

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра харчових технологій

**П о я с н ю в а л ь н а   з а п и с к а**

до кваліфікаційної роботи  
ступеня вищої освіти «Магістр»  
на тему:

**Обґрунтування процесу очищення зерна на  
відцентровому сепараторі решітного типу**

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

\_\_\_\_\_ Максим ВОЛКОВ

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Наталія СОБА

**Рецензент:** \_\_\_\_\_ Владислав ГРИЦИШИН

Дніпро 2023

**ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра харчових технологій

Ступінь вищої освіти: «Магістр»

Освітньо-професійна програма: «Харчові технології»

Спеціальність: 181 «Харчові технології»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. завідувача кафедри

харчових технологій,

кандидат технічних наук, доцент

Віталій КОШУЛЬКО

(підпис)

«09» листопада 2023 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Волкову Максиму Сергійовичу

1. Тема роботи: «Обґрунтування процесу очищення зерна на відцентровому сепараторі решітного типу».

Керівник роботи: Сова Наталія Анатоліївна, кандидатка технічних наук, доцентка, затверджені наказом закладу вищої освіти від «09» листопада 2023 року № 3423.

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

3. Вихідні дані до роботи: 1. Технологія та обладнання для забезпечення процесу первинної очистки зерна у відцентрових решітних сепараторах з вертикальною віссю обертання. 2. Наукова, нормативна, технологічна, технічна та патентна документація.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Вступ. 1 Сучасний стан питання сепарування зернового матеріалу. 2 Теоретичне дослідження процесу сепарування зернової суміші на циліндричному підсівному решіт із вертикальною віссю обертання. 3 Програма і методика експериментальних досліджень. 4 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз. 5 Охорона праці та захист навколишнього середовища. 6 Організаційно-економічна частина. Загальні висновки. Бібліографія.

#### 5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Огляд процесу сепарації на відцентрових сепараторах решітного типу. 2 Мета та задачі досліджень. 3 Теоретичні дослідження процесу сепарації. 4 Параметри, що впливають на рух зернового матеріалу. 5 Теоретичні дослідження процесу сепарації. 6 Програма та методика експериментальних досліджень. 7 Схема експериментальної установки. 8 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз. 9 Кошторис витрат на проведення досліджень. 10 Загальні висновки.

#### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Посада, прізвище та ім'я консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 – 6	доцентка СОВА Наталія	09.11.2023	08.12.2023

7. Дата видачі завдання 09 листопада 2023 року.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	09.11-10.11.23	виконано
2	Сучасний стан питання сепарування зернового матеріалу	13.11-15.11.23	виконано
3	Теоретичне дослідження процесу сепарування зернової суміші на циліндричному підсівному решіт із вертикальною віссю обертання	16.11-17.11.23	виконано
4	Програма і методика експериментальних досліджень	20.11-22.11.23	виконано
5	Результати експериментальних досліджень та їх аналіз	23.11-28.11.23	виконано
6	Охорона праці та захист навколишнього середовища	29.11-30.11.23	виконано
7	Організаційно-економічна частина	01.12-04.12.23	виконано
8	Загальні висновки та бібліографія	05.12-06.12.23	виконано
9	Розробка та підготовка демонстраційного матеріалу	07.12.2023	виконано

**Здобувач вищої освіти** \_\_\_\_\_ Максим ВОЛКОВ  
( підпис )

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_ Наталія СОВА  
( підпис )

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка магістерської роботи містить: 83 сторінки друкованого тексту, 25 рисунків та ілюстрацій, 7 таблиць та використано 49 літературних джерел посилань.

Мета роботи – інтенсифікація процесу сепарування зерна на циліндричному підсівному решеті, що має довгасті отвори, розташовані під кутом до твірної і внутрішній барабан з комбінованими пластинами відцентрово-решітного сепаратора.

Об'єкт дослідження – процес сепарування зернової суміші в відцентрово-решітному сепараторі.

Предмет дослідження – закономірності процесу сепарування на підсівному решеті з внутрішнім барабаном відцентрово-решітного сепаратора.

Найбільш перспективним напрямком при створенні робочих органів машин попереднього очищення є відцентрово-решітне сепарування.

Відцентрові сепаратори компактні, площа робочих органів в них в порівнянні з плоско-решітними сепараторами при однаковій продуктивності, в кілька разів менше. Застосування сепараторів з вертикальною віссю обертання і циліндричним решетом з продовгуватими отворами дозволить знизити енерго- та металовитрати на одиницю продукції в 1,5 – 2 рази в порівнянні з машинами, що мають традиційну плоско-решітну схему.

Використання запропонованого способу сепарування дає можливість для проектування сімейства машин на основі блочно-модульної побудови самих сепараторів і технологічних ліній для очищення зерна.

Ключові слова: РОБОТА, СЕПАНУВАННЯ, ВІДЦЕНТРОВИЙ, СЕПАРАТОР, ДОСЛІДЖЕННЯ, ЗЕРНО, МАТРИЦЯ, ПЛАНУВАННЯ, ВИРОБНИЧА ПЕРЕВІРКА, АДЕКВАТНІСТЬ, ЕФЕКТИВНІСТЬ.

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ	10
1.1 Класифікація решіт і отворів решіт зерноочисних машин	12
1.2 Класифікація відцентрових сепараторів	15
1.3 Переваги і недоліки відцентрових решіт	15
1.4 Відцентрово-решітні сепаратори з пластинчастим барабаном і вертикальною віссю обертання	18
Висновки за розділом	22
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ НА ЦИЛІНДРИЧНОМУ ПІДСІВНОМУ РЕШІТІ ІЗ ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ	24
2.1 Опис технологічної схеми відцентрово-решітного сепаратора	24
2.2 Параметри, що визначають рух зернового матеріалу на підсівному блоці відцентрово-решітного сепаратора	28
2.3 Рівняння процесу сепарування на підсівному решітці відцентрово-решітного сепаратора з комбінованими пластинами барабана	31
Висновки за розділом	37
3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	38
3.1 Програма і методика експериментальних досліджень	38
3.2 Опис експериментальної установки	38
3.3 Прилади та обладнання, що застосовуються при експериментальних дослідженнях	43
3.4 Характеристика зернового матеріалу	45
3.5 Методика проведення дослідів	45
3.6 Методика проведення багатofакторного експерименту	49
Висновки за розділом	54

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ	55
4.1 Вплив діаметра отворів решета на ефективність очищення і втрати зерна у відходи	56
4.2 Вплив кроку розстановки комбінованих пластин барабана на ефективність очищення зерна від дрібних домішок	57
4.3 Дослідження циліндричного решета з продовгуватими отворами на очищенні зерна від дрібних домішок	59
4.5 Вплив кінематичного режиму на ефективність очищення зерна	61
4.6 Вплив питомої подачі зернової суміші на повноту виділення дрібних домішок	63
4.7 Вплив висоти решета на інтенсивність просіювання дрібних домішок	65
4.8 Вплив вихідної засміченості зернової суміші на показники процесу сепарування	66
Висновки за розділом	68
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ В НАВКОЛИШЬОГО СЕРЕДОВИЩА	69
5.1 Розробка карти безпеки праці	69
5.2 Утилізація відходів виробництва на елеваторі ТОВ «Павлоградзернопродукт»	70
Висновки за розділом	70
6 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	71
6.1 Організація проведення дослідження	71
6.2 Витрати, пов'язані з проведенням дослідження	72
6.3 Розрахунок ціни дослідження	75
Висновки за розділом	76
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	77
БІБЛІОГРАФІЯ	78

## ВСТУП

Продовольча безпека є складовою частиною національної безпеки України і в значній мірі визначається саме валовим збором зерна, необхідного для формування насіннєвих фондів, забезпечення продуктами харчування населення і тваринництва зернофуражу. Головним завданням агропромислового комплексу залишається стійке нарощування виробництва зерна.

Отримання високої врожайності не гарантує прибутковості зерновиробництва. Вирощений хліб ще необхідно прибрати, очистити і зберегти, що досить важко зробити в різко мінливих погодних умовах.

Прибраний з поля урожай може бути піддано негайного очищення, принаймні попередньої, тобто виділенню з зернового вороху дрібного насіння бур'янів, легкої домішки у вигляді полови.

На післязбиральну обробку і зберігання зерна припадають значні витрати, пов'язані з його виробництвом. Для їх скорочення необхідно вдосконалювати технології та технічні засоби, підвищувати їх продуктивність. Широке використання перспективних сучасних зерноочисних машин дозволить знизити витрати на обробку зерна [38].

У більшості малих та середніх господарств переважають зерноочисні агрегати типу ЗАВ, побудовані в 80-их роках. Модернізація типових агрегатів і будівництво нових технологічних ліній для очищення зерна і насіння з використанням сучасного обладнання – це першочергове завдання для керівників господарств. Зерновиробники через низьку якість насіння щорічно недобирають 5 – 10 % врожаю [46].

Втрати врожаю, за експертними оцінками, через висів некондиційного насіння складають від 10 до 15 млн. тон на рік, а через не вирішення питань комплексної механізації післязбиральної обробки і зберігання від 5 до 10 млн. тон на рік [13].

Машини попереднього очищення, оснащені плоскими решетами, в тому числі і підсівними, мають низьку продуктивність. У типових агрегатах через недосконалість їх технологічної схеми, машини первинного очищення виконують аналогічну технологічну операцію. Тому необхідно розробляти нові способи сепарування і створювати робочі органи, здатні високоефективно очищати зерно від дрібних домішок.

Найбільш перспективним напрямком при створенні робочих органів машин попереднього очищення є відцентрово-решітне сепарування.

Відцентрові сепаратори компактні, площа робочих органів в них в порівнянні з плоско-решітними сепараторами при однаковій продуктивності, в кілька разів менше. Застосування сепараторів з вертикальною віссю обертання і циліндричним решетом з продовгуватими отворами дозволить знизити енерго- та металовитрати на одиницю продукції в 1,5 – 2 рази в порівнянні з машинами, що мають традиційну плоско-решітну схему.

Використання запропонованого способу сепарування дає можливість для проектування сімейства машин на основі блочно-модульної побудови самих сепараторів і технологічних ліній для очищення зерна.

У зв'язку з цим, розробка технічних засобів для інтенсифікації процесу попереднього очищення зернового вороху, первинного очищення зерна є актуальною науково-практичною проблемою, що має велике значення для народного господарства України.

Мета роботи – інтенсифікація процесу сепарування зерна на циліндричному підсівному решеті, що має довгасті отвори, розташовані під кутом до твірної і внутрішній барабан з комбінованими пластинами відцентрово-решітного сепаратора.

Для вирішення поставленої мети нами були висунуті наступні завдання дослідження:

1. Встановити закономірності основних факторів сепарування, під час очищення зерна на циліндричному підсівному решеті.



2.Розробити механіко-математичну модель процесу руху зернового матеріалу по підсівному решеті з пластинчастим барабаном і процесу сепарування на ньому з урахуванням роботи комбінованих пластин.

3.Обґрунтувати основні конструктивно-кінематичні параметри сепаратора і вивчити вплив технологічних параметрів на його роботу.

4. Провести розрахунок вартості досліджень.

Об'єкт дослідження –процес сепарування зернової суміші на підсівному решеті в відцентрово-решітному сепараторі.

Предмет дослідження– закономірності процесу сепарування на підсівному решеті з внутрішнім барабаном відцентрово-решітного сепаратора.

## 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ

Очищення зерна – це складний процес, для інтенсифікації якого необхідно вирішити технічне протиріччя, домогтися необхідної продуктивності при максимальній ефективності і в той же час мінімізувати втрати зерна у відходи.

Сучасне уявлення післязбиральної обробки зерна розглядає процес сепарування одночасно з детермінованим підходом, в області руху зернової суміші, і стохастичним підходом, в області просіювання прохідової фракції.

Детермінований підхід до процесу руху зернової суміші розглянуто в роботах Горячкіна В.П., Гортинського В.В., Дринчі В.М. та інших дослідників.

Спроба відійти від загальноприйнятого підходу в області сепарування зернової суміші була зроблена в роботі [29], де процес сепарування розглянуто як детермінований процес.

Основним завданням при дослідженні процесу очищення зерна є відшукування залежності процесу сепарування від кінематичних, конструктивних, параметрів зерноочисної машини і фізико-механічних властивостей поділюваних продуктів.

В пошуках більш ефективних способів сепарування сипучих матеріалів зріс інтерес до відцентрованих сепараторів, у яких виділення часток через сепарувальну поверхню відбувається під дією інерційних сил, набагато переважаючих сили тяжіння. Поділ сипучих матеріалів в полі дії відцентрових сил дозволяє інтенсифікувати процес сепарування. Постійний контакт з сепарувальною поверхнею збільшує ймовірність попадання частинок в отвори, а велика швидкість руху сепарованого матеріалу забезпечує високу продуктивність відцентрових сепараторів [41].

Загальний пристрій і принципи роботи плоско-решітних сепараторів вивчені в повній мірі. На їх основі розроблено велику кількість сепарувальних робочих органів з різними схемами розміщення решіт, складені класифікації і представлені схеми роботи. Відцентрове сепарування – це відносно новий спосіб поділу зернових матеріалів на фракції і тому недостатньо вивчений. Ми

спробували узагальнити пристрої відомих відцентрових сепараторів по загальним схематичним ознаками (рис. 1.1).

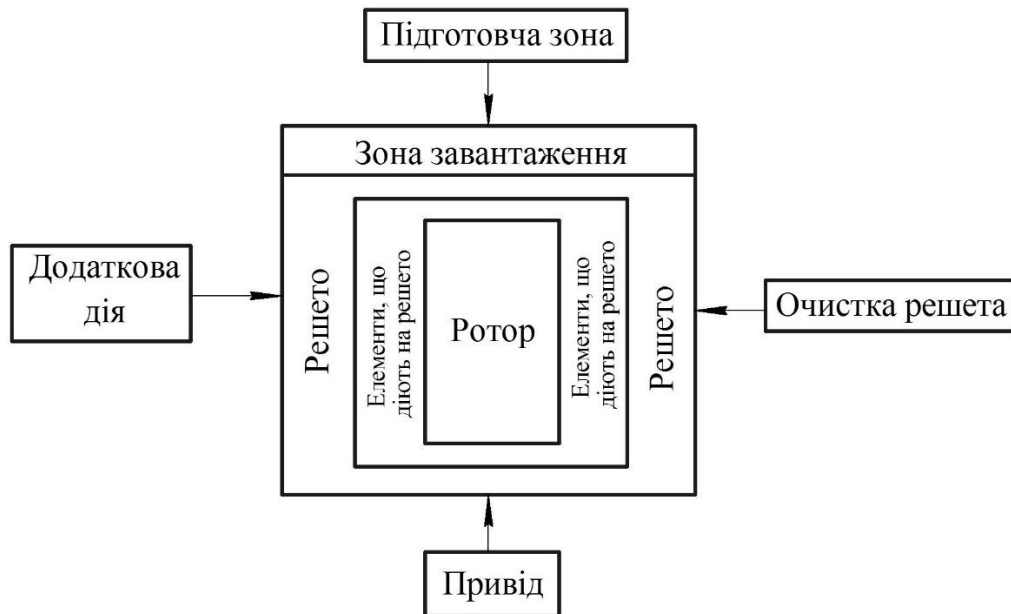


Рисунок 1.1 – Принципова схема пристрою відцентрово-решітного сепаратора

Будь-який відцентровий сепаратор представляє закінчену технічну систему, що складається з взаємозв'язаних вузлів і елементів. Таким елементом, загальним для всіх розглянутих машин, є підготовча зона. У цьому пристрої відбувається розшарування матеріалу, що очищається, надання йому первісної швидкості і спрямованого руху. У підготовчій зоні зернові частки розрихлюються і орієнтуються в заданому напрямку.

Далі розташовується зона завантаження, що складається з нерухомої або горловини, що обертається, механізмів рівномірного розподілу маси, що надходить по ширині або площі решета.

Основним робочим органом є решето різної форми (циліндричної, конічної, параболічної), яке безпосередньо здійснює поділ сумішей на дві фракції. Залежно від форми і розміру отворів решіт з зернового вороху виділяються насіння бур'янів і зернові домішки.

Додатковим механізмом, що допомагає розшаровуватися (розпушувати) матеріал, може бути внутрішній ротор різного виконання (у вигляді циліндра, пластинчастого барабана, шнека, спіралі та інше), а також він може

розташовуватися на решеті. Решето і ротор відцентрово-решітних сепараторів є єдиною конструкцією, яка може мати різноманітні технічні рішення.

Обертання відцентрових решіт і внутрішніх пристроїв здійснюється через приводний механізм, що складається з двигуна і передавальних елементів.

Для підвищення ефективності процесу очищення можуть застосовуватися додаткові пристрої, які впливають на решето: вібропривід – додає коливання, продувні пристрої – створюють повітряний потік, що проходить крізь решето та інше.

Очищення отворів решіт від застряглих зерен здійснюється щітковими механізмами: капроновими щітками циліндричної або плоскої форми, або гумовими кільцями (круглими, овальними).

Розглянемо більш докладно кожен елемент сепараторів і складемо класифікацію пристроїв, що беруть участь в роботі очисних машин.

### 1.1 Класифікація решіт і отворів решіт зерноочисних машин

Сучасний рівень розвитку виробництва техніки для післязбиральної обробки зерна значно поступається рівню розвитку досліджень в даній області. У зв'язку з цим необхідно розглянути стан досліджень в області очищення зерна, класифікувати основні параметри машин і дати рекомендації для їх подальшого вдосконалення.

Основна класифікація типів решіт за призначенням представлена на рисунку 1.2. Ділильні решета призначені для поділу зернової суміші на дві частини (наприклад, для поділу суміші на два решітних стану або працюють як збагачувачі). Фракційні решета призначені для розділення вихідного матеріалу на дві фракції, що відрізняються, як правило, за розмірами. Проходові решета мають найбільші отвори в розмірному ряду решіт, пропускають через себе основну частину зерна. Вони призначені для виділення із зернової купи великих і соломистих домішок. Сходові решета можуть використовуватися як сортувальні, або як підсівні для очищення зерна від дрібних домішок.

