2 - 0,0289133 V - 0,1094344 Q V + 0,00232333 V^2, R = 0.994; \quad (2.24)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 9 \text{ г}) = 0,572833 + 4,3144 Q + 7,59911 Q^2 - 0,0530222 V - 0,239733 Q V + 0,00282244 V^2, R = 0.948; \quad (2.25)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 12 \text{ г}) = 0,468544 + 2,57154 Q + 20,2243 Q^2 - 0,0410454 V - 0,231645 Q V + 0,00232945 V^2, R = 0.956; \quad (2.26)$$

$$\bar{x}(m_{1000} = 15 \text{ г}) = 0,481133 + 2,876555 Q + 18,28533 Q^2 - 0,0471544 V - 0,2272854 Q V + 0,0023944354 V^2, R = 0.947; \quad (2.27)$$

$$\sigma(m_{1000} = 3 \text{ г}) = -0,267945 - 3,981044 Q + 16,7945 Q^2 + 0,074555 V - 0,00119634 V^2, R = 0.995; \quad (2.28)$$

$$V+0,151244 Q V - 0,00214559 V^2, R = 0.956;$$

$$\sigma(m_{1000} = 6 \text{ г}) = -0,09251455 + 1,72445 Q + 2,11445 Q^2 + 0,0182455 V - 0,026459 Q V - 0,000195619 V^2, R = 0.956; \quad (2.29)$$

$$\sigma(m_{1000} = 9 \text{ г}) = -0,05984569 + 2,86501 Q + 0,4545789 Q^2 + 0,008546078 V - 0,06284562 Q V + 0,000033568 V^2, R = 0.954; \quad (2.30)$$

$$\sigma(m_{1000} = 12 \text{ г}) = 0,0144565 + 1,874561 Q + 6,45634 Q^2 + 0,006541 V - 0,05446656 Q V + 0,000156682 V^2, R = 0.965; \quad (2.31)$$

$$\sigma(m_{1000} = 15 \text{ г}) = 0,0441457 + 3,045685 Q + 3,65878 Q^2 - 0,005587537 V - 0,10557667 Q V + 0,00044407567 V^2, R = 0,979; \quad (2.32)$$

Графічні відображення залежностей (2.23)-(2.32) можна знайти на рисунку 2.6.

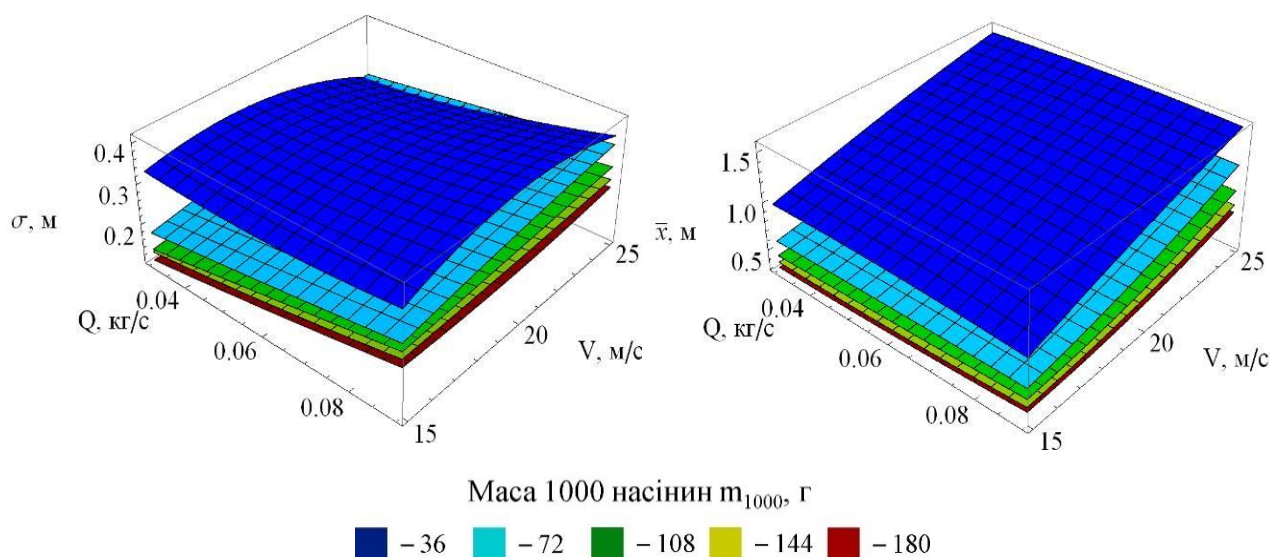


Рисунок 2.6 – Графіки залежностей середнього значення і середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  від параметрів експерименту для фракцій насіння з ефективним діаметром  $D_e = 7$  мм.

Згідно з даними таблиці та використанням програмного пакету Mathematica, був створений математичний вираз, що моделює зв'язок коефіцієнта заповнення  $\theta$  з факторами досліджень у вигляді кодованому:

$$\theta = 0,24597 + 0,005545686 x_1 - 0,02845676 x_1^2 - 0,034544 x_2 - \quad (2.33)$$



$$- 0,0069314545 x_1 x_2 - 0,002454556 x_2^2 - 0,04565568 x_3 + \\ + 0,0685655 x_1 x_3 + 0,02356508 x_2 x_3 - 0,0345651 x_3^2.$$

Розраховане значення коефіцієнта кореляції ( $R = 0,83$ ) і Стюдента. Згідно з  $t_{05}(27) = 2,04$ , коефіцієнти наступних членів рівняння значущі за довірчого рівня не менше ніж 95%.:  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_1^2$ ,  $x_3^2$ .

У розкодованому вигляді модель (2.33) після спрощення має вигляд:

$$\theta = 0,6583453 - 0,063438 D_p - 0,00711343 D_p^2 - 4,3134391 Q + \\ + 0,00181343 V + 0,006830343 D_p V + 0,1534349 QV - 0,00133434 V^2. \quad (2.34)$$

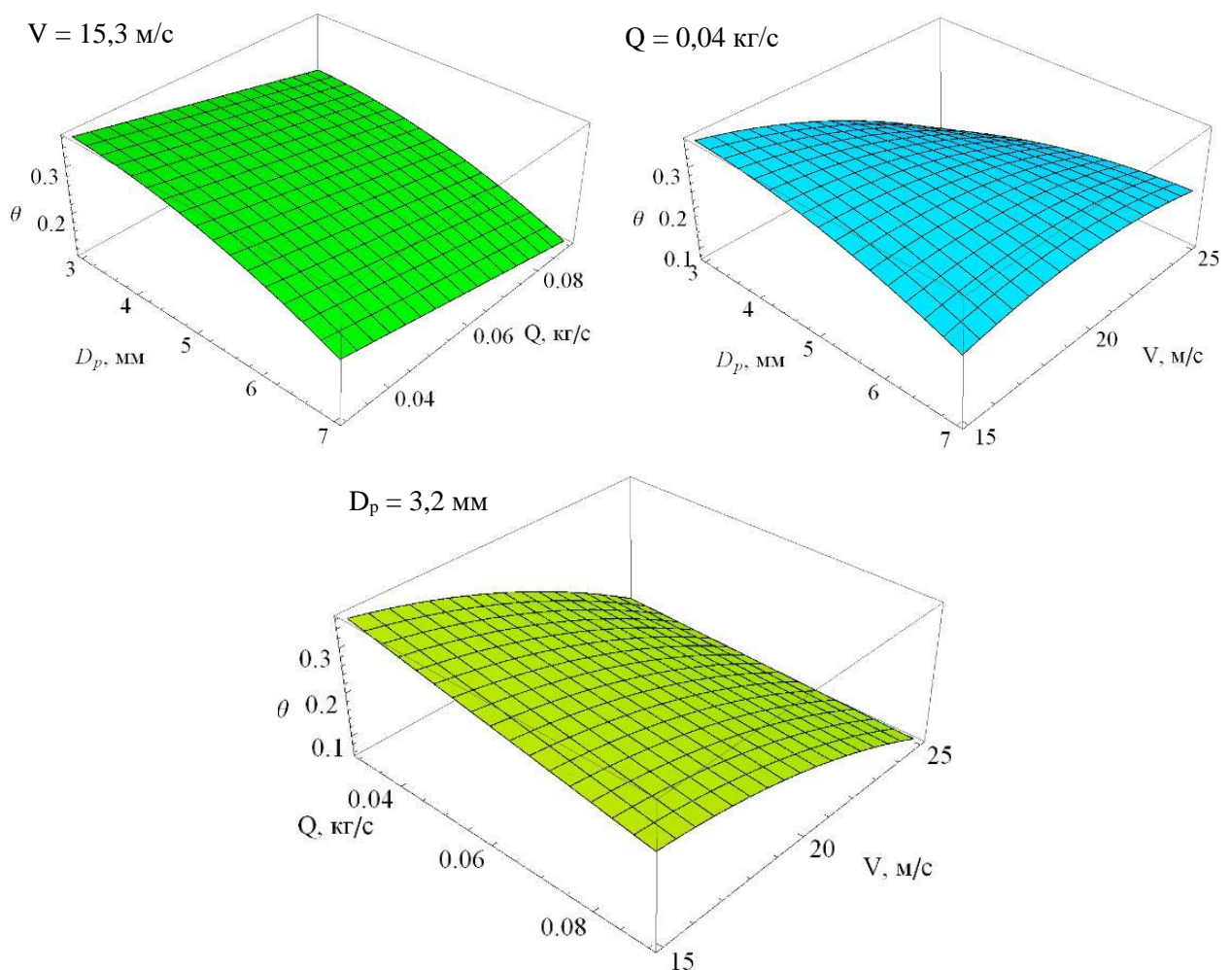


Рисунок 2.7 – Зв'язок між коефіцієнтом заповнення  $\theta$  та такими параметрами, як ефективний діаметр насіння  $D_p$ , подача насіння  $Q$  і швидкість повітря  $V$

Графічне представлення залежності (2.34) подано на рисунку 2.7.

Оптимальні параметри рівняння (2.34) в умовах максимального коефіцієнта заповнення  $\theta$  мають вигляд  $D_p = 3,2$  мм,  $Q = 0.04$  кг/с,  $V = 15,3$  м/с.

Як видно з рис. 2.7, швидкість заповнення  $\theta$  параболічно зменшується зі збільшенням діаметра насіння  $D_p$ . Зі збільшенням подачі насіння  $Q$  швидкість заповнення  $\theta$  зменшується лінійно. Для руху повітря із швидкістю  $V = 15,3$  м/с існує раціональне значення швидкості  $\theta$ .

