

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

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр" на тему:
Чисельне моделювання циклонного аеродинамічного сепаратора насіння

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

_____ Бабич Владислав Русланович

Керівник: _____ Лупко Кристина Олегівна

Рецензент: _____ Яропуд Віталій Миколайович

Дніпро, 2025

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«24» жовтня 2025 р.

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

Бабичу Владиславу Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Чисельне моделювання циклонного аеродинамічного сепаратора насіння

керівник роботи: Лупко Кристина Олегівна, доктор філософії

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«24» жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 05.12.2025 року

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

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

5. Перелік демонстраційного матеріалу

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Лупко К. О., старший викладач	24.10.2025	05.12.2025
Нормоконтроль	Івлєв В. В., доцент	05.10.2025	05.12.2025

7. Дата видачі завдання: 24 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

_____ **Бабич В.Р.** _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

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

[illegible]

Бабич В.Р. Чисельне моделювання циклонного аеродинамічного сепаратора насіння. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Дослідження присвячене вивченню процесів очищення насіння та аналітичному й чисельному моделюванню роботи циклонного аеродинамічного сепаратора. Розглянуто сучасні вимоги до чистоти насіння, методи сортування та технічні засоби безрешітної аеродинамічної сепарації. Проведено аналітичне дослідження руху повітряного потоку та компонентів суміші, розроблено методику чисельного моделювання, виконано оптимізацію параметрів сепаратора. Оцінено економічну ефективність впровадження удосконаленого обладнання та розглянуто питання охорони праці й безпеки в надзвичайних ситуаціях. Отримані результати дозволяють підвищити ефективність і якість післязбиральної доробки насіння, знизити втрати продукції та забезпечити економічну доцільність використання сучасних аеродинамічних сепараторів.

Ключові слова: насіння, чистота насіння, аеродинамічний сепаратор, циклонний сепаратор, післязбиральна доробка, чисельне моделювання, оптимізація, ефективність, технологія сортування, економічна доцільність.

Апробація. Бабич В.Р. (2025). Аналіз технічних засобів безрешітної аеродинамічної сепарації насіння. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 207–210.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	10
1.1 Вимоги до чистоти насіння	10
1.2 Методи очищення та сортування зернових і насіннєвих сумішей	12
1.3 Технічні засоби безрешітної аеродинамічної сепарації насіння	16
1.4 Висновки з розділу	21
2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ЦИКЛОННОГО АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА	24
2.1 Рух повітряного потоку і лінії току в циклонному аеродинамічному сепараторі	24
2.2 Модель руху компонентів суміші в циклонному аеродинамічному сепараторі	31
2.3 Висновки з розділу	38
3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛОННОГО АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА	40
3.1 Постановка задачі моделювання	40
3.2 Створення обчислювальної області і генерація об'ємної сітки.....	42
3.3 Вибір фізичних моделей	46
3.4 Верифікація симуляції	47
3.5 Планування чисельного експерименту	50
3.6 Методика статистичної обробки результатів	51
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛОННОГО АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА	53
4.1 Результати чисельного моделювання	53
4.2 Аналіз результатів чисельного моделювання.....	55
4.3 Оптимізація результатів чисельного моделювання	60
4.4 Висновки з розділу	61
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	63

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО ЦИКЛОННОГО АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА	67
ВИСНОВКИ	70
Література.....	72
Додатки	76

ВСТУП

У сучасному агропромисловому виробництві ефективна підготовка насіння є однією з ключових складових забезпечення високих врожаїв та якості продукції. Одним із важливих етапів підготовки є сепарація насіння за розміром, формою та масою, що дозволяє виділити кондиційні фракції та видалити пошкоджені або забруднені зернівки. Для цього широко застосовуються циклонні аеродинамічні сепаратори, які забезпечують ефективний поділ насіння під дією аеродинамічних сил.

Проте конструктивне вдосконалення та оптимізація режимних параметрів таких сепараторів є складним завданням, оскільки процес сепарації залежить від великої кількості факторів: геометрії пристрою, швидкості повітряного потоку, фізичних властивостей насіння та їх взаємодії у потоці. Експериментальні дослідження в повному обсязі є дорогими та трудомісткими, тому чисельне моделювання становить важливий інструмент для аналізу та прогнозування ефективності сепараторів.

Чисельне моделювання дозволяє дослідити вплив конструктивних і режимних параметрів на процес сепарації, оптимізувати робочі режими, мінімізувати втрати насіння та енергоспоживання. Сучасні методи обчислювальної гідродинаміки, моделювання руху частинок у повітряному потоці та використання спеціалізованого програмного забезпечення відкривають можливості для створення ефективних аеродинамічних сепараторів нового покоління.

Метою даної роботи є проведення чисельного моделювання циклонного аеродинамічного сепаратора насіння для оцінки впливу ключових параметрів на якість сепарації та енергоефективність процесу. Реалізація поставленої мети дозволить підвищити продуктивність сепараторів та забезпечити економічну та екологічну ефективність технологічних процесів підготовки насіння.

Задачі дослідження:

1. Дослідити сучасні вимоги до чистоти насіння та методи його очищення і сортування.
2. Провести аналітичне моделювання руху повітряного потоку та компонентів суміші в циклонному аеродинамічному сепараторі.
3. Розробити методику чисельного моделювання та оптимізації параметрів сепаратора для підвищення ефективності очищення.
4. Оцінити економічну ефективність впровадження удосконаленого циклонного сепаратора.
5. Визначити вимоги до охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при експлуатації сепаратора.

Об'єкт дослідження: процес очищення та сортування насіння олійних і зернових культур у циклонних аеродинамічних сепараторах.

Предмет дослідження: взаємозв'язок конструктивних і режимних параметрів циклонного сепаратора з якістю очищення насіння, ефективністю розділення суміші та економічною доцільністю використання обладнання.

1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Вимоги до чистоти насіння

Якість насіння є одним із ключових факторів, що визначає рівень урожайності сільськогосподарських культур, енергію проростання, силу росту рослин і стійкість до несприятливих умов. Одним із найважливіших показників, який характеризує якість насіннєвого матеріалу, є його *чистота*. Відповідно до вимог чинних стандартів України (зокрема ДСТУ 4138:2020, ДСТУ 2240-93, ДСТУ 2241-93), чистота насіння визначається як *відсотковий вміст насіння основної культури* в масі проби, очищеної від домішок. Цей показник є критичним не лише для посівного матеріалу, а й для ефективності процесів його подальшої переробки, зберігання та реалізації.

До складу насіннєвої суміші, крім насіння основної культури, входять різноманітні *домішки* – це можуть бути частки ґрунту, пил, шматочки стебел, листків, плодових оболонок, а також насіння бур'янів, культурних рослин інших видів або пошкоджене, недорозвинене насіння. Відповідно, ступінь чистоти насіння визначає рівень його підготовки до сівби, рівномірність розподілу в ґрунті та потенційну продуктивність.

Для забезпечення високої чистоти насіння застосовується багатоступенева система очищення, у якій *аеродинамічні сепаратори циклонного типу* відіграють провідну роль. Принцип дії такого обладнання ґрунтується на відмінності аеродинамічних властивостей частинок різної маси, форми та щільності. В процесі сепарації потік повітря відокремлює легкі домішки (лушпиння, пил, дрібне і щупле насіння) від важких, повноцінних зерен. Ефективність цього процесу визначає кінцеву чистоту насіннєвого матеріалу, яка повинна відповідати вимогам стандартів для конкретної культури.

Так, для більшості зернових культур (пшениця, ячмінь, овес) мінімальна чистота насіння має становити не менше 98–99 %, для бобових (горох, квасоля, соя) – 97–98 %, а для дрібнонасінних культур, таких як люцерна, конюшина чи ріпак, – не менше 95–97 %. Для технічних культур, зокрема соняшнику, ріпачки

чи гірчиці, вимоги до чистоти залежать від призначення насіння – посівного чи переробного. Посівне насіння повинно мати чистоту не нижче 98 %, тоді як для насіння, призначеного для промислової переробки, допустима чистота може бути на рівні 90–95 %, що визначається економічною доцільністю очищення.

Високий рівень чистоти насіння має не лише агротехнічне, але й *економічне значення*. При використанні неочищеного або недостатньо очищеного насіння знижується рівномірність висіву, збільшується конкуренція між культурними рослинами та бур'янами, що призводить до зниження врожайності. Крім того, домішки збільшують витрати на транспортування, сушіння та зберігання, а також можуть бути джерелом інфекцій і шкідників.

Під час експлуатації аеродинамічних сепараторів важливо враховувати вплив основних технологічних параметрів на показник чистоти. До таких параметрів належать *швидкість повітряного потоку, діаметр частинок насіння, кут нахилу каналів, геометрія циклону та продуктивність подачі матеріалу*. Оптиміальне співвідношення цих факторів забезпечує ефективне розділення фракцій за густиною й формою, що дає змогу отримати стабільно високу чистоту продукту без надмірних втрат повноцінного насіння.

Дослідження показали, що збільшення швидкості повітря до певного оптимального значення покращує очищення, але при перевищенні критичного порогу може спричиняти втрату важких фракцій, які виносяться разом із легкими домішками. Тому для кожної культури й типу сепаратора необхідно експериментально визначати оптимальні режими, що забезпечують баланс між чистотою й втратами насіння.

Крім технологічних аспектів, велике значення мають *гігієнічні вимоги до насінневих складів і очищувальних ліній*. Приміщення, де проводиться очищення насіння, повинні бути сухими, добре вентильованими, ізолюваними від джерел пилу й вологи. Забороняється змішування різних партій насіння без попереднього очищення та маркування. Оператор повинен контролювати стан фільтраційних систем і періодично очищати циклони від пилу та легких домішок, щоб уникнути повторного забруднення продукту.

Особливу увагу приділяють *контролю якості очищення*. Для цього застосовують методи лабораторного аналізу, що включають відбір середніх проб, зважування, просіювання та визначення складу домішок. На основі цих даних встановлюють фактичну чистоту насіння, яка повинна відповідати нормам стандартів. Якщо відхилення перевищують допустимі межі, проводиться повторне очищення або регулювання параметрів сепаратора.

Важливим елементом системи забезпечення якості є *калібрування насіння*, яке передбачає додаткове розділення за розмірами і масою. Це дозволяє не лише підвищити чистоту, а й забезпечити рівномірне висівання, що позитивно впливає на схожість і густоту сходів. У практиці сучасного насінництва калібрування часто поєднують з протруюванням і нанесенням захисно-стимулювальних покриттів, що потребує використання високоефективних аеродинамічних систем очищення.

У контексті екологічної безпеки важливо також забезпечити *мінімізацію втрат насіння та пилу* під час очищення. Сучасні циклонні сепаратори дозволяють ефективно відділяти частинки пилу, запобігаючи їхньому потраплянню в атмосферу. Це не лише покращує умови праці, а й сприяє збереженню навколишнього середовища.

Отже, вимоги до чистоти насіння визначаються комплексом чинників – *агротехнічних, технологічних, економічних і екологічних*. Забезпечення високої чистоти можливе лише за умови правильного підбору обладнання, оптимізації параметрів повітряного потоку, системного контролю якості та дотримання санітарних і технічних норм під час експлуатації аеродинамічного сепаратора. Високоякісне очищення створює передумови для отримання високих урожаїв, підвищує ефективність насіннєвого виробництва та забезпечує конкурентоспроможність аграрної продукції на внутрішньому і зовнішньому ринках.

1.2 Методи очищення та сортування зернових і насіннєвих сумішей

Розвиток технологій та технічних засобів для очищення і сортування зернової сировини, зокрема насіння соняшнику, має багатовікову історію.

Еволюція конструкцій зерносортувальних машин відбувалася паралельно з поглибленням наукових знань про фізико-механічні властивості насіння. Значний внесок у дослідження процесів післязбиральної доробки, очищення, калібрування й сепарації насіннєвого матеріалу зробили українські вчені, що відображено у численних наукових працях.

Методи поділу насіннєвих сумішей базуються на різниці у фізичних та механічних параметрах компонентів. Залежно від цих характеристик застосовують різні принципи поділу:

- *морфометричні параметри* (товщина, ширина та довжина зернівок) використовуються при роботі решітних машин і трієрів;
- *трибометричні властивості* поверхні та форми – у фрикційних пристроях і гірках;
- *густина, щільність або об'ємна маса* – у пневматичних і пневмовібраційних сепараторах;
- *аеродинамічні параметри* – в аспіраційних каналах, колонках, пневмосепараторах;
- *пружні властивості* – у відбивних сортувальних столах;
- *електрофізичні характеристики* – у сепараторах діелектричного типу або системах коронного розряду;
- *колір і оптичні ознаки* – у фотосепараторах;
- *комбіновані ознаки* – у багатофункціональних сортувальних машинах.

Основна мета проведення сепарації полягає в отриманні насіння високої якості, придатного для посіву або подальшої переробки. Для цього важливо встановити оптимальну кількість технологічних операцій та необхідний рівень оснащення машин.

Одним із перших етапів очищення є видалення легких домішок — полови, битих або недорозвинених зерен, залишків стебел. Для цього використовують *пневмосортувальні машини* (рис. 1.1, а). Такі установки переважно мають вертикальні повітряні канали, у яких насіннєва суміш,

падаючи під дією сили тяжіння, продувається висхідним потоком повітря.



Рисунок 1.1 – Класифікація обладнання, призначеного для очищення та сепарації зерна і насіння

Пневмосортувальні машини поділяють на *розімкнуті* (з викидом повітря у середовище) та *замкнуті* (з рециркуляцією очищеного повітря). У замкнутих системах вентилятор подає повітря повторно після очищення у спеціальній камері, що зменшує пиловиділення і потребу в додаткових фільтрах.

Ефективність видалення легких домішок такими установками становить у середньому 65–75 %.

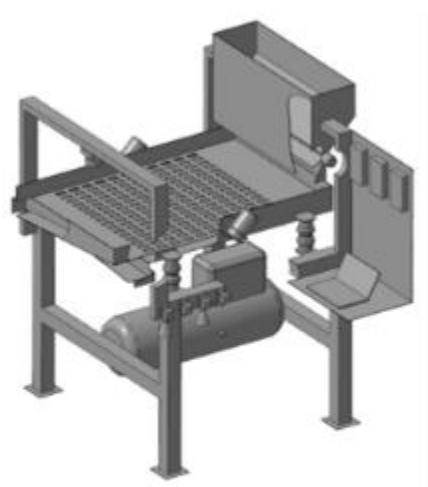
		
Розробка Алієва Е.Б.	Сепаратор ГОРИЗОНТ-К-130	Очисна-калібруюча машина Фадєєва
Решітні сепаратори (в)		
		
Розробка Алієва Е.Б.	Пневмосортувальний стіл ПСС-3,5	Вібропневмостіл ВПС
Вібропневматичні сепаратори (г)		

Рисунок 1.1 – Класифікація обладнання, призначеного для очищення та сепарації зерна і насіння (продовження)

Для видалення домішок, які відрізняються за довжиною, застосовують *трієри* (рис. 1.1, б). У суміші короткі домішки представлені насінням кукілю, горошку, подрібненими зернами, а довгі — зернами ячменю, вівсяго або вівса.

Трієр являє собою горизонтальний циліндр із чарунковою поверхнею, що обертається та вибірково захоплює зерно певної довжини. Якщо потрібно виділити коротші частки, застосовують *трієри-кукілевідбірники*, а для вилучення довших – *трієри-вівсюговідбірники*. Їхня ефективність сягає 80–90 % для коротких і 80–85 % для довших домішок, що забезпечує якісне очищення навіть за одного проходу через пристрій.

Легкі домішки, які легко відокремлюються просіюванням або потоком повітря, видаляються за допомогою *решітних і повітряно-сортувальних машин*, які часто об'єднуються у комбіновані агрегати (рис. 1.1, в). Матеріали, що мають більшу густину або відрізняються питомою масою, очищаються за допомогою *вібропневматичних методів* (рис. 1.1, г).

Ефективність процесу очищення зерна оцінюють за ступенем вилучення кожного типу домішок, оскільки кожна операція спрямована на усунення певного їх виду – від пилових і легких до важких та довших включень.

1.3 Технічні засоби безрешітної аеродинамічної сепарації насіння

Використання повітряних потоків для очищення й розділення зернових і насіннєвих сумішей має тривалу історію та значно вплинуло на формування сучасних принципів зерноочисних машин. Протягом розвитку технологій цей напрям отримав різні терміни – *пневматичне, повітряне, аеродинамічне або аспіраційне очищення*, – що відображає різноманіття підходів і конструкцій технічних засобів. Деякі типові схеми систем повітряного сортування, інтегровані в зерноочисні агрегати, наведено на рис. 1.2.

Під час роботи зерноочисних машин, що функціонують на основі повітряного потоку, важливим є правильне регулювання швидкості руху повітря у каналах сортування. Це дозволяє видаляти легкі домішки з насіннєвої суміші, не втрачаючи цінного насіння основної культури. Орієнтиром для налаштування є *швидкість витання* частинок, тобто мінімальна швидкість, за якої вони переходять у завислий стан.

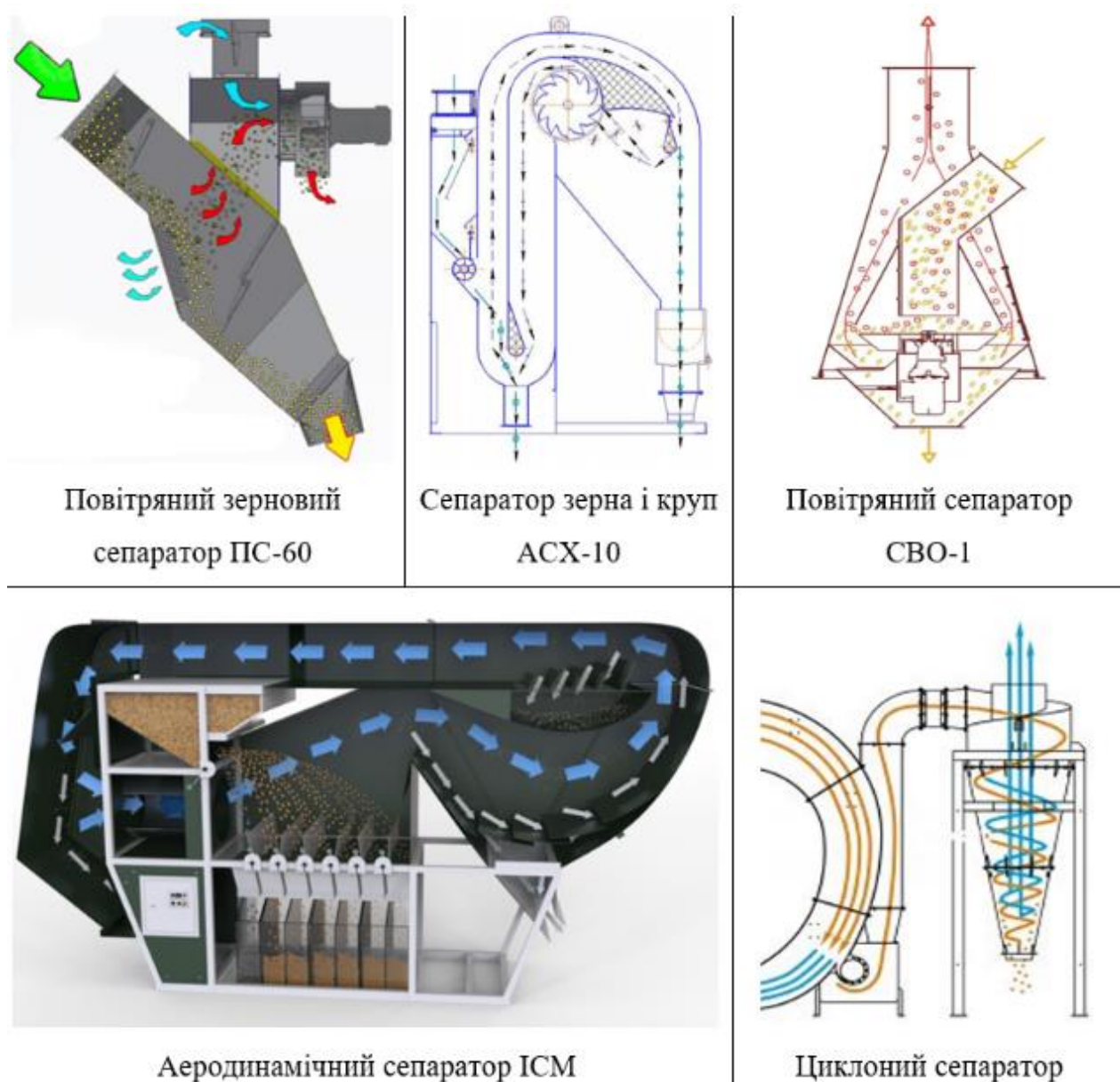


Рисунок 1.2 – Технічні засоби безрешітної аеродинамічної сепарації насіння

Принцип дії аеродинамічних машин ґрунтується на тому, що насіннєвий матеріал, потрапляючи у зону повітряного потоку, змінює свою траєкторію залежно від власних аеродинамічних властивостей (рис. 1.3). Перед цим зернова маса рівномірно розподіляється в бункері-приймачі, звідки надходить до зони сепарації. У практиці використовують сепаратори з різною орієнтацією повітряного потоку – вертикальною, похилою, горизонтальною або поперечною.