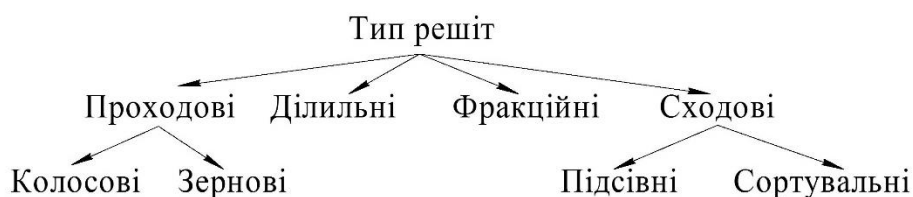


Рисунок 1.2 – Класифікація решіт за призначенням

Найбільш важливим в процесі сепарування є просіювання зерна через отвори. За геометрією отвори можна розділити: круглі – для поділу зернового матеріалу по ширині; прямокутні – для поділу по товщині [36]; овальні – для збільшення ефективності сепарування по ширині, в порівнянні з круглими. Щілинні решета (струнні) використовуються в плоско-решітних, [18, 20], циліндричних [33] і конічних сепараторах [32]. В даному випадку, щілина стає дедалі більшою до більшої основи конуса. Трикутні, круглі лункоподібні, квадратні використовуються для сепарування окремих культур з специфічною будовою насіння – гречки, кукурудзи, сої тощо.

Рельєфні решета використовуються в машинах для обробки насіння кукурудзи [48].

Решета з гексагональними отворами, плоскої і рельєфної форми – це новий вид сепарувальної поверхні, що прийшла на зміну решіт з круглими отворами. Переваги полягають у наступному: збільшена пропускна здатність, завдяки додатковим граням; більший живий переріз через зменшення товщини перемичок; зниження забивання, так як площа окремо взятого отвору більше в порівнянні з круглим отвором [23].

У площині решета отвори круглої і гексагональної форми можуть розташовуватися у вигляді трикутника, шестикутника і по квадрату.

За профілем поверхні вони поділяються на плоскі (звичайні пробивні решета) [20, 21], опуклі і увігнуті [27, 29], а також рельєфною форми для інтенсифікації процесу очищення насіння [20, 21].

За розмірами – отвори постійного розміру, регульованого (циліндричне спіральне решето Пінея із змінною відстанню між навивкою) [45] і змінними

розмірами отворів [12], де зміна розміру отворів забезпечується зміщенням рухомого решета щодо нерухомого, встановленого впритул до першого.

Розташування отворів на решеті має не менш важливе значення для процесу сепарування.

Довгі отвори в відцентрово-решітних сепараторах по відношенню до осі обертання можуть розташовуватися: горизонтально, вертикально, під кутом, мати змінне розташування, а також складне у вигляді спіралі [9]. Розташування отворів по спіралі вибрано виходячи з траєкторії руху матеріалу. Це забезпечує найбільше просівання.

У плоских решетах крім розміщення отворів уздовж поверхні зустрічається розташування рядами зі зміщенням і під кутом до твірної решета [31].

Все решета характеризуються загальним показником – коефіцієнтом живого перетину, який знаходиться як відношення площі отворів до всієї площі решета, на якому вони розташовуються. Широке поширення отримали плоскі пробивні решета, головним недоліком яких є малий живий переріз через наявність широких перемичок.

Плетені решета (тканинні сита) використовуються в основному в круп'яній та борошномельній промисловості, де потрібні дрібні отвори і не потрібне їх очищення.

Дротові зварні решета мають площу живого перетину на 50 – 55 % більше, ніж пробивні решета з продовгуватими отворами [8]. Вони широко застосовуються в конструкціях скальператорів, так як прості у виготовленні і мають тривалий термін служби.

Відмінність струнних решіт від дротово-зварних у відсутності перемичок і здатність струн утворювати довгу щілину будь-якої ширини з можливістю її поступового збільшення [32].

Просторові решета утворюють довгі щілини між ребрами різної форми. Профіль ребер може бути: трикутний [28], прямокутний, овальний. Решета можуть утворюватися пластинами, що мають у верхній частині круглі виступи

[25] і т. д. Такий тип решіт добре розширює матеріал і направляє його уздовж щілини, де відбувається просіювання часток.

## 1.2 Класифікація відцентрових сепараторів

Відцентрово-решітні сепаратори за формою робочої поверхні підрозділяються на: циліндричні [1], конічні [33], параболоїдні [37], ступінчасті [17] і комбіновані [37]. По розташуванню решіт можна розділити на послідовне, яке здобуло найбільшого поширення, і концентричне [1].

По розташуванню осі обертання відцентрової-решітні сепаратори поділяються: горизонтальні, вертикальні, розташовані під кутом до горизонту і із змінним кутом нахилу [37].

За ознакою поділу зернової суміші: ширині, товщині, довжині і комбінований спосіб (поєднує в собі кілька ознак поділу) [37].

За способом завантаження матеріалу сепараторів з вертикальною віссю обертання поділяються: завантаження зверху, знизу [10] і з системою розвантаження [12].

За ступенем впливу на об'єкт сепарування підрозділяються на сепаратори прямої дії і з ефектом розширення зернової суміші (ефект стратифікації).

Ефекту стратифікації домагаються на відцентрових решетах за допомогою подачі повітряного потоку, як з зовнішньої поверхні решета [7], так і з внутрішньої [10].

Використання струнного решета також сприяє розширенню зернової суміші. Даний спосіб сепарування знайшов відображення в роботі [33].

## 1.3 Переваги і недоліки відцентрових решіт

Перевага відцентрово-решітних сепараторів полягає в тому, що створюється постійний контакт частинок з сепарувальною поверхнею. Це підвищує ймовірність попадання частинок в отвори, а велика швидкість руху сепарованого матеріалу забезпечує високу продуктивність відцентрових сепараторів [41]. У

вертикальному циліндричному решеті вага частинок повністю використовується для надання їм необхідної відносної швидкості, а поле відцентрових сил зберігається незмінним по всій сепарувальній поверхні. Наприклад, в вібровідцентрових сепараторах траєкторіями відносного руху частинок є прямі, паралельні осі обертання решета. У циліндричному похилому решеті в повному обсязі використовується можлива питома продуктивність його поверхні.

Аналіз існуючих технічних рішень показав, що загальним недоліком циліндричних решіт є критична швидкість руху частинок по сепарувальній поверхні, при якій відбувається заклинювання матеріалу.

Конічне решето при відповідному виборі кута конусності і рівних з циліндричним решетом прискоренням вібрацій дає можливість застосувати більш високі швидкості обертання. Зі збільшенням кута конусності зростає нерівномірність поля інерційних сил по довжині твірної решета, в результаті чого на ділянках з його меншим діаметром ефективність сепарування нижче.

Загальний недолік конічних сепараторів – рух сепарованого матеріалу по робочій поверхні від вершини конуса до основи з прискоренням, за рахунок чого час проходження частинки над отвором різко зменшується і частка меншого діаметру, в порівнянні з отвором, може не встигнути пройти через нього.

Для параболічного решета характерна невідповідність між напрямком руху зернового шару і умовою найкращого використання сепарувальної поверхні. Внаслідок цього знижується питома продуктивність решета [16].

У параболоїдному решеті, як і в конічному, частинки рухаються не тільки уздовж твірної поверхні решета, але мають відхилення за рахунок дії Коріолісової сили інерції.

У зв'язку з цим сепарувальна поверхня повинна виконуватися як єдине ціле, що ускладнює динамічне зрівноважування ротора. До того ж решето параболоїдної форми, в порівнянні з іншими, значно складніше у виготовленні. На рис. 1.3 представлені сили, що діють на зерно при русі його по відцентровим решетам різної форми.



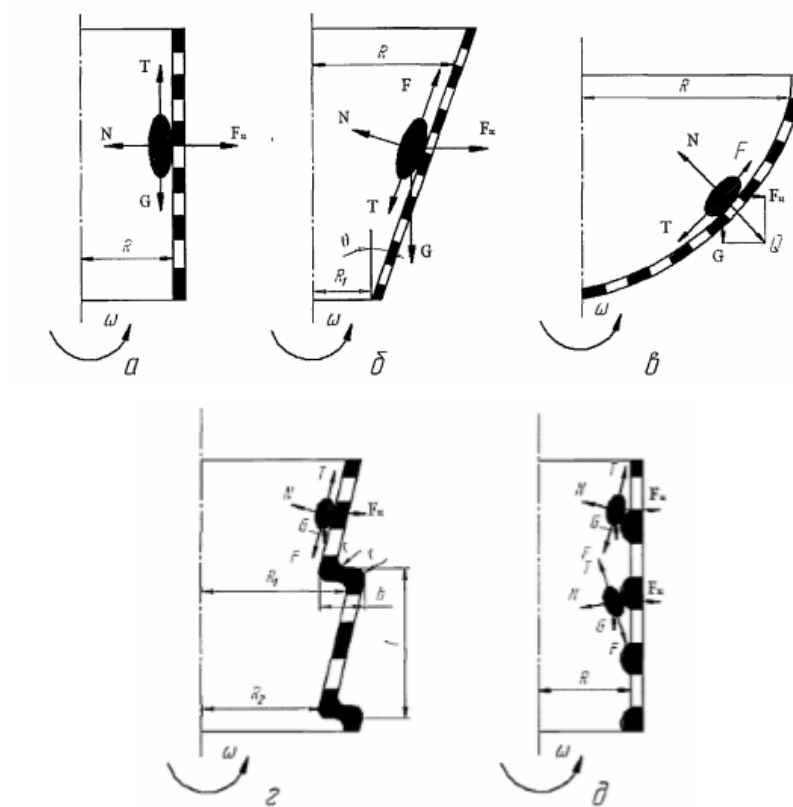


Рисунок 1.3– Сили, що діють на зерно при русі його по відцентровим решетам різної форми:

*a*– циліндричне решето; *б*– конічне решето; *в*– параболічне решето;  
*г* – зигзагоподібне решето; *д* – циліндричне решето з рифами;  $R_1, R_2$  – радіуси решета;  $N$ – нормальна реакція решета;  $G$  – сила ваги частинки;  $F_y$  – відцентрова сила інерції;  $T$ – сила тертя зернівки об решето;  $F$  – рушійна сила;  $Q$  – результуюча сила;  $r$  – радіус закруглення;  $\omega$  – кутова швидкість;  $\theta$  – кут нахилу решета.

Проведені теоретичні дослідження показали, що переміщення частинок зернового шару по сепарувальній поверхні циліндричного решета з вертикальною віссю обертання є найбільш ефективним [16].

#### 1.4 Відцентрово-решітні сепаратори з пластинчастим барабаном і вертикальною віссю обертання

Розглянувши класифікацію відцентрових сепараторів і їх робочих органів, були виявлені переваги і недоліки сепараторів різної форми. Найбільш перспективними для подальшого дослідження є відцентрово-решітні сепаратори, з внутрішнім пластинчастим барабаном. Розглянемо детальніше внутрішній устрій і технологічний процес існуючих розробок.

В [25] досліджено процес сепарування зерна по довжині вертикальними циліндричними решетами з орієнтацією зерна в активному шарі.

Циліндричний решітний сепаратор-вівсюговідбірник ЦРО з вертикальною віссю обертання, використовуючи принцип безперервного видалення довгих домішок з поверхні циліндричного решета за допомогою спіралі, очищає вихідну суміш від довгих домішок. Зерна під дією відцентрової сили притискаються до решета, орієнтуються довгою віссю відносно круглих отворів і потім транспортуються гвинтовою спіраллю під кільцеву щітку.

Робочій процес в відцентрово-решітному сепараторі-вівсюговідбірнику (рис. 1.4) протікає в такий спосіб. Зернова суміш подається через нерухому завантажувальну горловину 9 і надходить у простір між решетом і барабаном. Решето і барабан обертаються в одну сторону, але зрізними швидкостями. Внаслідок цього в кільцевому шарі матеріалу, розташованого між пластинами барабана і решетом, відбувається відносне проковзування елементарних шарів зерен і переміщення їх по поверхні решета. Зерна першого (контактуючого з решетом) елементарного шару, переміщаючись по решету, просіваються через отвори, утворюючи проходову фракцію II, а довгі домішки (вівсюг і ін.), перекриваючи собою отвори решета (див. рис. 1.4 б), не можуть проходити в них і спіраллю безперервно транспортуються з-під кільцевого шару матеріалу в осьовому напрямку і далі в зазор між решетом і кільцевою щіткою. При русі матеріалу в цьому зазорі відбувається остаточне просіювання проходових зерен.

Щоб гвинтова спіраль транспортувала (виводила з-під кільцевого шару) в осьовому напрямку частки, що лежать на поверхні решета, товщина її (в радіальному напрямку) повинна бути рівною товщині одного елементарного шару зернового матеріалу.

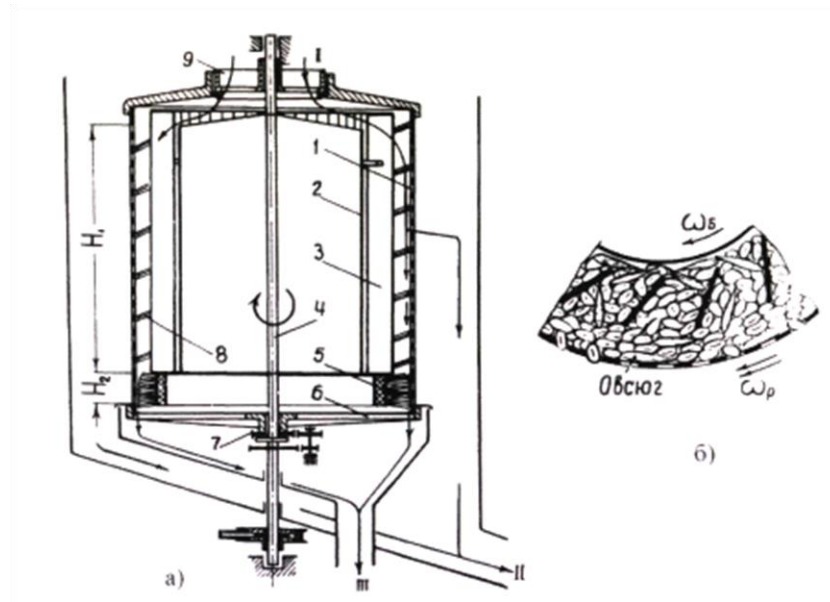


Рисунок 1.4 – Принципова схема циліндричного решітного сепаратора-вівсюговідбірника:

- а) поздовжній розріз ЦРО: 1 – решето; 2 – пластинчастий барабан; 3 – пластина барабана; 4 – вал барабана; 5 – кільцева щітка; 6 – хрестовина решета; 7 – зубчата передача приводу решета; 8 – гвинтова спіраль; 9 – завантажувальна горловина;
- б) технологічна схема поділу: I – подача вихідного зернового матеріалу; II – вихід насіння проходової (короткої) фракції; III – вихід насіння (довгої) фракції.

Так само було обґрунтовано оптимальне співвідношення кутових швидкостей решета і пластинчастого барабана  $\frac{\omega_B}{\omega_P} = 0,57$ . Виробничі дослідження показали, що повнота виділення вівсюга становить 78 – 84 % при питомій продуктивності 18 – 21 т/м<sup>2</sup>·год. Втрати зерна в відходи менше 0,3 %.

В роботі [48] запропоновано в конструкції вівсюговідбірника використовувати попередню підготовку зернового матеріалу, що дозволило підвищити продуктивність решета і повноту виділення довгих домішок. Для

розвантаження зернового циліндричного решета після завантажувальної горловини були встановлені конічний живильник і ділильне решето.

Дослідивши підготовчу зону, було обґрунтовано застосування шестилопатевого живильника з кутом розкриття конуса  $45^\circ$ , для подання поступаючому зерновому вороху початкової швидкості руху і подачі його на внутрішню поверхню ділильного решета.

Ділильне решето оберталося зі швидкістю циліндричного решета і служило для попереднього розшарування матеріалу, що надходить. Параметри решета наступні: кут розкриття конуса  $10 - 11^\circ$ , діаметр отворів  $6,0 - 6,5$  мм.

Сепаратор працював наступним чином (рис. 1.4). Зернова суміш, яка містить великі і довгі домішки надходила через завантажувальну горловину 1 на поверхню живильника 2, який відкидав суміш на внутрішню поверхню конічного ділильного решета 3, і вона захоплюється ним, рухаючись по поверхні. При цьому основна маса зерен і дрібні включення просіювались через отвори, а великі домішки і сторонні предмети йшли сходом. Завдяки цьому опрацьований матеріал, що пройшов через отвори ділильного решета 3, отримувалась більш збагаченим зерном культури, що очищалась. Сход з ділильного решета 3 надходив на колосове решето 4 і при русі по його поверхні сепарувався, а великі домішки і сторонні предмети йшли сходом з останнього і віддалялися скребками в лоток. Матеріал, який пройшов через отвори ділильного решета 3, надходив в кільцевий шар між пластинами барабана 5 і циліндричним решетом 6. Внаслідок різниці швидкостей обертання циліндричного решета 6 і барабана 5 відбувалося відносне ковзання зернового матеріалу по поверхні решета, а також між елементарними шарами. Завдяки цьому довгі домішки орієнтуються, вкладаючись поздовжньою віссю щодо поверхні решета 6. Зерна культури, що очищається, просіваються через отвори циліндричного решета і виводяться з машини, а довгі домішки гвинтовою спіраллю транспортуються вниз.

Відмінність також полягало в тому, що прохід через колосове решето 4 також надходив в кільцевої шар, але значно пізніше, ніж прохід через ділильне решето. Внаслідок цього довгі домішки надходили на поверхню циліндричного

решета 6 в його нижній частині, завдяки чому шлях ковзання довгих домішок по поверхні циліндричного решета і, отже, ймовірність проходження їх через отвори решета знижувалася. Це сприяло підвищенню продуктивності і якості очищення зерна від довгих домішок.

Виробничі випробування експериментального зразка сепаратора показали, що при продуктивності 25 – 27 т/год повнота виділення довгих домішок склала 84 %, а втрати зерна у відходи 0,29 %.