### 2.3 Висновки з розділу

1. Внаслідок моделювання процесу під впливом повітряного потоку було встановлено, як змінюється розподіл кожної фракції насіння вздовж довжини області. Цей розподіл характеризується середнім значенням, середньоквадратичним відхиленням та коефіцієнтом заповнення. Відомо, як ці параметри залежать від ефективного діаметра насіння  $D_p$ , швидкості подачі повітря  $V$  та подачі насіння  $Q$ .

2. На основі аналізу отриманих залежностей та за умови досягнення максимального значення коефіцієнта заповнення  $\theta$ , були визначені оптимальні параметри для даного процесу. Для насінь з ефективним діаметром  $D_p = 3,2$  мм оптимальні значення параметрів визначено як  $Q = 0,04$  кг/с для подачі насіння та  $V = 15,3$  м/с для швидкості повітря.

## **3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **3.1 Програма досліджень**

Програмою експериментальних досліджень передбачено наступне:

- проведення дослідження аеродинамічних властивостей зернової суміші;
- проведення експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора зернової суміші;

Задачі досліджень наступні:

- створити лабораторне обладнання для дослідження аеродинамічних властивостей зернової суміші;
- розробити методику дослідження аеродинамічних властивостей зернової суміші;
- створити експериментальне обладнання для дослідження аеродинамічних властивостей зернової суміші;
- розробити методику експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора зернової суміші;
- провести лабораторні і експериментальні дослідження і встановити відповідні залежності.

### **3.2 Методика лабораторних досліджень аеродинамічних властивостей зернової суміші**

Фізико-механічні властивості зерна є ключовими параметрами, які необхідно враховувати під час його подальшої обробки після збирання. Практично всі види насіння піддаються різним механічним впливам, таким як подрібнення, перемішування, транспортування, зберігання та інші операції. Планування та розрахунок обладнання для виконання цих технологічних процесів неможливий без знання фізико-механічних властивостей матеріалів, які обробляються.

Багато дослідників присвятили свої дослідження властивостям насіння олійних культур, і інформація про фізико-механічні та технологічні характеристики доступна у літературі [30, 31, 32, 33, 34]. Однак ця інформація зазвичай надає загальну характеристику, яку можна використовувати для розробки моделей процесів сушіння та післязбирального обробітку насіння. Для вдосконалення процесу очищення та сепарації насіння олійних культур (соняшнику, гірчиці, камеліни, ріпаку, сої та ін.) пропонується провести додаткові дослідження його фізико-механічних властивостей.

Для досягнення цієї мети було розроблено програму експериментальних досліджень, що передбачає визначення таких фізико-механічних властивостей олійного насіння:

- параметри, що характеризують сипкість насіння, такі як кут природнього відкосу  $\varphi$ ;
- фрикційні властивості насіння, включаючи статичний коефіцієнт тертя  $f$ ;
- пористість (шпаруватість)  $\varepsilon$  та щільність  $\rho$ ;
- розмірно-масові характеристики насіння, такі як довжина  $L$ , ширина  $B$ , товщина  $T$ , ефективний діаметр  $D_e$  та маса 1000 насінин  $M_{1000}$ .

На основі отриманих результатів експериментальних досліджень проведено аналіз впливу вологості насіння (позначено як  $W_b$ ) на вивчені показники. Для налаштування вологості насіння олійних культур до певних значень, проводилася додавання відповідної кількості води, після чого матеріал ретельно переміщувався і герметизувався в окремих поліетиленових мішках. Зразки потім піддавалися тепловій обробці при  $50^\circ \text{C}$  у теплоізоляційній шафі протягом тижня. Перед кожним тестуванням зразки вилучалися з теплоізоляційної шафи та допускалися до кімнатної температури. Властивості фізико-механічні визначалися при вмісті вологи, що становила  $7,1 \pm 0,2\%$ ,  $10,2 \pm 0,2\%$ ,  $13,1 \pm 0,2\%$  і  $16,3 \pm 0,2\%$ .

Ефективний діаметр, виражений у вигляді розміру, розраховували за такою формулою [35, 36, 37, 38]

$$D_e = (L \cdot W \cdot T)^{\frac{1}{3}} \quad (3.1)$$

Масу 1000 насінин визначали шляхом випадкового вибору 100 зразків та їх зважування на електронних вагах з точністю до 0,001 г.

Дійсну щільність ( $\rho_t$ ) визначали методом витіснення толуолу. Об'ємну щільність ( $\rho_b$ ) насіння визначали, наповнюючи циліндр відомого об'єму (100 мм × 100 мм × 100 мм) насінням та зважуючи його на електронних вагах.

Пористість розраховували за відповідним рівнянням. Кут природного ухилу визначали як восьмикутник відношення подвоєної висоти до діаметра насінневої купи, розміщеної на круглій пластині [39, 40, 41]

$$\varepsilon = 100 \frac{(\rho_t - \rho_b)}{\rho_t} \quad (3.2)$$

Статичний коефіцієнт тертя ( $f$ ) визначали для насіння на сталевій поверхні. Проводили вимірювання, піднімаючи один кінець насіння по поверхні, доки воно не починало ковзати, і визначали кут, при якому це сталося [42].

Геометричні параметри та фізико-механічні властивості насіння впливають на його поведінку в повітряному потоці під час технологічних операцій, таких як очищення, теплова сушка, активне вентилявання та інші. Швидкість руху повітря грає важливу роль у цих процесах. При низьких швидкостях насіння зберігає свої властивості, і повітря проходить через пори насіння. Але при збільшенні швидкості руху повітря насіння може почати рухатися одне відносно іншого, що призводить до різкого зменшення концентрації насіння в шарі та збільшення об'єму цього шару. Це може призвести до псевдозрідження і навіть псевдокипіння, коли опір повітряному потоку наближається до ваги насіння.

Швидкість, при якій частинки сипучого матеріалу перебувають у підвішеному стані, називається швидкістю витання для даного матеріалу. Для оцінки цієї швидкості були проведені вимірювання на випробувальній установці, яка була описана на рисунку 3.1. На цій установці повітря подавалося за допомогою повітрорудної машини з регульованою частотою обертання крильчатки.

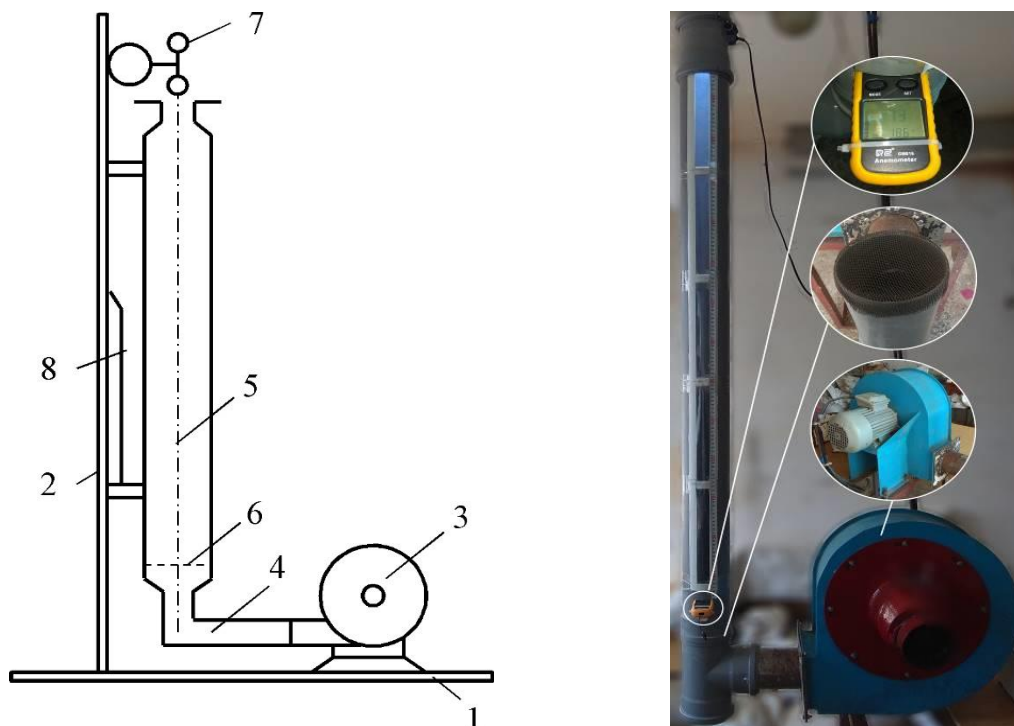


Рисунок 3.1 – Установка для визначення швидкостей витання насіння і зерна

Гофрошланг з'єднував машину та вертикальну трубу, в якій була встановлена сітка. Швидкість повітря вимірювалася анемометром, а висота підйому частинок визначалася за допомогою шкали. Шар насіння товщиною 3-5 мм розміщувався на сітці в вертикальній трубі. Швидкість витання визначалася приблизно на половині підйому частинок в трубі, і показання анемометра зафіксувалися. Цей експеримент проводився для різних фракцій матеріалу, які були попередньо розділені за розмірами.

Основна схема вимірювальної установки для визначення швидкостей підйому частинок має такий склад: 1 – станина; 2 – вертикальна стійка; 3 – повітродувна машина; 4 – гофрошланг; 5 – вертикальна труба; 6 – сітка; 7 – чашковий анемометр; 8 – шкала.

В ролі об'єктів дослідження були вибрані насіння наступних сортів олійних культур: соняшник сорту «Надійний», гірчиця сорту «Тавричанка», рижій сорту «Престиж», ріпак сорту «Легіон», і соя сорту «Дені».

### 3.3 Методика експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора зернової суміші

Експерименти були проведені за допомогою аеродинамічного сепаратора серії "Алмаз". Установка складалася з наступних компонентів: бункера для завантаження насінневого матеріалу (який підлягає сепаруванню), вібралотка, генератора каскаду повітряних струменів, що працює з вентилятором під тиском, сепараційної камери та збірників фракцій. Крім того, був встановлений забірник пилу та легкої фракції. Для контролю подачі насіння використовувалася відкалібрована заслінка, а подача повітря регулювалася за допомогою частотного перетворювача. Швидкість подачі повітря визначалася з використанням анемометра.

В експериментах використовувалися насіння соняшнику сорту "Прометей". Кожен експеримент включав обробку 100 кг насіння через експериментальний зразок.

Факторами в експерименті були швидкість подачі повітря ( $V$ ) і подача насіння ( $Q$ ). Діапазони та рівні змінних факторів наведені в таблиці 1.1.