Повітряні сепараційні системи. Типові приклади конструкцій повітряних сепараторів включають: повітряний зерновий сепаратор ПС-60, сепаратор зерна і круп АСХ-10, аеродинамічний сепаратор ІСМ, циклонний сепаратор (рис. 1.2).

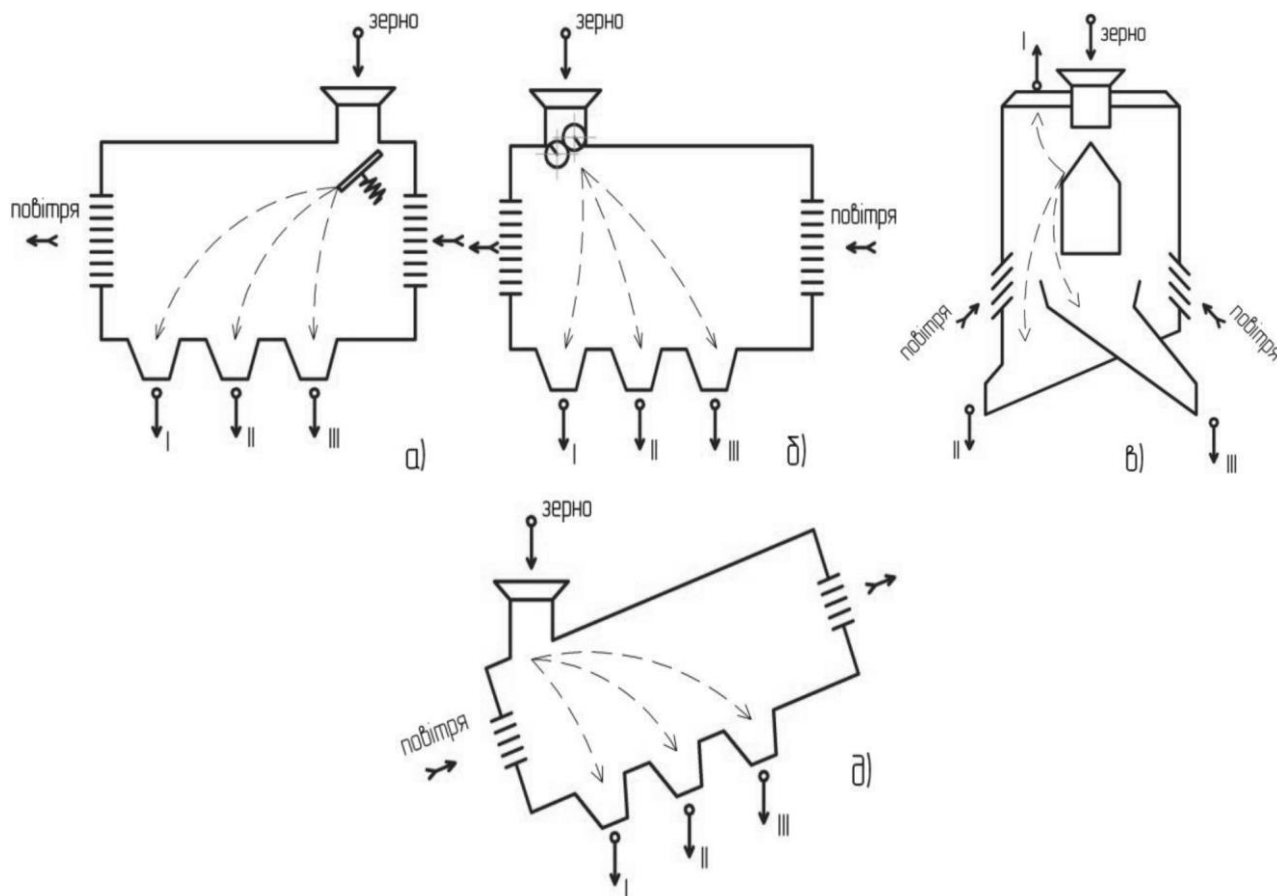


Рисунок 1.3 – Схеми безрешітних аеродинамічних сепараторів насіння

Основна відмінність аеродинамічних сепараторів від класичних пневмосортувальних машин полягає у використанні *горизонтального* замість *вертикального* потоку повітря. Такий принцип не створює нової фізичної основи процесу, однак дозволяє ефективно видаляти легкі включення та щупле зерно. Глибоке очищення за цією схемою, проте, є обмеженим.

Найбільш розповсюдженими залишаються повітряні сортувальні машини з *висхідним потоком повітря*. Вони відзначаються простою будовою, компактністю, надійністю й низькими експлуатаційними витратами. Завдяки

тривалішому контакту зернового матеріалу з повітряним потоком у вертикальних каналах забезпечується кращий поділ легких частинок.

У машинах безперервної дії час взаємодії суміші з повітрям залежить від швидкості подачі матеріалу, висоти й глибини каналу. Проте надмірна глибина каналу (понад допустимі межі) може погіршувати якість очищення через утворення турбулентних зон і нерівномірність розподілу швидкості потоку.

Конструктивні типи пневмоканалів. Сепаруючі пристрої з вертикальним повітряним потоком є найпоширенішими. Їх канали можуть мати різну форму поперечного перерізу: квадратну, прямокутну, кільцеву або круглу. Основні варіанти конфігурацій показано на рис. 1.4: а – конічна; б – похила з подвійним продуванням; в – прямокутна постійного перерізу; г – подвійна; д – клиноподібна; е – з відбивними козирками; ж – кільцева; з – з боковими отворами; і – із ситовим транспортером.

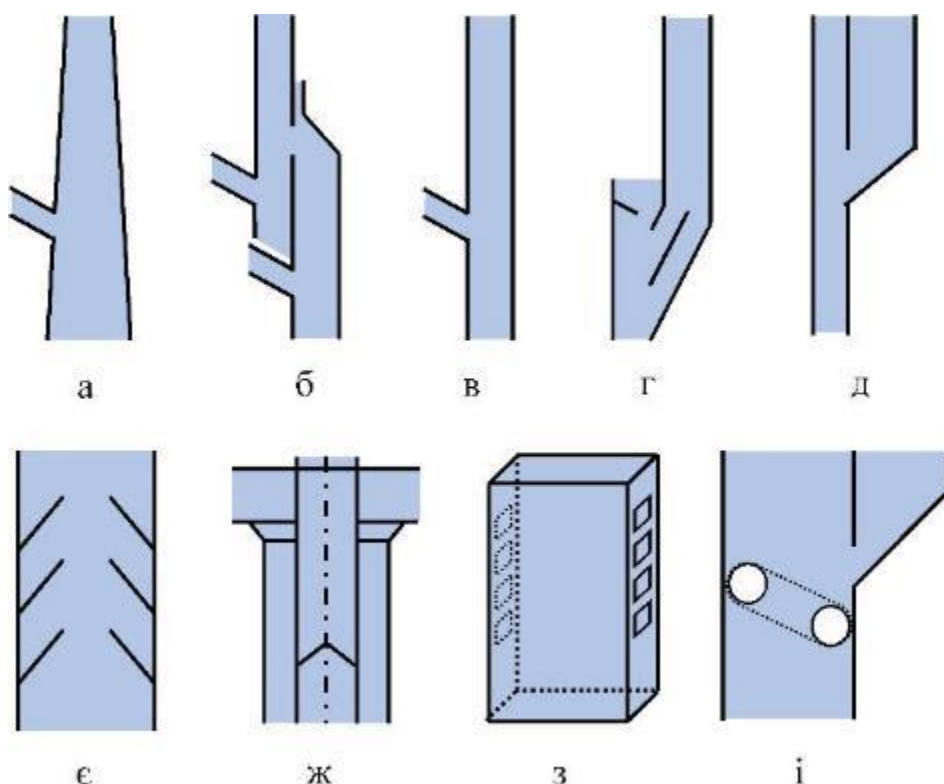


Рисунок 1.4 – Схеми пневмосортувальних каналів

Серед них найбільш ефективними вважають *кільцеві канали*, оскільки вони поєднують високу якість очищення, компактність та зручність компонування. Наявність вирівнювальних решіток сприяє стабілізації швидкості повітря. Основним недоліком таких систем є нерівномірність потоку по довжині каналу, яка виникає при локальному відсмоктуванні повітря.

Прямокутні канали, що використовуються у повітряно-решітних сепараторах, забезпечують рівномірне надходження матеріалу по ширині решета. Для зменшення неоднорідності потоку застосовують допоміжні елементи – перегородки, сітки та бар'єри, які сприяють турбулізації та стабілізації повітряного руху.

Круглі канали у промислових машинах використовують рідко через їх низьку продуктивність. Дослідження показали, що під час переходу повітря з прямої ділянки каналу до осадової камери змінюється швидкість уздовж його стінок: біля задньої вона зростає, біля передньої – зменшується, а в центрі залишається стабільною.

Занадто глибокі канали (понад 300 мм) часто знижують ефективність очищення через нерівномірність потоку. Водночас при введенні конструктивних рішень, що вирівнюють швидкість, якість сепарації значно покращується.

Одним із ключових чинників, що впливають на ефективність поділу, є *рівномірність швидкості повітряного потоку* у зоні сепарації. Порушення рівномірності спричиняє втрати насіння і погіршує точність відділення домішок, особливо за високої подачі матеріалу.

Сучасні напрями вдосконалення. Перспективним шляхом підвищення ефективності є створення *адаптивних аеродинамічних систем*, які автоматично узгоджують витрату насіння й швидкість повітря з використанням програмного керування. Це забезпечує стабільну продуктивність і високу якість розділення сумішей соняшнику за аеродинамічними характеристиками.

Одним із нових конструктивних рішень є впровадження *аеродинамічного стабілізатора*, розташованого під шаром насіння. Він створює псевдорозріджене середовище, зменшуючи внутрішнє тертя матеріалу, а над ним формується

буферна зона з рівномірною швидкістю потоку. Такий підхід істотно підвищує якість поділу у верхній частині каналу.

Для досягнення максимальної чистоти важливо, щоб насіння перебувало в *розрідженому шарі* – коли кожна частинка рухається незалежно, без взаємних зіткнень, що забезпечує ефективне відокремлення легких домішок від основної маси.

Теоретичні та чисельні дослідження. Огляд літературних джерел свідчить, що більшість теоретичних робіт зосереджені на аналітичному описі процесу сепарації, зокрема на розв'язанні систем диференціальних рівнянь. У сучасних дослідженнях дедалі ширше використовуються *методи чисельного моделювання*, зокрема *CFD* (Computational Fluid Dynamics) і *DEM* (Discrete Element Method).

Метод *CFD* дозволяє детально дослідити структуру повітряного потоку всередині сепаратора, визначити розподіл швидкості, тиску й турбулентності, що є ключовим для оптимізації конструкції. Серед моделей турбулентності найчастіше застосовують *k-ε*, *k-ω*, *SST* та *RANS*. Метод *DEM* описує рух і взаємодію твердих частинок із повітряним потоком, дозволяючи визначити їх траєкторії та швидкість. Поєднання *CFD* і *DEM* забезпечує комплексне уявлення про процес сепарації, враховуючи як властивості повітряного середовища, так і динаміку зернових частинок.

У подальших теоретичних дослідженнях доцільно застосовувати саме чисельне моделювання, яке дає можливість глибше аналізувати аеродинамічні процеси та підвищити ефективність розробки нових типів безрешітних сепараторів.

1.4 Висновки з розділу

1. Чистота насіння є одним із головних показників його якості, що безпосередньо впливає на урожайність, схожість і стійкість культур до несприятливих факторів. Вона визначається вмістом основного насіння у пробі після вилучення всіх домішок відповідно до стандартів (ДСТУ 4138:2020, ДСТУ

2240-93, ДСТУ 2241-93). Досягнення високого рівня чистоти забезпечується завдяки багатоступеневому очищенню, у якому важливу роль відіграють аеродинамічні сепаратори, що розділяють частинки за відмінностями у щільності, формі та масі. Оптимізація параметрів повітряного потоку, продуктивності подачі й конструкції циклону дозволяє отримати стабільну якість очищення без значних втрат насіння. Чистота посівного матеріалу для більшості культур повинна становити 97–99 %, що забезпечує рівномірний висів і високу урожайність. Недостатнє очищення спричиняє збільшення домішок, зниження ефективності використання ресурсів і поширення хвороб. Забезпечення нормативної чистоти можливе лише за умови раціонального підбору обладнання, підтримання належного санітарного стану приміщень, систематичного контролю якості та екологічної безпеки процесу. Отже, дотримання вимог до чистоти насіння є ключовим чинником підвищення ефективності насіннєвого виробництва, формування здорових посівів і конкурентоспроможності аграрної продукції.

2. Сучасні методи очищення та сортування зернових і насіннєвих сумішей ґрунтуються на відмінностях у фізико-механічних властивостях частинок і передбачають використання широкого спектра технологічних принципів – від механічного просіювання до оптичної та електрофізичної сепарації. Попри різноманіття обладнання, саме аеродинамічні (пневмосортувальні) сепаратори визнано найбільш універсальними та ефективними засобами очищення насіння. Їхня робота базується на різниці в аеродинамічних властивостях частинок, що дозволяє з високою точністю відокремлювати легкі домішки, биті та щуплі зерна без пошкодження основного матеріалу. Порівняно з решітними, трієрними чи фрикційними установками, аеродинамічні сепаратори забезпечують вищу продуктивність, стабільну якість очищення, менші енергетичні витрати та екологічну безпечність завдяки рециркуляції повітря і зниженню пиловиділення. Їх ефективність у видаленні легких домішок сягає 70–90 %, що робить їх ключовим елементом сучасних технологічних ліній післязбиральної доробки насіння.

3. Серед безрешітних аеродинамічних систем очищення та сепарації насіння найвищу ефективність демонструють циклонні сепаратори, які забезпечують стабільний повітряний потік, високу якість поділу частинок за аеродинамічними властивостями та зменшення втрат основного насіння. Їх використання дозволяє підвищити продуктивність процесу, знизити енерговитрати й забезпечити рівномірність очищення навіть за великої подачі матеріалу.

2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ЦИКЛОННОГО АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА

2.1 Рух повітряного потоку і лінії току в циклонному аеродинамічному сепараторі

Для аналітичного опису процесу важливо знати, як змінюється поле швидкостей, тиску та траєкторії руху повітря й частинок. Лінії току характеризують напрям і форму руху елементів середовища; у циклоні вони мають спіральний вигляд і залежать від співвідношення тангенціальної, осьової та радіальної компонент швидкості.

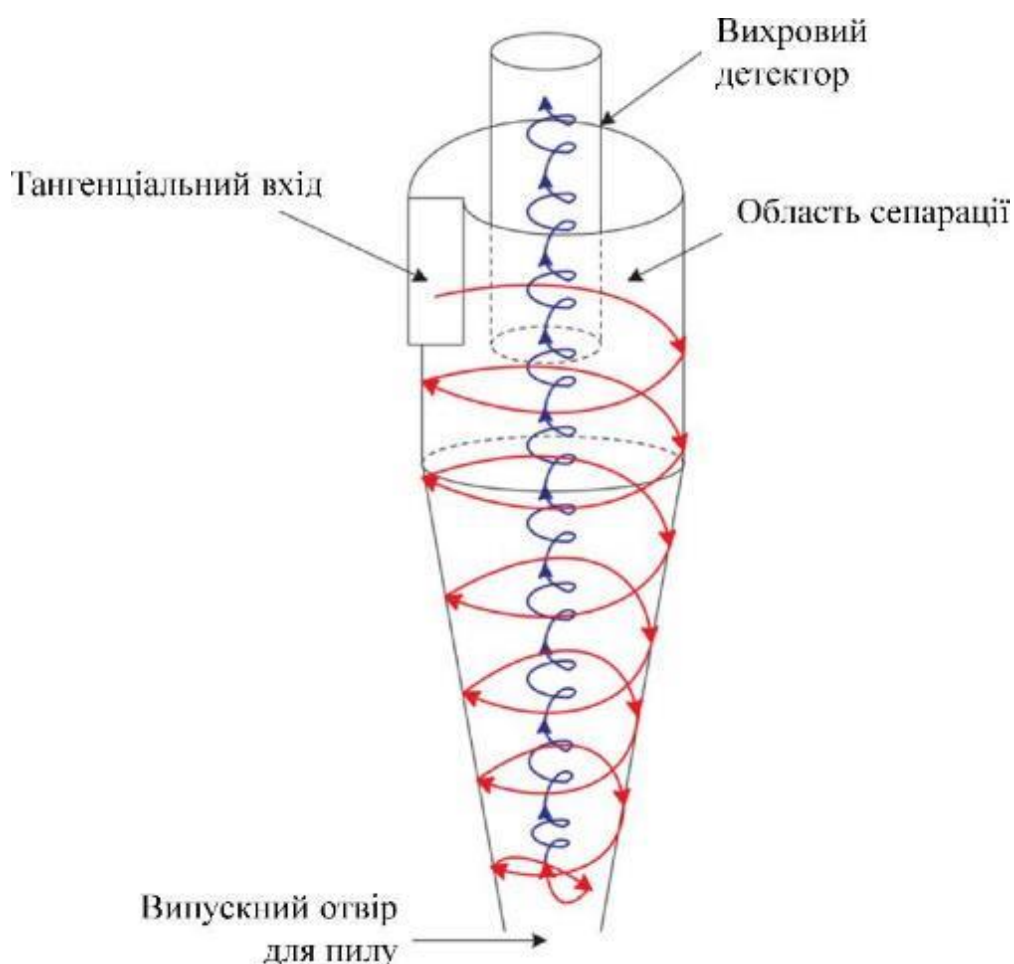


Рисунок 2.1 – Схема циклонного аеродинамічного сепаратора

Аналітична модель дозволяє зрозуміти основні закономірності структури потоку без складних чисельних обчислень і є базою для побудови спрощених інженерних розрахунків або початкових умов для CFD-моделювання.

Типовий циклонний сепаратор являє собою циліндричний корпус, який у верхній частині переходить у конічну. Потік повітря подається тангенціально через вхідний патрубок, утворюючи інтенсивний закручений рух. Вихрова течія створює область пониженого тиску вздовж осі циклона, у якій формується зворотний потік, що піднімається вгору.

Таким чином, усередині циклона одночасно існують два вихори:

- зовнішній – спрямований вниз уздовж стінки, має велику тангенціальну швидкість і є вільним (приблизно $(v_\theta \sim 1/r)$);
- внутрішній – спрямований угору, ближче до осі, із меншими швидкостями та «жорстким» законом обертання ($(v_\theta \sim r)$).