Подальші дослідження відцентрово-решітного сепаратора ЦРС з пластинчастим барабаном були присвячені вдосконаленню його конструкції.

У роботі [48] обґрунтовано способи поліпшення підсівного блоку відцентрово-решітного сепаратора. Ним були досліджені вплив основних параметрів на процес сепарування і розроблена математична модель процесу руху зернового матеріалу на циліндричному підсівному решеті.

Конструктивна відмінність від сепаратора, зображеного на рисунку 1.5, полягає в тому, що між конічної обичайки і зерновим решетом додатково встановлено блок підсівних решета, а пластинчастий барабан виконаний двосекційним, з утворенням підсівної секції, пластини якої встановлені під кутом нахилу  $\beta = 40 - 45^\circ$  до радіусу в сторону обертання [12].

Додатково в конічній обичайці з внутрішньої сторони великої основи виконано циліндричну ділянку, на якій встановлені гасителі окружної швидкості зернової суміші, вони виконані у вигляді лопаток; ширина яких рівна двом еквівалентним діаметрам зернової частки в радіальному напрямку, причому гасителі окружної швидкості розташовуються з кроком в два рази більшим кроку розстановки пластин підсівної секції. Внесені в конструкцію зміни: установка пластин з кутом нахилу  $45^\circ$ , гасителі окружної швидкості і використання підсівного решета з діаметром отворів 3,6 мм дозволило виділяти дрібні домішки з ефективністю близько 70 %.

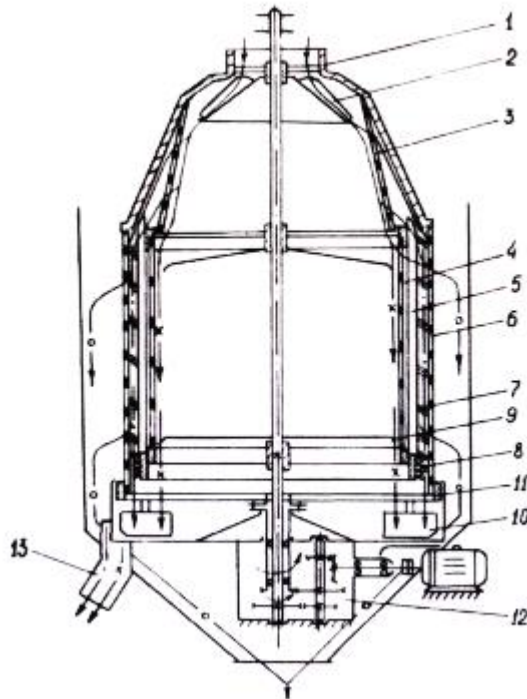


Рисунок 1.5 – Схема відцентрово-решітного сепаратора

1 – горловина, 2 – живильник, 3 – конічне ділильне решето, 4 – колосове решето, 5 – пластинчастий барабан, 6 – циліндричне решето, 7 – спіраль, 8 – кільцева щітка, 9 – еластичне кільце, 10 – скребки, 11 – циліндрична обичайка, 12 – редуктор, 13 – лоток.

#### Висновки за розділом

1. Значно інтенсифікувати робочий процес підсівних решіт зерноочисних машин можна шляхом застосування відцентрових сил для очистки зерна від дрібних домішок. Велике різноманіття вже існуючих технічних пристроїв для виконання даної технологічної операції до теперішнього часу не можуть вирішити проблему відокремлення проходових фракцій.

2. Огляд конструкцій решітних сепараторів вказує на цілеспрямованість застосування підсівних циліндричних решіт, але без вібрації та інших пристроїв, що створюють умови для ефективного протікання технологічного процесу.

3. Застосування відцентрових циліндричних решіт з внутрішнім пластинчастим барабаном, при співвідношенні кутових швидкостей  $\frac{\omega_b}{\omega_p} = 0,5 \dots 0,57$ , дозволяє виключити з технологічного процесу роботи сепаратора вібрацію, що істотно підвищує надійність роботи машини і спрощує її конструкцію. У зв'язку з цим увагу в даній роботі приділено аналітичному і експериментальному дослідженню робочого процесу підсівного решета з пластинчастим барабаном.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ НА ЦИЛІНДРИЧНОМУ ПІДСІВНОМУ РЕШІТІЗ ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

### 2.1 Опис технологічної схеми відцентрово-решітного сепаратора

Очищення зернового вороха включає в себе 3 стадії: 1 – виділення легких домішок; 2 – виділення дрібних домішок і 3 – виділення великих і важковідокремлюваних домішок.

Спираючись на результати досліджень, проведені в [28], [32] і [48], був вдосконалений відцентрово-решітний сепаратор з внутрішнім пластинчастим барабаном. Для очищення зерна сепаратор має систему повітряної очистки (виділення легких домішок), два блоки решіт: підсівне 4 (видалення дрібних домішок) і зернове 5 (очищення від довгих і великих домішок).

Відцентрово-решітний сепаратор (рис. 2.1) складається з нерухомої завантажувальної горловини 1, конічної обичайки 2 з ділильним решето 10 всередині неї, що має роликову опору 3, два блоки решіт 4 і 5, і встановлений всередині блоків пластинчастий барабан 6.

З метою інтенсифікації процесу сепарування пластини 7 виконані у формі тригранного клину. Одна грань 8 якого нахилена під кутом  $\beta = 40 - 45^\circ$  до радіусу в сторону обертання барабана, а друга 9 лежить на одній прямій з продовженням його радіуса (має  $0^\circ$  кут нахилу) [48].

Пластини мають полки для кріплення і встановлені таким чином, що утворюють щілинне решето.

Сепаратор має конічне ділильне решето 10, живильник 11 жорстко пов'язані з конічною обичайкою. Привід решіт здійснюється через обід 12, а пластинчастого барабана від валу редуктора.



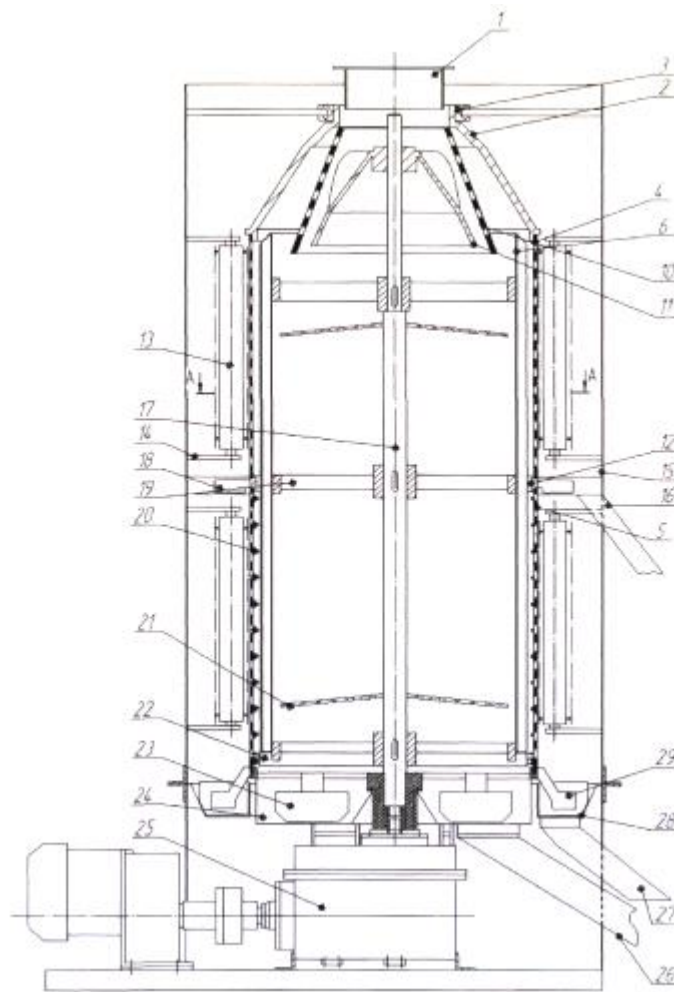


Рисунок 2.1 – Відцентрово-решітний сепаратор

- 1 – завантажувальна горловина; 2 – кінцева обичайка; 3 – роликівна опора;  
 4 – підсівне решето; 5 – зернове решето; 6 – пластинчастий барабан;  
 7 – комбінована пластина; 8 – похила пластина; 9 – радіальна пластина;  
 10 – ділильне решето; 11 – живильник; 12 – обичайка решета; 13 – циліндрична  
 щітка; 14 – пружинне кріплення щітки; 15 – корпус сепаратора; 16 – вихід дрібної  
 фракції; 17 – вал; 18 – скребок; 19 – обичайка для пластин; 20 – спіраль;  
 21 – еластичне кільце; 22 – кільцева щітка; 23 – скребок великої фракції;  
 24 – приймач великої фракції; 25 – привід; 26 – вихід великої фракції; 27 – вихід  
 очищеного зерна; 28 – приймач зерна; 29 – скребок для зерна.

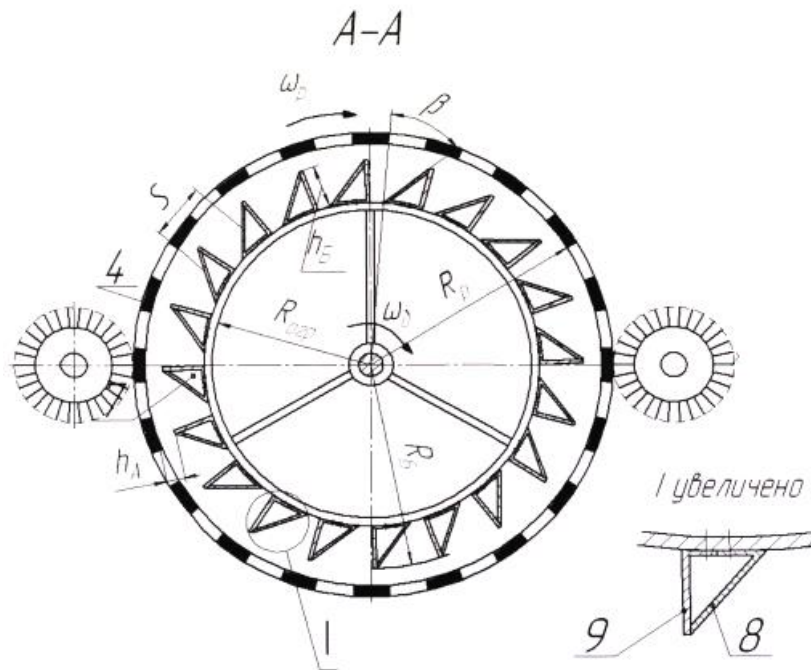


Рисунок 2.2–Поперечний розріз решета підсівного блоку

4 – підсівне решето; 7 – комбінована пластина; 8 –похила пластина;  
9 – радіальна пластина.

Підсівне решето 4 для підвищення ефективності роботи виконано з пробивного полотна з продовгуватими отворами, розташованими під кутом у  $\gamma = 5^\circ$ , з нахилом в протилежну сторону обертання.

Принцип роботи сепаратора наступний. Зернова суміш подається в завантажувальну горловину 1, надходить на живильник 11, відкидається під дією відцентрових сил на внутрішню поверхню конічного ділильного решета 10 і далі рухається вниз, при цьому зерно просіваються через отвори решета. Конічне ділильне решето розділяє зерновий матеріал на дві фракції. Довгі і великі домішки, а також сторонні предмети, що знаходяться в зерновому матеріалі затримуються. Сход з ділильного решета 10 надходить на внутрішню поверхню пластинчастого барабана 6, утвореного основами комбінованих пластин 7 прилеглими до обичайок, а прохід подається в простір між пластинчастим барабаном 6 і циліндричним підсівним решетом 4.

Сторонні предмети йдуть сходом з циліндричного щілинного решета 6, утвореного пластинчастими полицями комбінованих пластин 7 підсівної секції і завдяки еластичному кільцю 21 потрапляють в приймач великої фракції 24.

Решето і барабан обертаються в одну сторону, але з різними швидкостями,  $\left(\frac{\omega_B}{\omega_P} = 0,57\right)$ , завдяки приводу. У кільцевому шарі матеріалу  $h_a$ , між циліндровим підсівним решетом 4 і пластинами 7 підсівної секції відбувається відносне ковзання елементарних концентричних шарів. Ці шари утворюють загальний активний шар, в якому під дією відцентрових сил і сил тяжіння відбувається поділ зернової суміші.

Зерновий матеріал, потрапляючи на решето 4, під дією відцентрових сил притискається до нього, комбінованими пластинами 7 створює додатковий тиск на зернову суміш, що знаходиться в активному шарі. Завдяки грані 9 виключається неробоча зона, звідки дрібні фракції не могли пройти на підсівне решето. Під дією відцентрових сил і сил тиску пластин дрібні домішки, проходячи крізь пори між зернівками, виявляються на поверхні решета. Зернова суміш, що рухається по решету, має відхилення від вертикальної осі, тому продовгуваті отвори решета, виконані з кутом нахилу  $\gamma = 5^\circ$ , сприяють максимальному виділенню дрібних домішок.

Далі дрібні домішки потрапляють в приймач дрібної фракції 17, де скребками 18, виводяться по патрубку виведення дрібній фракції 16 з сепаратора. Зерно, очищене від дрібних домішок, йде сходом по решету і надходить на решето 5, де відбувається подальша очистка від довгих і великих домішок. Довгі частки під дією тертя в активному шарі укладаються «пластом» на зернове решето. Ковзання зернової суміші відносно поверхні решета дає можливість зернам основної культури проходити через отвори решета, цьому сприяють відцентрові сили. Очищене зерно, яке пройшло крізь отвори зернового решета, надходить в приймач очищеного зерна 28 і скребками 29 через патрубок 26 виводиться з машини. Довгі домішки залишаються на поверхні зернового решета 19 і спіраллю 20 безперервно транспортуються з під кільцевого шару матеріалу в

осьовому напрямку через кільцевий зазор між зерновим решето 5 і кільцевою щіткою 22 в приймач великої фракції 24, звідки скребками 23 викидаються в патрубок 26 разом зі сторонніми предметами і грубими домішками.

2.2 Параметри, що визначають рух зернового матеріалу на підсівному блоці відцентрово-решітного сепаратора

Розглянемо процес руху зернової суміші по циліндричному решету в відцентрово-решітному сепараторі (ЦРС) з внутрішнім барабаном при використанні комбінованих пластин і решета з продовгуватими отворами, нахиленими під кутом. Для побудови механіко математичної моделі процесу руху зернової суміші в ЦРС приймаємо ряд припущень:

- розглядаємо тільки установлений процес руху зернового матеріалу;
- коефіцієнти тертя постійні і не залежать від кругової швидкості решета і барабана;
- суміш можна вважати однорідною;
- сипуча суміш рухається в сепараторі під дією відцентрової сили, сили тяжіння і інерції матеріалу;
- прискорення частинок, що знаходяться в кільцевому активному шарі і поміщеними між пластинами барабана, прийняті постійними і рівними прискоренню кожного з шарів;
- пластини можна вважати паралельними одна до одної в радіальному напрямку.

Модель руху зернової суміші по решету показана на рис. 2.3. У даній моделі вхідними параметрами є:

- $f_1$  – коефіцієнт тертя зерна об металеву пластину внутрішнього барабана;
- $f_0$  – коефіцієнт тертя зерна про зерно;
- $f_p$  – коефіцієнт тертя зерна про решето.

Регульовані параметри:

- $S$  – крок розстановки пластин на барабані;

- $\omega_p, \omega_B$  – кутова швидкість обертання решета і барабана;
- $\beta$  – кут нахилу пластин барабана;
- $\gamma$  – кут нахилу продовгастих отворів решета в бік, протилежний напрямку обертання;
- $Q$  – подача зернової маси.

Вихідними параметрами є:

- $\mu$  – коефіцієнт трансформації силового тиску;
- $a_{zA}, a_{zB}$  – прискорення руху зернової суміші в осьовому напрямку в активному шарі і між пластинами барабана відповідно;
- $\chi$  – кут між вектором сили тертя активного шару об решето і горизонтом;
- $\beta_{\Pi}$  – кут нахилу сили тертя шару зерна, укладеного між пластинами об активний шар відносно горизонту.
- 

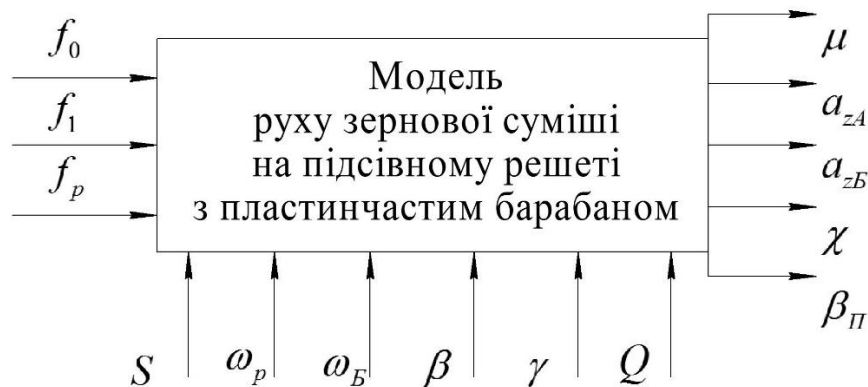


Рисунок 2.3 – Функціональна модель руху зернової суміші по підсівному решету

Сили, що діють на сипуче тіло між комбінованими пластинами барабана:

$F_B^y$  – відцентрова сила інерції.

$$F_B^y = m_B \omega_B^2 R_{Bcp}, \quad (2.1)$$

де  $m_B = S_B l_B \gamma_{cm}$  – маса зернової суміші між пластинами барабана;

$S_B$  – площа поперечного перерізу елемента між пластинами барабана;

$l_B$  – висота виділеного елемента;

$\omega_B$  – кутова швидкість пластинчастого барабана;

$R_{Bcp}$  – середній радіус пластинчастого барабана;

$\gamma_{cm}$  – об'ємна маса зернової суміші.