На рисунку 3.2 зображено структурну схему (а) та зовнішній вигляд (б) експериментальної установки, яка використовується для вивчення процесу сепарації насіння соняшнику за впливу повітряного потоку. Установка включає в себе наступні компоненти: бункер (1), вібралоток (2), генератор каскаду повітряних струменів (3), вентилятор (4), сепараційну камеру (5), збірники фракцій (6), забірник пилу і легкої фракції (7), заслінку (8), частотний перетворювач (9) і анемометр (10).

Під впливом повітряного потоку, після розділення насіння, розподіл кожної фракції за їхньою довжиною може бути описаним як нормальний розподіл, який має певне середнє значення та середньоквадратичне відхилення (показано на рисунку 3.3). Для такого нормального розподілу  $x \in [\bar{x} - 2\sigma; \bar{x} + 2\sigma]$  в області довжини є ймовірність 95,45%.

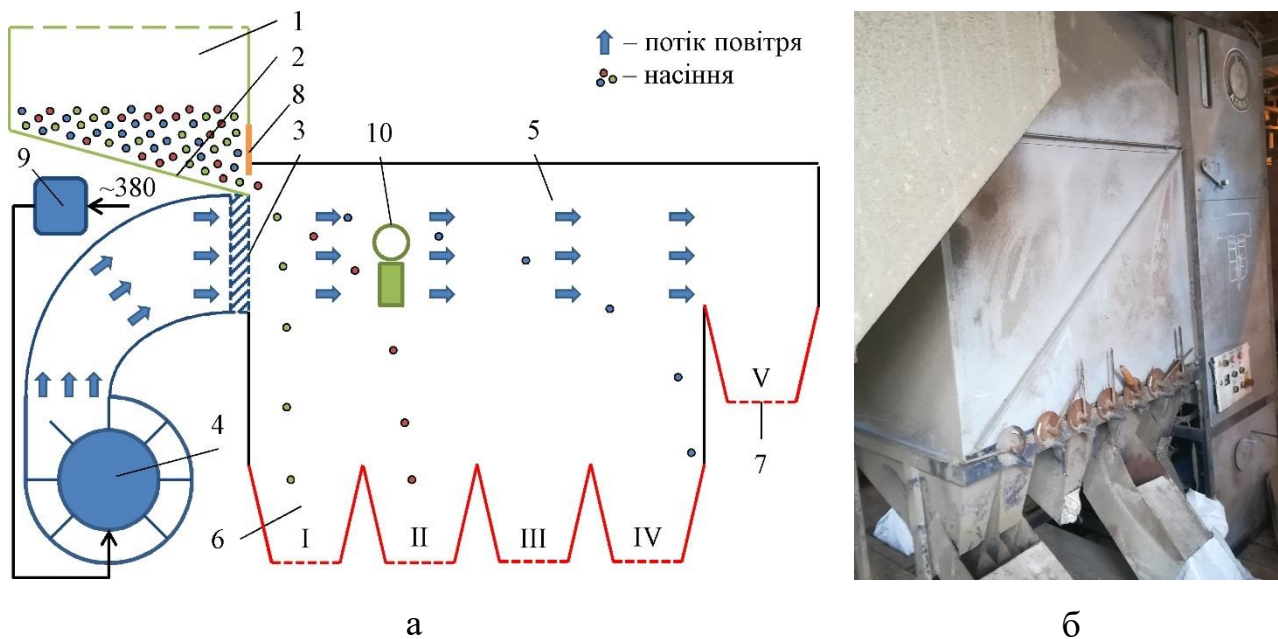


Рисунок 3.2 – Установа для дослідження процесу аеродинамічної сепарації зернової суміші

Таблиця 1.1 – Рівні факторів процесу аеродинамічної сепарації зернової суміші

| Рівні | Фактори        |                |
|-------|----------------|----------------|
|       | Q, кг/с        | V, м/с         |
|       | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> |
| (+)   | 0,08           | 26             |
| (0)   | 0,06           | 20             |
| (-)   | 0,04           | 14             |
| Δ     | 0,02           | 4              |

Відповідно до рисунку 3.3, найкращий роздільний ефект (95,45%) досягається при виконанні наступних умов:



$$2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5 \leq \bar{x}_5 - \bar{x}_1, \quad (3.3)$$

або

$$\theta = \frac{\bar{x}_5 - \bar{x}_1}{2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5} \rightarrow \max, \quad (3.4)$$

де  $\theta$  – коефіцієнт заповнення.

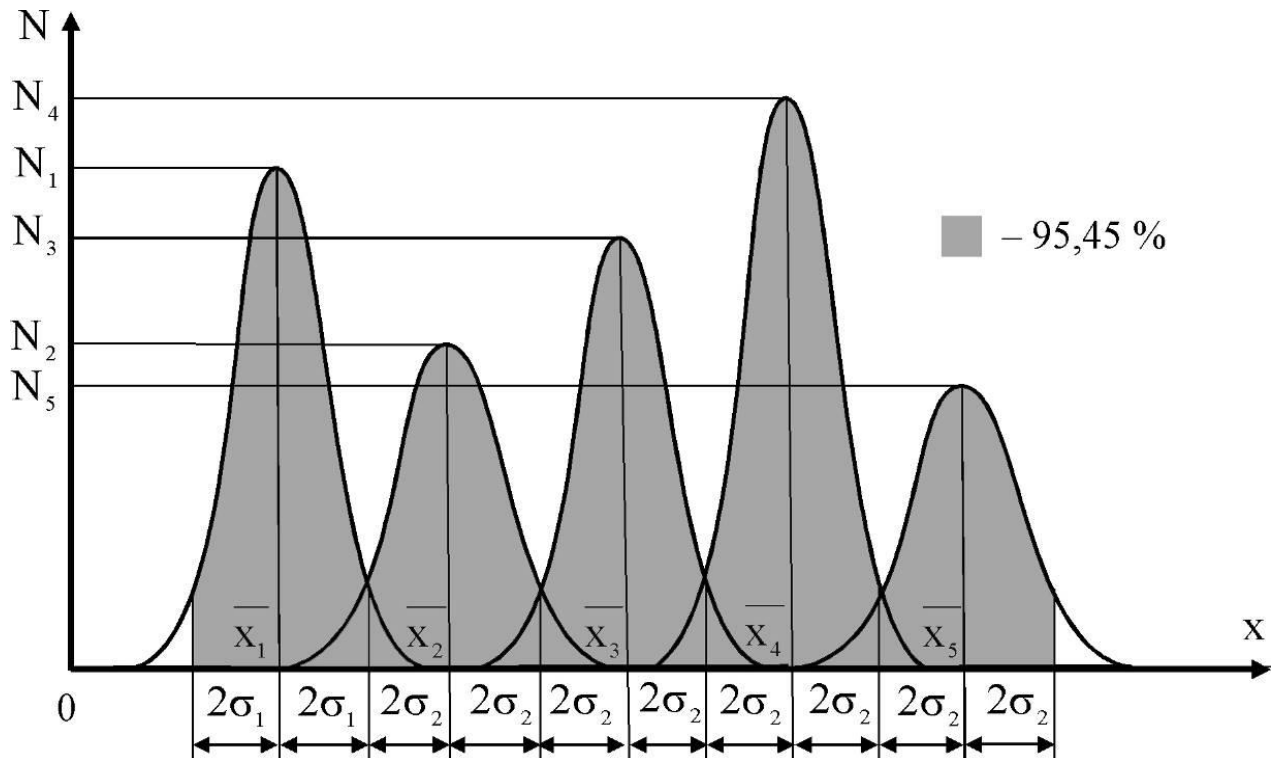


Рисунок 3.3 – Нормальний розподіл фракцій зернової суміші по ширині області

Важливо відзначити, що вся область була розділена на 20 зон, і для кожної з цих зон була визначена кількість насіння кожної фракції.

Вище вказані значення коефіцієнта заповнення  $\theta$ , середніх значень розподілу фракцій по довжині і їх середньоквадратичних відхилень  $\sigma$  вказують на розміри та розташування забірних областей (забірників). Однак, оскільки в більшості наявних установок аеродинамічної сепарації використовуються приймальні пристрої однакового розміру, оцінити якість процесу сепарації досить

складно. Тому було запроваджено альтернативний критерій для оцінювання якості розподілу фракцій на вході: коефіцієнт розподілу  $\delta$ , який визначається так [33].

Якщо вихідний матеріал розділено на  $N$  фракцій, то кількість ділянок відбору проб також дорівнює  $N$ . Для кожної ділянки відбору визначається фракційний склад посівної суміші, який математично може бути виражений у вигляді квадратної матриці  $N \times N$ . Коефіцієнт розподілу  $\delta$  розраховується як максимальна сума діагональних елементів цієї матриці [34].

$$\begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{N1} & w_{N2} & \dots & w_{NN} \end{pmatrix}, \quad (3.5)$$

$$w_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N m_{ij}} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

$$\delta = \max \left( \sum_{k=1}^N w_{kk}, \sum_{k=1}^N w_{k(k+1)}, \dots, \sum_{k=1}^N w_{k(k+N-1)}, \sum_{k=1}^N w_{(k+1)k}, \dots, \sum_{k=1}^N w_{(k+N-1)k} \right), \quad (3.7)$$

В якості критеріїв оптимізації були визначені: споживана потужність ( $P$ ) і коефіцієнт розподілу ( $\delta$ ). Потужність, яка витрачається для приведення в рух вентилятора, була виміряна за допомогою функції перетворювача частоти VLT Micro Drive Danfoss. Оскільки задачею сепарації насіння соняшника при його переміщенні під дією повітряного потоку було розділення на 5 фракцій (виконані, неповністю виконані, голі ядра, порожні та пил), то на експериментальній установці було встановлено 5 забірних областей. Під час кожного дослідження для кожної забірної області визначався фракційний склад згідно з загальноприйнятою методикою (ДСТУ 10854-88, 2010), і відповідний коефіцієнт розподілу  $\delta$ .

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 4.1 Результати лабораторних досліджень аеродинамічних властивостей зернової суміші

Під час досліджень були встановлені залежності між вологості насіння ( $W_b$ ) та рядом параметрів, таких як ефективний діаметр ( $D_e$ ), маса 1000 насінин ( $M_{1000}$ ), пористість ( $\epsilon$ ), дійсна щільність ( $\rho_t$ ), кут природнього відкосу ( $\phi$ ), та коефіцієнт тертя ( $f$ ). Графічна інтерпретація цих залежностей представлена на рисунку 4.1.