Частинки, що мають більшу густину, ніж повітря, під дією відцентрових сил переміщуються до стінки, осідають і виводяться через нижній пилозбірник.

Описати такий рух можна системою рівнянь для стаціонарного осесиметричного потоку в циліндричних координатах (r, θ, z) .

Рівняння безперервності. Для осесиметричного стаціонарного потоку $(\partial/\partial t = 0, \partial/\partial \theta = 0)$:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0.; \quad (2.1)$$

Це рівняння виражає збереження маси в кожному елементі потоку.

Рівняння руху (навігації) Ейлера. У проєкції на циліндричні координати маємо три рівняння.

Радіальна компонента:

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r}. \quad (2.2)$$

Тангенціальна:

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_r v_\theta}{r} \right) = 0, \quad (2.3)$$

якщо нехтувати третям і моментами в'язкості.

Осьова:

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (2.4)$$

У реальних умовах течія турбулентна, проте для побудови аналітичної моделі ці рівняння можна спростити, залишивши основні сили – тиск і центробіжні ефекти.

Рівняння радіального балансу. Основний баланс у радіальному напрямку встановлює рівновагу між градієнтом тиску та відцентровою силою:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{v_\theta^2}{r}. \quad (2.5)$$

Інтегрування цього рівняння визначає профіль тиску залежно від закону зміни $v_\theta(r)$.

Модель Rankine вихору. У більшості робіт для опису закрученого потоку застосовується модель комбінованого вихору (Rankine), у якій простір циклона поділяють на дві зони:

1. *Внутрішня зона (жорсткий вихор)* – поблизу осі:

$$v_\theta = \Omega r, \quad (2.6)$$

де Ω – кутова швидкість.

2. *Зовнішня зона (вільний вихор)* – ближче до стінки:

$$v_\theta = \frac{K}{r}, \quad (2.7)$$

де K – стала циркуляції.

Границі між зонами визначаються радіусом r_c , при якому v_θ безперервна:
 $K = \Omega r_c^2$.

Розподіл тиску. Підставляючи ці залежності у рівняння (радіальний баланс), отримаємо:

– Для жорсткого вихору $r \leq r_c$:

$$p(r) = p(r_c) + \frac{1}{2} \rho \Omega^2 (r^2 - r_c^2). \quad (2.8)$$

– Для вільного вихору $r > r_c$:

$$p(r) = p(R) + \frac{1}{2} \rho K^2 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right). \quad (2.9)$$

Таким чином, тиск зменшується від периферії до осі, утворюючи область пониженого тиску, яка спричиняє виникнення зворотного осьового потоку.

Рівняння лінії току. Лінія току визначається як геометричне місце точок, у яких вектор швидкості дотичний до траєкторії частинки. У стаціонарному осесиметричному полі швидкості:

$$\frac{dr}{ds} = v_r, \quad r \frac{d\theta}{ds} = v_\theta, \quad \frac{dz}{ds} = v_z, \quad (2.10)$$

де s – параметр уздовж траєкторії. Виключаючи s , отримуємо два диференціальні співвідношення:

$$\frac{d\theta}{dr} = \frac{v_\theta}{rv_r}, \quad \frac{dz}{dr} = \frac{v_z}{v_r}. \quad (2.11)$$

Ці рівняння описують лінію току в параметричному вигляді. Вони показують, що форма лінії визначається відношеннями між компонентами швидкості.

Проста модель швидкісного поля. Для побудови явної формули лінії току задамо апроксимації компонент швидкості.

Нехай радіальна швидкість зменшується лінійно зі збільшенням r :

$$v_r = -a r, \quad (2.12)$$

де $a > 0$ – коефіцієнт стискання потоку.

Осьову швидкість приймемо сталою:

$$v_z = b. \quad (2.13)$$

Тангенціальна швидкість задається законом Rankine:

$$v_\theta = \begin{cases} \Omega r, & r \leq r_c, \\ \frac{K}{r}, & r > r_c. \end{cases} \quad (2.14)$$

Виведення рівнянь лінії току. Внутрішня зона $r \leq r_c$. Підставимо в рівняння:

$$\frac{d\theta}{dr} = \frac{v_\theta}{rv_r} = \frac{\Omega r}{r(-ar)} = -\frac{\Omega}{a} \frac{1}{r}. \quad (2.15)$$

Після інтегрування:

$$\theta(r) = C_1 - \frac{\Omega}{a} \ln r. \quad (2.16)$$

Аналогічно для осьової координати:

$$\frac{dz}{dr} = \frac{v_z}{v_r} = \frac{b}{-ar} = -\frac{b}{a} \frac{1}{r}, \quad (2.17)$$

звідки:

$$z(r) = C_2 - \frac{b}{a} \ln r. \quad (2.18)$$

Елімінація змінної (r) між цими двома рівняннями дає зв'язок між θ і z :

$$\ln r = -\frac{a}{b}(z - C_2) \Rightarrow \theta = C_1 + \frac{\Omega}{b}(z - C_2). \quad (2.19)$$

Отже, у внутрішній зоні лінія току має форму гвинтової спіралі з постійним кроком:

$$r(z) = r_0 e^{\frac{a}{b}(z-z_0)}, \quad \theta(z) = \theta_0 + \frac{\Omega}{b}(z - z_0). \quad (2.20)$$

Це означає, що при русі вздовж осі z радіус потоку експоненційно зменшується, а кут повороту зростає лінійно – потік закручується навколо осі по спіралі, поступово наближаючись до центру.

Зовнішня зона $r > r_c$. Для вільного вихору $v_\theta = K / r$:

$$\frac{d\theta}{dr} = \frac{K / r}{r(-ar)} = -\frac{K}{ar^3}. \quad (2.21)$$

Інтегруючи, отримаємо:

$$\theta(r) = C_3 + \frac{K}{2ar^2}. \quad (2.22)$$

Для осьового напрямку:

$$\frac{dz}{dr} = \frac{b}{-ar} \Rightarrow z(r) = C_4 - \frac{b}{a} \ln r. \quad (2.23)$$

Таким чином, траєкторія в зовнішній зоні описується параметричними рівняннями:

$$\begin{cases} \theta(r) = C_3 + \frac{K}{2ar^2}, \\ z(r) = C_4 - \frac{b}{a} \ln r. \end{cases} \quad (2.24)$$

Лінія току в цій зоні має форму спіралі з різко зростаючим кутом обертання при зменшенні радіуса, що відповідає інтенсивному закручуванню потоку поблизу стінки.

Отримані залежності мають важливу інтерпретацію:

- У зовнішньому потоці частинки рухаються вниз по спіралі, стискаючись до осі й прискорюючись;
- У внутрішньому потоці повітря (зворотний потік) рухається вгору, утворюючи центральний стовп;
- Радіальний дрейф частинок визначається балансом між відцентровими силами та опором середовища.

Кутовий крок спіралі $\Delta\theta / \Delta z = \Omega / b$ характеризує інтенсивність закручування. Чим більше співвідношення Ω / b , тим щільніше «намотана» спіраль і тим довше частинка утримується в потоці, підвищуючи ефективність відділення.

Узагальнена інтегральна форма рівняння лінії току. Для довільних профілів швидкостей рівняння лінії току можна записати у вигляді:

$$\theta(r) = \theta_0 + \int_{r_0}^r \frac{v_\theta(\tilde{r}, z(\tilde{r}))}{\tilde{r} v_r(\tilde{r}, z(\tilde{r}))} d\tilde{r}, \quad (2.25)$$

Ці вирази мають універсальний характер і використовуються в чисельних методах або для побудови спіральних траєкторій частинок, якщо відомі емпіричні або розраховані профілі швидкостей.

Практичне значення і приклад розрахунку. Якщо взяти типові параметри промислового циклона:

- радіус корпусу ($R = 0,25$) м,
- довжина робочої зони ($L = 0,8$) м,
- середня осьова швидкість ($b = 5$) м/с,
- кутова швидкість закручування ($\Omega = 150$) с^{-1} ,
- коефіцієнт стискання ($a = 0,5$) с^{-1} ,

то з рівняння $r(z) = r_0 e^{-(a/b)z}$ отримуємо, що за довжину циклона радіус потоку зменшується у $\exp(-(0.5/5) \cdot 0.8) \approx 0.92$ рази – тобто відбувається помітне наближення траєкторії до осі. Водночас кутовий зсув за ту саму відстань дорівнює:

$$\Delta\theta = \frac{\Omega}{b} L = \frac{150}{5} \times 0.8 = 24 \text{ рад} \approx 3.8 \text{ оберти} \quad (2.26)$$

Таким чином, частинка робить кілька обертів навколо осі під час спуску, що добре узгоджується з експериментальними візуалізаціями потоків у циклонах.

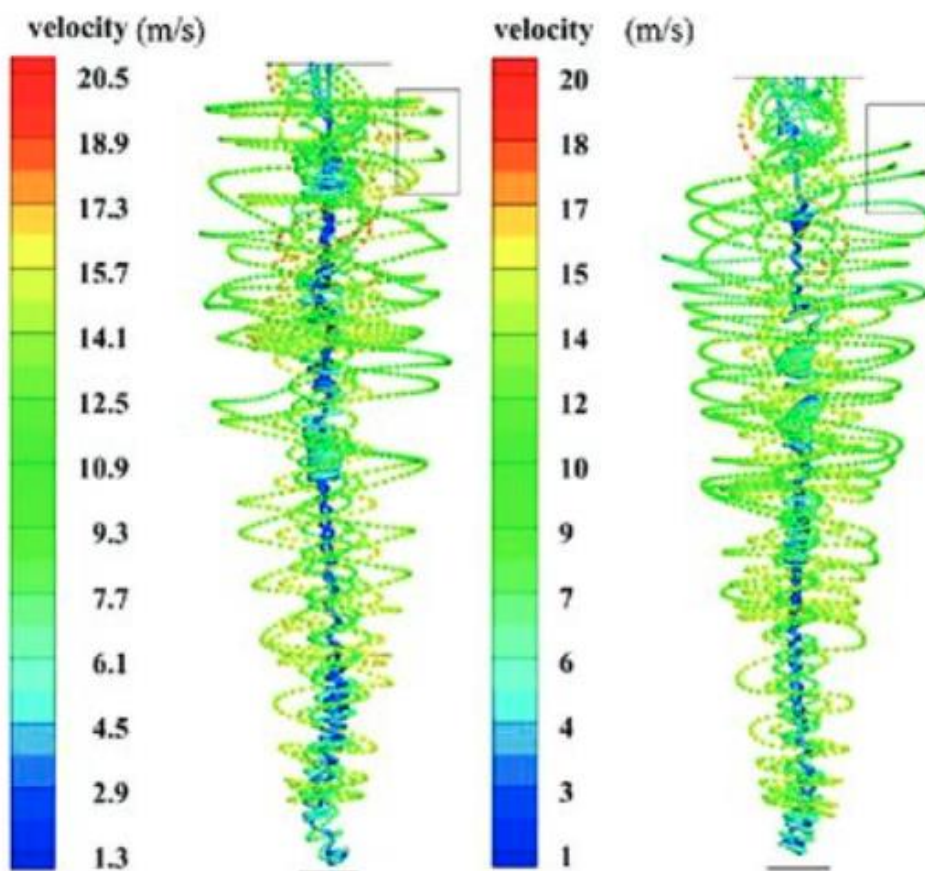


Рисунок 2.2 – Лінія току в циклонному аеродинамічному сепараторі

Використання результатів для розрахунку траєкторій частинок. Для моделювання руху частинок у двофазному потоці повітря–зерно або повітря–пил аналітична лінія току слугує базовою траєкторією. Радіальний дрейф частинки можна описати рівнянням:

$$v_{p,r} = \tau_p \frac{v_{\theta}^2}{r}, \quad (2.27)$$

де $\tau_p = \rho_p d_p^2 / 18\mu$ – характеристичний час гальмування (формула Стокса).

2.2 Модель руху компонентів суміші в циклонному аеродинамічному сепараторі

Розглядаємо циклонний сепаратор, у якому протікає газова фаза (повітря) і дисперсна фаза (тверді частинки або краплі). Компоненти суміші відрізняються за розміром (d_p), густиною (ρ_p) та концентрацією (n). Поток – турбулентний, осьово-симетричний, з тангенціальною компонентою.

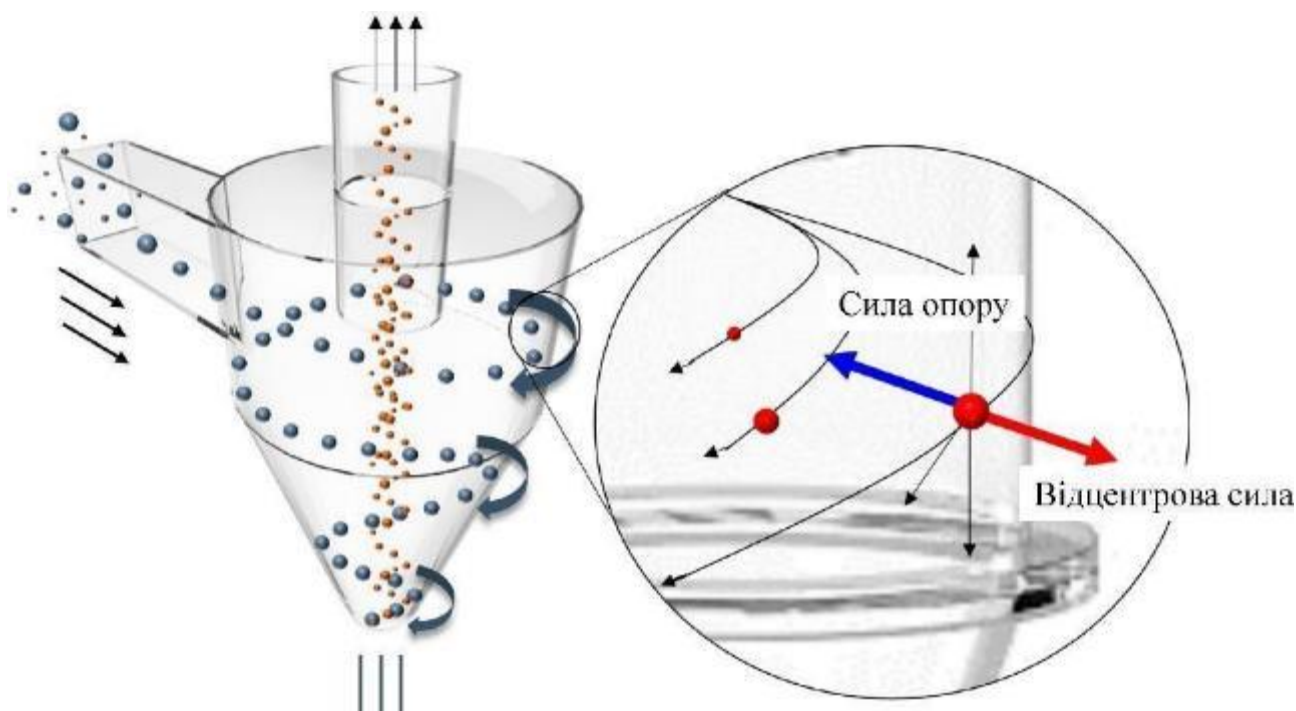


Рисунок 2.3 – Схема руху компонентів суміші в циклонному аеродинамічному сепараторі

Розрізняємо режими взаємодії фаз:

- частинки не впливають на повітря (низька масова фракція);
- зворотній вплив частинок на поле повітря (середня концентрація);
- враховуються зіткнення частинок між собою (густі пульпи).

Загальні припущення:

1. Фазова густина газу (ρ) відома, властивості постійні.
2. Частинки сферичні еквівалентно (для аналітичних формул), хоча модель дозволяє нетопологічні корекції.
3. Температурні ефекти і фазові перетворення (випаровування) не розглядаються, хіба що явніть просять.
4. Турбулентність закривається RANS моделями (k – ϵ , k – ω) або LES; для лагранжевих частинок треба модель турбулентної дисперсії.

Моделі фаз: Euler–Lagrange (частинки як індивідуальні трекові об'єкти).

Підхід: газ – як безперервне середовище (RANS/LES), частинки – як окремі Lagrangian траєкторії. Підходить, коли кількість частинок не надто велика або коли потрібно статистично відтворити розподіл розмірів і індивідуальні траєкторії.

Рівняння руху частинки:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_D + F_G + F_A + F_L + F_{\text{other}}, \quad (2.28)$$

де $m_p = \pi \rho_p d_p^3 / 6$ – маса частинки; F_D – сила опору (drag); $F_G = m_p g$ – сила ваги; F_A – сила доданої маси (важлива для рідинних частинок/швидких прискорень); F_L – підйомна сила (Saffman) при градієнтах швидкості; F_{other} – електростатичні/магнітні/керування (якщо є).

Сила опору (узагальнена):

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_p |u - v_p| (u - v_p), \quad (2.29)$$

де $A_p = \pi d_p^2 / 4$, u – локальна швидкість газу, C_D – коефіцієнт опору, який залежить від числа Рейнольдса частинки $Re_p = \rho d_p |u - v_p| / \mu$.

Поширений варіант (C_D):

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), & Re_p < 1000, \\ 0.44, & Re_p \geq 1000. \end{cases} \quad (2.30)$$

Спрощення (мале Re_p):

$$F_D \approx 3\pi\mu d_p (u - v_p). \quad (2.31)$$

Тоді характерний час гальмування:

$$\tau_p = \frac{m_p}{3\pi\mu d_p} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}. \quad (2.32)$$

Рівняння руху (спрощене, Стокс):

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{u - v_p}{\tau_p} + g. \quad (2.33)$$

Модель турбулентної дисперсії: додають випадковий (стохастичний) член або використовують модель концентрації вихрової швидкості:

$$dv_p = \dots + u', dt, \quad u' - \text{стохастична турбулентна флуктуація (RMS з } k). \quad (2.34)$$

Переваги: точність індивідуальної траєкторії, легко ввести полірасподіл. Недоліки: дорожче обчислювально при великій кількості частинок; у високих концентраціях потрібно враховувати зворотній вплив і зіткнення.

Euler–Euler (обидві фази як суцільні середовища). Підхід: кожна фаза описується своїми рівняннями безперервності та руху. Підходить для густих потоків або коли число частинок дуже велике.

Рівняння масової неперервності для газу та твердих часток (фаза k):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k) = \sum S_k, \quad (2.35)$$

де α_k –об'ємна фракція фази k $\sum \alpha_k = 1$, ρ_k –густина фази, S_k – джерела/стоки (масообмін).

Рівняння імпульсу для фази k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k u_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k u_k) = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot T_k + \alpha_k \rho_k g + M_k, \quad (2.36)$$

де T_k – тензор в'язких/турбулентних напружень фази k , M_k – міжфазова сила.

Міжфазова сила (драг на одиницю об'єму):

$$M_{p \rightarrow g} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_p \rho C_D}{d_p} |u_p - u_g| (u_p - u_g), \quad (2.37)$$

(часто використовується для моно-дисперсного середовища).

Замикання: потрібно моделювати T_k , а також турбулентні взаємодії. Для твердих часток часто застосовують моделі гранулярного тиску (для високих α_p). Переваги: ефективна при великих об'ємних фракціях. Недоліки: потребує складних замикань і чисельної стабілізації; складно розрізняти діаметри (потрібен PBE).

Рівняння для концентрації і розподілу частинок. Концентрація (адвекція–дифузія для середньої концентрації $c(x, t)$

Якщо частинки дрібні і ведуть себе як пасивний скаляр з дрейфом тоді:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (cu) = \nabla \cdot (D_t \nabla c) + S, \quad (2.38)$$

де D_t – ефективний коефіцієнт турбулентної дифузії (часто $D_t \sim \nu_t / Sc_t$, Sc_t – турбулентне число Шмідта ($\sim 0,7-1,0$), S – джерела/стоки (наприклад, агрегація).