$F_2^y$  – відцентрова сила інерції в виділеному елементі при дії на нього активного шару;

$F_B^{in} = m_B a_{zB}$  – сила інерції, що діє на сипуче тіло між пластинами барабана в осьовому напрямку:

$m_B$  – маса зернового шару;

$a_{zB}$  – осьове прискорення;

$N, N_1$  – нормальна реакція радіальної і похилої пластин;

$T = f_1 N, T_1 = f_1 N_1$  – сили тертя зернової маси об границі пластини ( $f_1 = tg \varphi_1$  – коефіцієнт тертя зерна об пластину);

$N_0$  – нормальна реакція зернової маси активного шару;

$T_0 = f_0 N_0$  – сила тертя елемента зернової суміші, укладеної між пластинами барабана, о зернову масу активного шару ( $f_0 = tg \varphi$  – коефіцієнт тертя зерна об зерно);

$G_B = m_B g$  – сила тяжіння зернового шару, укладеного між пластинами барабана:

$m_B$  – маса зернової суміші між пластинами барабана;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$N_2$  – нормальна реакція зернової маси на виділений елемент, укладений між пластинами при розгляді дії сил активного шару;

$G_2 = m_2 g$  – сила тяжіння зернового шару, укладеного між пластинами барабана з урахуванням дії сил від активного шару:

$m_2$  – маса зернової суміші між пластинами барабана в другому виділеному елементі.

$F_2^{in} = m_2 a_{z2}$  – сила інерції, що діє на виділений елемент укладений між пластинами барабана в осьовому напрямку з врахуванням дії сил від активного шару:

$a_{zB}$  – осьове прискорення

Сили, що діють на виділений елемент в активному шарі підсівного блоку:

$T_p = f_p N_p$  – сила тертя зернової суміші об решето ( $f_p = tg\varphi_p$  – коефіцієнт тертя зерна об решето);

$N_p$  – нормальна реакція решета;

$P_A = m_A \omega_A^2 R_{Acp}$  – відцентрова сила інерції від виділеного елемента;

$F_A^{in} = m_A a_{zA}$  – сила інерції, що діє на сипуче тіло, виділеного елемента в осьовому напрямку ( $m_A$  – маса виділеного зернового шару,  $a_{zA}$  – осьове прискорення активного шару);

$G_A = m_A g$  – сила тяжіння виділеного елемента в активному шарі,

де  $m_A$  – маса зернової суміші між пластинами барабана.

Нормальна реакція пластини, використовуючи формулу [30] може бути записана у вигляді:

$$N = \frac{1}{2} \gamma_{cm} h_B^2 m_i l_B \omega_B^2 R_{Bcp}, \quad (2.2)$$

де  $h_B$  – товщина зернового шару між пластинами барабана;

$$m_i = tg^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \text{ – коефіцієнт рухливості [30].}$$

2.3 Рівняння процесу сепарування на підсівному решеті відцентрово-решітного сепаратора з комбінованими пластинами барабана

Інтенсивність процесу сепарування на решеті буде залежати від швидкості проходження дрібної фракції крізь шари зерна до решета – сегрегація (перша стадія) і безпосередньо через його отвір – сепарація (друга стадія). Процес сепарування найбільш інтенсивно протікає зі збільшенням відносного ковзання елементарних шарів в сипучому тілі, до настання критичної швидкості, коли відбувається

притиснення шарів один до одного. Отже, друга фаза – сепарація, буде тим інтенсивніше, чим вище швидкість відносного руху активного шару, який контактує з решетою, за умови, що ця швидкість нижча за критичну, коли процес сепарування припиняється.

Таким чином, повноту виділення через решето можемо виразити формулою [26]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\theta_1 \cdot e^{-\frac{t}{\theta_1}} - \theta_2 \cdot e^{-\frac{t}{\theta_2}}}{\theta_1 - \theta_2}; \quad (2.3)$$

де  $\theta_1$  – середній час просування прохідової частки по товщині загального кільцевого зернового шару, тобто середній час перебування прохідової частки в загальному зерновому шарі від моменту набрання цим загальним шаром на початок решета до моменту підходу прохідової частки до сепарувальної поверхні;

$\theta_2$  – середній час перебування прохідової частки на решеті від моменту її надходження на поверхню решета до моменту просіювання;

$t$  – час від моменту надходження прохідової частки в товщу зернового шару до моменту її просіювання.

Оскільки  $\theta_1$  і  $\theta_2$  повинні визначатися експериментально, а рівняння (2.3) не вдається вирішити при відомих, але різних значеннях  $\varepsilon$  (тобто вирішити систему відносно двох невідомих), то величину  $\theta_2$  визначимо теоретично.

Зв'язавши середній час перебування  $\theta$  із середнім шляхом ковзання  $l$  і позначивши його через середній шлях пройдений по решету  $H_{cp}$  отримаємо

$$\varepsilon = 1 - \frac{H_{1cp} \cdot e^{-\frac{H}{H_{1cp}}} - H_{2cp} \cdot e^{-\frac{H}{H_{2cp}}}}{H_{1cp} - H_{2cp}}. \quad (2.4)$$



Для спрощення запису введемо позначення:  $H_{2cp} = \lambda_2$ ;  $H_{1cp} = \lambda_1$  і перетворимо рівняння (2.4) в наступний вигляд:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\lambda_1 \cdot e^{-\frac{H}{\lambda_1}} - \lambda_2 \cdot e^{-\frac{H}{\lambda_2}}}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad (2.5)$$

де  $\varepsilon$  – повнота виділення дрібних домішок, що визначається експериментально.

Застосування решіт з продовгуватими отворами змінює теорію просіву написану, для круглих отворів. У продовгасті отвори може пройти кілька насінин дрібної фракції, що одночасно підійшли до решета, а не одне як в круглі. Комбіновані пластини сприяють інтенсивному розшаруванню зернової купи і стабілізації руху матеріалу по решету. Зробимо припущення, що процес виділення дрібних домішок в відцентрово-решітному сепараторі можна описати одношаровою моделлю.

Тоді рівняння (2.3) і (2.6) приймуть вид:

$$\varepsilon = 1 - \lambda \cdot e^{-\frac{t}{\theta}}; \quad (2.6)$$

$$\varepsilon = 1 - \lambda \cdot e^{-\frac{H}{\lambda}}. \quad (2.7)$$

Підставляючи у формули  $\varepsilon$ , взяті з результатів конкретних дослідів, визначимо  $\lambda$ . Порівняємо експериментальну криву ефективності очищення зерна від висоти решета і теоретичну, побудовану за формулою 2.7 і наведеними на рисунку 2.4.

Знайдемо  $\theta$  середній час перебування матеріалу в сепараторі, для цього скористаємося формулою:

$$m = Q \cdot t; \quad (2.8)$$

де  $m$  – маса зернової суміші, що знаходиться всередині циліндричного решета;

$Q$  – продуктивність відцентрово-решітного сепаратора.

Визначимо масу зернової суміші з урахуванням технологічних параметрів:

$$m = V \cdot \rho, \quad (2.9)$$

де  $\rho$  – щільність сипучого тіла. Для пшениці «критична» щільність (мінімальна щільність укладання частинок в площинах зсуву)  $\rho = 685 \text{ кг/м}^3$  [26];

$V$  – об'єм кільцевого шару зернового матеріалу, що знаходиться на сепаруючій поверхні.

Відповідно знайдемо об'єм:

$$V = S \cdot H; \quad (2.10)$$

де  $H$  – висота циліндричного решета;

$S$  – площа зерна в поперечному розрізі підсівних блоку.

Розглянемо об'єм зернового матеріалу, що знаходиться на підсівному циліндричному решеті при сталому режимі.

Площа в поперечному розрізі барабана, зайнята зерном:

$$S = S_A + S_B, \quad (2.11)$$

де  $S_A$  – площа активного шару;

$S_B$  – площа зернового матеріалу між пластинами барабана.

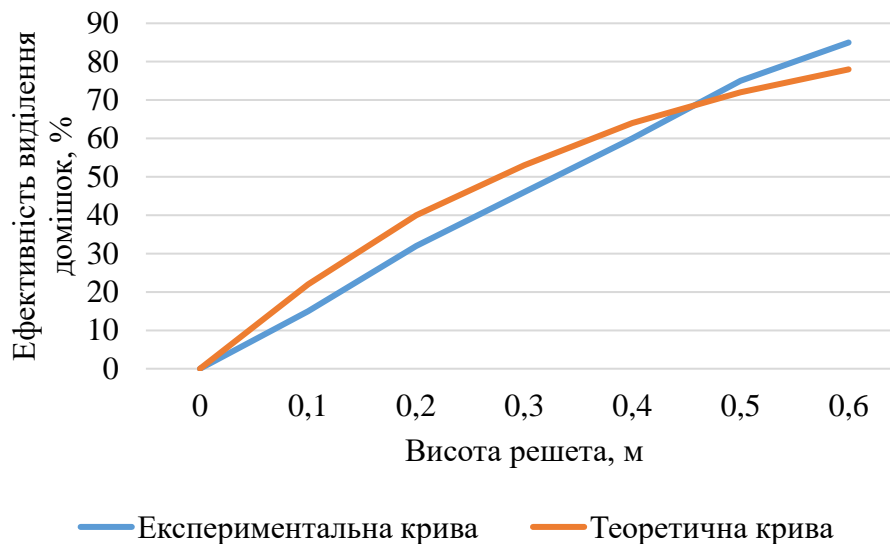


Рисунок 2.4 – Залежності ефективності виділення дрібних домішок від висоти циліндричного решета.

Комбіновані пластини  $\beta = 45^\circ$ ;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $Q = 26,38 \text{ т/год} \cdot \text{м}^2$ ;

$W = 14\%$ ;  $h_A = 10 \text{ мм}$ ;  $2,2 \times 16 \text{ мм}$ ;  $S = 44 \text{ мм}$ ;  $\omega_p = 15,42 \text{ с}^{-1}$ ;  $R = 0,145 \text{ м}$ .

$$S = \pi(R_\rho^2 - R_B^2) + \pi(R_B^2 - R_{обм}^2) - \left[ 0,5R_B h_B \text{tg} \beta - \frac{\pi R_{обм}^2 \arctg \frac{htg \beta}{R_{обм}}}{360} \right] n; \quad (2.12)$$

де  $R_\rho$  – радіус решета;

$R_{обм}$  – радіус обмежує циліндра;

$R_B$  – радіус пластинчастого барабана;

$h$  – висота пластини барабана;

$\beta$  – кут нахилу грані комбінованої пластини до радіусу;

$n$  – кількість пластин на барабані.

Час перебування зернового матеріалу на робочій поверхні циліндра з урахуванням (2.8) і (2.9) визначиться за формулою:

$$t = \frac{V\rho}{Q}. \quad (2.13)$$

Визначивши час за виразом (2.13), знайдемо середній час перебування частинок прохідової фракції  $\theta$  на решеті.

Знаючи значення  $\theta$  і використовуючи вираз (2.6), простежимо за зміною повноти виділення прохідових частинок в залежності від середнього часу перебування зернової суміші в підсівному блоці і різній кількості пластин на решеті (рис. 2.5)

Виявлено залежності середнього часу перебування прохідових частинок на решеті при різній кількості пластин на внутрішньому барабані. Зі збільшенням часу перебування частинок на решеті ефективність сепарування зростає. Видно істотну відмінність в ефективності сепарування, наприклад, при великому і малому кроках розстановки пластин на барабані при одному і тому ж часу перебування прохідових частинок на решеті. Різниця в ефективності виділення дрібних домішок досягає 20%.

Висота решета впливає на процес сепарування, теоретичні та експериментальні залежності наведені на рисунку 2.4.

Отримані залежності відображають суть перебігу технологічного процесу сепарування і мають закономірність, визначену іншими дослідниками [46]. Графіки показують, що збільшення висоти решета веде до зростання ефективності сепарування. Досягнення максимальної ефективності сепарування повинно обмежуватися конструктивними розмірами решета. Теоретична крива узгоджується з експериментальною в допустимих відхиленнях.

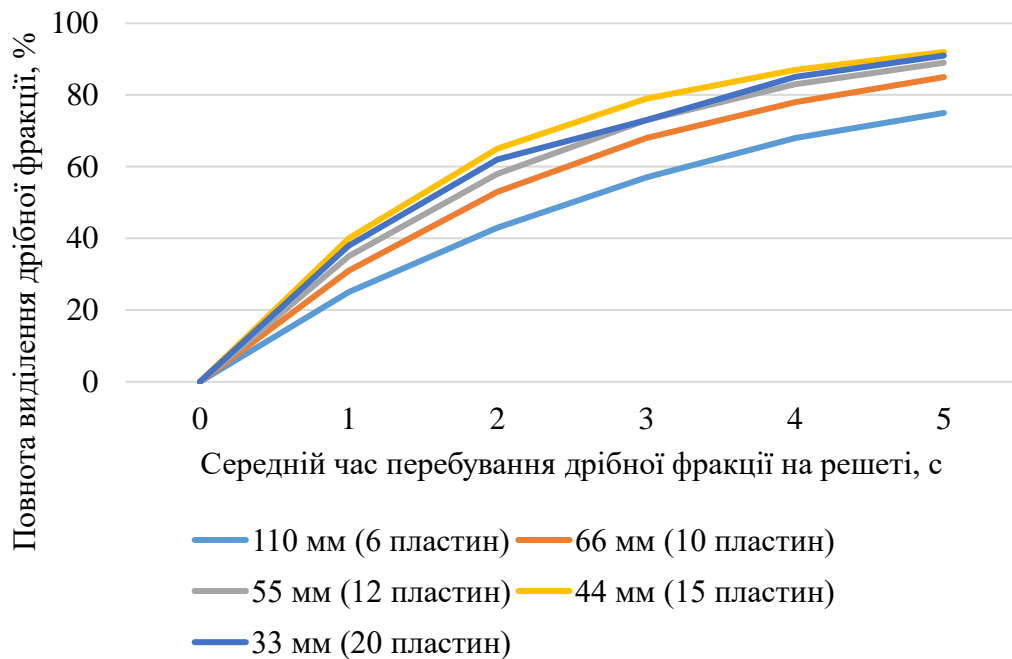


Рисунок 2.5– Зміна повноти виділення проходових частинок в залежності від середнього часу перебування зернової суміші на решеті з різним кроком розстановки пластин на барабані:

Комбіновані пластини з  $\beta = 45^{\circ}$ ;  $\gamma = 45^{\circ}$ ;  $Q = 26,38 \text{ т/год} \cdot \text{м}^2 W = 14\%$ ;  $h_A = 10 \text{ мм}$ ;  $2,2 \times 16 \text{ мм}$ ;  $\omega_p = 15,42 \text{ с}^{-1}$ ;  $R = 0,145 \text{ м}$ .

#### Висновки за розділом

Аналітичне дослідження математичної моделі руху зернової суміші показує, що основними факторами, що забезпечують протікання процесів, є параметри пластинчастого барабана (кути нахилу комбінованих пластин барабана, крок розстановки цих пластин), кутові швидкості решета і барабана, коефіцієнт внутрішнього тертя зернового матеріалу і коефіцієнт зовнішнього тертя об решето і пластини барабана.

Встановлено, що на повноту виділення дрібних домішок впливає час перебування проходових частинок на сепарувальній поверхні решета  $\theta$  яка повинна складати не менше 3 с.

## 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Теоретичні дослідження виявили основні закономірності сепарування зернової суміші на решеті, а також визначили основні конструктивні і кінематичні параметри відцентрово-решітного сепаратора. Для підтвердження основних теоретичних обґрунтувань була розроблена програма і проведені експерименти.

### 3.1 Програма і методика експериментальних досліджень

Програма досліджень в себе включала:

- вивчення впливу комбінованих пластин на процес сепарування;
- дослідження впливу кроку розстановки пластин на барабані на процес сепарування;
- досліді по визначенню впливу діаметра отворів решіт на ефективність сепарування;
- досліді з вивчення впливу робочих розмірів продовгастих отворів решіт на якість сепарування;
- дослідження впливу кута нахилу довгастих отворів, щодо осі обертання решета на ефективність виділення дрібних домішок;
- визначення раціональних значень кутової швидкості обертання барабана і решета;
- визначення величини просіювання по висоті циліндричного решета;
- досліді з визначення впливу засміченості вихідного матеріалу на питому продуктивність і повноту виділення дрібних домішок;

### 3.2 Опис експериментальної установки

Установка для проведення експериментальних досліджень повинна відповідати наступним вимогам:

1) простота конструкції (можливість швидкого розбирання та збирання установки, компактність, можливість доступу до всіх елементів сепаратора, невеликі габарити);

2) можливість регулювання (конструктивних, кінематичних і технологічних) параметрів в заданих межах;

3) стійкість режимів роботи і стабільність параметрів, що впливають на процес сепарування;

4) можливість вимірювання вихідних параметрів при зміні конструктивно-кінематичних і технологічних параметрів одночасно.

Структурно-функціональна схема сепаратора представлена на рисунку 3.1.

Експериментальна установка складається з 3 автономних елементів (рис.3.2):

1.Завантажувального бункера об'ємом  $0,1 \text{ м}^3$  з дозуючим пристроєм, здатним здійснювати задану подачу зерна за допомогою шиберної заслінки.

2. Рами, на якій закріплені робочі органи циліндричного решета і пластинчастого барабана і приводу, що забезпечує їх обертання.

3.Відкидних лотків, що дозволяють відокремлювати матеріал в період роботи сепаратора при сталому і несталому режимах роботи, а так само ємностей в які надходить очищене зерно та дрібні домішки.

Обертання решета і внутрішнього пластинчастого барабана забезпечує двоступінчастий редуктор, привід до якого здійснюється від двигуна потужністю  $0,7 \text{ кВт}$  через клинопасову передачу. Решето і барабан обертаються в одну сторону, але з різними кутовими швидкостями, причому кутова швидкість решета в  $0,57$  рази більше, ніж барабана. Це досягається завдяки конструкції редуктора. Дане співвідношення вибрано виходячи з раніше проведених досліджень [41] і при проведенні всіх дослідів воно не змінювалося.



Рисунок 3.1 – Структурно-функціональна схема сепаратора.