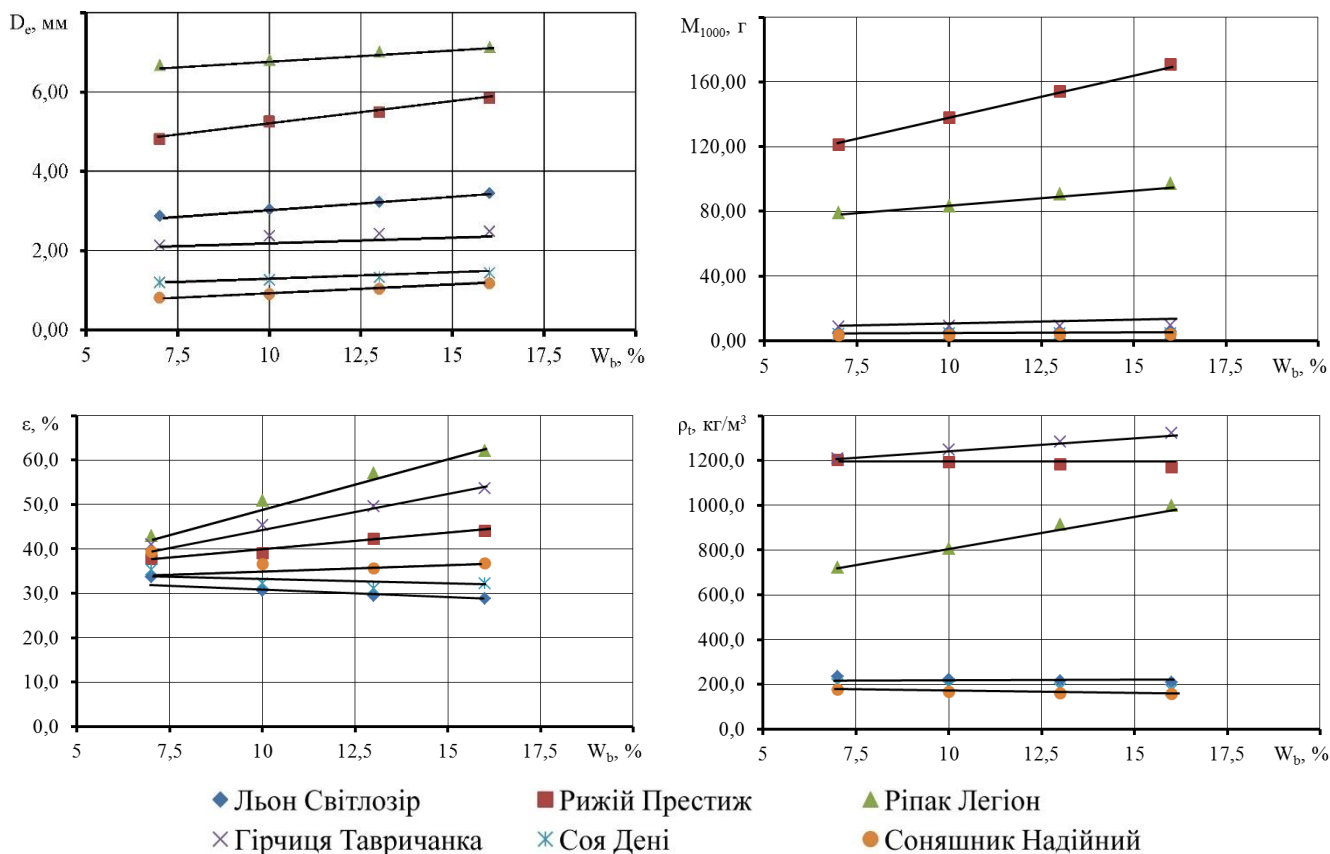
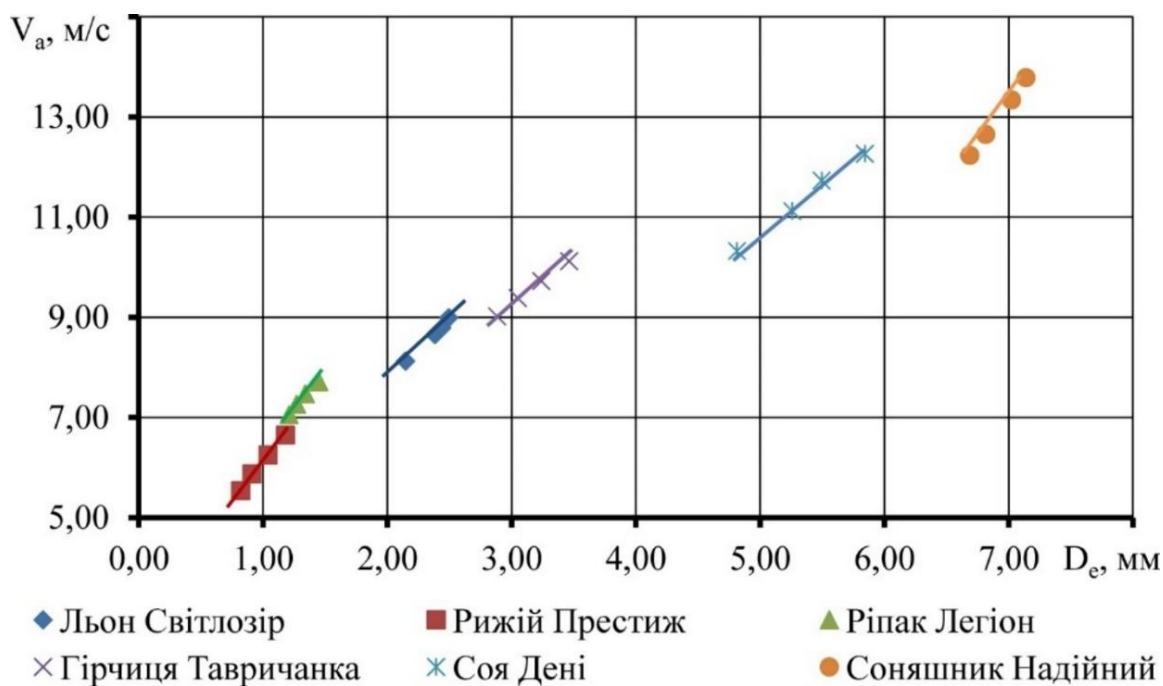


Рисунок 4.1 – Співвідношення між вологості насіння ( $W_b$ ) та наступними параметрами: ефективний діаметр ( $D_e$ ), маса 1000 насінин ( $M_{1000}$ ), пористість ( $\epsilon$ ), дійсна щільність ( $\rho_t$ ), кут природнього відкосу ( $\phi$ ), та коефіцієнт тертя ( $f$ )

Для різних фракцій матеріалу, розділеного за розмірами, була проведена аеродинамічна оцінка насіння в повітряному потоці. Рисунок 4.2 показує лінії тренда, які досить точно (з коефіцієнтом детермінації  $R^2$  від 0,95 до 0,98) описують експериментальні залежності швидкостей витання від геометричних параметрів насіння. З цих графіків видно, що зі збільшенням геометричних розмірів насіння їх швидкість витання збільшується лінійно для кожної олійної культури.

Коефіцієнт тертя для насіння олійних культур сильно залежить від шорсткості поверхні, і цей коефіцієнт зменшується зі збільшенням вологості. Причиною цього є те, що при збільшенні вологості сили молекулярного зчеплення між оболонкою насіння та поверхнею матеріалу слабшають.

Збільшення вологості насіння олійних культур є важливим фактором, що впливає на їх щільність. Зі збільшенням вологості насіння стає більш щільним. Це зрозуміло, оскільки поглинання води матеріалом призводить до збільшення загальної маси насіння і, отже, підвищення його щільності.



Збільшення вологості матеріалу призводить до зростання кута природнього відкошу насіння олійних культур. Це пояснюється зменшенням сипучості цього матеріалу при збільшенні вологості, що в свою чергу призводить до збільшення кута природнього відкошу.

Результати досліджень показують, що розміри більшості насіння мало відрізняються від середніх значень. Проте вологість матеріалу впливає на досліджувані параметри.

Отже, при проектуванні та розрахунку машин для очищення та розділення насіння олійних культур можна використовувати середні розмірні характеристики насіння як вихідні дані. Також фізико-механічні властивості насіння можуть служити основою для моделювання процесу очищення та розділення насіння і вибору оптимальних параметрів машин. Дослідження також показали, що зміна кута нахилу прямої лінії тренда від геометричних характеристик насіння олійних культур є результатом їх форми.

## **4.2 Результати експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора зернової суміші**

Експерименти були проведені за допомогою математичного планування експерименту, що дозволяє створити математичні моделі, виражені у вигляді рівнянь регресії, для опису процесів. Усі отримані дані з досліджень представлені у табл. 4.1.

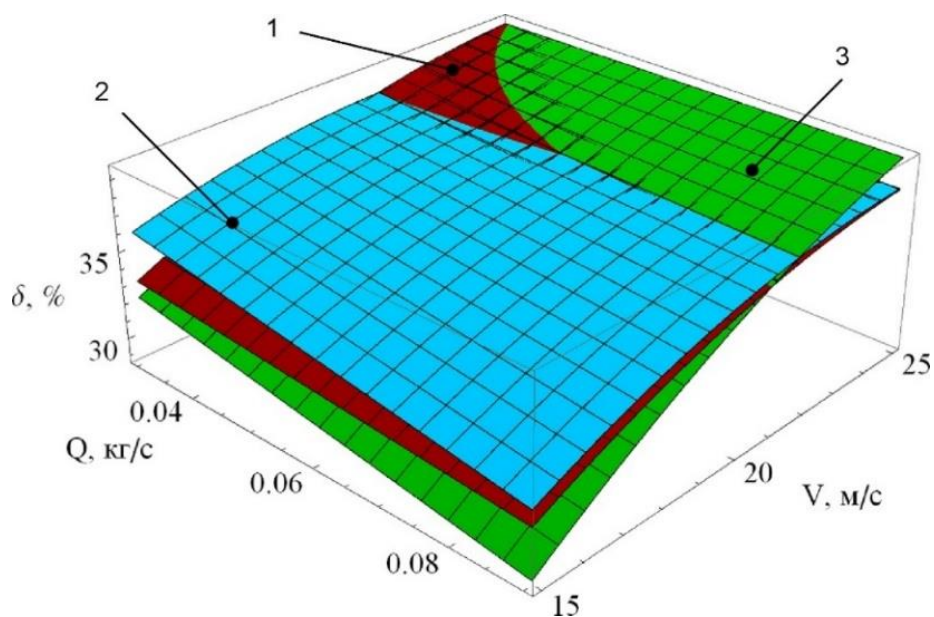
Математична модель впливу факторів на коефіцієнт  $\delta$  виглядає так:

$$\delta = 36,8588 - 0,87431 x_1 + 0,0222222 x_1^2 + 3,12163 x_2 + 0,883579 x_1 x_2 - 1,25313 x_2^2. \quad (4.1)$$

Для цього рівняння було проведено статистичний аналіз, і результати показали, що модель є адекватною на будь-якому рівні довірчої ймовірності 95%. Усі коефіцієнти в цьому рівнянні є статистично значущими.