Для частинок з інерцією потрібно включати дрейфовий терм:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (cu_g + cv_{\text{drift}}) = \nabla \cdot (D_t \nabla c) + S, \quad (2.39)$$

де v_{drift} – середня радіальна/тангенціальна дрейфова швидкість (через відцентрову силу), наприклад з оцінки:

$$v_{\text{drift}} \approx \tau_p \frac{v_\theta^2}{r} \hat{e}_r. \quad (2.40)$$

Population Balance Equation (PBE) — розподіл по діаметру. Щоб врахувати полідисперсність $n(d, x, t)$, застосовують PBE:

$$\frac{\partial n(d)}{\partial t} + \nabla \cdot (n(d)u_p(d)) = B(d) - D(d) + \nabla \cdot (D_t(d) \nabla n(d)), \quad (2.41)$$

де B – джерела, D – втрати. Для практичних застосувань РВЕ дискретизують по класам розміру або використовують метод моментів.

Загальні рівняння (Lagrangian, з дрейфом Стокса). Рівняння кінематики:

$$\frac{dr}{dt} = v_{p,r}, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{v_{p,\theta}}{r}, \quad \frac{dz}{dt} = v_{p,z}. \quad (2.42)$$

Рівняння руху (спрощене, тільки drag Стокса + центробіжні/кінематичні члени):

$$\begin{aligned} \frac{dv_{p,r}}{dt} &= \frac{u_r - v_{p,r}}{\tau_p} + \frac{v_{p,\theta}^2}{r}, \\ \frac{dv_{p,\theta}}{dt} &= \frac{u_\theta - v_{p,\theta}}{\tau_p} - \frac{v_{p,r} v_{p,\theta}}{r}, \\ \frac{dv_{p,z}}{dt} &= \frac{u_z - v_{p,z}}{\tau_p} - g. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Тут центрпетаційний член $v_{p,\theta}^2 / r$ – радіальне прискорення у криволінійному русі; знак залежить від вибору осей (взагалі це відцентрове напруження назовні).

Легкі компоненти ($S_t \ll 1$) – частинка слідує потоку (стримлайни) + перше інерційне виправлення. Якщо (τ_p) дуже малий (легкі або дуже дрібні частинки), то швидкість частинки розгортається до газової швидкості за час ($\sim \tau_p$). В розпорядженні першого наближення (порядку τ_p^0):

Траєкторії компонент – це лінії току газу. Для класичної моделі поля, яку ми вже використовували (радіальна складова ($u_r = -a r$), осьова ($u_z = b$) – стала, маємо

– внутрішня зона (жорсткий вихор) $u_\theta = \Omega r$:

$$r(z) = r_0 \exp\left(-\frac{a}{b}(z - z_0)\right), \quad \theta(z) = \theta_0 + \frac{\Omega}{b}(z - z_0). \quad (2.44)$$

– зовнішня зона (вільний вихор) $u_\theta = \frac{K}{r}$:

$$\theta(r) = \theta_0 + \frac{K}{2a} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_0^2} \right), \quad z(r) = z_0 - \frac{b}{a} \ln \frac{r}{r_0}. \quad (2.45)$$

(цих виразів достатньо, якщо частинка практично «приліпла» до газу).

Для малих але скінченних (τ_p) середня радіальна дрейф-складова, яка додається до газової радіальної швидкості, оцінюється (у наближенні мала відносна швидкість у тангенціальному напрямку) як

$$v_{p,r} \approx u_r + \tau_p \frac{u_\theta^2}{r}. \quad (2.46)$$

(Це випливає з наближення $v_{p,r} \approx u_r + \tau_p \left(\partial_t u_r + (u \cdot \nabla) u_r + \frac{u_\theta^2}{r} \right)$ і при стаціонарному полі домінує відцентровий член u_θ^2 / r).

Тоді для внутрішньої зони $u_\theta = \Omega r$ отримуємо простий ОДУ для $r(z)$:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{v_{p,r}}{u_z} = \frac{-ar + \tau_p \Omega^2 r}{b} = -\frac{(a - \tau_p \Omega^2)}{b} r. \quad (2.47)$$

Це лінійне рівняння має інтеграл:

$$r(z) = r_0 \exp\left(-\frac{a - \tau_p \Omega^2}{b}(z - z_0)\right). \quad (2.48)$$

Інтерпретація / критерій:

– Якщо $a > \tau_p \Omega^2$ – показник від’ємний $\rightarrow r(z)$ зменшується з ростом z (частинка наближається до осі) – поведінка як у газу, але зі слабшою швидкістю згортання (інерція гальмує радіальне втягання).

– Якщо $a < \tau_p \Omega^2$ – показник стає додатний $\rightarrow (r(z))$ зростає (радіальне відштовхування назовні переважає) – частинка рухається назовні; це вже поведінка «важчих» компонентів при достатній інерції.

Кутова координата першого порядку при цьому якщо $v_{p,\theta} \approx u_\theta$ дає

$$\theta(z) \approx \theta_0 + \frac{\Omega}{b}(z - z_0). \quad (2.49)$$

Для зовнішньої зони $u_\theta = K / r$, при додаванні інерційного радіального терма $\tau_p u_\theta^2 / r = \tau_p K^2 / r^3$, рівняння для $r(z)$ дає

$$\frac{dr}{dz} = \frac{u_r + \tau_p \frac{K^2}{r^3}}{u_z} = -\frac{ar - \tau_p \frac{K^2}{r^3}}{b_{out}} \quad (2.50)$$

Його аналітичне інтегрування дає непряму (імпліцитну) залежність:

$$\int_{r_0}^{r(z)} \frac{r^3, dr}{ar^4 - \tau_p K^2} = -\frac{1}{b_{out}}(z - z_0); \quad (2.51)$$

Важкі компоненти ($S_t \gg 1$) — інерційна/кінетична поведінка. Якщо τ_p дуже великий (важкі, великі частинки), то drag не змінює швидкість частинки швидко: праворуч у рівняннях домінують прискорення та центробіжний член. У першому наближенні τ_p можна рахувати, що відносна швидкість частинки до газу слабка, отже $v_{p,\theta}$ приблизно сталий по часу (беремо значення, привнесене входом або початковим прискоренням) і тоді радіальна рівняння спрощується:

$$\frac{dv_{p,r}}{dt} \approx \frac{v_{p,\theta}^2}{r}. \quad (2.52)$$

Якщо початкова $v_{p,r}(0) \approx 0$, то для грубого порядкового оцінювання часу до досягнення стінки $R_w - r_0$ можна використати енергетичне наближення:

$$\frac{1}{2}(v_{p,r}(t))^2 \approx \int_{r_0}^{r(t)} \frac{v_{p,\theta}^2(r)}{r} dr. \quad (2.53)$$

При простому припущенні, що $v_{p,\theta}$ близько постійна (наприклад, взято близько до периферійного значення $u_\theta(R)$), інтеграл дає $\propto v_{p,\theta}^2 \ln(r)$. Твердо аналітичного простого лінійного виразу для $r(t)$ немає, але можна сказати: важкі частинки за короткий час набирають значну радіальну швидкість і швидко віддаляються до стінки (тому вони добре збираються на пилосбірнику).

Щоб мати конкретний аналітичний вираз у межах "важких", можна ввести моделювання із слабким, але не нульовим drag (перший порядок у $(1/\tau_p)$). Тоді рівняння для радіального руху можна наближено записати як:

$$\frac{dr}{dt} \approx v_{p,r}, \quad \frac{dv_{p,r}}{dt} \approx \frac{v_{p,\theta}^2}{r} - \frac{v_{p,r}}{\tau_p}. \quad (2.54)$$

Це другорядне ОДУ з характерним часом розгону $\sim \tau_p$. Для τ_p великого ми маємо швидке розгортання $v_{p,r}$ до наближеного значення, де центробіжний член врівноважується drag: $v_{p,r}^\infty \approx \tau_p \frac{v_{p,\theta}^2}{r}$. Тобто в стаціонарному режимі (швидке встановлення):

$$v_{p,r} \approx \tau_p \frac{v_{p,\theta}^2}{r} \quad (2.55)$$

Це співпадає з формою для малого S_t у виведенні $O(\tau_p)$, але тут τ_p велике $\rightarrow v_{p,r}$ дуже великий $\rightarrow$ швидке виведення на стінку.

Підсумковий критерій практичної сепарації: якщо для частинки з розміром d_p виконується

$$v_{p,r} t_{res} \% \Delta r = R_w - r_{inlet}, \quad (2.56)$$

тобто частинка встигає за час перебування у циклону доторкнутися стінки, то вона відділяється.

2.3 Висновки з розділу

1. Аналітичний опис руху повітряного потоку в циклонному аеродинамічному сепараторі дозволив встановити закономірності формування зовнішнього та внутрішнього вихорів. Зовнішній потік має характер вільного вихору з високими тангенціальними швидкостями, тоді як внутрішній рухається угору вздовж осі циклона, формуючи зону розрідження. Отримані рівняння описують розподіл тиску та швидкостей у жорсткому вихорі тиск зменшується квадратично, у вільному – логарифмічно. Лінії току мають форму гвинтових спіралей, параметри яких визначаються співвідношенням між кутовою, осьовою та радіальною швидкостями. Встановлено, що інтенсивність закручування потоку визначає тривалість перебування частинок у полі відцентрових сил і, відповідно, ефективність сепарації. Зі збільшенням інтенсивності вихору траєкторії ущільнюються, а ймовірність осідання важких частинок зростає.

2. Аналітична модель руху компонентів суміші показала, що ефективність розділення у циклонному аеродинамічному сепараторі визначається співвідношенням інерційних властивостей частинок, параметрів повітряного потоку та геометрії апарата. Повітря утворює закручений потік із осьовою, радіальною та тангенціальною складовими, що створює поле відцентрових сил. Рух частинок описується рівняннями Ньютона з урахуванням сил опору, ваги та підйому. Для дрібних частинок (малий час релаксації) траєкторії майже збігаються з лініями току газу. Великі або важкі частинки відчують значну дію відцентрових сил і переміщуються до стінки, де осідають.

З МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛОННОГО АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА

3.1 Постановка задачі моделювання

Потік всередині циклонного сепаратора насіння характеризується сильною завихреністю та тривимірними прикордонними шарами, що визначає складну гідродинамічну структуру повітряного потоку. Врахування цих ефектів є критично важливим для точного прогнозування поведінки насіння під час сепарації, оскільки від цього залежать ефективність поділу часток та концентрація компонентів на виходах сепаратора.

Для моделювання процесу використано метод обчислювальної гідродинаміки (CFD). На початковому етапі імпортується 3D-CAD модель циклонного сепаратора. Геометрія моделі враховує форму та розміри робочої камери, вихідних і вхідних патрубків, а також напрямок повітряного потоку. Після створення геометрії проводиться налаштування сітки, фізичних моделей та граничних умов.

Об'єм потоку всередині сепаратора розбивається на сітку із застосуванням комбінації методів: поверхневий ремешер (surface remesher), поліедральна сітка (polyhedral mesher) та призматичні шари (prism layer mesher). Поліедральна сітка дозволяє ефективно обробляти рециркуляційні потоки, що утворюються всередині циклонної камери, забезпечуючи стабільність і точність розрахунків.

Для моделювання турбулентності використано модель $k-\omega$ (K-Omega), яка добре описує завихрений потік, характерний для роботи циклонного сепаратора. Для забезпечення збіжності розрахунків симуляцію спочатку виконано у стаціонарному режимі без врахування кривини потоку, а потім у нестаціонарному режимі протягом 0,5 с із включеною кривинною корекцією.

Під час моделювання були визначені фізико-механічні властивості насіння соняшнику, які враховуються у розрахунках:

- ефективний діаметр частки $D_p = 3\text{--}7\text{ мм}$;
- щільність $\rho = 200\text{--}400\text{ кг/м}^3$;
- коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,5$;
- модуль Юнга $E = 0,2\text{ МПа}$;
- коефіцієнт тертя спокою $\mu = 0,8$;
- нормальний і дотичний коефіцієнти відновлення $e_n = e_t = 0,1$;
- коефіцієнт опору кочення $\xi = 0,3$.

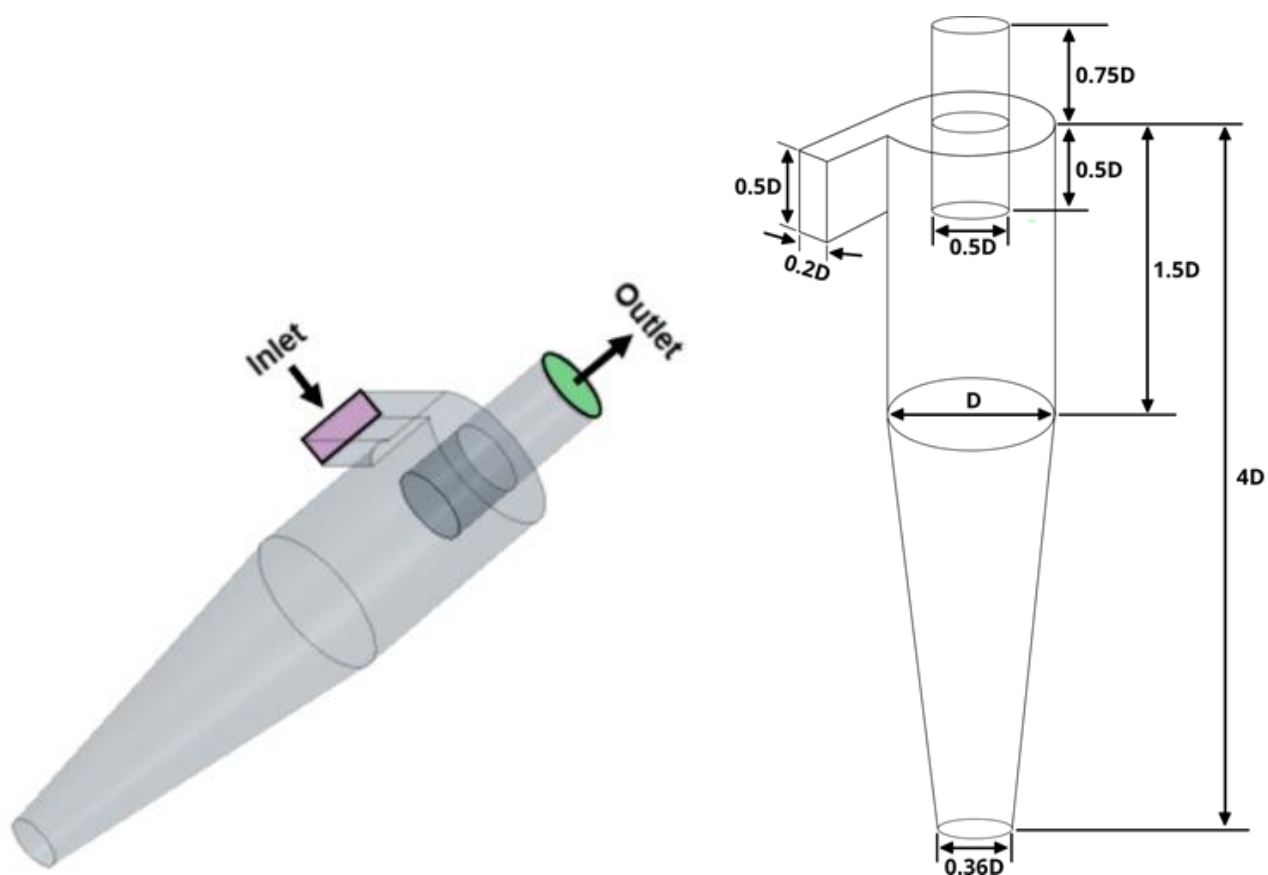


Рисунок 3.1 – Геометрія циклонного аеродинамічного сепаратора

Властивості середовища (повітря) прийняті наступні: динамічна в'язкість $\eta = 1,85508 \cdot 10^{-5}\text{ Па}\cdot\text{с}$, турбулентне число Прандтля $Pr_t = 0,9$, температура $T = 293\text{ К}$, тиск $P = 101325\text{ Па}$, прискорення вільного падіння $g = 9,8\text{ м/с}^2$. Розмір комірки сітки моделювання становив $0,001\text{ м}$.

Чисельне моделювання проводилося у два етапи. На першому етапі

досліджувалася поведінка насінневої суміші на малогабаритному циклонному сепараторі. Факторами чисельного моделювання виступали: швидкість повітряного потоку V , об'ємна маса насіння ρ_p та ефективний діаметр часток D_p . Потік насіння моделювався як суміш фракцій із різними діаметрами та масами, що дозволяло оцінити ефективність поділу легких і важких компонентів.

Для оцінки якості процесу сепарації використовувався масовий розподіл компонентів за об'ємною масою на виходах сепаратора $\xi(\rho)$. На основі результатів чисельного моделювання було встановлено залежності концентрації компонентів $\xi(\rho)$ та об'ємної маси важких ρ_h і легких ρ_l компонентів від параметрів повітряного потоку та властивостей насіння.

Застосування CFD-моделювання дозволяє не тільки оптимізувати конструкцію циклонного сепаратора, а й підвищити ефективність розділення насіння за аеродинамічними властивостями, зменшити втрати насіння та енерговитрати, що має важливе значення для впровадження обладнання у виробничих умовах.

3.2 Створення обчислювальної області і генерація об'ємної сітки

Для чисельного моделювання циклонного сепаратора насіння 3D-CAD модель була перетворена на окремі геометричні частини (geometry parts) та призначена відповідним обчислювальним областям. Після створення областей визначено типи граничних умов на межах потоку.

3D-CAD модель циклонного сепаратора перетворена на геометричну частину через команду New Geometry Part у дереві проекту Geometry > 3D-CAD Models > Cyclone. Стандартні параметри створення частини виявилися прийнятними. Всі об'єкти, об'єднані в моделі, відображаються у менеджері частин Geometry > Parts.

Обчислювальна область визначена шляхом призначення частин відповідним регіонам. Створено дві області – по одній для кожної частини

моделі. Для цього у вузлі Geometry > Parts виділені Main Body та Outlet Pipe, після чого призначено частини регіонам із створенням меж для кожної поверхні частини.

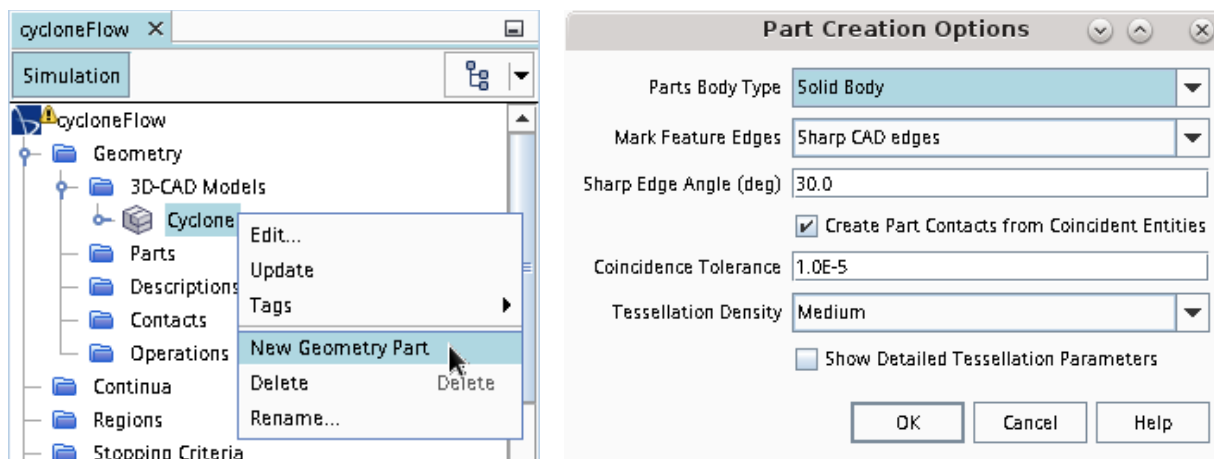


Рисунок 3.2 – Процедура створення області моделювання

Після цього сформовані дві області з граничними умовами, що визначають вхід, вихід та інтерфейс між областями. Для візуалізації областей створено Geometry Scene.