Виділення домішок із зернової суміші здійснюється завдяки решету з продовгуватими отворами, нахиленими під кутом до твірної циліндра (або круглими отворами) і пластинчастому барабану, що складається з валу, на який надіті два диска з отворами для кріплення пластин.

Використовувані комбіновані пластини барабана складаються з двох частин: радіальної пластини і похилої під кутом  $45^\circ$ . Кількість пластин на барабані змінювалася перестановкою їх по отворах дисків. Довжина пластин становила 500 мм, ширина 23 мм (без кріпильних полиць) при активному шарі рівному 10 мм, кількість пластин змінювалося від 8 до 20 штук. Усередині барабана встановлений обмежувальний циліндр. Решета брали діаметром 290 мм і висотою 500 мм (робоча зона решета), які встановлювали на двох обичайках. Використовувалися решета з круглими отворами різного діаметру і з продовгуватими отворами різної ширини і нахилу. Було виготовлено і досліджено циліндричні решета, представлені в таблиці 3.1.



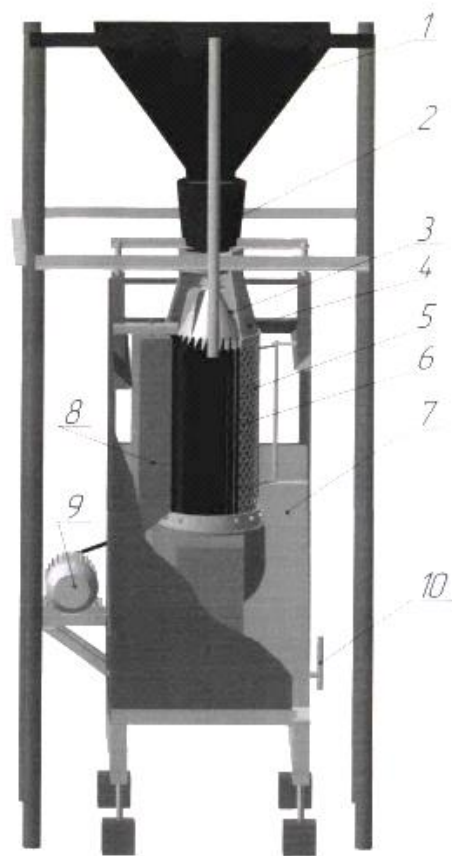


Рисунок 3.2 – 3D-модель лабораторної установки відцентрово-решітного сепаратора:

1 – бункер; 2 – завантажувальна горловина; 3 – живильник з лопатями; 4 – конічна обичайка; 5 – підсівне решето; 6 – пластинчастий барабан; 7 – корпус сепаратора; 8 – пробовідбірник; 9 – привід; 10 – відкидний лоток.

Таблиця 3.1 – Характеристика досліджуваних решіт

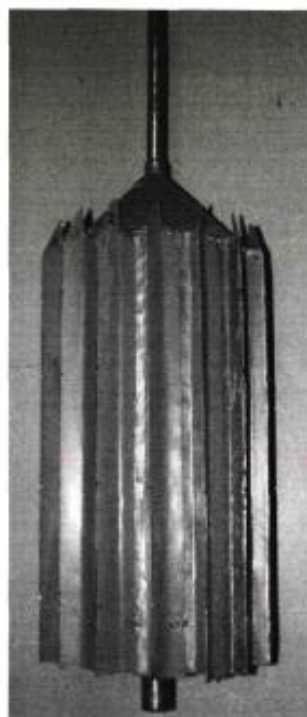
№	Форма отворів	Діаметр отвору, мм	Ширина отвору, мм, при довжині 16 мм	Кут нахилу, град.
1	Кругла	3,2; 3,4; 3,6; 3,8; 4,0		
2	Продовгувата		2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8	0
3	Продовгувата		2,2	0; 5; 10; 15
4	Щілина		2,0×24	

Визначення величини просіювання по висоті циліндричного решета здійснювалося за допомогою пробовідбірника, що складається з вертикальних секцій, з можливістю обертання його навколо вертикальної осі.

Регулювання швидкості обертання решета і барабана здійснювалося за допомогою частотного перетворювача і контролювалося цифровим тахометром.



а



б

Рисунок 3.3 – Складові підсівного блоку ЦРС:

а – решето з похилими продовгуватими отворами; б – барабан з комбінованими пластинами.

Завантаження сепаратора здійснювали через підготовчу зону, що складається з наступних елементів: конічної завантажувальної горловини, конічної ступінчастою обичайки, гасителів кругової швидкості, конічного лопатевого живильника, що має шість лопатей. Живильник обертася зі швидкістю решета і мав можливість осьового зсуву щодо втулки (для регулювання кільцевого зазору між конічною обичайкою і живильником).

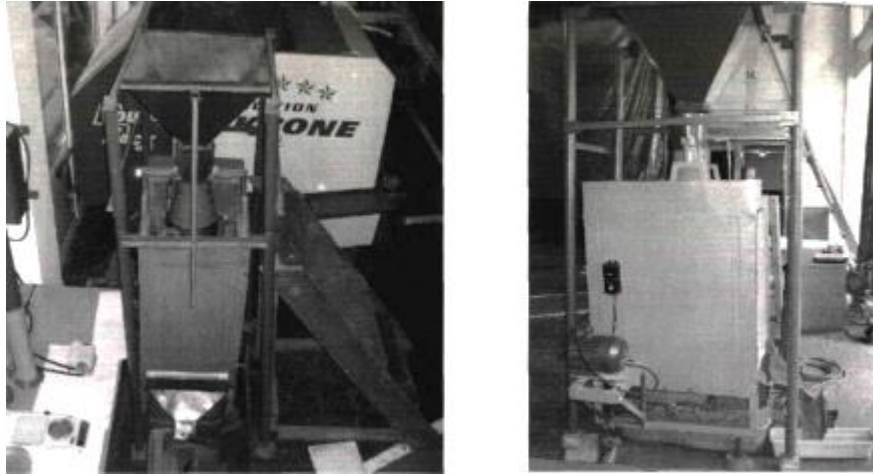


Рисунок 3.4 – Лабораторна установка відцентрово-решітного сепаратора

Прототип досліджуваного сепаратора був створений в ТОВ «Павлоградзернопродукт».

3.3 Прилади та обладнання, що застосовуються при експериментальних дослідженнях

При експериментальних дослідженнях відцентрово-решітного сепаратора вимірювали і визначали наступні параметри:

1. Кутову швидкість обертання решета  $-\omega_p$ .
2. Час досліду  $-t_\theta$ .
3. Масу матеріалу в проході і в сході з решета  $-m_{np}, m_{cx}$ .
4. Вологість вихідного матеріалу  $-W$ .
5. Вихідну засміченість зернового матеріалу  $-C_0$ .
6. Масу проходової фракції в секціях пробовідбірника  $m_\theta$  – дрібні домішки (смітник),  $m_k$  – крупні частки (дрібне і колоте зерно).
7. Ефективність сепарування і втрати зерна у відходи  $-\varepsilon, \Pi$ .

Частота обертання решета змінювалася частотним перетворювачем Mitsubishi FR-E540-3 і визначалася за допомогою цифрового тахометра ЦАТ- 2М, що дозволяє вимірювати частоту в межах від 10 до 10000 об/хв.

Час дослідю замірявся за допомогою електронного секундоміра.

У дослідях споживана потужність на роботу сепаратора реєструвалася за допомогою вимірювального комплексу К-50.

Зважування проходової фракції, а також визначення маси 1000 зерен здійснювалося на лабораторних електронних вагах MW-300T з точністю вимірювання 0,01 г.

Маса зернової суміші зважувалася на електронних вагах МК-15.2-А20 з максимальною масою зважування 15 кг і похибкою вимірювання 2 гр.

Для визначення вологості зернового матеріалу використовувався аналізатор вологості «Евлас-2М» (МВИ).МВИ використовує термогравіметричний метод визначення вологості, заснований на висушуванні проби з відомої вихідною масою, зважуванні залишку і обчисленні відносної зміни маси з похибкою, що не перевищує  $\pm 0,2\%$ , при довірчій ймовірності 0,95.

Об'ємна маса зернового матеріалу визначається за допомогою літрової пурки ПХ-1.

Кут внутрішнього тертя зернової суміші визначався по куту природного укосу, який формувався способом насипання [43].



Рисунок 3.5 – Прилади для проведення дослідів: ваги електронні МК-15.2-А20, аналізатор вологості «Евлас-2М» (МВИ), лабораторні електронні ваги MW-300T

### 3.4 Характеристика зернового матеріалу

Для досліджень використовувалася пшениця сорту Білосніжка, врожаю 2022 року, обмолочена на лабораторній установці МПС-60. Очищення здійснювалося зерноочисною машиною СМ-0,15.

Нами було встановлено з літературних джерел і власних розрахунків [29], що максимальний розмір пор при сепарування пшениці дорівнює 2,5 мм, тому було вирішено основні експерименти провести в максимально складних умовах при виділенні суріпки з ефективним діаметром 2,2 мм.

В якості засмітників зерна використовувалися суріпка і щиреця (прохід решета  $d = 2,2$  мм сход  $d = 1,8$  мм). Засміченість вихідної зернової суміші змінювалася від 2 до 6 % за вагою.

При вологості 14 %: об'ємна маса зерна становила 750 г/л, маса 1000 зернин – 35,5 г, кут природного укосу –  $35^\circ$ , кут тертя зерна по залізу –  $18^\circ$ .

Вологість зерна зберігалася незмінною протягом усього періоду проведення експериментів, а необхідне значення вологості забезпечувалося за рахунок штучного зволоження.

### 3.5 Методика проведення дослідів

Порядок проведення експериментальних досліджень в кожному випадку залишався одним і тим же і полягав в наступному:

1. На експериментальній установці встановлювали необхідні значення досліджуваних і фіксованих параметрів.
2. Готували вихідну зернову суміш масою 50 кг.
3. Під відкидні лотки ставили ємності (по дві на кожен з двох лотків).
4. Включали установку і відкривали на необхідну величину шиберну заслінку для забезпечення заданої подачі матеріалу.
5. При сталому режимі, через 5 – 8 секунд після пуску, виробляли одночасний поворот відкидних лотків і зерновий матеріал (сход і прохід)

надходив в окремі контрольні ємності. При повороті лотків замикався електричний ланцюг, і включався електронний секундомір.

6. Після закінчення 6 – 10 секунд усталеного режиму роботи сепаратора, чому відповідає час сепарування 50 % підготовленої суміші, лотки ставили в початкове положення, при цьому розмикалася електричне коло в електронному секундоміре. Закривали заслінку бункера, і вимикали привід установки.

7. Робили зважування матеріалу з кожної контрольної ємності.

8. Проходова фракція піддавалася сепарування на плоскому решеті з отворами діаметром 2,5 мм для визначення втрат зерна у відходи.

9. Всі отримані дані дослідів заносили в журнал спостережень, і робили обробку результатів.

10. Після проведення досліду зернову суміш додатково очищали від дрібних домішок на лабораторному решітному класифікаторі фірми «Petkus», з метою створення однорідної зернової суміші для проведення наступного досліду.

При обраному довірчому інтервалі в 0,95 кількість дослідів прийнято рівне 3. Як показали попередні експерименти, відхилення по повторюваностям відрізнялися не більше ніж на 5 %. Це дозволило залишити проведення дослідів в триразовою повторністю.

Після проведення досліду і записи отриманих результатів в журнал спостережень, далі проводилася зміна регульованого параметра і досліди тривали.

Теоретичні дослідження, апріорне ранжування факторів, а також попередні однофакторні експерименти дозволили виділити фактори, що впливають на ефективність сепарування:

$$\varepsilon = f(C_0, d_p, Q, \beta, S, \omega_p, \omega_s, h_A, W, b_p, \gamma);$$

$$\Pi = f(C_0, d_p, Q, \beta, S, \omega_p, \omega_s, h_A, W, b_p, \gamma),$$

де  $C_0$  – початкова засміченість зернової суміші, %;

$d_p$  – діаметр отворів решета, мм;

$Q$  – подача зернової суміші, т/(год·м<sup>2</sup>);

$\beta$  – кут нахилу пластин барабана, град;

$S$  – крок розстановки пластин барабана, мм;

$\omega_p, \omega_b$  – кутова швидкість обертання решета і барабана, с<sup>-1</sup>;

$h_A$  – товщина активного шару, мм;

$W$  – вологість вихідного матеріалу, %;

$b_p$  – ширина продовгуватих отворів решета, мм;

$\gamma$  – кут нахилу продовгуватих отворів решета щодо твірної циліндричного решета, град.

Для оцінки технологічного ефекту сепарування розроблено і використовується досить велика кількість методів [15].

Оптимізація процесів сепарування належить до компромісних задач, і в якості критеріїв оптимізації (відгуків) прийняті два критерії [26].

Ефективність сепарування визначали за формулою:

$$\varepsilon = \frac{P_1 a_{вих}^M}{P_o a_{исх}} 100\% , \quad (3.1)$$

де  $P_1$  – маса прохідної фракції;

$a_{вих}^M$  – зміст дрібних домішок в прохідній фракції;

$P_o$  – маса вихідного матеріалу;

$a_{исх}$  – зміст дрібних домішок у вихідному матеріалі.

Втрати зерна в відходи:

$$\Pi = \frac{P_1 a_{вих}^{KP}}{P_o a_{ex}^{KP}} 100\% , \quad (3.2)$$

де  $a_{вих}^{KP}$  – зміст великої фракції в прохідній;

$a_{ex}^{kp}$  – вміст великої фракції в вихідному матеріалі.

Було виявлено 11 факторів, що впливають на процес сепарування відцентрово-решітного сепаратора (кінематичних, конструктивних, технологічних). За допомогою проведених однофакторних експериментів і, спираючись на попередні дослідження [4], було проаналізовано вплив більшості факторів. Деякі параметри були зафіксовані і не розглядалися в подальшому дослідженні – це:  $K$  – показник кінематичного режиму,  $h_A$  – товщина активного шару (відстань між пластинами барабана і решетом).

Спираючись на отримані раніше дані [4], були визначені 4 найбільш значущих параметра для проведення багатфакторного експерименту.

Досліди було вирішено проводити на трьох рівнях для кожного з показників. Фактори і рівні їх варіювання представлені в таблиці 3.2.

Фактори, що впливають на процес сепарування

$$\varepsilon = f(\omega_B, S, Q, C_o); \quad (3.3)$$

$$\Pi = f(\omega_B, S, Q, C_o). \quad (3.4)$$

Таблиця 3.2 – Значущі фактори та рівні їх варіювання

Фактори і їх найменування	Позначення	Інтервал варіювання	Значення факторів відповідних рівнів		
			-1	0	+1
$C_o$ – засміченість вихідного матеріалу, %;	$X_1$	2	2	4	6
$\omega_p$ – частота обертання решета, $c^{-1}$ ;	$X_2$	0,73	14,69	15,42	16,15
$Q$ – подача суміші, $t/(год \cdot m^2)$	$X_3$	3,83	22,55	26,38	30,21
$S$ – крок розстановки пластин, мм	$X_4$	11	55	44	33



Інші фактори прийняті на наступних рівнях: вологість вихідного матеріалу  $W = 14\%$ , товщина активного шару  $h_A = 10$  мм, ширина отворів решета  $b_p = 2,2 \times 16$  мм, кут нахилу отворів решета щодо вертикалі в сторону протилежну обертанню барабана  $5^\circ$ , кут нахилу граней комбінованих пластин барабана  $45^\circ$ .

### 3.6 Методика проведення багатofакторного експерименту

Використовуючи отримані результати, був обраний план багатofакторного експерименту (план № 60 композиційний симетричний трирівневий план) [60]. За планом була складена матриця, в кодованому вигляді вона представлена в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Матриця плану факторного експерименту

№№ дослідів	Змінні фактори в новому позначенні			
	$X_1(C_0)$	$X_2(\omega_p)$	$X_3(Q)$	$X_4(S)$
1	2	3	4	5
1	+	+	+	+
2	-	+	+	+
3	+	-	+	+
4	-	-	+	+
5	+	+	-	+
6	-	+	-	+
7	+	-	-	+
8	-	-	-	+
9	+	+	+	-
10	-	+	+	-
11	+	-	+	-
12	-	-	+	-
13	+	+	-	-
14	-	+	-	-
15	+	-	-	-
16	-	-	-	-

1	2	3	4	5
17	-	0	0	0
18	+	0	0	0
19	0	-	0	0
20	0	+	0	0
21	0	0	-	0
22	0	0	+	0
23	0	0	0	-
24	0	0	0	+

Число вимірювань в дослідах дорівнювало 3 для прийнятої довірчої ймовірності  $\alpha = 0,95$  і похибки  $\varepsilon = \pm 3\sigma$ , де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення результатів дослідів.

Дослідження процесів поділу зерна показують, що процес сепарування

$$y = b_o + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=j}^n b_u x_i^2 + b_{ij} x_i x_j ; \quad (3.5)$$

де  $b_o$  – вільний член;

$b_i$   $b_u$   $b_{ij}$  – розрахункові коефіцієнти регресії;

$x_i$   $x_j$  – незалежні змінні (фактори).

Перевірку однорідності (відтворюваності) експериментів в паралельних дослідах проводили за критерієм Кохрена, тому що у всіх точках матриці планування є однакове число паралельних вимірювань [30]:

$$G = \frac{S_{n\max}^2}{\sum_i S_{yn}^2}, \quad (3.6)$$

де  $S_{n\max}^2$  – максимальна дисперсія експерименту;

$S_{yn}^2$  – дисперсія одного дослідю;

$N$  – число дослідів ( $N$  – нашому випадку  $N = 24$ );

$n$  – число повторень ( $n = 3$ ).

Обчислене за (3.6) значення порівнюється з табличним зі ступенями свободи [60].

При рівні значущості  $\alpha = 0,05$ , кількості дослідів  $N = 24$  і числі ступенів свободи  $f = n - 1 = 3 - 1 = 2$  табличне значення критерію Кохрена рівне  $G_{табл} = 0,235$  [30].

Коефіцієнти регресії  $b_o, b_i, b_{ij}, b_{ij}$  вираховували за допомогою прикладної програми Statistica V6 для ЕОМ.