Таблиця 4.1 – Результати експериментів

| № | $x_1$ | $x_2$ | P, кВт |      |      |      | $\delta$ , % |       |       |       |
|---|-------|-------|--------|------|------|------|--------------|-------|-------|-------|
|   |       |       | 1      | 2    | 3    | Сер. | 1            | 2     | 3     | Сер.  |
| 1 | 0     | -1    | 0,63   | 0,67 | 0,59 | 0,63 | 37,41        | 36,41 | 36,81 | 36,91 |
| 2 | 0     | 0     | 1,63   | 1,67 | 1,6  | 1,63 | 37,91        | 39,61 | 38,61 | 38,71 |
| 3 | 0     | 1     | 2,63   | 2,67 | 2,58 | 2,63 | 34,31        | 30,61 | 32,71 | 32,51 |
| 4 | -1    | -1    | 0,61   | 0,61 | 0,59 | 0,6  | 36,11        | 32,41 | 34,21 | 34,21 |
| 5 | -1    | 0     | 1,6    | 1,63 | 1,58 | 1,6  | 38,31        | 37,31 | 37,71 | 37,71 |
| 6 | -1    | 1     | 2,59   | 2,64 | 2,55 | 2,59 | 37,91        | 39,61 | 38,81 | 38,81 |
| 7 | 1     | -1    | 0,63   | 0,66 | 0,58 | 0,62 | 37,91        | 39,61 | 38,81 | 38,81 |
| 8 | 1     | 0     | 1,64   | 1,67 | 1,6  | 1,64 | 36,51        | 35,51 | 36,11 | 36,01 |
| 9 | 1     | 1     | 2,61   | 2,65 | 2,57 | 2,61 | 32,51        | 28,81 | 30,91 | 30,71 |



1 – графік отриманої експериментальної залежності; 2 – графік теоретичної залежності при  $D_{p1} = 7$  мм; 3 – графік теоретичної залежності при  $D_{p1} = 8$  мм.

Рисунок 4.3 – Графічне представлення взаємозв'язку між коефіцієнтом розподілу  $\delta$ , подачею насіння  $Q$  і швидкістю повітря  $V$ .

Також, ця модель була переведена в розкодований вигляд, що виглядає так:

$$\delta = 6,07089 - 29,1437 Q + 2,62933 V - 0,0501251 V^2. \quad (4.2)$$

Крім того, була створена математична модель для впливу досліджуваних факторів на споживану потужність  $P$ :

$$\delta = 6,07089 - 29,1437 Q + 2,62933 V - 0,0501251 V^2. \quad (4.3)$$

Ця модель також була проаналізована статистично, і результати підтвердили її адекватність на рівні довірчої ймовірності 95%. Усі коефіцієнти цього рівняння є статистично значущими.

У розкодованому вигляді ця модель виглядає так:

$$P = -2,35556 + 0,199111 V. \quad (4.4)$$

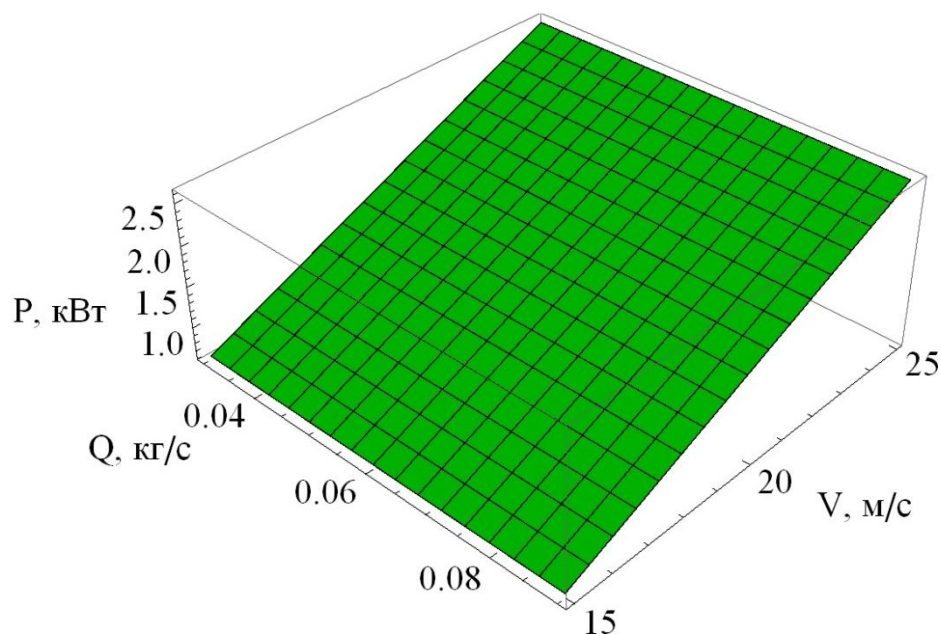


Рисунок 4.4 – Графік, що відображає, як змінюється споживана потужність  $P$  експериментальною установкою в залежності від об'єму подачі насіння  $Q$  та швидкості повітря  $V$

Графік ілюструє відношення, яке вказує, як змінюється кількість потужності  $P$ , яку споживає експериментальна установка, в залежності від об'єму подачі

насіння  $Q$  та швидкості повітря  $V$ . Якщо розглядати рівняння, то можна стверджувати, що на цю споживану потужність впливає тільки швидкість повітря  $V$ .

Завданням компромісного розв'язання було досягнення мінімізації споживаної потужності  $P$  експериментальною установкою при одночасному досягненні максимального значення коефіцієнта розподілу  $\delta$  та об'єму подачі насіння  $Q$ . Це виражено у рівнянні

$$\begin{cases} \delta(Q, V) \rightarrow \max, & \frac{P(Q, V)}{Q \times \delta(Q, V)} \rightarrow \min. \\ P(Q, V) \rightarrow \min, \\ Q \rightarrow \max. \end{cases} \quad (4.5)$$

За допомогою програмного пакету Mathematica була знайдена оптимальна комбінація технологічних параметрів для процесу сепарації насіння соняшнику під дією повітряного потоку: об'єм подачі насіння  $Q = 0,09$  кг/с, швидкість повітря  $V = 15$  м/с, коефіцієнт розподілу  $\delta = 31,6\%$ , та споживана потужність  $P = 0,63$  кВт.

### 4.3 Результати впровадження

Для практичного підтвердження ефективності конструкційно-технологічної схеми адаптивного аеродинамічного сепаратора було створено його експериментальний прототип, який працює з оптимально підібраними параметрами режиму, такими як подача насіння  $Q$  і швидкість повітря  $V$ . Це було досягнуто завдяки застосуванню спеціального програмного забезпечення, що використовує розроблений алгоритм. Загальний вигляд цього експериментального прототипу адаптивного аеродинамічного сепаратора можна побачити на рисунку 4.5.

Експериментальний процес перевірки складався з двох етапів. Перший етап був виконаний за раціональними параметрами аеродинамічного сепаратора, які відповідали (4.5). Другий етап включав в себе використання автоматизованої



системи для управління параметрами режиму аеродинамічного сепаратора відповідно до адаптивного алгоритму. Кожен етап експерименту було проведено з десятьма повторами за використанням насінневих сумішей з різним компонентним складом гібриду Пріоритет. Оцінкою якості сепарації насінневої суміші були коефіцієнт розподілу  $\delta$  і продуктивність  $q$ .

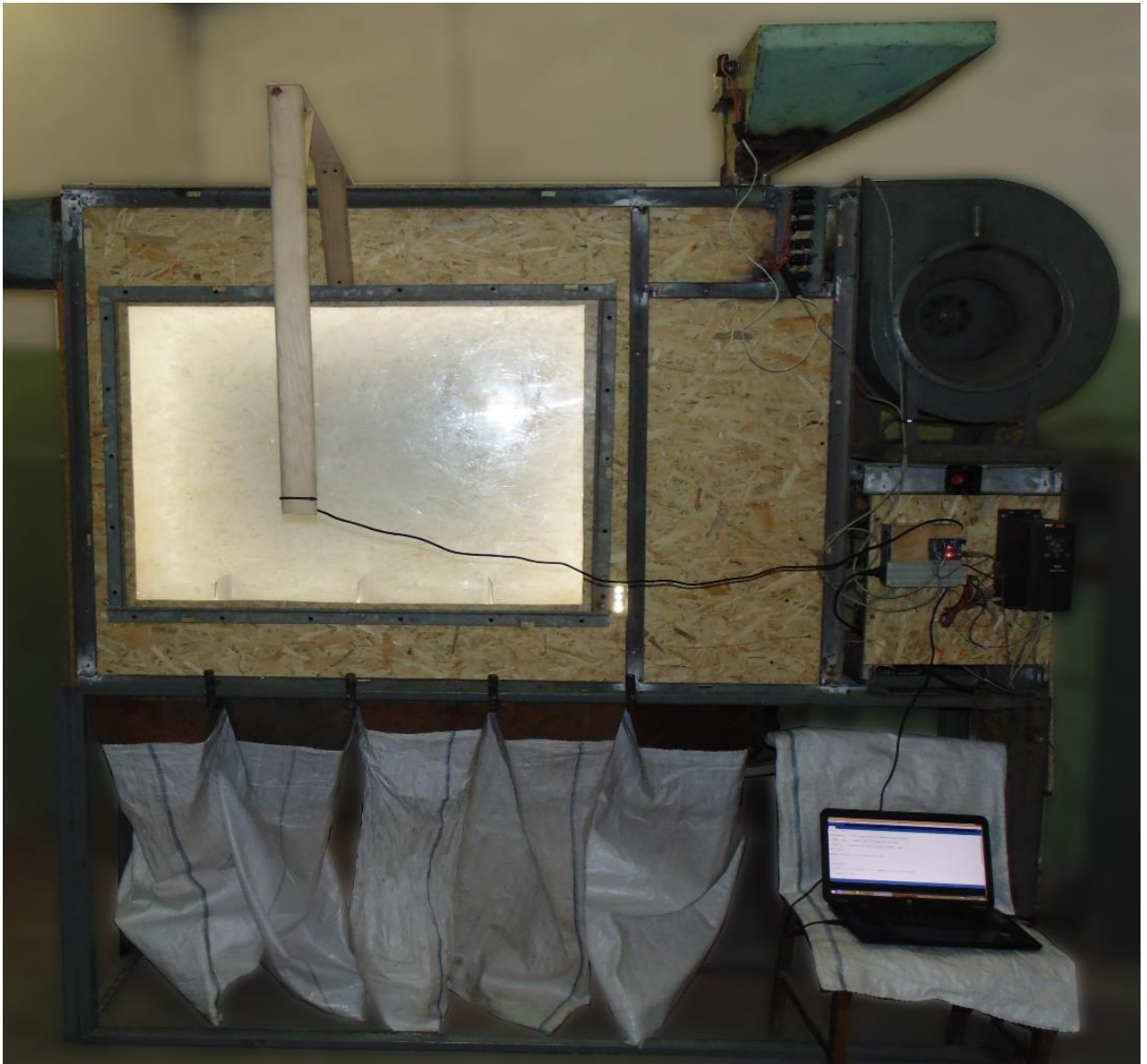


Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд прототипу адаптивного аеродинамічного сепаратора