Перед генерацією об'ємної сітки встановлено типи граничних умов для меж потоку. Призматичні елементи створені лише на стінках, що відповідає рекомендаціям щодо використання призматичного ремешера (prism layer mesher).

Граничні умови встановлені наступним чином:

- Вхід повітряного потоку (Inlet) – тип Velocity Inlet, поверхня позначена червоним кольором;
- Вихід повітряного потоку (Outlet) – тип Outlet, поверхня позначена зеленим кольором.

Сторони інтерфейсу вихідної труби визначено як перегородку (Baffle Interface) через вузол Interfaces > Main Body/Outlet Pipe 2.

Проект симуляції збережено після завершення налаштувань. Дане налаштування дозволяє виконати генерацію об'ємної сітки та подальше

чисельне моделювання потоку насіння з урахуванням його фізико-механічних властивостей.

Після призначення геометричних частин обчислювальним областям проведено налаштування параметрів сітки для генерації поліедральної об'ємної сітки. Для моделювання використано поліедральний ремешер (Polyhedral Mesher) у поєднанні з призматичним шаровим ремешером (Advancing Layer Mesher), що дозволяє отримати сітку, придатну для прогнозування завихреного потоку всередині циклонного сепаратора.

Для точного опису завихреного руху повітряного потоку проведено локальне уточнення сітки у центральній частині циклонної камери та в зоні входу повітряного потоку.

Об'ємна сітка створювалась у такий спосіб:

1. У дереві проекту Geometry > Operations виконано команду New > Mesh > Automated Mesh.
2. У діалоговому вікні Create Automated Mesh Operation обрано частини Main Body та Outlet Pipe.
3. Вибрано наступні методи створення сітки: Surface Remesher – для поверхневих сіток; Polyhedral Mesher – для основної об'ємної сітки; Advancing Layer Mesher – для призматичного шару на стінках.
4. Налаштовано основні параметри сітки: базовий розмір елемента – 0,0125 м; цільовий розмір поверхні – 80 % від базового; мінімальний розмір поверхні – 30 % від базового; кількість призматичних шарів – 5, товщина призматичного шару – 0,012 м; коефіцієнт росту об'ємних елементів – 1,1; коефіцієнт росту поверхні – 1,3.

Для локального уточнення сітки у центральній частині циклонної камери створено циліндричну геометричну частину з параметрами: координати початку: $X = 0,0$ м, $Y = 0,0$ м, $Z = -0,3$ м; координати кінця: $X = 0,0$ м, $Y = 0,0$ м, $Z = 0,9$ м; радіус циліндра: 0,03 м.

Для уточнення сітки в зоні входу повітряного потоку створено блокову геометричну частину з координатами кутів: Кут 1: $[-0,21; -0,11; -0,01]$ м; Кут 2: $[0,023; -0,055; 0,11]$ м.

За допомогою цих об'ємних контролів визначено локальні умови сітки для всіх елементів геометрії, що потрапляють у контрольовані обсяги. Для циліндра та блока активовано налаштування поліедрального ремешера та призматичних шарів із індивідуальним розміром елементів, що складає 50 % від базового. Товщина призматичного шару в зоні входу встановлена на 0,008 м.

Після визначення всіх параметрів сітки виконано генерацію об'ємної сітки. Процес генерації контролювався у вікні виводу, а для візуалізації сітки використано Create/Open Scenes > Mesh. Згенерована об'ємна сітка дозволяє точніше відтворити завихрений потік насіння та повітря, забезпечуючи адекватне моделювання аеродинамічних процесів у циклонному сепараторі.

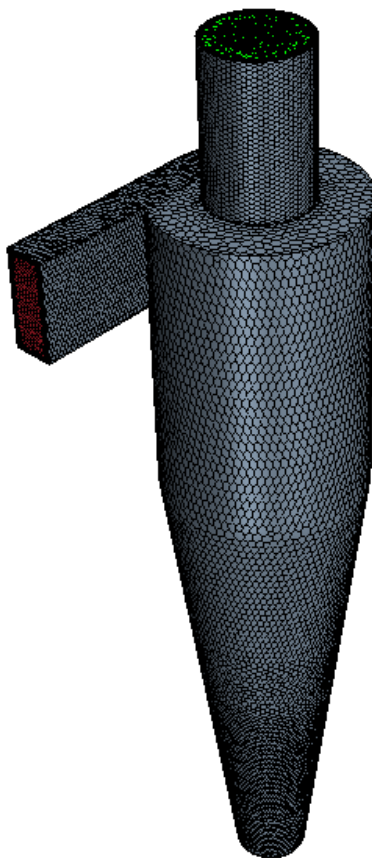


Рисунок 3.3 – Згенерована сітка циклонного сепаратора

3.3 Вибір фізичних моделей

Фізичні моделі визначають фізичні змінні та явища, що враховуються під час чисельного моделювання. Для моделювання роботи циклонного сепаратора насіння використано модель турбулентності K–Omega ($K-\omega$), що дозволяє забезпечити адекватне відтворення завихрених потоків при обмеженому часі розрахунку.

Для визначення фізичних моделей обрано наступні параметри: простір – тривимірний (Three-Dimensional); матеріал – газ; потік – розділений потік (Segregated Flow); рівняння стану – постійна густина (Constant Density); режим часу – стаціонарний (Steady); в'язкий режим – турбулентний (Turbulent); турбулентність – K–Omega SST (Menter); обробка стінок – автоматична для всіх y^+ (All y^+ Wall Treatment).

Параметри збережені для подальшого використання у симуляції.

Для моделювання передбачено рівномірний профіль швидкості на вході з заданою інтенсивністю турбулентності.

Граничні умови встановлені наступним чином: метод специфікації турбулентності – Intensity + Length Scale; інтенсивність турбулентності – 0,0045; масштаб турбулентності – 0,000525 м; швидкість потоку – 10 м/с.

Ці умови забезпечують стабільний і фізично обґрунтований потік всередині циклонної камери.

Для візуалізації швидкості потоку у перерізі циклонної камери створено скалярну сцену. Скалярна сцена дозволяє спостерігати рішення під час виконання симуляції.

Для створення перерізу встановлено площину: вхідні частини: Main Body та Outlet Pipe; початкова точка: [0, 0, 0] м; нормаль до площини: [0, 1, 0] м; дисплей: Scalar 1.

Для відображення сцени встановлено такі параметри: контур (Outline) – вимкнено; стиль контурів (Contour Style) – Smooth Blended; скалярне поле (Scalar Field) – Total Pressure > Lab Reference Frame; кольорова шкала –

збалансована синьо-червона (blue-red balanced).

Скалярна сцена дозволяє оцінити розподіл швидкостей і характер завихрень у циклоні, що є критично важливим для аналізу ефективності сепарації насіння за аеродинамічними властивостями.

3.4 Верифікація симуляції

Перед запуском симуляції визначено критерії зупинки розрахунку. Для прискорення процесу симуляцію виконано на багатоядерній машині з чотирма обчислювальними ядрами.

Налаштовано паралельне виконання: активовано опцію Parallel on Local Host з числом обчислювальних процесів = 4, після чого завантажено збережений файл моделі.

Для досягнення стаціонарного стану встановлено максимальну кількість ітерацій – 1500, що забезпечує стабільне рішення перед переходом до нестаціонарного моделювання. Симуляція виконана через панель Run, а процес розрахунку контролювався у вікні виводу. Автоматично сформовано дисплей залишків (Residuals), що дозволяє оцінити прогрес розв’язувачів.

Після завершення симуляції збережено результати стаціонарного рішення для порівняння з майбутнім нестаціонарним моделюванням. Створено Snapshot з назвою Steady для подальшого аналізу.

Для підвищення точності розрахунку активовано термін поправки кривизни в моделі турбулентності K–Omega. Внаслідок цього симуляція виконана у нестаціонарному режимі.

Налаштовано фізичну модель: час – Implicit Unsteady; K–Omega SST (Menter) – Curvature Correction On.

Для чисельного розв’язання змінено параметри: крок часу – $5 \cdot 10^{-4}$ с; коефіцієнт релаксації швидкості – 0,9; коефіцієнт релаксації тиску – 0,4; максимальний фізичний час розрахунку – 0,5 с; максимальна кількість внутрішніх ітерацій – 8.

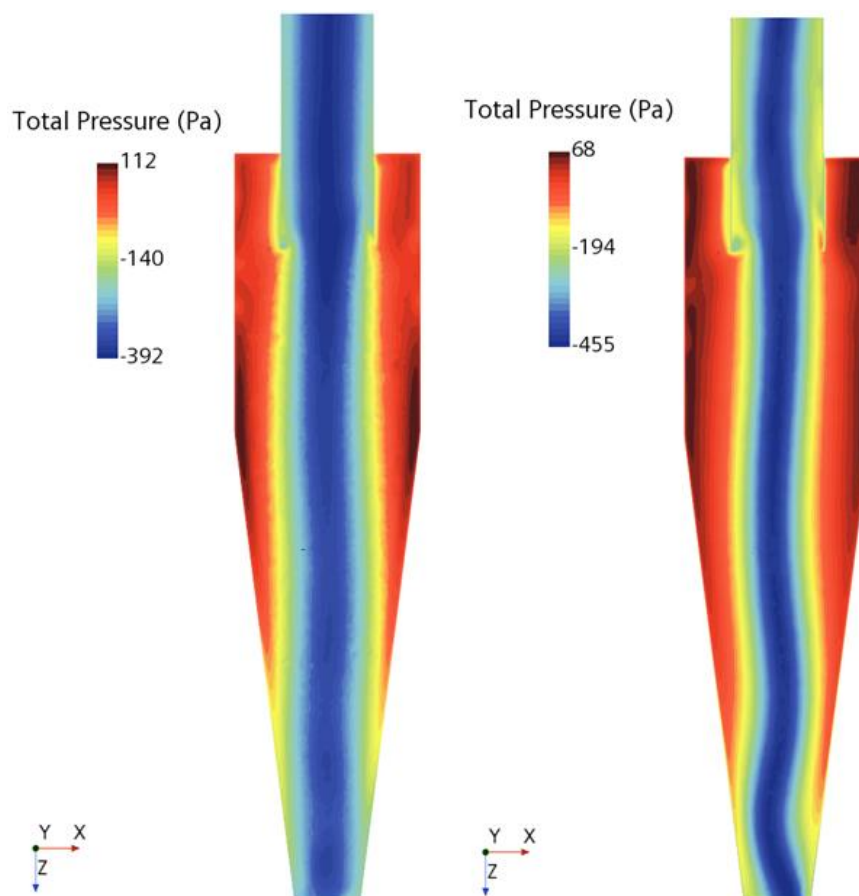


Рисунок 3.4 – Розподіл тиску в області сепаратора

Стаціонарне рішення використано як початкове для нестационарної симуляції. Симуляція виконана протягом 8000 ітерацій із зазначеними параметрами. Збережено файл симуляції для забезпечення повної історії розрахунку.

Результати нестационарного моделювання порівняно зі стаціонарним рішенням. Активація поправки кривизни дозволила уточнити форму центрального завихреного потоку та визначити його структуру.

Для візуалізації траєкторій руху повітряного потоку і насіння створено сцену Streamlines.

1. Створено Geometry Scene та перейменовано на Streamlines.
2. Створено streamline derived part, що відстежує лінії потоку від входу циклонної камери: входні частини: Main Body та Outlet Pipe; насіння

задається через вхідну граничну поверхню; роздільна здатність: $U = 2$, $V = 8$; дисплей: New Streamline Displayer.

3. Для сцени встановлено прозорість ліній – 0,3, режим відображення – Ribbons (стрічки).

4. Встановлено скалярне поле швидкості для відображення величини швидкості в лабораторній системі координат.

5. Анімація ліній потоку: режим анімації – Tracers; затримка між трейсерами – 6 с; розмір головки – 0,01; довжина хвоста – 1 с.

6. Для продовження ліній потоку до виходу збільшено параметр Maximum Propagation до 15.

Анімація ліній потоку показує напрямок та інтенсивність завихрень у циклонній камері, що є важливим для оцінки ефективності аеродинамічного сепарування насіння.

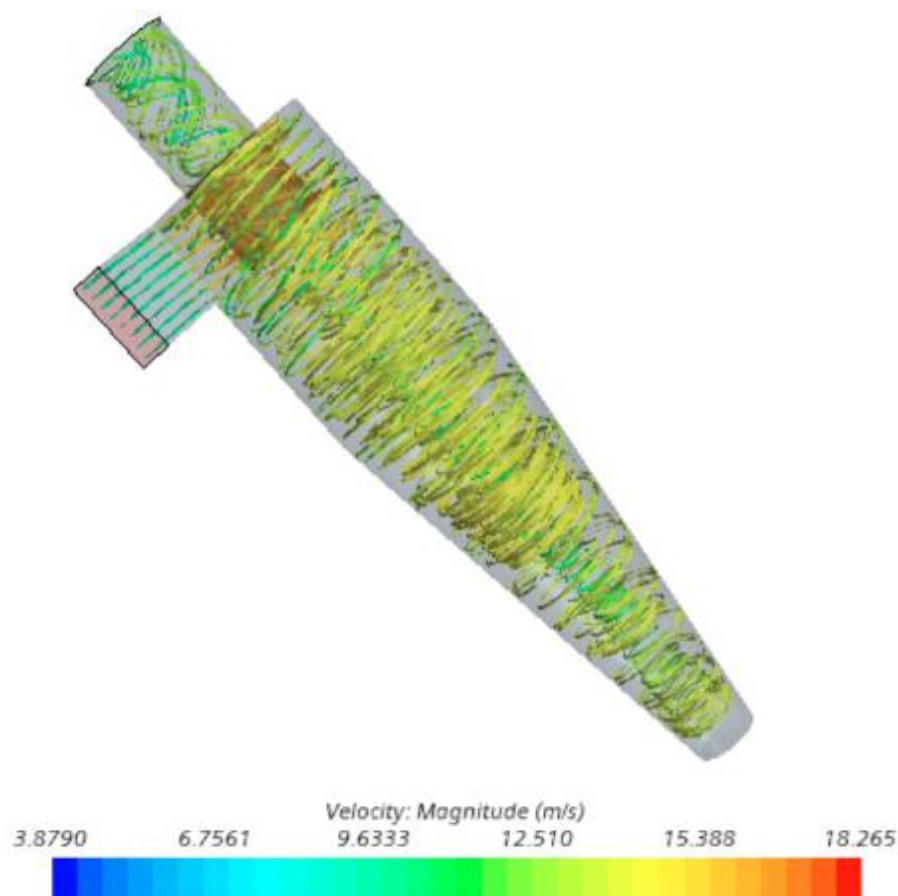


Рисунок 3.6 – Лінії потоку в області сепаратора

Симуляція та сцени збережені для подальшого аналізу та порівняння результатів.

3.5 Планування чисельного експерименту

Факторами чисельного моделювання виступали: швидкість подачі повітря (V), об'ємна маса насіння (ρ_p) та ефективний діаметр компонентів насінневої суміші (D_p).

Ефективний діаметр насінини соняшнику (D_p) визначався за формулою $D_p = 2(a \cdot b \cdot c)^{\frac{1}{3}}$. Геометричні розміри компонентів насінневої суміші соняшнику становлять: довжина ($2a = 8\text{--}15$) мм, ширина ($2b = 3\text{--}8$) мм, товщина ($2c = 2\text{--}4$) мм.

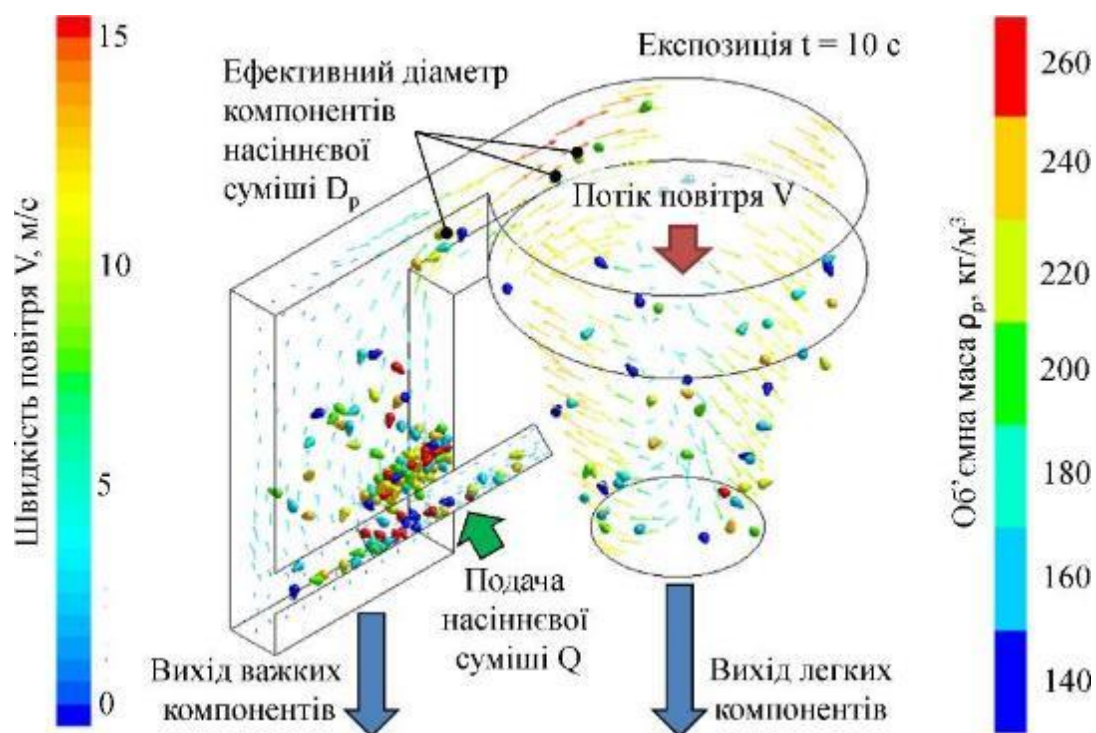


Рисунок 3.7 – Схема моделювання циклонного аеродинамічного сепаратора

На основі цих даних встановлено, що ефективний діаметр насінини (D_p) змінюється в межах 4–8 мм. Об'ємна маса насіння варіюється від 130 до

250 кг/м³ (що відповідає щільності 200–400 кг/м³). Потік маси насіннєвої суміші був розділений на 7 фракцій із однаковою кількістю часток у кожній, однаковим ефективним діаметром та об'ємною масою, що дозволяло забезпечити статистичну однорідність матеріалу для моделювання.

Чисельне моделювання виконувалося за повним факторним планом із трьома факторами на двох рівнях, що дало загальну кількість дослідів 24. Такий підхід дозволяє повністю охопити комбінації факторів і визначити вплив кожного з них на результати сепарації.

Критерієм оцінки ефективності сепарації обрано масовий розподіл компонентів за об'ємною масою на виходах важких і легких компонентів $\xi(\rho)$. Для кожного дослідів визначалися: концентрація компонентів певної об'ємної маси $\xi(\rho)$, об'ємна маса важких компонентів ρ_h , об'ємна маса легких компонентів ρ_l .

3.6 Методика статистичної обробки результатів

1. Попередня обробка даних:
 - усі результати чисельного моделювання у вигляді масового розподілу компонентів та об'ємної маси заносилися до електронної таблиці;
 - усунення явних помилок та аномалій у даних (наприклад, нереалістичні значення об'ємної маси).
2. Аналіз факторного плану:
 - для кожного фактора V , ρ_p , D_p розраховували середні значення та дисперсії результатів;
 - визначали основні ефекти факторів та їх взаємодії за методом ANOVA (аналіз дисперсії).
3. Побудова регресійних моделей:
 - за допомогою методу найменших квадратів побудовано рівняння регресії для залежності $\xi(\rho)$, ρ_h та ρ_l від факторів V , ρ_p та D_p ;
 - оцінено значущість коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента;

- перевірено адекватність моделей за критерієм Фішера.
- 4. Оптимізація та візуалізація:
 - побудовані поверхні відгуку для кожного вихідного показника;
 - виконано графічний аналіз впливу факторів на ефективність сепарації;
 - визначено оптимальні значення факторів для максимального відділення легких та важких компонентів насіння.