Визначення значущості коефіцієнтів регресії проводили наступним чином:

а) визначали дисперсію  $S_y^2$  в дослідях [30]

$$S_y^2 = \frac{\sum_{iu}^n (y_{iu} - \bar{y}_{ucp})^2}{f}, \quad (3.7)$$

де  $y_{ucp}$  – середнє значення критерію оптимізації в  $i$ -му рядку матриці планування по паралельним дослідям.

б) визначали дисперсію оцінок коефіцієнтів рівнянь регресії. Згідно [30] дисперсія  $S^2$  і середньоквадратичні помилки  $S$  оцінок коефіцієнтів визначається за такими формулами:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{bo}^2 = c_1 \cdot S_y^2 \\ S_{bi}^2 = c_3 \cdot S_y^2 \\ S_{bij}^2 = c_4 \cdot S_y^2 \\ S_{bii}^2 = (c_5 + c_6) \cdot S_y^2 \end{array} \right. \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} S_{bo} = c_7 \cdot S_y \\ S_{bi} = c_8 \cdot S_y \\ S_{bii} = c_{10} \cdot S_y \\ S_{bij} = c_9 \cdot S_y \end{cases} \quad (3.9)$$

Для трьох рівнів варіювання  $n=3$  значення коефіцієнтів  $c_i$  будуть наступними [60]:  $c_1 = 0,22917$ ;  $c_2 = 0,0625$ ;  $c_3 = 0,05556$ ;  $c_4 = 0,0625$ ;  $c_5 = 0,5$ ;  $c_6 = 0,1042$ ;  $c_7 = 0,47872$ ;  $c_8 = 0,23571$ ;  $c_9 = 0,25$ ;  $c_{10} = 0,62913$ .

в) критичні значення коефіцієнтів рівняння регресії визначаються наступним чином:

$$\begin{cases} \Delta_{b0} = t_{\alpha;f1} \cdot S_{b0} \\ \Delta_{bi} = t_{\alpha;f1} \cdot S_{bi} \\ \Delta_{bij} = t_{\alpha;f1} \cdot S_{bij} \\ \Delta_{bii} = t_{\alpha;f1} \cdot S_{bii} \end{cases} \quad (3.10)$$

де  $t$  – табличне значення критерію Стьюдента при числі ступенів свободи, з якими визначалося  $S_y^2$ .

г) коефіцієнт вважається статистично значимим, коли його абсолютна величина більше критичного значення або дорівнює йому [60]:

$$|b_i| \geq b_{iкр} \quad (3.11)$$

Після визначення значущих коефіцієнтів регресії необхідно провести перевірку прийнятої гіпотези на адекватність. Дану перевірку здійснювали за допомогою  $F$  – критерію (критерію Фішера), розрахункове значення якого не повинно перевищувати табличне.

Для цього визначали різниці значень відгуків, отриманими за рівнянням регресії і експериментальними значеннями розраховували дисперсію адекватності для ефективності очищення і втрат зерна у відходи

$$F_{расч} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2} \leq F_{f_1, f_2}^{табл} \quad (3.12)$$

де  $S_{неад}^2$  – дисперсія неадекватності, рівна.

$$S_{неад}^2 = \frac{S_{неад}}{f_1} = \frac{n \sum_{u=1}^N (\bar{y}_{урозр} - \bar{y}_{уекс})^2}{f_1} \quad (3.13)$$

де  $\bar{y}_{урозр}$  та  $\bar{y}_{уекс}$  – значення відгуку в  $u$ -му досліді, відповідно розраховані за рівнянням регресії і отримані експериментально;

$f_1 = N - k'$  – число ступенів свободи;

$k'$  – число залишених коефіцієнтів рівняння регресії.

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (\bar{y}_{1u} - \bar{y}_{иср})^2}{f_2}, \quad (3.14)$$

де  $f_2 = N(n - 1)$ .

У разі, якщо  $F_{розр} \leq F_{табл}$ , то отримана поліноміальна модель рівняння регресії адекватно описує досліджувану закономірність.

Табличні значення критерію Фішера при числі ступенів свободи чисельника  $f_1 = 11$  і знаменника  $f_2 = 48$  становить  $F_{табл} = 2,31$  [22],  $F_{розр} = 2,1$ .

Для втрат зерна у відходи  $F_{табл} = 2,66$ ,  $F_{розр} = 2,33$ .

Отримані математичні моделі для ефективності очищення зерна і втрат зерна у відходи є адекватними.

### Висновки за розділом

В даному розділі кваліфікаційної роботи було обґрунтовано оптимальні параметри сепаратора: крок розстановки пластин  $S = 44$  мм, кути нахилу граней комбінованої пластини  $\beta = 45^\circ$  і  $\beta' = 0^\circ$ , кут відхилення отворів на решеті  $\gamma = 5^\circ$  від вертикалі в сторону, зворотну обертанню. Експериментальними дослідженнями підтверджено теоретичні висновки про ефективність застосування комбінованих пластин і розташуванні продовгастих отворів на решеті під кутом.

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Дослідження процесу сепарування на циліндричному решеті з внутрішнім пластинчастим барабаном відцентрово-решітного сепаратора проводилася на кафедрі технології зберігання і переробки с.-г. продукції. Була створена лабораторна установка, описана в розділі 3.2. В результаті проведених раніше досліджень [48] було встановлено вплив таких параметрів, як кінематичний режим і кут нахилу пластин барабана. У відцентрово-решітному сепараторі редуктор забезпечує різницю швидкостей обертання пластинчастого барабана і решета, причому  $\frac{\omega_B}{\omega_P} = 0,57$  і це ставлення залишалася постійним при проведенні всіх дослідів [41]. В роботі [48] було обґрунтовано застосування пластин з кутом нахилу  $45^\circ$  до горизонту і отримано позитивний результат. У нашому випадку досліди проводилися на комбінованих пластинах, що складаються з радіальної і похилій під кутом  $45^\circ$  граней.

Раніше проведені дослідження показали, що вологість робить істотний вплив на продуктивність циліндричних решіт. При підвищенні вологості продуктивність плоских решіт [42] знижується в межах 3 – 5% на кожен відсоток її підвищення понад кондиційної. Таке ж зниження продуктивності було встановлено і на циліндричних решетах [25]. При підвищенні вологості ефективність виділення дрібних домішок зростала в результаті збільшення обсягу зернівок і, як наслідок, пор між ними, але при цьому падала продуктивність відцентрово-решітного сепаратора [48].

Для проведення дослідів використовувалося зерно з кондиційної вологістю, попередньо очищене. Необхідна в досліді засміченість досягалася шляхом штучного введення дрібних домішок у вихідну суміш.

Активний шар (шар між решетою і краями комбінованих пластин) не змінювався і становив 10 мм.

Радіус решета 0,145 м, показник кінематичного режиму  $K=3,69$ . Дані параметри не змінювалися при проведенні всіх експериментів.

#### 4.1 Вплив діаметра отворів решета на ефективність очищення і втрати зерна у відходи

Дослідами встановлено, що збільшення діаметра отворів решета призводить до зростання ефективності очищення і одночасно до зростання втрат зерна у відходи.

При діаметрі отворів решета рівному 4,0 мм, ефективність  $\varepsilon = 88\%$ , а втрати зерна у відходи  $\Pi = 3,6\%$ . Найкращі показники по втратах зерна у відходи 1,1 % мають решета з діаметром отворів 3,6 мм, але при більш низькій ефективності  $\varepsilon = 71\%$ .

Використання решета з діаметром отворів 3,6 мм дозволяло виділяти не тільки дрібні домішки, такі як суріпка, просо куряче, щиріця, а й дрібне насіння гречишки татарської та гречишки в'юнкової. Виділення цих важковідокремлюваних домішок сприяє розвантаженню машин остаточного очищення.

Таким чином, доцільно встановлювати решета з круглими отворами діаметром 3,6 мм. При установці комбінованих пластин на барабан відцентрово-решітного сепаратора ефективність очищення зросла приблизно на 10 %, в порівнянні з раніше отриманими результатами на решеті з таким же діаметром отворів і пластинами, нахиленими під кутом  $45^\circ$  [4].

Збільшення розміру отворів підсівного решета обмежується допустимими втратами зерна у відходи. Застосування решіт з меншим діаметром отворів призводить до різкого зниження ефективності виділення дрібних домішок, що видно з рисунка 4.1.



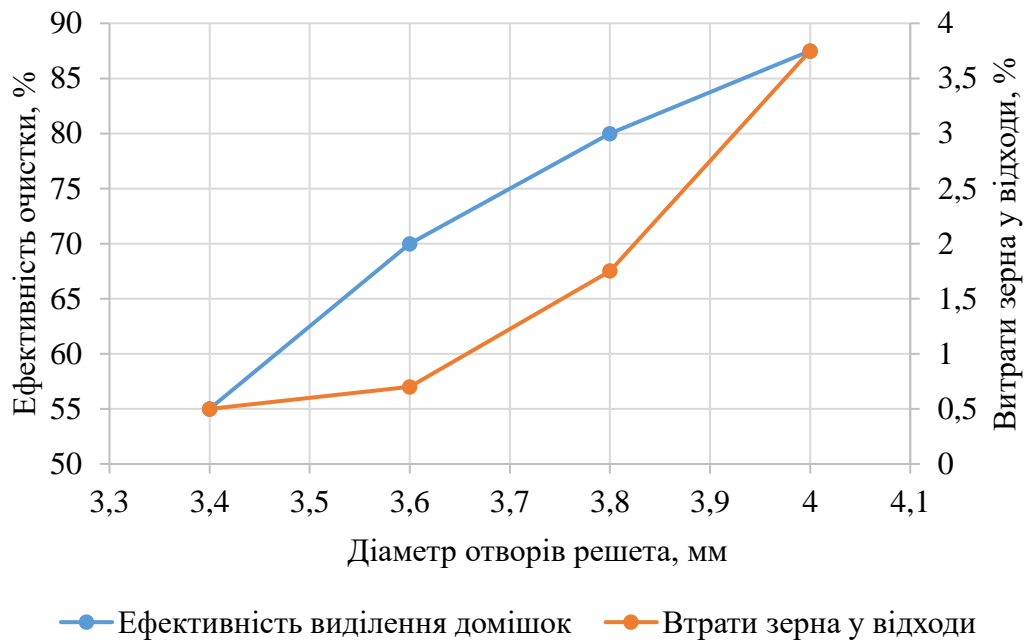


Рисунок 4.1 – Залежність ефективності виділення дрібних домішок і втрати зерна у відходи від діаметра отворів решета.

Комбіновані пластини з  $\beta = 45^\circ$ ;  $S = 44$  мм;  $\omega_p = 15,42$  с<sup>-1</sup>;  $Q = 26,38$  т/(м<sup>2</sup>·год);

$C_0 = 4\%$  (по вазі).

Таким чином, дослідями була встановлена висока ефективність очищення зерна від дрібних домішок в відцентрово-решітному сепараторі із застосуванням комбінованих пластин і діаметром отворів решета  $d_p = 3,6$  мм. Щоб проводити очищення зерна від важковідокремлюваних домішок, використовуючи даний спосіб сепарування, необхідно провести дослідження в цьому напрямку. Можна припустити, що такий робочий орган буде окремою машиною.

#### 4.2 Вплив кроку розстановки комбінованих пластин барабана на ефективність очищення зерна від дрібних домішок

Експериментальні дослідження по вивченню впливу кроку розстановки пластин на внутрішньому барабані на ефективність виділення дрібних домішок показують, що ефективність очищення зерна зростає при збільшенні числа

комбінованих пластин на барабані. Так із зменшенням кроку розстановки пластин зі 110 мм до 44 мм ефективність зростає, але при цьому і збільшуються втрати зерна у відходи. При подальшому зменшенні кроку ефективність падає, так як на барабані діаметром 270 мм з двадцятьма пластинами відбувається заклинювання зернового матеріалу між пластинами і процес сепарування погіршується.

Однак проведені дослідження показали, що при збільшеному кроці розстановки пластин потрібно підвищити подачу зернової суміші, щоб забезпечити необхідну товщину зернового шару між пластинами барабана.

Застосування комбінованих пластин дозволило прибрати зону розрядження, що утворюється за пластиною, що мала місце, коли пластини були розташовані під кутом, звідки дрібні домішки не могли підійти до сепарувальної поверхні решета. З використанням запропонованих пластин прохідна фракція при русі зернової суміші не екранується зворотною стороною похилої грані і рухаються уздовж радіальної межі під дією відцентрової сили, що підвищує кількість виділених дрібних домішок, а отже і ефективність очищення. Для внутрішнього барабана з такими пластинами буде потрібно менша їх кількість, що знизить металоемність барабана і сепаратора в цілому.

З графіка (рис. 4.2) видно, що раціональним кроком розстановки пластин слід вважати 44 мм, він відповідає 15 комбінованим пластинам на барабані. Ці експериментальні дані повністю узгоджуються з теоретичними дослідженнями, представленими на рисунку 2.7. При зменшенні кроку розстановки пластин на барабані відбувається зростання коефіцієнта трансформації силового тиску, що тісно пов'язано з ефективністю виділення дрібних домішок в відцентрово-решітному сепараторі.

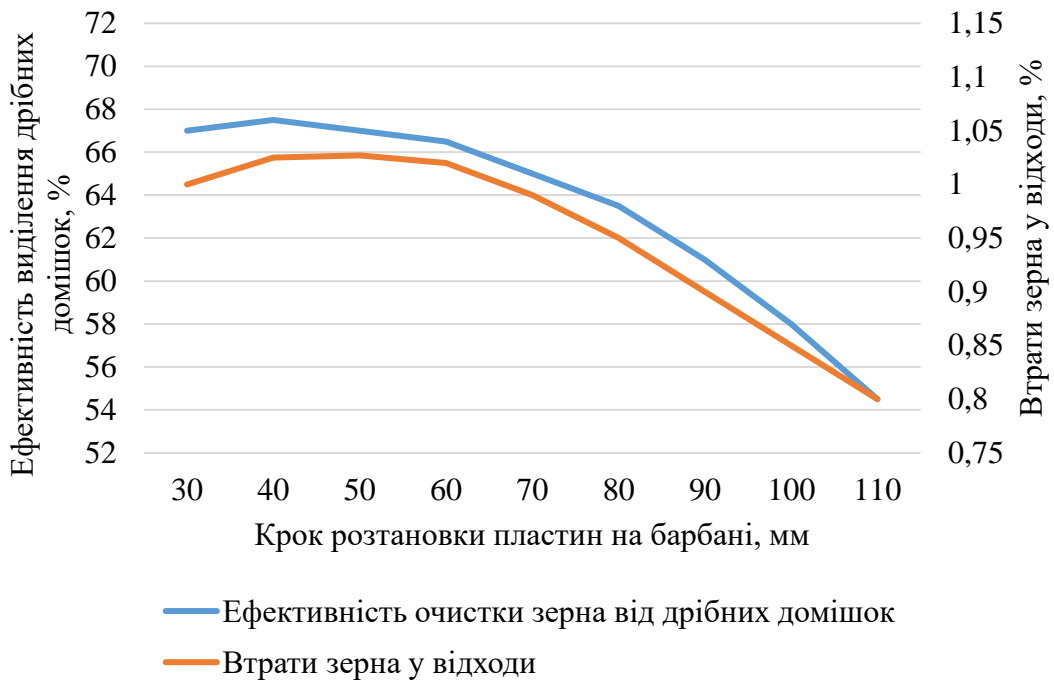


Рисунок 4.2 – Вплив кроку розстановки пластин барабана на ефективність виділення дрібних домішок і втрати зерна у відходи.

Комбіновані пластини з  $\beta = 45^\circ$ ;  $\varnothing = 3,6$  мм;  $\omega_p = 15,42$  с<sup>-1</sup>;  $Q = 26,38$  т/(м<sup>2</sup>·год);

$$C_0 = 4\% .$$

Таким чином, подальші дослідження по обґрунтуванню конструктивно-кінематичних параметрів підсівного решета і пластинчастого барабана по ефективності очищення зерна від дрібних домішок проводилися з використанням комбінованих пластин з кроком розстановки 44 мм.

#### 4.3 Дослідження циліндричного решета з продовгуватими отворами на очищенні зерна від дрібних домішок

Для оцінки роботи циліндричного решета з продовгуватими отворами в відцентрово-решітному сепараторі були поставлені дослідження з використанням різних розмірів по ширині.

Практичний досвід використання підсівних решіт на плоско-решітних сепараторах при очищенні зерна від дрібних домішок показує, що ширина

продовгуватих отворів повинна бути до 2,0 мм. З огляду на властивості сепарованої суміші, нами були виготовлені решета з продовгуватими отворами 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0 мм. Довжина отворів була однаковою у всіх решіт і становила 16 мм. Вибір збільшеного розміру продовгуватих отворів решіт на циліндричному решеті обумовлений характером руху зернової суміші по сепарувальній поверхні. Великий вплив робить швидкість руху зерна по робочій поверхні циліндричного решета під дією відцентрової сили і сили тяжіння.

При використанні плоских решіт на сортуванні розмір продовгуватих отворів по ширині повинен бути в межах 2,2 – 2,6 мм [49].

Проведені експериментальні дослідження з очищення зерна від дрібних домішок в відцентрово-решітному сепараторі, показали на високу ефективність роботи циліндричного підсівного решета з прямокутними отворами, в порівнянні з круглими.

Застосування продовгуватих отворів  $2,2 \times 16$  мм, розташованих уздовж вертикальної осі циліндричного решета дозволило отримати ефективність очищення  $\varepsilon = 79\%$ , а втрати зерна у відходи склали менше 0,2 % (рис. 4.3). При однакових параметрах навантаження і вихідної засміченості ефективність очищення зросла на 8 % в порівнянні з круглими отворами  $d_p = 3,6$  мм. Це говорить про те, що ймовірність просіювання дрібних домішок у продовгуватих отворів вище.

Такий результат був досягнутий при середньому діаметрі проходових частинок від 1,8 до 2,2 мм, близьких до розміру продовгуватих отворів циліндричного решета. Можна припустити, що якщо розмір дрібних частинок буде менше, то ефект очищення зросте.