Результати експериментального дослідження адаптивного аеродинамічного сепаратора наведені в таблиці 4.2. Застосування розробленого алгоритму під час дворазової сепарації насінневої суміші на адаптивному аеродинамічному сепараторі дозволило досягти технологічного процесу сепарації насінневої суміші соняшнику з використанням аеродинамічних властивостей з продуктивністю  $q = 115 \pm 8$  кг/год і коефіцієнтом розподілу  $\delta = 97,2 \pm 2,4$  %.

Таблиця 4.2 – Результати, отримані під час практичних випробувань адаптивного аеродинамічного сепаратора

| №        | I            |              |                |              | II           |              |                |              |
|----------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
|          | Раці. парам. |              | Розроб. алгор. |              | Раці. парам. |              | Розроб. алгор. |              |
|          | q, кг/год    | $\delta$ , % | q, кг/год      | $\delta$ , % | q, кг/год    | $\delta$ , % | q, кг/год      | $\delta$ , % |
| 1        | 279          | 66,5         | 305            | 78,26        | 110          | 84,86        | 109            | 94,76        |
| 2        | 288          | 67,28        | 319            | 78,5         | 108          | 84,8         | 111            | 95           |
| 3        | 289          | 67,58        | 315            | 78,26        | 110          | 84,26        | 111            | 94,76        |
| 4        | 311          | 72,14        | 307            | 83,9         | 93           | 91,1         | 127            | 100,4        |
| 5        | 320          | 71,84        | 301            | 83,06        | 95           | 90,56        | 127            | 99,56        |
| 6        | 295          | 66,26        | 301            | 78,02        | 112          | 84,62        | 107            | 94,52        |
| 7        | 291          | 65,06        | 321            | 78,98        | 106          | 86,78        | 107            | 95,48        |
| 8        | 304          | 71           | 315            | 82,22        | 96           | 89,72        | 125            | 98,72        |
| 9        | 301          | 71,06        | 317            | 83,9         | 93           | 90,5         | 123            | 100,4        |
| 10       | 300          | 65,42        | 305            | 78,26        | 111          | 85,46        | 106            | 94,76        |
| x        | 298          | 68,4         | 311            | 80,3         | 103          | 87,3         | 115            | 96,8         |
| $\sigma$ | 13           | 3,3          | 9              | 3,1          | 9            | 3,4          | 10             | 3,1          |

#### 4.4 Висновки з розділу

1. В ході наших досліджень була створена фізико-математична модель, яка дозволяє визначити вплив морфологічних характеристик насіння на їх фізико-механічні властивості. Отримані значення фізико-механічних характеристик для насіння різних олійних культур, таких як соняшник (сорт "Надійний"), гірчиця (сорт "Тавричанка"), ріжій (сорт "Престиж"), ріпак (сорт "Легіон"), і соя (сорт "Дені"). Ці характеристики включають в себе такі параметри, як кут природнього укусу  $\varphi$ , статичний коефіцієнт тертя  $f$ , пористість (шпаруватість)  $\varepsilon$ , щільність  $\rho$ , а також розмір та масу 1000 насінин. За результатами експериментів, ми також проаналізували вплив вологості насіння ( $W_b$ ) на вказані характеристики.

2. В результаті експериментальних досліджень, спрямованих на аналіз механіко-технологічного процесу сепарації насіння соняшнику під впливом повітряного потоку, була створена фізико-математична модель. Ця модель встановила зв'язок між коефіцієнтом розподілу  $\delta$  та споживаною потужністю  $P$ , залежною від подачі насіння  $Q$  і швидкості повітря  $V$ . Статистичний аналіз результатів показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичною та експериментальною залежностями під час варіювання значень факторів у визначеному діапазоні становить 0,96.

3. У процесі проведення досліджень було вирішено компромісну задачу, яка полягала в мінімізації споживаної потужності  $P$  експериментальною установкою при одночасному досягненні максимального значення коефіцієнта розподілу  $\delta$ . Для досягнення цієї мети були встановлені такі значення параметрів: подача насіння  $Q = 0,09$  кг/с, швидкість повітря  $V = 15$  м/с, коефіцієнт розподілу  $\delta = 31,6$  %, і споживана потужність  $P = 0,63$  кВт.

4. За допомогою автоматизованого каскаду заслінок, на основі даних чисельного моделювання, було встановлено, що можна досягти рівномірності швидкості повітряного потоку (з відхиленням приблизно від  $\pm 0,2$  до  $0,4$  м/с) в сепараційній камері аеродинамічного сепаратора, незалежно від типу генератора

поток. Проте це супроводжується втратою номінальної швидкості на рівні від 5% до 15 %.

5. На основі отриманих теоретичних та експериментальних даних був розроблений адаптивний аеродинамічний сепаратор, з урахуванням оптимальних режимних параметрів (подача насіння  $Q$  і швидкість повітря  $V$ ), використовуючи програмне забезпечення, яке базується на розробленому алгоритмі. Цей сепаратор дозволяє проводити процес сепарації насінневих сумішей соняшнику з високою продуктивністю ( $q = 115 \pm 8$  кг/год) та високою якістю (коефіцієнт розподілу  $\delta = 97,2 \pm 2,4$  %), відповідно до властивостей аеродинаміки.

## **5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **5.1 Законодавство та державні стандарти в галузі охорони праці та безпеки на зерноочисних підприємствах**

Забезпечення охорони праці та безпеки на зерноочисних підприємствах є важливим завданням для забезпечення безпечних умов праці працівників та попередження надзвичайних ситуацій. Україна має ряд законодавчих та нормативно-правових актів, які регулюють цю сферу.

Основними правовими актами та стандартами в галузі охорони праці і безпеки на зерноочисних підприємствах є:

1. Закон України "Про охорону праці" від 14.10.1992 р. № 2694-ХІІ.
2. Закон України "Про пожежну безпеку" від 20.12.2017 р. № 2245-VIII.
3. Державний стандарт України ДСТУ 12.1.019:2017 "Системи охорони праці. Безпека праці. Загальні вимоги."

Ці нормативні акти визначають основні вимоги щодо організації охорони праці та безпеки на зерноочисних підприємствах і токах, включаючи вимоги до умов праці, заходів з попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій.

### **5.2 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях на зерноочисних підприємствах і токах**

На зерноочисних підприємствах та токах існують специфічні ризики, пов'язані з обробкою зернових культур та роботою з технічними системами. Для забезпечення безпеки на робочому місці та попередження надзвичайних ситуацій необхідно дотримуватися наступних положень:

- Персонал повинен бути ознайомлений з правилами охорони праці та знати процедури дії в надзвичайних ситуаціях.
- Регулярно проводити інструктажі з питань охорони праці та ведення робіт у небезпечних умовах.

- Забезпечити належний стан обладнання та вчасний технічний огляд для попередження аварій.
- Розробити план евакуації та надзвичайних заходів у разі пожежі, викиду шкідливих речовин тощо.
- Запастися засобами індивідуального захисту та організувати їх використання.
- Проводити аудити та перевірки щодо виконання вимог охорони праці та безпеки на робочому місці.

### **5.3 Розрахунок системи вентиляції для очищення повітря у виробничому приміщенні**

Система вентиляції у виробничих приміщеннях зерноочисних підприємств є важливим елементом для забезпечення здорових умов праці і попередження небезпеки виникнення надзвичайних ситуацій, таких як пожежа або викид шкідливих речовин.

Для розрахунку системи вентиляції враховуються такі параметри:

1. Площа виробничого приміщення.
2. Кількість оброблюваного зернового матеріалу.
3. Тип і кількість обладнання, яке використовується для очищення та сортування зерна.
4. Тривалість та інтенсивність робочих процесів.

Розрахунок системи вентиляції передбачає визначення необхідного об'єму повітря, який повинен обмінюватися у виробничому приміщенні для підтримання безпечних умов праці та запобігання накопиченню шкідливих викидів.

Для забезпечення ефективної системи вентиляції рекомендується консультиватися з фахівцями в цій галузі, які можуть врахувати всі особливості виробничого приміщення та обладнання.

Вихідні дані:

- Площа виробничого приміщення:  $S = 300 \text{ м}^2$ .

- Кількість працівників:  $n = 20$ .
- Норма обміну повітрям за ДСТУ 12.1.019:2017:  $30 \text{ м}^3/\text{год}$  на одного працівника.

Обчислення:  $Q_{\text{вент}} = n \times Q_{\text{прац}} = 20 \times 30 = 600 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Отже, потужність вентиляційної системи повинна бути не менше  $600 \text{ м}^3/\text{год}$  для забезпечення нормальних умов праці та безпеки на підприємстві.

#### 5.4 Розрахунок системи освітлення у виробничому приміщенні

Система освітлення у виробничому приміщенні зерноочисних підприємств грає важливу роль у створенні безпечних та комфортних умов праці для працівників. Освітлення повинно забезпечувати достатню якість видимості для виконання робіт та запобігати виникненню травм і нещасних випадків.

Для розрахунку системи освітлення необхідно враховувати:

1. Площу виробничого приміщення.
2. Типи робіт, які виконуються.
3. Вимоги до освітлення відповідно до законодавства та стандартів.

Зазвичай розрахунок системи освітлення включає визначення кількості світильників, їх потужності, розташування та світловий потік. Основною метою є забезпечення рівномірного та належного освітлення у всіх робочих зонах.