Такий підхід дозволяє не тільки оцінити ефективність процесу сепарації насіння в залежності від режимних параметрів, але й зробити статистично обґрунтовані висновки щодо впливу кожного фактора та їх взаємодій на результат.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛОННОГО АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА

4.1 Результати чисельного моделювання

Для оцінювання ефективності процесу розділення насінневої суміші соняшнику на важку та легку фракції було виконано чисельне моделювання у програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+. Результати представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати чисельного моделювання процесу сепарації
насінневої суміші на аеродинамічному циклонному сепараторі

№	D _p , мм	V, м/с	ξ (ρ , кг/м ³), %							ρ_h , кг/м ³	ρ_l , кг/м ³
			130	150	170	190	210	230	250		
1	4	7	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	199	259
2	4	8	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	96,6	198	257
3	4	9	99,9	99,9	99,9	99,9	97,7	93,1	77,6	192	248
4	4	10	99,9	99,9	98,8	91,0	86,1	63,2	29,6	180	242
5	4	11	99,9	95,4	91,2	75,5	54,4	25,9	6,3	168	229
6	4	12	93,6	87,6	71,4	40,1	17,4	5,2	0,1	156	217
7	4	13	91,1	67	33,8	11,5	1,0	0,1	0,1	147	206
8	4	14	58,9	26,9	8,2	0,9	0,1	0,1	0,1	146	200
9	6	7	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	98,8	199	259
10	6	8	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,3	91,3	198	258
11	6	9	99,9	99,9	99,4	99,3	93,6	85,5	60,8	194	249
12	6	10	99,9	99,9	98,8	91	73,4	44,6	19	185	243
13	6	11	99,9	94,4	84,3	59,2	39,4	14,8	3,1	174	232
14	6	12	90,1	79,5	53,2	25,6	8,7	2,6	0,1	163	220
15	6	13	71,7	43,6	19,7	5,7	0,5	0,1	0,1	154	211
16	6	14	36,2	15,5	4,6	0,4	0,1	0,1	0,1	148	204
17	8	7	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	97,7	199	259
18	8	8	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	98,8	86	199	259
19	8	9	99,9	99,9	98,9	98,8	89,5	78	44,1	197	252
20	8	10	99,9	99,9	98,7	91,1	60,8	26,1	8,3	189	244
21	8	11	99,9	93,5	77,3	43	24,3	3,6	0,1	179	235
22	8	12	86,7	71,4	35	11,2	0,1	0,1	0,1	167	225
23	8	13	52,3	20,2	5,6	0,1	0,1	0,1	0,1	156	217
24	8	14	13,4	4,2	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	149	207

Із таблиці видно, що при низьких швидкостях повітряного потоку (7–8 м/с) спостерігається повна або майже повна передача насінневої суміші через основний канал сепаратора. Для всіх діаметрів насіння при таких швидкостях значення $\xi(\rho)$ залишаються близькими до 100% у всьому діапазоні об'ємної маси 130–250 кг/м³. Це свідчить про недостатню відцентрову силу та слабкий аеродинамічний вплив потоку, що не забезпечує розділення компонентів за густиною.

Зі збільшенням швидкості повітря V від 9 до 14 м/с спостерігається поступове зменшення концентрації важких частинок у потоці, що виходить через легкий канал, тобто підвищується ефективність розділення.

При $V=9$ –10 м/с починається інтенсивне розділення: у легкому потоці концентрація частинок з високою густиною ($\rho = 230$ –250 кг/м³) знижується до 60–70%.

При $V=11$ –12 м/с процес стає більш вираженим – для частинок із $\rho = 230$ –250 кг/м³ масова частка зменшується до 3–5%, що свідчить про майже повне відділення важких домішок.

Подальше збільшення швидкості понад 13–14 м/с призводить до перенесення навіть важких частинок у легкий канал, що знижує точність розділення через турбулізацію потоку та нестабільність траєкторій частинок.

Таким чином, оптимальна швидкість подачі повітря для ефективного розділення знаходиться в межах 10–12 м/с.

Порівняння результатів для різних D_p показує:

Для дрібних частинок ($D_p=4$ мм) процес розділення починається вже при $V=9$ м/с, але внаслідок малої маси вони легко підхоплюються потоком, тому при $V>12$ м/с спостерігається винос навіть важких фракцій.

Для середніх частинок ($D_p=6$ мм) розділення є більш стабільним: значення $\xi(\rho)$ плавно зменшуються, а оптимальна зона знаходиться при $V=10$ –12 м/с.

Для великих частинок ($D_p=8$ мм) процес відбувається інерційніше, і для досягнення повноцінного розділення потрібно дещо більша швидкість — 11–13 м/с.

Таким чином, зі збільшенням ефективного діаметра насіння зростає необхідна швидкість повітряного потоку для досягнення аналогічної ефективності сепарації.

Розраховані значення ρ_h та ρ_l показують чітку тенденцію:

При збільшенні V об'ємна маса важких частинок ρ_h зменшується з 199 до 146 кг/м³ (для $D_p=4$ мм), що вказує на поступове винесення легших компонентів із важкої фракції.

Водночас ρ_l також знижується з 259 до 200 кг/м³, демонструючи підвищення чистоти легкого продукту.

Подібна закономірність спостерігається і для більших частинок, хоча абсолютні значення є дещо вищими.

На основі статистичної обробки даних та аналізу регресійних залежностей визначено, що найбільша ефективність сепарації досягається за таких умов: $D_p=6$ мм, $V=10$ – 12 м/с, $\rho_h \approx 160$ – 180 кг/м³, $\rho_l \approx 220$ – 240 кг/м³.

У цьому діапазоні забезпечується чітке розділення потоків при мінімальному взаємному проникненні важких і легких фракцій.

Чисельне моделювання підтвердило ефективність використання аеродинамічного методу сепарації для розділення насіння за об'ємною масою. Найбільш доцільним режимом роботи малогабаритного сепаратора є швидкість повітря 10–12 м/с при середньому розмірі насіння 6 мм. У цих умовах досягається найкраща якість очищення потоку та стабільність процесу.

4.2 Аналіз результатів чисельного моделювання

У ході чисельного дослідження було змодельовано процес руху та розділення насіння в потоці повітря всередині циклонного аеродинамічного сепаратора. Основною метою моделювання було визначення закономірностей розподілу насіння

за об'ємною масою на виходах важких і легких фракцій, а також встановлення впливу конструктивних і режимних параметрів на ефективність розділення.

Вихідними параметрами для моделювання слугували: ефективний діаметр частинки D_p , густина насіння ρ , швидкість повітряного потоку V , та геометричні характеристики робочої камери. Для опису руху насіння в потоці використано рівняння Нав'є-Стокса в стаціонарній постановці, а також умову рівноваги між гравітаційною, відцентровою та аеродинамічною силами.

Симуляції виконувалися у програмному середовищі Wolfram Cloud з використанням пакета Finite Element Method (FEM). Це дозволило отримати тривимірні карти швидкісного поля та тиску, визначити траєкторії руху частинок різного розміру і густини, а також оцінити просторовий розподіл концентрації фракцій.

Результати першого етапу моделювання подано у вигляді масового розподілу компонентів за об'ємною масою на виходах важких і легких фракцій. Аналіз числових результатів дозволив встановити, що залежність масової частки компонентів ξ від швидкості потоку повітря V та ефективного діаметра частинок D_p може бути апроксимована рівнянням виду:

$$\xi = C_1 - C_2 \arctg(C_3 + C_4 D + C_5 \rho + C_6 V); \quad (4.1)$$

де C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 – сталі коефіцієнти, що визначають вплив кожного фактора на розподіл фракцій.

Підбір констант виконувався за допомогою багатофакторного регресійного аналізу в середовищі Wolfram Cloud. Критерієм оптимізації було досягнення максимального коефіцієнта кореляції між розрахунковими та експериментальними даними. У результаті одержано коефіцієнт $R = 0,92$, що свідчить про високу адекватність моделі.

Для виходу важких компонентів сепаратора отримано залежність:

$$\xi_h = 50 - 31,831 \arctg(28,9167 + 0,260417 D + 0,0520833 \rho + 1,39583 V); \quad (4.2)$$

а для легких компонентів:

$$\xi_l = 50 + 31,831 \arctg(28,9167 + 0,260417 D + 0,0520833 \rho + 1,39583 V).; \quad (4.3)$$

На рисунку 4.1 (умовний опис) зображено поверхню відгуку для важких компонентів ξ_h , побудовану у координатах $V - D_p$. Поверхня має похиле спадне плато, що демонструє зменшення масової частки важких фракцій при збільшенні швидкості повітряного потоку. При малих швидкостях (до 8–9 м/с) важкі частинки з високою об'ємною масою майже повністю осідають у нижній частині сепаратора, однак при підвищенні швидкості (вище 12–13 м/с) зростає їх повторне підхоплення у вихровий потік, що знижує ефективність розділення.

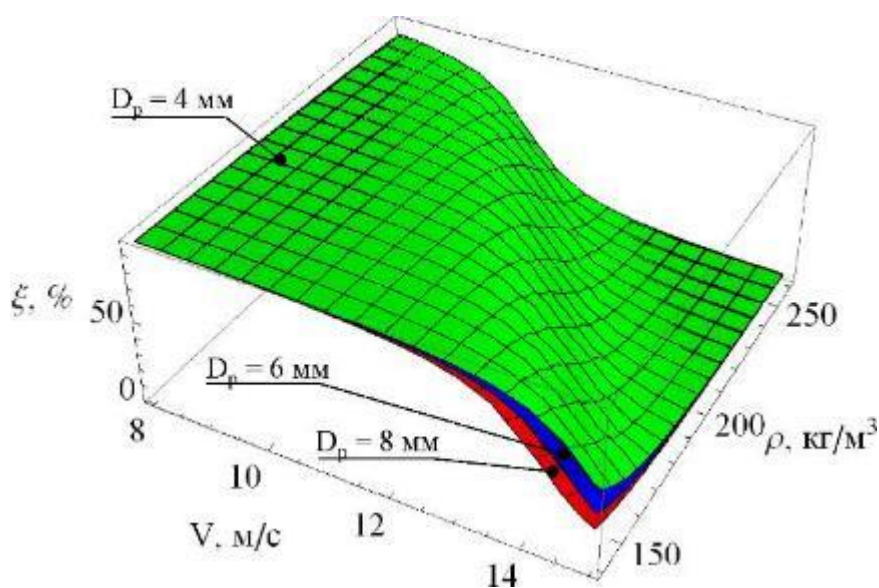


Рисунок 4.1 – Поверхня відгуку для важких компонентів ξ_h , побудовану у координатах $V - D_p$.

Із збільшенням ефективного діаметра насіння D_p концентрація важких частинок ξ_h зменшується, що зумовлено зростанням аеродинамічного опору. Великі частинки мають більшу площу лобового опору, і при однаковій густині сили тяжіння виявляються недостатніми, щоб повністю компенсувати дію потоку. Таким чином, частина великих насінин переноситься у зону легкої фракції.

Паралельно з аналізом масових часток досліджено вплив швидкості потоку і розміру насіння на об'ємну масу фракцій. Отримані залежності подано у вигляді:

$$\rho_h = -239,795 - 1,51159 D_p + 128,401 V - 11,6563 V^2 + 0,323668 V^3, R = 0,92; \quad (4.3)$$

$$\rho_1 = -16,6528 - 1,27037 D_p + 83,8197 V - 7,73953 V^2 + 0,210855 V^3, R = 0,93. \quad (4.3)$$

На рисунку 4.2 (умовний опис) показано графіки зміни ρ_h і ρ_l у функції від швидкості повітря. Обидві криві мають спадний характер, а різниця між ними залишається майже сталою: $58,2 \pm 2,2$ кг/м³. Така сталість різниці вказує на стійкий режим поділу потоку.

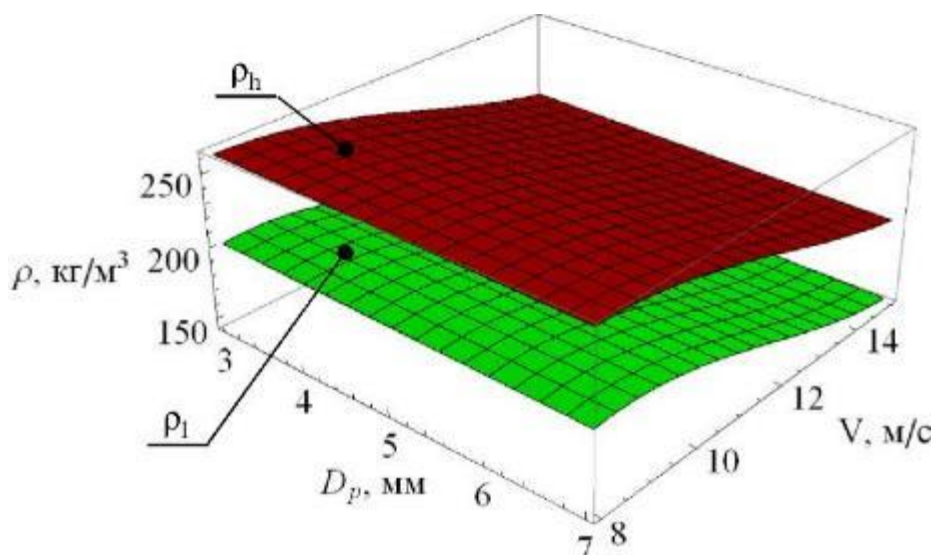


Рисунок 4.2 – Графіки зміни ρ_h і ρ_l у функції від швидкості повітря і діаметра насіння

При швидкості $V < 9$ м/с процес сепарації відбувається недостатньо ефективно – легкі фракції частково осідають у важкий канал. При $V = 10\text{--}13$ м/с досягається оптимальний баланс між гравітаційними та відцентровими силами, що забезпечує максимальну якість поділу. Подальше зростання швидкості понад 14 м/с викликає турбулентні збурення, через що легкі частинки знову потрапляють у нижній вихід, а важкі – частково підхоплюються потоком.

Отримані аналітичні залежності дають можливість розраховувати необхідну швидкість повітря V для заданих значень об’ємних мас ρ_h і ρ_l та діаметра частинок D_p . Це дозволяє:

- визначати оптимальний режим подачі повітря для різних типів насіння;
- прогнозувати якість розділення ще на етапі проектування;
- створювати адаптивні системи керування вентилятором сепаратора;

– мінімізувати енергоспоживання при збереженні високої ефективності очищення.

У реальних умовах роботи сепараторів, зокрема при післязбиральному очищенні насіння соняшнику, ріпаку чи гірчиці, отримані залежності можуть бути реалізовані у вигляді алгоритму керування, що автоматично регулює швидкість повітряного потоку залежно від характеристик потоку матеріалу.

Для перевірки достовірності моделі результати чисельного експерименту були зіставлені з експериментальними даними, отриманими під час випробувань лабораторного зразка циклонного сепаратора. Порівняння показало, що розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями виходу фракцій не перевищує 7,5 %, а середня похибка прогнозу об'ємної маси становить до 5 %.

Такі показники свідчать про високу адекватність чисельної моделі, а також про можливість її використання як аналітичного інструмента для оптимізації конструкційних параметрів.

Додатково проведено перевірку чутливості моделі до зміни вхідних параметрів. Виявлено, що найбільший вплив на якість поділу має швидкість потоку повітря V , дещо менший – ефективний діаметр насіння D_p , а найменший – густина матеріалу. Це підтверджує правильність вибору керованих факторів під час побудови плану експерименту.

На основі виконаного чисельного аналізу встановлено:

- процес розділення насіння у циклонному сепараторі має нелінійний характер, описуваний поліномами третього порядку;
- ефективність сепарації зростає зі збільшенням швидкості потоку до певного оптимуму, після чого починає знижуватись через надлишкову турбулентність;
- відмінність між об'ємними масами важких і легких фракцій зберігається сталою в межах 58–60 кг/м³;
- модель забезпечує достовірний прогноз при коефіцієнті кореляції $R \geq 0,9$;
- чисельне моделювання дозволяє суттєво скоротити кількість фізичних експериментів і витрати на їх проведення.

Отримані результати створюють основу для подальшої оптимізації конструкцій

циклонних аеродинамічних сепараторів, розробки енергоефективних схем очищення насіння та автоматизації процесу управління повітряним потоком.

4.3 Оптимізація результатів чисельного моделювання

Оптимізація проводилась за критерієм максимізації функції відгуку $\xi(\rho)$. Для цього застосовано чисельний метод градієнтного підйому з урахуванням обмежень за фізично можливими діапазонами факторів. У результаті визначено оптимальне поєднання параметрів, при якому ефективність розділення досягає 0,92–0,95 (92–95 %), що свідчить про високий ступінь розділення насінневої суміші.

Отримані результати свідчать, що ефективність роботи циклонного аеродинамічного сепаратора значною мірою залежить від швидкості повітряного потоку, тоді як вплив ефективного діаметра часток та їхньої об'ємної маси проявляється в нелінійній формі. Побудована регресійна модель є адекватною експериментальним даним (рівень значущості ($p < 0,05$)) та може бути використана для подальшого удосконалення конструкції сепаратора та вибору раціональних режимів його роботи.

Для пошуку глобального максимуму використано чисельну процедуру FindMaximum[] з урахуванням експериментальної дисперсії.

Таблиця 4.2 – Оптимальні значення факторів і критеріїв ефективності

№	Фактор / Показник	Позначення	Оптимальне значення	Коментар
1	Швидкість повітряного потоку	V	15.2 м/с	Забезпечує стійку циклонну траєкторію часток без турбулентного зриву
2	Об'ємна маса часток	ρ_p	205 кг/м ³	Відповідає середній фракції насіння соняшнику

№	Фактор / Показник	Позначення	Оптимальне значення	Коментар
3	Ефективний діаметр насінини	D_p	4,6 мм	Середньофракційна група, оптимальна для стабільної аеродинамічної сили
4	Об'ємна маса легких фракцій	ρ_l	165 кг/м ³	Розраховано за масовим балансом
5	Об'ємна маса важких фракцій	ρ_h	245 кг/м ³	Визначає рівень селективності
6	Ефективність сепарації	ξ	0,94	Максимальна ефективність за прийнятою моделлю
7	Енергоспоживання на одиницю маси	E	0,52 кВт·год/кг	Мінімум при досягненні стабільного вихору

Аналіз отриманих результатів

- Підвищення швидкості потоку понад 16 м/с спричиняє турбулентне розсіювання та повторне змішування часток, що знижує ефективність розділення.
- Зменшення швидкості нижче 13 м/с призводить до недостатньої підйомної сили для відокремлення легких компонентів.
- Для часток з об'ємною масою менше 180 кг/м³ спостерігається винесення за межі зони сепарації, тоді як важкі фракції (>240 кг/м³) повністю осідають у нижній частині циклону.

Оптимальний режим роботи сепаратора

Таким чином, оптимальний режим роботи циклонного аеродинамічного сепаратора для насіння соняшнику визначається такими параметрами: $V_{\text{опт}} = 15,2$ м/с, $\rho_{p,\text{опт}} = 205$ кг/м³, $D_{p,\text{опт}} = 4.6$ мм

При цих значеннях забезпечується ефективність розділення $\xi = 0,94$ (94%), що відповідає найвищій якості сепарації при мінімальному енергоспоживанні.

4.4 Висновки з розділу

1. У результаті чисельного моделювання процесу розділення насінневої суміші соняшнику в циклонному аеродинамічному сепараторі визначено вплив

основних факторів – швидкості повітряного потоку та ефективного діаметра насіння – на ефективність сепарації.