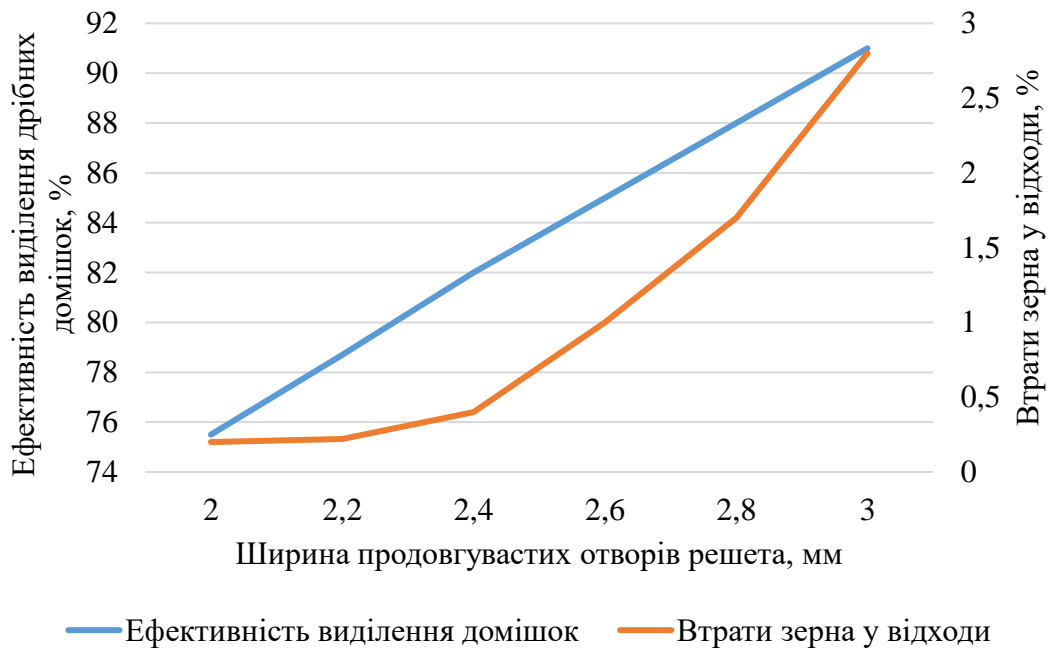


Рисунок 4.3 – Ефективність очищення зерна від дрібних домішок в залежності від ширини отворів решета

Комбіновані пластини з  $\beta = 45^\circ$ ;  $\gamma = 0^\circ$ ;  $\omega_p = 15,42 \text{ с}^{-1}$ ;  $Q = 26,38 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ;

$C_0 = 4\%$ ;  $S = 44 \text{ мм}$ .

З графіка видно, що більш інтенсивно зростає ефективність очищення при збільшенні ширини отворів решета. В діапазоні зміни розмірів отворів 2,0 – 2,6 мм втрати зерна становлять менше 1 %.

Подальше збільшення ширини продовгуватих отворів (понад 2,6 мм) при більш високій ефективності очищення призводить до різкого збільшення втрат зерна. Решета з такими отворами можна використовувати для подальшого очищення і сортування [48]. Таким чином, дослідями встановлена можливість використання підсівного циліндричного решета з прямокутними отворами як сортувального в відцентрово-решітному сепараторі.

#### 4.5 Вплив кінематичного режиму на ефективність очищення зерна

Кінематичний режим є одним з найбільш значущих чинників, що впливають на роботу відцентрово-решітного сепаратора. При малих швидкостях обертання відцентрова сила мала і матеріал не притискається до решета, а

рухається вниз, внаслідок чого дрібні домішки не виділяються. З ростом відцентрової сили ефективність сепарування зростає, але до певного моменту, коли зерновий шар почне обертатися разом з решетом (відбувається заклинювання). Як було сказано вище, редуктор лабораторної установки забезпечує різницю швидкостей обертання пластинчастого барабана і решета, рівну 0,57 і дане співвідношення не змінювалося.

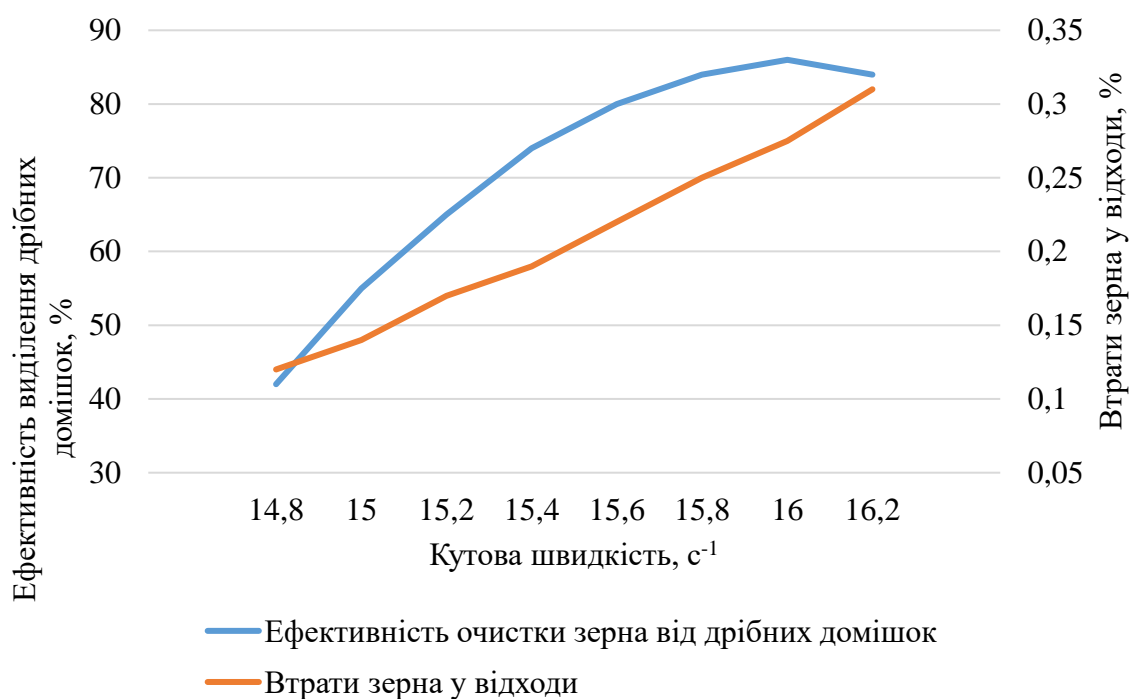
При проведенні дослідів відбувалася зміна кругової швидкості решета і барабана одночасно.

Кутова швидкість решета  $\omega_p$  змінювалася в межах від 14,7 до 16,1  $\text{с}^{-1}$ .

Характер зміни ефективності очищення і втрат зерна у відходи від кутової швидкості представлений на рисунку 4.4.

З аналізу результатів випливає, що при збільшенні кутової швидкості до 15,7  $\text{с}^{-1}$  робочий процес протікає стійко, ефективність очищення зерна зростає. Однак збільшення кутової швидкості понад 16,2  $\text{с}^{-1}$  призводить до «заклинювання» зернової суміші, тобто припинення її руху щодо сепарувальної поверхні. Недоліком відцентрових циліндричних сепараторів з вертикальною віссю обертання є жорсткий кінематичний режим з вузькими межами регулювання. Тому найбільш прийнятними кутовими швидкостями є швидкості від 15,1 до 15,7  $\text{с}^{-1}$ . Це підтверджують і дослідження, проведені в роботі [4].

Збільшення кутової швидкості призводить до зростання енергоємності процесу сепарування і збільшення втрат зерна у відходи, які досягають значення 0,45% при 16,1  $\text{с}^{-1}$ . Встановлено [40], що найбільша частка енергії витрачається на тертя, тобто на транспортування зерна по робочій поверхні решета. зростання кутової швидкості призводило до збільшення коефіцієнта трансформації силового тиску і як наслідок, до зростання сил тертя зерна об зерно між шарами (активним і укладеними між пластинами барабана) і зерна об робочу поверхню решета. Відцентрово-решітний сепаратор має мале енергоспоживання і збільшення кутової швидкості обертання решета призводить до незначного його підвищення.



Вплив кутової швидкості решета на ефективність виділення дрібних домішок і втрати зерна у відходи

Комбіновані пластини з  $\beta = 45^\circ$ ;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $\omega_p = 15,42 \text{ с}^{-1}$ ;

$Q = 26,38 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ;  $C_0 = 4\%$ ;  $S = 44 \text{ мм}$ ; розмір отвору  $2,2 \times 16 \text{ мм}$ .

#### 4.6 Вплив питомої подачі зернової суміші на повноту виділення дрібних домішок

Проведені дослідження з оцінки впливу подачі зернової суміші на процес сепарування дозволили встановити, що зі збільшенням питомої подачі від  $20,45$  до  $32,51 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$  ефективність очищення зерна зростає від  $57$  до  $95\%$ , що видно з рисунка 4.5. Це пояснюється тим, що товщина зернового шару між пластинами в радіальному напрямку збільшується, отже, зростає і значення коефіцієнта трансформації силового тиску.

Використання комбінованих пластин, збільшує тиск зернової суміші на решето. Це сприяє інтенсивному перемішуванню зернової суміші і виділення дрібної домішки, але призводить до зменшення площі, зайнятої зерном між пластинами барабана і, отже, потрібно зниження подачі.

Слід зауважити, що велику подачу можна забезпечити при використанні радіальних пластин на барабані, але при меншій ефективності виділення дрібних домішок.

Плоско-решітні сепаратори добре виділяють дрібну фракцію при подачі 10 – 15 т/(м<sup>2</sup>·год), зі збільшенням подачі до 20 т/(м<sup>2</sup>·год) відбувається різке зниження ефективності очищення зерна (до 30 %) [26]. Це пов'язано з тим, що дрібні частки не встигають пройти до решета зі збільшенням товщини зернової суміші на ньому.

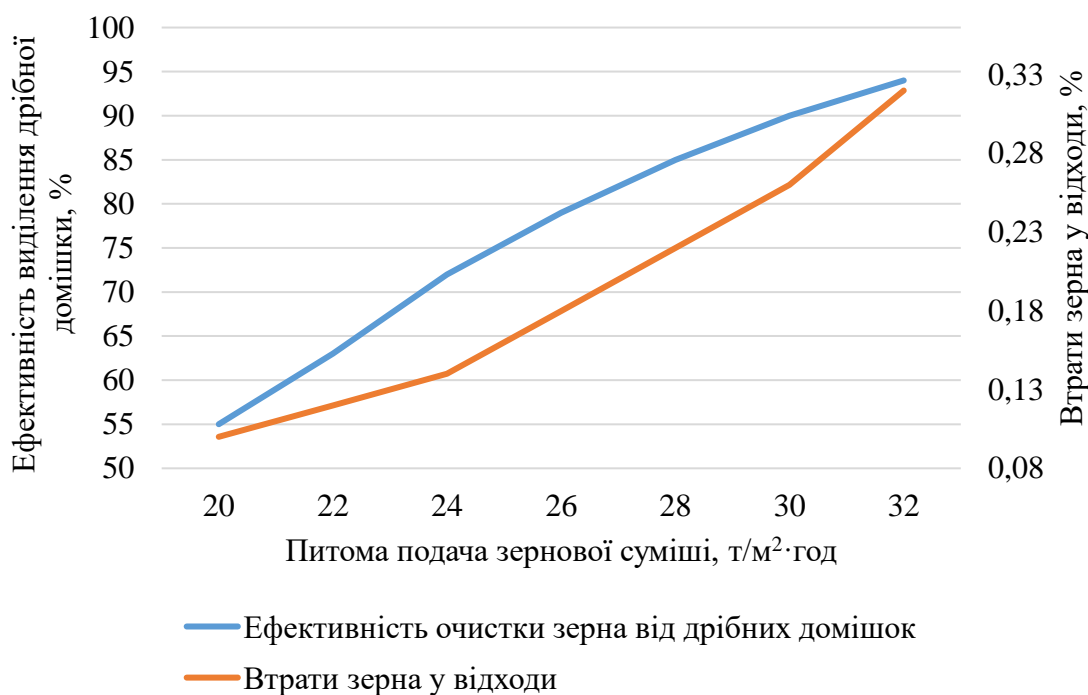


Рисунок 4.5– Вплив питомої подачі зернової суміші на ефективність виділення дрібних домішок і втрати зерна у відходи

Комбіновані пластини з  $\beta = 45^\circ$ ;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $\omega_p = 15,42 \text{ с}^{-1}$ ;  $C_0 = 4\%$ ;  $S = 44 \text{ мм}$ ; розмір отвору  $2,2 \times 16 \text{ мм}$ .

Згідно з дослідженнями [17], збільшення подачі зернової суміші у вібровідцентровому сепараторі призводить до зниження повноти виділення дрібної фракції. Зауважимо, що при повноті виділення рівній 70 % вібровідцентровий сепаратор працює при питомій подачі 20 т/(м<sup>2</sup>·год)тоді як для



досліджуваного відцентрово-решітного сепаратора з підсівним решетом подача зернової суміші склала  $24 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ .

#### 4.7 Вплив висоти решета на інтенсивність просіювання дрібних домішок

Висота решета впливає на повноту виділення дрібних домішок.

За графіком, зображеному на рисунку 4.6 видно, що найбільша інтенсивність просіювання спостерігається у верхній частині решета (коли зернова суміш знаходиться в стані інтенсивного розшарування), а потім відбувається зниження просіювання. Це пояснюється тим, що дрібні частинки підходять до сепарувальної поверхні решета з далеких елементарних зернових шарів за рахунок сегрегації суміші.

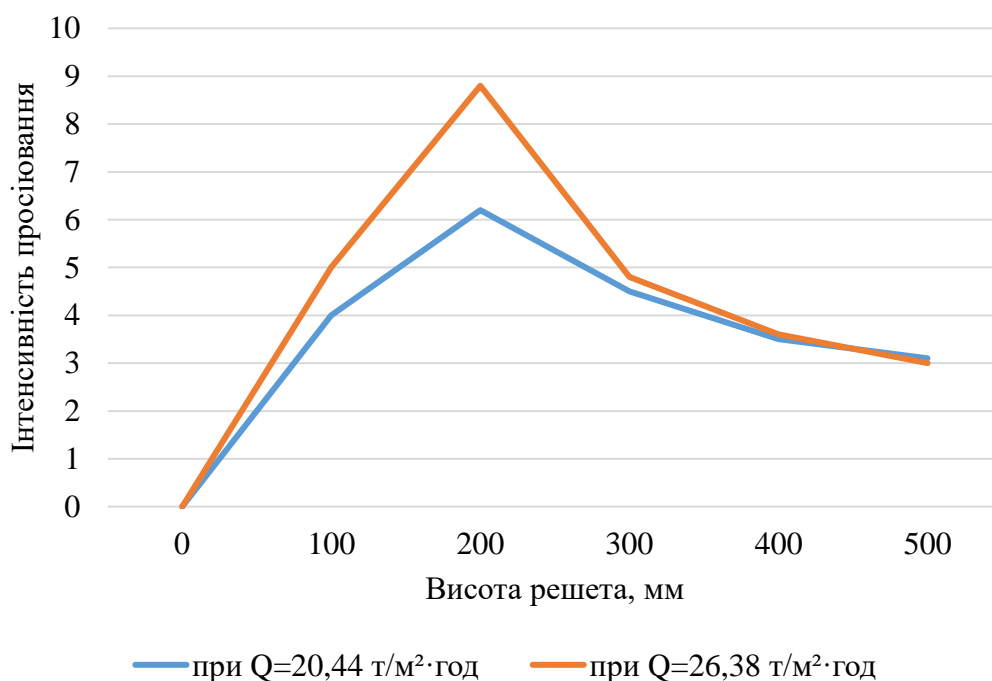


Рисунок 4.6– Зміна інтенсивності просіювання від висоти циліндричного решета при різних подачах

Комбіновані пластини з  $\beta = 45^\circ$ ;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $\omega_p = 15,42 \text{ с}^{-1}$ ;  $C_0 = 4\%$ ;  $S = 44 \text{ мм}$ ; розмір отвору  $2,2 \times 16 \text{ мм}$ .

Таке зниження характерно для всіх зерноочисних машин, так як кількість прохідної фракції зменшується в міру руху матеріалу по решету.

При роботі відцентрово-решітного сепаратора з комбінованими пластинами зростання просіювання спостерігається до 200 мм висоти решета, далі відбувається значне зниження. При використанні простих пластин, нахилених під кутом  $45^\circ$ , різке зниження просіювання відзначається вже на висоті 100 мм від верху решета і до нижньої частини практично повністю відсутня [47].

Інтенсивність просіювання вище при подачі зернової суміші  $Q = 26,38$  т/(м<sup>2</sup>·год) на ділянці довжини решета 300 мм, ніж при  $Q = 20,44$  т/(м<sup>2</sup>·год), це пояснюється тим, що загальний зерновий шар, що знаходиться між пластинами барабана повністю заповнений і тиск його на активний шар вище.

#### 4.8 Вплив вихідної засміченості зернової суміші на показники процесу сепарування

Засміченість зерна значно впливає на ефективність роботи зерноочисних машин, особливо призначених для попередньої та первинної очистки. Отримана залежність ефективності виділення дрібних домішок на відцентрово-решітному сепараторі від засміченості вихідного матеріалу, представлена на рисунку 4.7.

За графіком добре простежується зниження ефективності очищення при збільшенні засміченості. Підвищення засміченості зернового матеріалу дрібними домішками з 2 до 6 % призводить до зниження ефективності очищення з 95 до 73 %. Зниження склало 22 %, тобто на кожен відсоток збільшення засміченості відбувається зниження ефективності на 4,4 %. Таке зниження характерно для роботи зерноочисних машин. Втрати зерна в відходи зі збільшенням засміченості знижуються. Це пояснюється тим, що отвори решета в процесі сепарування «зайняті» прохідною фракцією.