Вихідні дані:

- Площа виробничого приміщення:  $S = 300 \text{ м}^2$ .
- Коефіцієнт природного освітлення:  $K_{\text{пр}} = 1,5 \%$ .
- Норма освітленості за ДСТУ 12.1.019:2017:  $300 \text{ лк}$ .

Обчислення:  $P = S \times E \times K_{\text{пр}}$ , де  $P$  - потужність системи освітлення (Вт),  $S$  - площа приміщення ( $\text{м}^2$ ),  $E$  - норма освітленості (лк),  $K_{\text{пр}}$  - коефіцієнт природного освітлення.

$$P = 300 \text{ м}^2 \times 300 \text{ лк} \times 0,015 = 1350 \text{ Вт}$$

Отже, потужність системи освітлення повинна бути не менше  $1350 \text{ Вт}$  для забезпечення відповідної освітленості виробничого приміщення.

## 5.5 Висновки з розділу

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях на зерноочисних підприємствах і токах є надзвичайно важливими аспектами для забезпечення безпечних умов праці та запобігання небезпеці для працівників і оточуючого середовища. Виконання всіх вимог законодавства та стандартів у цій галузі є обов'язковим і сприяє покращенню умов праці та запобіганню надзвичайних ситуацій.

Розрахунок системи вентиляції та освітлення у виробничому приміщенні є необхідним етапом для забезпечення безпеки працівників і оптимальних умов для виробництва. Важливо враховувати всі особливості виробничого процесу та виробничого приміщення для досягнення найкращого результату у забезпеченні безпечних умов праці.

Завданням керівництва є постійне покращення системи охорони праці та безпеки, вивчення і впровадження новітніх технологій та методів для забезпечення найвищого рівня безпеки на зерноочисних підприємствах і токах.

Усвідомлення важливості охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях допомагає знизити ризики та небезпеки на виробництві, зберегти здоров'я працівників і запобігти виникненню надзвичайних подій. Важливо регулярно перевіряти та оновлювати системи вентиляції та освітлення, дотримуватися всіх вимог стандартів і законодавства, тим самим забезпечуючи безпеку працівників і успішне функціонування зерноочисних підприємств і токів.



## 6 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 6.1 Організація проведення дослідження

Було виявлено, що розробка технології сепарації зернової суміші і аеродинамічного сепаратора має значний науковий і практичний внесок до технології підготовки зерна і насіння до зберігання і подальшої переробки.

Згідно з метою наших досліджень, нашим основним завданням є вдосконалення технології сепарації зернової суміші і аеродинамічного сепаратора з метою підвищення їхньої технологічної цінності.

Для досягнення поставленої мети був розроблений відповідний план дій, який наведено в таблиці 6.1. відповідно до нашої цілі.

Таблиця 6.1 – План наукових досліджень

| Етап роботи | Назва роботи   | Експозиція робіт $t_{ij}$ , дн. |
|-------------|--|---------------------------------|
| 1-2         | Розробка концепту досліджень   | 4                               |
| 2-3         | Літературний огляд та аналіз   | 11                              |
| 3-4         | Обґрунтування схеми виконання науково-дослідних робіт  | 3                               |
| 4-5         | Параметри об'єкту та методи виконання науково-дослідних робіт                                | 3                               |
| 5-6         | Підготовка зразків зернової суміші   | 4                               |
| 6-7         | Налаштування дослідного зразка аеродинамічного сепаратора та обладнання для реєстрації даних | 19                              |
| 7-8         | Вплив повітряного потоку на якість технологічного процесу сепарації                          | 3                               |
| 7-9         | Зміна якості зернової суміші під час аеродинамічні   | 3                               |

| Етап роботи | Назва роботи  | Експозиція робіт $t_{ij}$ , дн. |
|-------------|---|---------------------------------|
|             | сепарації   |                                 |
| 7-10        | Визначення енергоємності технологічного процесу сепарції зернової суміші          | 4                               |
| 7-11        | Обґрунтування вибору конструктивно-режимних параметрів аеродинамічного сепаратора | 7                               |
| 8-12        | Оброблення та аналіз даних виконання науково-дослідних робіт                      | 2                               |
| 9-12        |   | 2                               |
| 10-12       |   | 2                               |
| 11-12       |   | 3                               |
| 12-13       | Підготовка результатів науково-дослідних робіт до друку                           | 8                               |

Згідно з графіком робіт була розроблений мережевий граф, структура якої подана на рисунку 6.1.

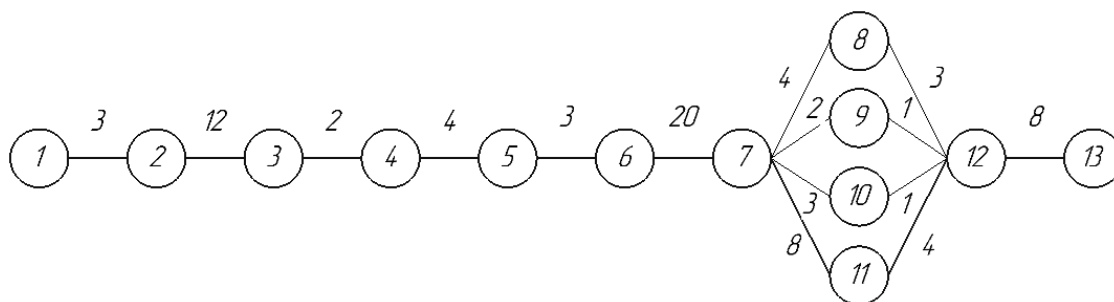


Рисунок 6.1 – Граф виконання робіт

## 6.2 Економічний розрахунок витрат на виконання науково-дослідних робіт

Витрати на матеріали, як основні, так і додаткові, розраховуються відповідно до формули:

$$M = \sum m_1 \cdot C_1, \quad (6.1)$$

де  $m_1$  – кількість матеріалу для досліджень;

$C_1$  – ціна матеріалу для досліджень, грн.

Результати розрахунків наведено в таблиці 6.2.

Установка для озонування знаходилась на підприємстві, тому її вартість не врахована

Таблиця 6.2 – Кількість і вартість витрачених матеріалів

| Назва                | Кількість | Ціна, грн | Сума, грн |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Насіння соняшника, т | 0,4       | 9600      | 2760      |
| Всього               |           |           | 2760      |

Витрати на заробітну плату учасників досліджень представлені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Розрахунок витрат на оплату праці

| Посада працівника               | Заробіток за місяць, грн | Заробіток за годину, грн | Кількість людино-годин | Сума, грн |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-----------|
| Керівник кваліфікаційної роботи | 9100                     | 54,16                    | 35                     | 1895,60   |
| Всього                          |                          |                          |                        | 1895,60   |

Розраховані нарахування на оплату праці становлять 417,03 грн.

Витрати на електроенергію обчислюються відповідно до формули::

$$E = M \cdot K \cdot T \cdot a, \quad (6.2)$$

де  $M$  – потужність встановленого електрообладнання, в кількості кВт;

$K$  – коефіцієнт потужності, що використовується ( $K = 0,9$ );

$T$  – тривалість роботи на обладнанні, год;

$a$  – ціна за електроенергію, грн/(кВт/год).

Витрати енергії на обробку даних на персональному комп'ютері також

обчислюються окремо:

$$E_2 = 1,3 \cdot 0,9 \cdot 290 \cdot 1,68 = 570,02 \text{ грн.}$$

Потужність аеродинамічного сепаратора складає 0,63 кВт. Враховуючи загальну тривалість одного дослідження – 1 год і їх кількості – 27 при триразовій повторності, отримуємо витрати електроенергії на проведення дослідження:  $1,3 \times 0,9 \times 51,05 \times 1,68 = 100,34$  грн.

Загальні витрати енергії складають:

$$E_{\text{заг}} = E_1 + E_2 = 100,34 + 570,02 = 670,36 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію обладнання визначаються за формулою::

$$A = \frac{\Phi \cdot H \cdot t}{100 \cdot 365}, \quad (6.3)$$

де  $A$  – відрахування на амортизацію, грн;  $\Phi$  – ціна обладнання, грн;  $H$  – норма річної амортизації, %;  $t$  – час проведення дослідження на обладнанні, днів.

Результати розрахунку наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Результати розрахунків витрат на амортизацію

| Обладнання               | Ціна, грн | Норма річної амортизації, % | Час роботи, днів | Затрати на амортизацію, грн |
|--------------------------|-----------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| Аеродинамічний сепаратор | 100000,00 | 15                          | 5                | 205,48                      |
| Персональний комп'ютер   | 12000,00  | 24                          | 36               | 284,05                      |
| Всього                   |           |                             |                  | 489,53                      |

Розрахунок накладних витрат виконується за формулою:

$$\frac{(1895,60 \cdot 80)}{100} = 1516,48 \text{ грн.}$$

Загальний кошторис всіх видів витрат приведено в табл. 6.5.

Згідно з розрахунками, основними факторами витрат під час проведення досліджень є витрати на оплату праці та закупку основних матеріалів.

Таблиця 6.5 – Загальний кошторис всіх видів

| Затрати                  | Вартість, грн. |
|--------------------------|----------------|
| Матеріали                | 2760,00        |
| Оплата праці             | 1895,60        |
| Нарахування оплати праці | 417,03         |
| Електроенергія           | 670,36         |
| Амортизація              | 489,53         |
| Накладні витрати         | 1516,48        |
| Всього                   | 7749,00        |

### 6.3 Розрахунок вартості науково-дослідних робіт

Загальна вартість науково-дослідних робіт розраховується:

$$Ц = C + \frac{P \cdot C}{100}, \quad (6.4)$$

де  $Ц$  – вартість науково-дослідних робіт, грн;

$C$  – витрати на науково-дослідних робіт, грн;

$P$  – рентабельність ( $P = 30$ ), %.

$$Ц = 7749,00 + \frac{30 \cdot 7749,00}{100} = 10073,7 \text{ грн.}$$

Вартість науково-дослідних робіт складає 10073,70 грн.

### 6.4 Висновки з розділу

Згідно з результатами розрахунків, найбільшими видатками під час проведення досліджень є оплата праці 1895,60 грн. та витрати на матеріали складають 2760,00 грн. Загальна вартість досліджень складає 10073,70 грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1 В результаті аналізу патентно-інформаційних досліджень була розроблена ефективна технологічна лінія для процесів очищення і розділення зернової суміші. Також, під час аналізу технічного обладнання технологічних процесів очищення та розділення зернової суміші, було проведено порівняння споживаної енергії вітчизняних і закордонних машин і установок. Показники споживаної енергії варіюються від 0,1 до 3,5 кВт·год/т в залежності від типу робочого органу.