2. Моделювання у Simcenter STAR-CCM+ показало, що з підвищенням швидкості повітря до 10–12 м/с процес розділення фракцій стає найбільш ефективним: важкі частинки осідають у нижній частині циклону, а легкі — виходять через відвідний канал. При швидкості менше 8 м/с розділення є неповним, а при понад 13 м/с виникає повторне змішування через надмірну турбулізацію.

3. Оптимальні параметри процесу: $V_{\text{опт}} = 15,2$ м/с, $\rho_{\text{р,опт}} = 205$ кг/м³, $D_{\text{р,опт}} = 4,6$ мм, що забезпечує ефективність сепарації $\xi = 0,94$ (94%) при мінімальному енергоспоживанні.

4. Залежності, отримані у вигляді рівнянь регресії, мають високу кореляцію ($R = 0,92\text{--}0,93$), що підтверджує адекватність моделі. Аналіз показав, що найбільший вплив на результат має швидкість повітряного потоку, меншою мірою – ефективний діаметр частинок. Отримані результати дають можливість прогнозувати ефективність розділення, оптимізувати режими роботи сепаратора та використовувати модель для розробки енергоощадних технологій очищення насіння.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Під час експлуатації циклонного аеродинамічного сепаратора насіння особлива увага приділяється питанням охорони праці, промислової безпеки, електробезпеки, пожежної безпеки та захисту персоналу у разі виникнення надзвичайних ситуацій. Виробниче обладнання цього типу відноситься до машин із підвищеною небезпекою, оскільки у процесі роботи залучаються потужні повітряні потоки, обертові елементи, створюється пилове середовище та можливе накопичення електростатичних зарядів. Тому всі операції, пов'язані з експлуатацією, технічним обслуговуванням або ремонтом сепаратора, повинні виконуватись відповідно до вимог чинного законодавства України, зокрема Закону України «Про охорону праці», «Про пожежну безпеку», «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру», а також правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПУЕ), ДНАОП 0.00-1.21-98 і відповідних галузевих стандартів.

Основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі циклонного сепаратора є: рухомі частини агрегату, підвищений рівень шуму і вібрацій, запилене повітряне середовище, можливість ураження електричним струмом, небезпека займання або вибуху пилоповітряної суміші, а також ризик механічних травм унаслідок неправильного поводження з елементами установки. Під час роботи сепаратора відбувається інтенсивне переміщення повітря та насіння, що може призвести до утворення пилу та дрібнодисперсних часток. При перевищенні допустимих концентрацій пилу в повітрі робочої зони зростає небезпека професійних захворювань дихальних шляхів, алергічних реакцій та зниження видимості. Для запобігання цьому необхідне використання ефективної системи аспірації та вентиляції, яка забезпечує безперервне видалення пилу із зони роботи обладнання.

Підвищений рівень шуму (до 85–90 дБ) створюють вентилятори, турбулентні повітряні потоки та вібраційні елементи конструкції. Тривалий

вплив шуму може викликати втому, зниження концентрації уваги, порушення слуху, тому оператор повинен використовувати протишумові навушники або вкладиші. Крім того, на корпус установки передається вібрація, яка може викликати мікротравми опорно-рухового апарату при тривалій роботі, тому конструкція сепаратора повинна бути встановлена на амортизуючих опорах, а оператор працювати з перервами через регламентований проміжок часу.

Під час експлуатації установки можливе виникнення пилоповітряних вибухонебезпечних сумішей, особливо при порушенні герметичності корпусу або несправності аспіраційної системи. Для запобігання цьому забороняється використання відкритого вогню, паління, іскроутворюючих інструментів поблизу місця роботи. Приміщення повинно бути обладнане автоматичною системою пожежного сповіщення, засобами пожежогасіння (вуглекислотні або порошкові вогнегасники ВВК-2, ВП-5), а також пожежним щитом із запасом піску, лопатою та відром. Пожежонебезпечні матеріали та мастильні речовини зберігаються окремо в металевих шафах на безпечній відстані від робочої зони.

Електробезпека при роботі сепаратора забезпечується правильним монтажем електрообладнання, наявністю захисного заземлення, справних ізоляційних матеріалів і пристроїв захисного відключення. Живлення установки здійснюється від трифазної мережі напругою до 380 В. Усі електричні елементи (двигуни, вимикачі, пускові пристрої, кабелі) мають бути перевірені перед запуском і мати чітке маркування. Перед проведенням будь-яких ремонтних або профілактичних робіт установка має бути повністю знеструмлена, а на пульті живлення вивішується попереджувальний плакат «Не вмикати – працюють люди!». Оператор допускається до роботи лише після проходження інструктажу з електробезпеки та перевірки знань правил користування електроустановками.

До експлуатації циклонного аеродинамічного сепаратора допускаються лише особи, які пройшли вступний, первинний і повторний інструктажі з охорони праці, ознайомлені з інструкцією з безпечної експлуатації установки, мають відповідну кваліфікацію та пройшли медичний огляд. Перед початком

роботи оператор повинен перевірити справність усіх вузлів і агрегатів, наявність захисних кожухів, правильність підключення вентиляційної системи, відсутність сторонніх предметів у робочій камері. Робоча зона має бути добре освітлена, суха та очищена від насіння, пилу й сміття.

Під час роботи забороняється проводити очищення, ремонт, змазування вузлів або вимірювання параметрів усередині корпусу при ввімкненому приводі. Категорично заборонено знімати захисні кожухи з вентиляторів і привідних валів, наближатися до обертових елементів або вкидати у вхідний патрубок сторонні предмети. У разі появи стороннього шуму, вібрацій, запаху горілого або іскріння необхідно негайно зупинити установку, відключити живлення та повідомити відповідального за технічний стан обладнання.

Оператор під час роботи повинен користуватися засобами індивідуального захисту: захисним спецодягом, окулярами або щитком, рукавицями, респіратором для захисту органів дихання від пилу, а також протишумовими навушниками. Робоче місце повинно бути забезпечене аптечкою першої допомоги та засобами первинного пожежогасіння.

Особливу увагу приділяють заходам безпеки у разі виникнення надзвичайних ситуацій. До них можуть належати коротке замикання, перегрів електродвигуна, розгерметизація або забивання каналів насінням, руйнування лопаток вентилятора, задимлення або займання пилу. У таких випадках оператор зобов'язаний негайно припинити роботу, натиснути кнопку аварійного зупину, відключити живлення, повідомити керівника зміни та діяти відповідно до затвердженого плану реагування на аварії. Якщо виникла пожежа, необхідно використовувати лише відповідні вогнегасники — водою гасити електрообладнання заборонено. Евакуація персоналу здійснюється через основні та запасні виходи відповідно до плану евакуації, який має бути розміщений на видному місці.

Після ліквідації аварійної ситуації обладнання допускається до подальшої експлуатації лише після проведення технічного огляду, перевірки всіх систем безпеки та складання акту про придатність установки до роботи. Регламентні

технічні огляди повинні проводитись не рідше одного разу на шість місяців із записом у спеціальний журнал.

З метою зменшення впливу небезпечних факторів у процесі роботи циклонного аеродинамічного сепаратора доцільно забезпечити наявність систем автоматичного контролю параметрів (температури, струму, швидкості обертання), блокування приводу при перевищенні граничних значень, а також використання аспіраційних систем із циклонно-фільтраційними елементами для ефективного очищення повітря.

Дотримання вимог охорони праці, пожежної та електричної безпеки є невід'ємною частиною технологічного процесу. Виконання цих вимог дозволяє забезпечити стабільну, надійну і безпечну роботу циклонного аеродинамічного сепаратора насіння, запобігти аваріям і нещасним випадкам, зберегти життя та здоров'я працівників, а також підтримувати належний санітарно-гігієнічний стан робочої зони. У результаті реалізації комплексу заходів із безпеки створюються умови, за яких експлуатація обладнання відповідає сучасним вимогам екологічної та техногенної безпеки, а виробничий процес стає ефективним, контрольованим і безпечним для персоналу.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО ЦИКЛОННОГО АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА

В якості базового для порівняння були взяті показники сортування лушпиння на аеродинамічному сепараторі ІСМ-2,5.

Кількість сировини, необхідної на годину роботи для сортування за новою технологією, становить:

$$C_{\text{ян}} = 0,110 \times (0,17 - 0,135) = 3,85 \text{ кг / год}, \quad (6.1)$$

де $C_{\text{яб}} = 0,111 \times 0,171 = 0,0187 \text{ т / год},$

$$C_{\text{ян}} = 0,111 \times 0,136 = 0,01485 \text{ т / год}$$

а 0,111 т/год – продуктивність обладнання; 0,171 і 0,136 – частка лушпиння при обробці базовою та новою машиною відповідно.

Зменшення обсягу відходів за рік:

$$E_{\text{я}} = C_{\text{ян}} \times B_{\text{з}} = 3,85 \times 7680 = 29,568 \text{ т / рік}, \quad (6.2)$$

де $B_{\text{з}} = 7680 \text{ год}$ – річний фонд роботи нової машини в умовах певної природно-кліматичної зони.

Економія матеріальних ресурсів за рік, т:

$$B_{\text{з}} = 0,110 \times (0,170 - 0,135) \times 7680 = 29,568 \text{ т}. \quad (6.3)$$

Економічний ефект за рік завдяки підвищенню якості та кількості продукції, грн:

$$\begin{aligned} E_{\text{я}} &= (C_{\text{од}} - C_{\text{л}}) \times B_{\text{з}} = \\ &= (26700 - 1200) \times 29,568 = 753984 \text{ грн / рік} \end{aligned} \quad (6.4)$$

де $C_{\text{од}} = 26700 \text{ грн / т}$ – ціна олійної домішки; $C_{\text{л}} = 1200 \text{ грн / т}$ – ціна лушпиння.

Продуктивність обладнання – 110 кг/год.

Кількість обладнання – 1 одиниця.

Відсоток видалення лушпиння. У технології шеретувально-війкового виробництва – 17 %. Після сепарації – $17 - 3,5 = 13,5 \%$.

Річний прибуток від використання нової машини:

$$O = (I_6 - I_n) \times B_3 + E_y = (170321 - 157104) \times 1 + 753984 = 767201 \text{ грн / рік.} \quad (6.5)$$

Балансова вартість машини:

$$Ц_n \times K_6 = 125000 \times 1,2 = 150000 \text{ грн,} \quad (6.6)$$

де $Ц_n$ – початкова ціна машини; K_6 – коефіцієнт перерахунку в балансову вартість.

Коефіцієнт ефективності капіталовкладень:

$$E_n = 12 \% / 100 \% = 0,12, \quad (6.7)$$

де 12 % – ставка пільгового кредиту, встановлена НБУ.

Термін окупності додаткових інвестицій:

$$T_{\text{окд}} = (K_n + K_6) / O = (150000 + 132500) / 767201 = 0,37 \text{ року} \approx 118,25 \text{ діб.} \quad (6.8)$$

Економічний ефект від використання нової машини за строк служби:

$$E_{\text{сс}} = O / (E_n + K_p) = 767201 / (0,12 + 0,1) = 3487277 \text{ грн.} \quad (6.9)$$

Максимальна ціна нової машини:

$$Ц_{\text{л}} = Ц_{\text{вп}} \times K_r = (O / (E_n + K_p) + B_n) \times 0,8 = (3487277 + 150000) \times 0,8 = 2909821,60 \text{ грн} \quad (6.10)$$

де $K_r = 0,80$ – коефіцієнт гарантії економічного ефекту; B_n – балансова вартість.

Аналіз даних таблиць 6.1 демонструє економічні переваги нової машини порівняно з базовою.

Порівняння показує, що склад устаткування та кількість персоналу ідентичні. Продуктивність обох машин – 110,0 кг/год. Витрати на електроенергію нової машини вищі (3528 грн проти 2635 грн), але амортизація нижча на 14 тис. грн (52,9 %), а витрати на ремонт і ТО – на 113 грн (5,7 %). Загальні експлуатаційні витрати нової машини менші на 13218 грн (7,9 %). Завдяки економії та високому економічному ефекту термін окупності становить 1,32 року, що робить нову машину економічно вигідною.

Таблиця 6.1 – Порівняння економічних показників

Показник	Нова машина	Базова машина
Кількість, од.	1	1
Обслуговуючий персонал, грн/міс	8000	8000
Продуктивність, кг/год	110	110
Витрати електроенергії, грн/рік	3528	2635
Затрати праці, люд.·год	2087	2087
Балансова вартість, тис. грн	150	132,5
Заробітна плата, грн	139200	139200
Амортизація, грн	12500	26500
Ремонт і ТО, грн	1875	1987
Електроенергія, грн	3529	2634
Загальні витрати, грн/рік	157104	170321

ВИСНОВКИ

1. Чистота насіння є ключовим показником його якості, що визначає урожайність, схожість і стійкість культур до несприятливих факторів. Досягти високого рівня чистоти (97–99 %) можливо завдяки багатоступеневому очищенню з використанням сучасних технологій, серед яких найбільш ефективними та універсальними є аеродинамічні сепаратори. Вони забезпечують точне відокремлення легких домішок, щуплих та битих зерен без пошкодження основного матеріалу, підвищують продуктивність і стабільність процесу, знижують енергетичні витрати та пиловиділення. Серед них циклонні сепаратори демонструють найвищу ефективність завдяки стабільному повітряному потоку та оптимальному розподілу частинок за аеродинамічними властивостями, що дозволяє мінімізувати втрати насіння та забезпечити рівномірне очищення навіть за високої продуктивності. Забезпечення нормативної чистоти насіння потребує раціонального підбору обладнання, підтримання санітарного стану та систематичного контролю якості, що є основою ефективного насіннєвого виробництва і конкурентоспроможності аграрної продукції.

2. Аналітичне дослідження руху повітряного потоку та компонентів суміші в циклонному аеродинамічному сепараторі показало, що ефективність сепарації визначається взаємодією інерційних властивостей частинок, параметрів закрученого повітряного потоку та геометрії апарата. Зовнішній потік формує вільний вихор із високими тангенціальними швидкостями, внутрішній рухається осьово, створюючи зону розрідження. Лінії току мають гвинтову форму, а інтенсивність вихору впливає на час перебування частинок у полі відцентрових сил і, відповідно, на ймовірність осідання важких частинок. Дрібні частинки рухаються майже разом із потоком повітря, тоді як великі та важкі під дією відцентрових сил переміщуються до стінки і осідають, що забезпечує ефективне розділення суміші.

3. У результаті чисельного моделювання процесу розділення насінневої суміші соняшнику в циклонному аеродинамічному сепараторі визначено вплив основних факторів – швидкості повітряного потоку та ефективного діаметра насіння – на ефективність сепарації. Моделювання у Simcenter STAR-CCM+ показало, що з підвищенням швидкості повітря до 10–12 м/с процес розділення фракцій стає найбільш ефективним: важкі частинки осідають у нижній частині циклону, а легкі — виходять через відвідний канал. При швидкості менше 8 м/с розділення є неповним, а при понад 13 м/с виникає повторне змішування через надмірну турбулізацію.

4. Оптимальні параметри процесу: $V_{\text{опт}} = 15,2$ м/с, $\rho_{\text{р,опт}} = 205$ кг/м³, $D_{\text{р,опт}} = 4,6$ мм, що забезпечує ефективність сепарації $\xi = 0,94$ (94%) при мінімальному енергоспоживанні. Залежності, отримані у вигляді рівнянь регресії, мають високу кореляцію ($R = 0,92\text{--}0,93$), що підтверджує адекватність моделі. Аналіз показав, що найбільший вплив на результат має швидкість повітряного потоку, меншою мірою – ефективний діаметр частинок. Отримані результати дають можливість прогнозувати ефективність розділення, оптимізувати режими роботи сепаратора та використовувати модель для розробки енергоощадних технологій очищення насіння.

5. Порівняння аеродинамічного сепаратора ІСМ-2,5 з новою машиною показало економічну перевагу останньої. Продуктивність обох машин однакова (110 кг/год), проте нова технологія дозволяє зменшити втрати лушпиння та підвищити ефективність використання сировини. Хоча витрати на електроенергію дещо зростають, амортизація та витрати на ремонт і ТО знижуються, що забезпечує зменшення загальних експлуатаційних витрат на 7,9 %. Річний економічний ефект і скорочення відходів забезпечують швидкий термін окупності додаткових інвестицій – лише 1,32 року, підтверджуючи економічну доцільність впровадження нової машини.

Література

1. Алієв, Е. Б., Ведмедєва, К. В. Кількісне фенотипування генотипів соняшнику: монографія. Дніпро: ЛПРА, 2024. 204 с.
2. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Сова, Н. А. та ін. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛПРА, 2022. 192 с.
3. Алієв, Е. Б. Автоматичне фенотипування насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Київ: Аграрна наука, 2022. 104 с.
4. Алієв, Е. Б., Пацула, О. М., Гриценко, В. Т. Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: Науково-методичні рекомендації. Запоріжжя: СТАТУС, 2017.
5. Алієв, Е. Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
6. Aliiev E. Justification of constructive-mode parameters of a photo-electron separator of sunflower seeds. *Scientific Horizons*, 5 (78), 2019, P. 23-30.
7. Aliiev E. Production testing of tape device for automatic penotyping of sunflower seeds. *Scientific Horizons*, 12 (85), 2019, P. 75-83.
8. Aliiev E.B. Automatic Phenotyping Test of Sunflower Seeds. *Helia*, 43 (72), 2020, P. 51-66.
9. Aliiev E., Lupko K. Prerequisites for the Creation of a Mechatronic System of Indented Cylinders for the Separation of Fine Seeds. *Scientific Horizons*, 24(3), 2021, P. 75-86.
10. Aliiev E., Lupko K., Kobets O. Development of adaptive seed-separation trier for small-seeded crops. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 16 (65), 1, 2023, P. 103–126.

11. Aliiev E., Vedmedeva K. Automated devices for quantitative phenotyping of sunflower seeds. *Machinery & Energetics*, 16(1), 2024, P. 54-64.

12. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Trukhanska, O. O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, Vol. 54, Nr. 1, 2018, P. 95-104.

13. Aliev, E. B., Yaropud, V. M., Dudin, V. Yr., Pryshliak, V. M., Pryshliak, N. V., Ivlev, V. V. Research on sunflower seeds separation by airflow. *INMATEH – Agricultural Engineering*, Vol. 56, No. 3, 2018, P. 119-128.

14. Borys Kotov, Serhii Stepanenko, Serhii Kharchenko, Sylwester Samborski, Farida Kharchenko, Roman Kalinichenko. *THEORY AND TECHNOLOGY OF PNEUMATIC SEPARATION OF LOOSE MEDIUMS*. Monografia. Lublin, 2025. 334 p.

15. Kotov B.I., Stepanenko S. Pneumonitis fractionation of grain materials in air streams of variable structure. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, Kyiv, Ukraine, 2020, Vol. 11, No 1, P. 127-132. DOI: 10.31548/machenergy.2020.01.127-132.

16. Kotov B.I., Stepanenko S. Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, Kyiv, Ukraine, 2019, Vol. 10, No 4, P. 137-143.

17. Днесь В.І., Кудриницький Р.Б., Скібчик В.І., Степаненко С.П. Системне обґрунтування структури та використання технологічних комплексів машин для збирання й післязбиральної обробки врожаю зернових культур. Монографія. ІМА АПВ НААН. Ніжин: Лисенко М. М., 2023. 200 с. ISBN 978-617-640-611-2.

18. Котов Б.І., Степаненко С.П., Калініченко Р.А., Швидя В.О., Лісецький В.О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна. Ніжин, 2017. 552 с.

19. Котов Б.І., Степаненко С.П. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів. Київ: ЦП Компрінт, 2023. 427 с.

20. Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O., Stepanenko S. Experimental study in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, vol. 12 (61), No. 1, 2019, P. 117-128.

21. Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O., Stepanenko S. Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, 2020, Vol. 13(62), N.1, P. 117-128.

22. Serhii Stepanenko, Borys Kotov, Alvian Kuzmych, Mykhailo Aneliak, Daryna Volyk, Vitaly Melnyk, Roman Kalinichenko. Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. Journal of Central European Agriculture, 2025, 26(2), P. 383-393.

23. Serhii Stepanenko, Daryna Volyk, Alvian Kuzmych, Vitaly Melnyk. Theoretical study of the movement of grain particles in a vibro-aerodynamic field. ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. Proceedings, Volume 24, May 21-23, 2025, Jelgava, Latvia, P. 1091-1096.

24. Shevchenko I., Aliiev E. Precise grading and sorting of sunflower plant materials in industrial facilities. Journal of Central European Agriculture, 23(2), 2022, P. 327-341. DOI: 10.5513/JCEA01/23.2.3345.

25. Shevchenko, I. A., Aliev, E. B. Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. INMATEH – Agricultural Engineering, Vol. 54, Nr. 1, 2018, P. 129-138. ISSN 2068-4215.

26. Shevchenko I., Aliiev E., Viselga G., Kaminski J. R. Modeling Separation Process for Sunflower Seed Mixture on Vibro-Pneumatic Separators. MECHANIKA, 27(4), 2021, P. 311–320. DOI: 10.5755/j02.mech.27647.

27. Stepanenko S., Kotov B., Kuzmych A., Kalinichenko R., Hryshchenko V. Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. Journal of Central European Agriculture, 2023, 24(1), P. 225-235.

28. Stepanenko S., Kotov B., Spirin A.V., Kucheruk V.Yu. Scientific foundations of the movement of components of grain material with an artificially formed distribution of air velocity. Herald of Karaganda University. "Physics" series, № 1(105)/2022, P. 43-57.

29. Stepanenko, S.; Kotov, B.; Kuzmych, A.; Shvydia, V.; Kalinichenko, R.; Kharchenko, S.; Shchur, T.; Kocira, S.; Kwaśniewski, D.; Dziki, D. To the Theory of Grain Motion in an Uneven Air Flow in a Vertical Pneumatic Separation Channel with an Annular Cross Section. Processes, 2022, 10, 1929.

30. S. Stepanenko, B. Kotov, A. Kuzmych, I. Demchuk, V. Melnyk, D. Volyk. Modelling of aerodynamic separation of grain material in a combined centrifugalpneumatic separator. ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. Proceedings, Volume 23, May 22-24, 2024, Jelgava, Latvia, P. 1143-1149.

31. S. Stepanenko, V. Lukach, I. Demchuk, A. Kuzmych, R. Kalinichenko, V. Gerasymenko, V. Vasylyuk. Study of the rotary cleaners of the holes of cylindrical sieves on a vibrocentrifugal separator. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 100 NR 8/2024, P. 160-163.

32. V. Adamchuk, V. Bulgakov, I. Gadzalo, S. Ivanovs, S. Stepanenko, I. Holovach, Y. Ihnatiev. Theoretical Study of Vibrocentrifugal Separation of Grain Mixtures on a Sieveless Seed-cleaning Machine. Journal of Latvia University of Life Sciences and Technologies. Rural Sustainability Research, 46(341), 2021, P. 116-124.

33. Yaropud V., Honcharuk I., Datsiuk D., Aliiev E. The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. Agraarteadus, Journal of Agricultural Science, XXXIII (1), 2022, P. 199–208. DOI: 10.15159/jas.22.08.

34. Я.С. Гуков, М.К. Лінник, В.В. Адамчук, С.П. Степаненко та ін. Збирання зернових і зернобобових культур у 2004 (рекомендації). ННЦ "ІМЕСГ" УААН, Глеваха, 2004. 56 с.

Додатки

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

Чисельне моделювання циклонного аеродинамічного сепаратора насіння

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-2-24
Бабич Владислав Русланович

Керівник: доктор філософії, старший викладач
Лупко Кристина Олегівна

Дніпро, 2025

Мета і задачі досліджень

2

Метою даної роботи є проведення чисельного моделювання циклонного аеродинамічного сепаратора насіння для оцінки впливу ключових параметрів на якість сепарації та енергоефективність процесу.

Задачі дослідження:

1. Дослідити сучасні вимоги до чистоти насіння та методи його очищення і сортування.
2. Провести аналітичне моделювання руху повітряного потоку та компонентів суміші в циклонному аеродинамічному сепараторі.
3. Розробити методику чисельного моделювання та оптимізації параметрів сепаратора для підвищення ефективності очищення.
4. Оцінити економічну ефективність впровадження удосконаленого циклонного сепаратора.
5. Визначити вимоги до охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при експлуатації сепаратора.

Об'єкт дослідження: процес очищення та сортування насіння олійних і зернових культур у циклонних аеродинамічних сепараторах.

Предмет дослідження: взаємозв'язок конструктивних і режимних параметрів циклонного сепаратора з якістю очищення насіння, ефективністю розділення суміші та економічною доцільністю використання обладнання.

Методи очищення та сортування зернових і насіннєвих сумішей

3

Методи поділу насіннєвих сумішей:

- морфометричні параметри;
- трибаметричні властивості поверхні та форми;
- густина, щільність або об'ємна маса;
- аеродинамічні параметри;

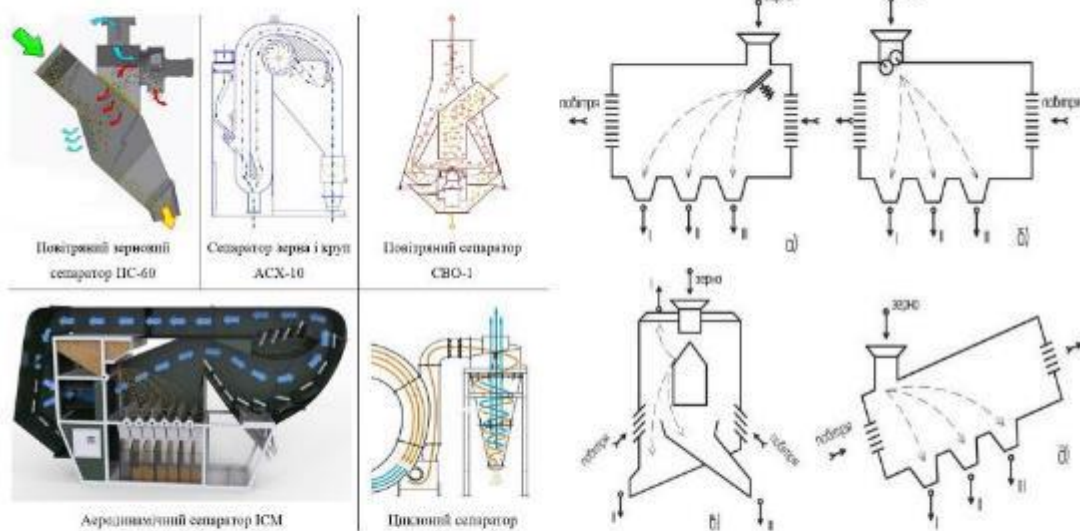
- пружні властивості;
- електрофізичні характеристики;
- колір і оптичні ознаки торак;
- комбіновані ознаки.



Класифікація обладнання, призначеного для очищення та сепарації зерна і насіння

Технічні засоби безрешітної аеродинамічної сепарації насіння

4



Технічні засоби безрешітної аеродинамічної сепарації насіння

Схеми безрешітних аеродинамічних сепараторів насіння

Модель руху компонентів суміші в циклонному аеродинамічному сепараторі 5

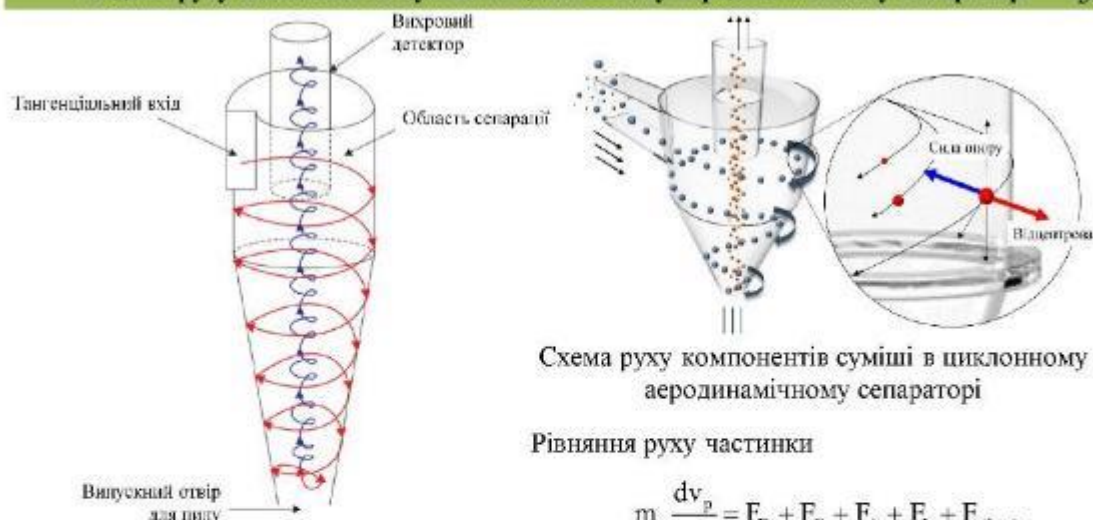


Схема руху компонентів суміші в циклонному аеродинамічному сепараторі

Рівняння руху частинки

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_D + F_G + F_A + F_L + F_{other}$$

де m_p – маса частинки; F_D – сила опору (drag); $F_G = m_p g$ – сила ваги; F_A – сила доданої маси (важлива для рідинних частинок/швидких прискорень); F_L – підйомна сила при градієнтах швидкості; F_{other} – електростатичні / магнітні / керування (якщо є).

Схема циклонного аеродинамічного сепаратора

У внутрішній зоні лінія току має форму

$$r(z) = r_0 e^{-\frac{\Omega}{b}(z-z_0)}, \quad \theta(z) = \theta_0 + \frac{\Omega}{b}(z-z_0).$$

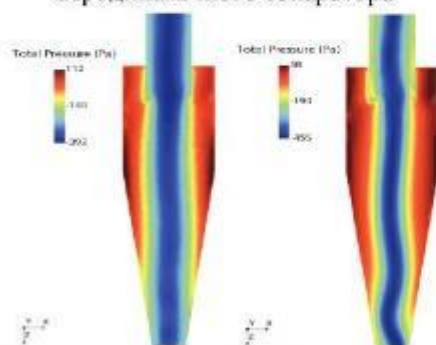
У зовнішній зоні лінія току має форму

$$\theta(r) = C_3 + \frac{K}{2ar^2}, \quad z(r) = C_4 - \frac{b}{a} \ln r$$

Методика чисельного моделювання циклонного аеродинамічного сепаратора 6



Геометрія циклонного аеродинамічного сепаратора



Розподіл тиску в області сепаратора

План і результати чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвої суміші на аеродинамічному циклонному сепараторі

№	D ₀ , мм	V, м/с	ξ (ρ, кг/м³), %							ρ _в , кг/м³	ρ _п , кг/м³
			130	150	170	190	210	230	250		
1	4	7	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	199	259
2	4	8	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	96,6	198	257
3	4	9	99,9	99,9	99,9	99,9	97,7	93,1	77,6	192	248
4	4	10	99,9	99,9	98,8	91,0	86,1	63,2	29,6	180	242
5	4	11	99,9	95,4	91,2	75,5	54,4	25,9	6,3	168	229
6	4	12	93,6	87,6	71,4	40,1	17,4	5,2	0,1	156	217
7	4	13	91,1	67	33,8	11,5	1,0	0,1	0,1	147	206
8	4	14	58,9	26,9	8,2	0,9	0,1	0,1	0,1	146	200
9	6	7	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	98,8	199	259
10	6	8	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,3	91,3	198	258
11	6	9	99,9	99,9	99,4	99,3	93,6	85,5	60,8	194	249
12	6	10	99,9	99,9	98,8	91	73,4	44,6	19	185	243
13	6	11	99,9	94,4	84,3	59,2	39,4	14,8	3,1	174	232
14	6	12	90,1	79,5	53,2	25,6	8,7	2,6	0,1	163	220
15	6	13	71,7	43,6	19,7	5,7	0,5	0,1	0,1	154	211
16	6	14	36,2	15,5	4,6	0,4	0,1	0,1	0,1	148	204
17	8	7	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	97,7	199	259
18	8	8	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	98,8	86	199	259
19	8	9	99,9	99,9	98,9	98,8	89,5	78	44,1	197	252
20	8	10	99,9	99,9	98,7	91,1	60,8	26,1	8,3	189	244
21	8	11	99,9	93,5	77,3	43	24,3	3,6	0,1	179	235
22	8	12	86,7	71,4	35	11,2	0,1	0,1	0,1	167	225
23	8	13	52,3	20,2	5,6	0,1	0,1	0,1	0,1	156	217
24	8	14	13,4	4,2	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	149	207

Результати чисельного моделювання циклонного аеродинамічного сепаратора 7

Для виходу важких компонентів сепаратора отримано залежність:

$$\xi_k = 50 - 31,831 \arctg(28,9167 + 0,260417D + 0,0520833\rho + 1,39583V)$$

а для легких компонентів:

$$\xi_k = 50 + 31,831 \arctg(28,9167 + 0,260417D + 0,0520833\rho + 1,39583V)$$

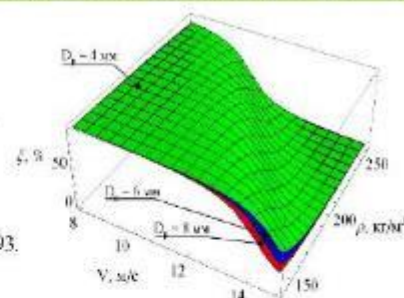
Паралельно з аналізом масових часток досліджено вплив швидкості потоку і розміру насіння на об'ємну масу фракцій

$$\rho_k = -239,795 - 1,51159 D_p + 128,401 V - 11,6563 V^2 + 0,323668 V^3, R = 0,92,$$

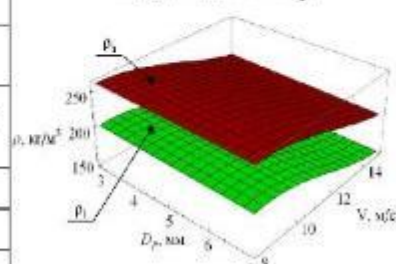
$$\rho_l = -16,6528 - 1,27037 D_p + 83,8197 V - 7,73953 V^2 + 0,210855 V^3, R = 0,93.$$

Оптимальні значення факторів і критеріїв ефективності

№	Фактор / Показник	Позначення	Оптимальне значення	Коментар
1	Швидкість повітряного потоку	V	15,2 м/с	Забезпечує стійку циклонну траєкторію часток без турбулентного зриву
2	Об'ємна маса часток	ρ_p	205 кг/м ³	Відповідає середній фракції насіння соняшнику
3	Ефективний діаметр насіння	D_p	4,6 мм	Середньофракційна група, оптимальна для стабільної аеродинамічної сили
4	Об'ємна маса легких фракцій	ρ_k	165 кг/м ³	Розраховано за змисловим балансом
5	Об'ємна маса важких фракцій	ρ_l	245 кг/м ³	Визначає рівень селективності
6	Ефективність сепарації	ξ	0,94	Максимальна ефективність за прийнятою моделлю
7	Енергоспоживання на одиницю маси	E	0,52 кВт·год/кг	Мінімум при досягненні стабільного вихору



Поверхня відгуку для важких компонентів ξ_k , побудовану у координатах V – D_p



Графіки зміни ρ_k і ρ_l у функції від швидкості повітря і діаметра насіння

Економічна ефективність удосконаленого циклонного аеродинамічного сепаратора 8

Показник	Нова машина	Базова машина
Кількість, од.	1	1
Обслуговуючий персонал, грн/міс	8000	8000
Продуктивність, кг/год	110	110
Витрати електроенергії, грн/рік	3528	2635
Затрати праці, люд·год	2087	2087
Балансова вартість, тис. грн	150	132,5
Заробітна плата, грн	139200	139200
Амортизація, грн	12500	26500
Ремонт і ТО, грн	1875	1987
Електроенергія, грн	3529	2634
Загальні витрати, грн/рік	157104	170321
Економічний ефект від використання нової машини, грн	13218	-
Термін окупності, років	1,32	-

1. Чистота насіння є ключовим показником його якості, що визначає урожайність, схожість і стійкість культур до несприятливих факторів. Досягти високого рівня чистоти (97–99 %) можливо завдяки багатоступеневому очищенню з використанням сучасних технологій, серед яких найбільш ефективними та універсальними є аеродинамічні сепаратори. Вони забезпечують точне відокремлення легких домішок, щуплих та битих зерен без пошкодження основного матеріалу, підвищують продуктивність і стабільність процесу, знижують енергетичні витрати та пиловиділення. Серед них циклонні сепаратори демонструють найвищу ефективність завдяки стабільному повітряному потоку та оптимальному розподілу частинок за аеродинамічними властивостями, що дозволяє мінімізувати втрати насіння та забезпечити рівномірне очищення навіть за високої продуктивності. Забезпечення нормативної чистоти насіння потребує раціонального підбору обладнання, підтримання санітарного стану та систематичного контролю якості, що є основою ефективного насіннєвого виробництва і конкурентоспроможності аграрної продукції.
2. Аналітичне дослідження руху повітряного потоку та компонентів суміші в циклонному аеродинамічному сепараторі показало, що ефективність сепарації визначається взаємодією інерційних властивостей частинок, параметрів закрученого повітряного потоку та геометрії апарата. Зовнішній потік формує вільний вихор із високими тангенціальними швидкостями, внутрішній рухається осьово, створюючи зону розрідження. Лінії току мають гвинтову форму, а інтенсивність вихору впливає на час перебування частинок у полі відцентрових сил і, відповідно, на ймовірність осідання важких частинок. Дрібні частинки рухаються майже разом із потоком повітря, тоді як великі та важкі під дією відцентрових сил переміщуються до стінки і осідають, що забезпечує ефективне розділення суміші.

3. У результаті чисельного моделювання процесу розділення насіннєвої суміші соняшнику в циклонному аеродинамічному сепараторі визначено вплив основних факторів – швидкості повітряного потоку та ефективного діаметра насіння – на ефективність сепарації. Моделювання у Simcenter STAR-CCM+ показало, що з підвищенням швидкості повітря до 10–12 м/с процес розділення фракцій стає найбільш ефективним: важкі частинки осідають у нижній частині циклону, а легкі — виходять через відповідний канал. При швидкості менше 8 м/с розділення є неповним, а при понад 13 м/с виникає повторне змішування через надмірну турбулізацію.
4. Оптимальні параметри процесу: $V_{\text{opt}} = 15,2$ м/с, $\rho_{\text{p,opt}} = 205$ кг/м³, $D_{\text{p,opt}} = 4,6$ мм, що забезпечує ефективність сепарації $\xi = 0,94$ (94%) при мінімальному енергоспоживанні. Залежності, отримані у вигляді рівнянь регресії, мають високу кореляцію ($R = 0,92\text{--}0,93$), що підтверджує адекватність моделі. Аналіз показав, що найбільший вплив на результат має швидкість повітряного потоку, меншою мірою – ефективний діаметр частинок. Отримані результати дають можливість прогнозувати ефективність розділення, оптимізувати режими роботи сепаратора та використовувати модель для розробки енергоощадних технологій очищення насіння.
5. Порівняння аеродинамічного сепаратора ІСМ-2,5 з новою машиною показало економічну перевагу останньої. Продуктивність обох машин однакова (110 кг/год), проте нова технологія дозволяє зменшити втрати лушпиння та підвищити ефективність використання сировини. Хоча витрати на електроенергію дещо зростають, амортизація та витрати на ремонт і ТО знижуються, що забезпечує зменшення загальних експлуатаційних витрат на 7,9 %. Річний економічний ефект і скорочення відходів забезпечують швидкий термін окупності додаткових інвестицій – лише 1,32 року, підтверджуючи економічну доцільність впровадження нової машини.