2 Внаслідок числового моделювання процесу руху зернового матеріалу олійних культур під впливом повітряного потоку було встановлено, як змінюється розподіл кожної фракції насіння вздовж довжини області. Цей розподіл характеризується середнім значенням, середньоквадратичним відхиленням та коефіцієнтом заповнення. Відомо, як ці параметри залежать від ефективного діаметра насіння  $D_p$ , швидкості подачі повітря  $V$  та подачі насіння  $Q$ . На основі аналізу отриманих залежностей та за умови досягнення максимального значення коефіцієнта заповнення  $\theta$ , були визначені оптимальні параметри для даного процесу. Для насіння з ефективним діаметром  $D_p = 3,2$  мм оптимальні значення параметрів визначено як  $Q = 0,04$  кг/с для подачі насіння та  $V = 15,3$  м/с для швидкості повітря.

3 В результаті експериментальних досліджень, спрямованих на аналіз механіко-технологічного процесу сепарації насіння соняшнику під впливом повітряного потоку, була створена фізико-математична модель. Ця модель встановила зв'язок між коефіцієнтом розподілу  $\delta$  та споживаною потужністю  $P$ , залежною від подачі насіння  $Q$  і швидкості повітря  $V$ . Статистичний аналіз результатів показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичною та експериментальною залежностями під час варіювання значень факторів у визначеному діапазоні становить 0,96.

4 У процесі проведення досліджень було вирішено компромісну задачу, яка полягала в мінімізації споживаної потужності  $P$  експериментальною

установкою при одночасному досягненні максимального значення коефіцієнта розподілу  $\delta$ . Для досягнення цієї мети були встановлені такі значення параметрів: подача насіння  $Q = 0,09$  кг/с, швидкість повітря  $V = 15$  м/с, коефіцієнт розподілу  $\delta = 31,6$  %, і споживана потужність  $P = 0,63$  кВт.

5 На основі отриманих теоретичних та експериментальних даних був розроблений адаптивний аеродинамічний сепаратор, з урахуванням оптимальних режимних параметрів (швидкість повітря  $V$  і подача насіння  $Q$ ), використовуючи програмне забезпечення, яке базується на розробленому алгоритмі. Цей сепаратор дозволяє проводити процес сепарації насінневих сумішей соняшнику з високою продуктивністю ( $q = 115 \pm 8$  кг/год) та високою якістю (коефіцієнт розподілу  $\delta = 97,2 \pm 2,4$  %), відповідно до властивостей аеродинаміки.

6 Згідно з результатами розрахунків, найбільшими видатками під час проведення досліджень є оплата праці 1895,60 грн. та витрати на матеріали складають 2760,00 грн. Загальна вартість досліджень складає 10073,70 грн.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Aliiev E. (2019). Justification of constructive-mode parameters of a photo-electron separator of sunflower seeds. [Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів фотоелектронного сепаратора насіння соняшника]. Scientific Horizons, 5 (78): 23-30. DOI: 10.33249/2663-2144-2019-78-5-23-30.

2. Алієв Е. Б., Кутіщев В. Л. Очищення та розділення насіннєвого матеріалу олійних культур. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури. тенденції та перспективи» (1 листопада 2016 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. 2016. С. 134–135.

3. Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.

4. Шафоростов В. Д., Тюрин А. А., Перетягин Е. А. Основные направления совершенствования технологии подготовки семенного материала высших репродукций. Науч.-техн. бюл. ВНИИ масличных культур. 2005. Вып. № 2 (133). С. 58–63.

5. Шафоростов В. Д., Припоров И. Е. Технология послеуборочной обработки семян сои с использованием машин отечественного производства. Зернобобовые и крупяные культуры. 2014. № 4 (12). С. 119-122.

6. Агрегаты и комплексы для послеуборочной обработки и хранения зерна и семян: учебное пособие / А.В. Авдеев, В.С. Сечкин, В.Д. Галкин, М.А. Новиков, А.Ф. Кошурников, А.Д. Галкин, Л.И. Ерошенко; под общ. ред. В.Д. Галкина. – С. – Пб.: СПГАУ, 2005.–130 с.

7. Галкин В.Д. Исследование процессов движения и разделения компонентов семенной смеси в вибропневмооживленном слое./ В.Д.Галкин, А.А. Хавыев, В.А. Хандриков, К.А. Грубов, И.П. Менгалиев, К.С. Килин, И.Ю. Козловский. Научно-практический журнал. Пермский аграрный вестник 2013. №3 (3). С.20-23.



8. Дринча В.М. Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки. / В.М. Дринча. – Воронеж. Издательство НПО «МОДЭК», 2006. – 384с.
9. Зерноочистка – состояние и перспективы./ В.Ф. Федоренко, Е.Л. Ревякин – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2006.
10. Анискин В.И., Батарчук А.И, Весна Б.А. Промышленное семеноводство. Справочник под ред. И.Г Строны. – М.: Колос, 1980. – 267 с.
11. Окнин Б.С., Горбачев И.В., Терехин А.А., Соловьев В.М. Машины для послеуборочной обработки зерна. - М.:Агропромиздат, 1987. - 238 с.
12. Pertti Broas. Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes. Trans. VTT Symposium Virtual prototyping. Espoo, Finland, February 1 st, 2001. P. 73–81.
13. Bai C. Modelling of spray impingement processes. Ph.D Thesis. University of London. 1996.
14. Dominik Kubicki, Simon Lo. Slurry transport in a pipeline – Comparison of CFD and DEM models. Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. CSIRO, Melbourne, Australia (10-12 December 2012) 2012. P. 1–6.
15. Sang Won Han, Won Joo Lee, Sang Jun Lee. Study on the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage Cyclone by CFD Simulation. World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 6. 2012. P. 411–415.
16. Satish G., Ashok Kumar K., Vara Prasad V., Pasha Sk. M. Comparison of flow analysis of a sudden and gradual change of pipe diameter using fluent software. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. Vol. 2. 2013. P. 41–45.
17. Ахмадиев Ф. Г., Александровский А. А. Моделирование и реализация способов приготовления смесей. Журнал Всесоюзного хим. общества им. Д.И. Менделеева. Т. XXXIII. № 4. 1988.
18. Iguchi Manabu, Pegbusi Olusegun J. Basic Transport Phenomena in Materials Engineering. Springer. 2014. 260 p.

19. Иванец В. Н., Бакин И. А., Белоусов Г. Н. Энтропийный подход к оценке процесса смешивания сыпучих материалов. Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. №11. 2002.

20. Бакин И. А., Белоусов Г. Н., Саблинский А. И. Моделирование процесса смешивания энтропийно – информационным методом. Новые технологии в научных исследованиях в образовании. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ч. 1. Юрга. 2001.

21. Кафаров В. В., Дорохов И. И., Александровский А. А. Математическая модель кинетики смешивания бинарных смесей, содержащих твердую фазу. Докл. АН СССР. 1975. Т. 24. № 5. С. 1134–1137.

22. Кафаров В. В., Дорохов И. И., Арутюнов С. Ю. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов. Москва: Наука. 1985. 440 с.

23. Конструирование и расчет машин химических производств: Учебник для вузов / Ю.И. Гусев, И.Н. Карасев, Э.Э. Кольман-Иванов, Ю.И. Макаров, М.П. Макевнин, Н.И. Рассказов. Москва: Машиностроение. 1985. 406 с.

24. Bai C., Gosman A. D. Development of methodology for spray impingement simulation. SAE Technical Paper Series. 1995. 21 p.

25. Khalid M. Saqr, Hossam S. Aly, Mazlan A. Wahid, Mohsin M. Sies. Numerical Simulation of Confined Vortex Flow Using a Modified k-e Turbulence Model. CFD Letters. 2009. Vol. 1(2). P. 87–94.

26. Wallin S. Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynolds stress models. Doctoral thesis. Norstedts truckeri, Stockholm, Sweden. 2000. 124 p.

27. Алієв Е. Б., Яропуд В. М. Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця, 2017. №2 (97). С. 19 –23.

28. Алієв Е. Б. Результати чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією повітряного потоку. Вісник Житомирського національного агроекологічного університету. Житомир, 2017. №1 (58), т.1. С. 173–180.

29. Алієв Е. Б., Лабатюк Ю. М. Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2017. Вип. 180. С. 67–71.

30. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел / В.В. Белобородов – М.: Пищевая промышленность. – 1966. – 478 с.

31. Копейковский В.М. Технология производства растительных масел / В.М. Копейковский, С.И. Данильчук и др. – М.: Легкая и пищевая промышленность, – 1982. – 416 с.

32. Пешук Л. В. Біохімія та технологія оліє-жирової сировини. Навч. посіб. / Л. В. Пешук, Т. Т. Носенко – К. : Центр учбової літератури, 2011. – 296 с.

33. Фізико–механічні властивості сировини і продукції. Навчальний посібник / С.Д. Руднєв. Кемеровський технологічний інститут харчової промисловості. – Кемерово, 2004. – 117 с.

34. Физико-механические свойства растений, грунтов и удобрений (Методы испытаний, приборы, характеристики). – М.: Колос, 1970. – 424 с.

35. Mohsenin N.N. Physical properties of plant and animal materials / N.N. Mohsenin // New York: Gordon and Breach Science Publishers Inc. – 1980 – P. 51-87.

36. Aydin C. Physical properties of almond nut and kernel / C. Aydin // New Food Eng. – Vol. 60 – P. 315-320.

37. Gupta R.K. Physical properties of sunflower seeds / R.K. Gupta, S.K. Das // Food Eng. – 1997 – Vol. 66 – P. 1-8.

38. McCabe W.L. Unit operations of chemical engineering / W.L. McCabe, J.C. Smith, P. Harriott // McGraw-Hill Book Co, New York. – 1986.

39. Jain R.K. Properties of pearl millet / R.K. Jain, S. Bal // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1997 – P. 85-91.
40. Sahay K.M. Unit operations in agricultural processing / K.M. Sahay, K.K. Singh // Vikas Publishing House Pvt Ltd, New Delhi. – 1994.
41. Singh K.K. Physical properties of sunflower seeds / K.K. Singh, T.K. Goswami // Physical properties of cumin seed. J. Agric. Eng. – 1996 – Vol. 64 – P. 93-98.
42. Nimkar M.P. Some Physical properties of green gram / M.P. Nimkar, K.P. Chattopadhyay // Journal of Agricultural Engineering Research. – 2001– Vol. 80(2) – P. 183-189.