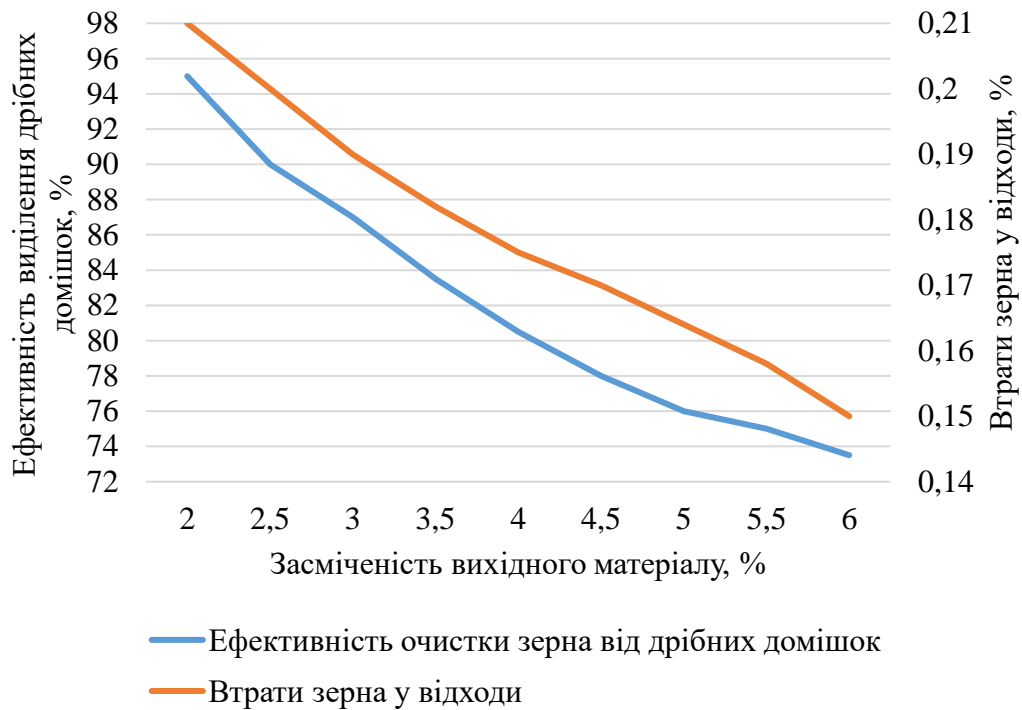


Рисунок 4.7– Залежність ефективності виділення дрібних домішок і втрат зерна у відходи від засміченості вихідного матеріалу

Комбіновані пластини з  $\beta = 45^\circ$ ;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $\omega_p = 15,42 \text{ с}^{-1}$ ;  $Q = 26,38 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ;

$W = 14\%$ ;  $S = 44 \text{ мм}$ ; розмір отвору  $2,2 \times 16 \text{ мм}$ .

Максимальне значення по засміченості дрібними домішками вихідного матеріалу в проведених експериментах становило 6 %. Такий зміст насіння бур'янів, що належать до дрібних домішок, навіть в свіжезібраному зерновому матеріалі зустрічається рідко.

На основі результатів однофакторних експериментів можна зробити висновок, що найбільший вплив на зміну ефективності роботи надають кінематичні і конструктивні параметри – кутова швидкість обертання решета і крок розстановки пластин барабана, а також технологічні чинники.

## Висновки за розділом

В даному розділі дипломної роботи було визначено, що при збільшенні засміченості зерна від 2 до 6 % повнота виділення дрібних домішок знижується з 95 % до 73,4 %, при цьому втрати зерна у відходи не перевищують встановлені вимоги.

Проведені випробування досліджуваного зразка сепаратора показали, що при продуктивності 32,6 т/год повнота виділення дрібних домішок із зернового вороху, при допустимому рівні втрат, становить 79,8 %. Відцентрово-решітний сепаратор з блоком підсівних решіт і при поєднанні з повітряним потоком може використовуватися в поточних лініях для очищення продовольчого зерна, як машина попереднього очищення.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ В НАВКОЛИШЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### 5.1 Розробка карти безпеки праці

При розробці карти з охорони праці для оператора відцентрового решітного сепаратора (рис. 5.1) були враховані всі характеристики та умови праці операторів зерноочисного обладнання.

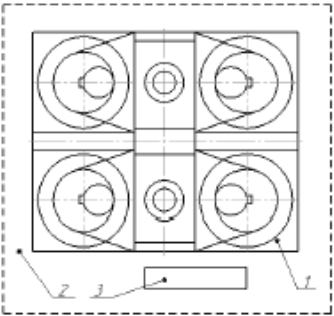
<p><b>I. Характеристика умов праці</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Місце роботи – ділянка очистки зерна лінії з підготовки зерна до зберігання;</li> <li>2. Вид робіт – очищення зерна пшениці від сторонніх домішок;</li> <li>3. Кваліфікація – оператор зерноочисного обладнання.</li> </ol>	<p><b>II. Вимоги технічних умов забезпечення безпеки праці</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Застосовувати засоби індивідуального захисту;</li> <li>2. Освітленість робочого місця – 150 лк;</li> <li>3. Повітряний обмін – 1000 м<sup>3</sup>/год.</li> </ol>
<p><b>III. Індивідуальні засоби захисту на робочому місці</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Костюм, комбінезон бавовняний;</li> <li>2. Ботинки шкіряні;</li> <li>3. Головний убір;</li> <li>4. Одяг повинен бути застібнутий на всі гудзики.</li> </ol>	<p><b>IV. Показники технологічного режиму та міри безпеки</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ефективність очистки – 87 %;</li> <li>2. Кутова швидкість циліндричного решета – 15,7 с<sup>-1</sup>;</li> <li>3. Наявність захисних кожухів обов'язкова;</li> <li>4. Не допускається виконувати регулювання при увімкненому електродвигуні.</li> </ol>
<p><b>V. Планування робочого місця</b></p>  <p>1 – сепаратор зерноочисний; 2 – місце перебування працівника; 3 – пульт керування.</p>	<p><b>VI. Вимоги безпеки праці перед початком робіт</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Починаючи роботу працівник повинен перевірити справність машини;</li> <li>2. Перевірити наявність та справність захисних огорожень приводів робочих органів;</li> <li>3. Перед включенням зерноочисної машини переконатись, що нікому із присутніх біля машини не загрожує небезпека від рухомих частин і механізмів</li> </ol>
<p><b>VII Вимоги безпеки при виконанні операції очистки зерна</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Роботи повинні виконуватись згідно заходів безпеки встановлених ДНАОП та існуючої на підприємстві документації.</li> <li>2. До роботи на сепараторі допускаються, що досягли 18 років, пройшли навчання та всі види інструктажу з охорони праці, стажування і мають досвід роботи на даному обладнанні.</li> <li>3. Забороняється проводити ремонтні роботи і очистку сепаратора не вимкнувши його від мережі і без повної зупинки робочих органів.</li> <li>5. Дотримуватися правил електробезпеки, здійснювати контроль допоміжних захисних пристроїв та захисних огорожень.</li> </ol>	

Рисунок 5.1 – Карта безпеки праці оператора відцентрового решітного сепаратора

## 5.2 Утилізація відходів виробництва на елеваторі ТОВ «Павлоградзернопродукт»

ТОВ «Павлоградзернопродукт» – це сучасний елеватор з повністю механізованими зерносховищами, які гарантують безпечне та комфортне поводження з продукцією. На виробничих потужностях здійснюється кілька процесів для поводження з відходами виробництва.

Виробничі відходи з елеватора потрапляють на склад після очищення зерносховища. Спеціальне обладнання запобігає потраплянню відходів ззовні будівлі. Однак тривале зберігання відходів у бункерах не рекомендується. Їх необхідно вчасно утилізувати.

Видалення залишків зерна в силосах після сортування зерна може покращити санітарний стан зерносховищ. Своєчасне видалення відходів також може запобігти самозайманню, розмноженню гризунів і патогенних мікроорганізмів.

Відходи з елеваторів передаються на сміттєзбірники. Змішування різних категорій відходів заборонено. Це пов'язано з тим, що передача на подальшу переробку та обробку для виробництва кормів значно ускладнюється.

Екологічна безпека залежить від дотримання вимог щодо зберігання, транспортування та утилізації відходів зернових культур. Невиконання цих вимог може призвести до небезпечних екологічних проблем. Зерновідходи утилізують поетапно.

### Висновки за розділом

В даному розділі кваліфікаційної роботи було розроблено карту безпеки праці оператора відцентрового решітного зерноочисного сепаратора, обговорено та запропоновано різні шляхи утилізації відходів елеваторного виробництва.

## 6 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 6.1 Організація проведення дослідження

Організація дослідження включала складання переліку завдань, визначення їх взаємозв'язку та тривалості, створення мережевого графіка, визначення критичного шляху та розрахунок орієнтовної вартості експерименту.

Перелік завдань, передбачених під час проведення дослідження з визначення впливу техніко-технологічних параметрів обладнання для очистки зерна у відцентровому решітному сепараторі з вертикальною віссю обертання, наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – План проведення дослідження

Шифр робіт $i-j$	Найменування робіт	Тривалість робіт $t_{ij}$ , днів
1	2	3
1-2	Вибір теми наукових досліджень	1
2-3	Пошук літератури та написання огляду	18
3-4	Складання плану наукових досліджень	2
4-5	Розробка методики наукових досліджень	3
5-6	Підготовка дослідних зразків зерна пшениці	3
6-7	Підготовка макетного зразка відцентрового решітного сепаратора	20
7-8	Визначення впливу основних геометричних параметрів решіт на ефективність відокремлення домішок	4
7-9	Визначення впливу геометричних параметрів продовгуватих отворів решета на ефективність відокремлення домішок	3
7-10	Визначення впливу геометричних параметрів решіт з круглими отворами на ефективність процесу сепарування	5
7-11	Визначення впливу кінематичних параметрів роботи дослідного зразка сепаратора на ефективність процесу сепарування	6
8-12	Аналіз та обробка результатів дослідження	1
9-12		1
10-12		1
11-12		1
12-13	Обробка отриманих результатів	4
13-14	Підготовка матеріалу для оприлюднення результатів	5
14-15	Формування демонстраційного матеріалу	4

У відповідності до плану робіт було створено мережевий графік, схема якого приведена на рис. 6.1.

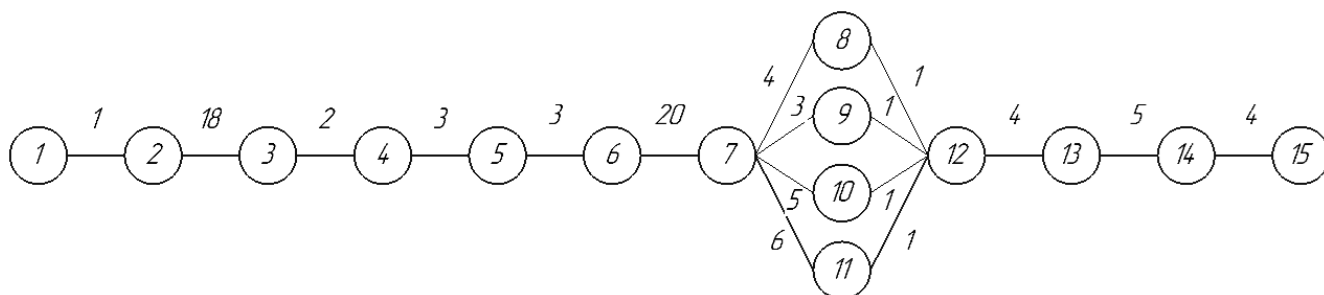


Рисунок 6.1 – Мережевий графік проведення науково-дослідної роботи

Знаходимо повний шлях – тривалість послідовних робіт від початкової події до кінцевої.

$$L_{1-2-3-4-5-6-7-8-12-13-14-15}^1 = 1 + 18 + 2 + 3 + 3 + 20 + 4 + 1 + 4 + 5 + 4 = 65;$$

$$L_{1-2-3-4-5-6-7-9-12-13-14-15}^2 = 1 + 18 + 2 + 3 + 3 + 20 + 3 + 1 + 4 + 5 + 4 = 62;$$

$$L_{1-2-3-4-5-6-7-10-12-13-14-15}^3 = 1 + 18 + 2 + 3 + 3 + 20 + 5 + 1 + 4 + 5 + 4 = 66;$$

$$L_{1-2-3-4-5-6-7-11-12-13-14-15}^4 = 1 + 18 + 2 + 3 + 3 + 20 + 6 + 1 + 4 + 5 + 4 = 67.$$

Максимальна тривалість робіт спостерігається у 4 шляху, його тривалістю 67 днів.

## 6.2 Витрати, пов'язані з проведенням дослідження

Витрати на основні та побічні матеріали розраховують за формулою:

$$M = \sum m_i \cdot C_i, \quad (6.1)$$

де  $m_i$  – кількість витраченого  $i$ -го матеріалу;

$C_i$  – ціна одиниці  $i$ -го матеріалу, грн.

Результати розрахунку витрат на матеріали наведені в табл. 6.2.



Таблиця 6.2 – Необхідна кількість основних матеріалів та їх вартість

Найменування, одиниці	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Зерно пшениці, кг	50	7,2	360,0
Всього			360,0

Результати розрахунку заробітна плата людей, що приймали участь у дослідженнях, наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Розрахунок витрат на заробітну плату

Посада	Середньомісячний заробіток, грн	Середньочасовий заробіток, грн	Кількість людино-годин	Сума, грн
Дипломний керівник	8000	47,62	20	952,40
Всього				952,40

Нарахування на заробітну складають:

$$H = \frac{952,40 \cdot 22}{100} = 209,53 \text{ грн.}$$

Затрати на витрачену електроенергію визначають за формулою:

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

де  $M$  – потужність встановленого електрообладнання, кВт;

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

$T$  – час роботи на установці, год;

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

Затрати енергії на сушильну шафу складають:

$$E_1 = 1,2 \cdot 0,9 \cdot 24 \cdot 1,68 = 43,54 \text{ грн.}$$

Затрати енергії на електронні ваги складають:

$$E_2 = 0,006 \cdot 0,9 \cdot 18 \cdot 1,68 = 0,16 \text{ грн.}$$

Затрати енергії на роботу відцентрового решітного сепаратора:

$$E_3 = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 12 \cdot 1,68 = 16,32 \text{ грн.}$$

Загальні затрати електроенергії складають:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 43,54 + 0,16 + 16,32 = 60,02 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію розраховуємо за формулою:

$$A = \frac{\Phi \cdot H \cdot t}{100 \cdot 12}, \quad (6.3)$$

де  $A$  – амортизаційні відрахування, грн;

$\Phi$  – вартість устаткування, грн;

$H$  – річна норма амортизації, %;

$t$  – тривалість проведення дослідження на устаткуванні, днів;

12 – кількість місяців у році.

Результати розрахунків витрат на амортизацію наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Результати розрахунків витрат на амортизацію

Устаткування	Вартість, грн	Річна норма амортизації, %	Тривалість роботи, днів	Витрати на амортизацію, грн
Аналізатор	7850,0	24	3	14,51
Електронні ваги	2190,0	24	3	5,12
Дослідна модель відцентрового сепаратора	16000,0	24	2	21,73
Всього				41,36

Накладні витрати становлять:

$$\frac{(952,40 \cdot 80)}{100} = 761,92 \text{ грн.}$$

Кошторис витрат на проведення дослідження наведений в табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Кошторис витрат на проведення дослідження

Витрати	Сума, грн.
Основні матеріали	360,00
Заробітна плата	952,40
Нарахування на заробітну плату	209,53
Електроенергія	60,02
Амортизація	41,36
Накладні витрати	761,92
Всього	3146,59

Аналіз показав, що на першому місці стоять витрати на заробітну плату і накладні витрати.

### 6.3 Розрахунок ціни дослідження

Ціну досліджень визначаємо:

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

де  $Ц$  – вартість дослідження, грн;

$C$  – витрати на дослідження, грн;

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

$$Ц = 3146,59 + \frac{30 \cdot 3146,59}{100} = 4090,57 \text{ грн.}$$

Витрати на проведені дослідження становлять 4090,57 грн.

Висновки за розділом

Найбільшими є витрати на заробітну плату та накладні витрати, які складають 952,40 грн та 761,92 грн. Загалом ціна досліджень складає 4090,57 грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виявлено, що перспективним способом очищення зерна від дрібних домішок є застосування ротаційних циліндричних решіт з вертикальною віссю обертання, що мають продуктивність в 2,5 – 3 рази більше, ніж у плоских підсівних решіт. Стійкість робочого процесу сепарування на підсівному решеті забезпечується внутрішнім пластинчастим барабаном.

2. Встановлені закономірності показують, що ефективність очищення на підсівному решеті підвищується зі зменшенням кроку розстановки пластин на барабані від 60 до 38 мм і зміною кута нахилу поздовжньої осі отвору до твірної циліндра до  $10^\circ$ .

4. Обґрунтовано оптимальні параметри сепаратора: крок розстановки пластин  $S = 44$  мм, кути нахилу граней комбінованої пластини  $\beta = 45^\circ$  і  $\beta' = 0^\circ$ , кут відхилення отворів на решеті  $\gamma = 5^\circ$  від вертикалі в сторону, зворотну обертанню. Експериментальними дослідженнями підтверджено теоретичні висновки про ефективність застосування комбінованих пластин і розташуванні продовгастих отворів на решеті під кутом.

5. Визначено, що при збільшенні засміченості зерна від 2 до 6 % повнота виділення дрібних домішок знижується з 95% до 73,4%, при цьому втрати зерна у відходи не перевищують встановлені вимоги.

6. Встановлено дослідженнями, що при збільшенні кутової швидкості до  $15,7 \text{ c}^{-1}$  робочий процес протікає стійко, ефективність очищення зерна зростає. Однак збільшення кутової швидкості понад  $16,2 \text{ c}^{-1}$  призводить до «заклинювання» зернової суміші, тобто припинення її руху щодо сепарувальної поверхні. Тому найбільш оптимальними кутовими швидкостями є швидкості від  $15,1$  до  $15,7 \text{ c}^{-1}$ . Збільшення кутової швидкості призводить до зростання енергоємності процесу сепарування і збільшення втрат зерна у відходи.

8. Найбільшими є витрати на заробітну плату та накладні витрати, які складають 952,40 грн та 761,92 грн. Загалом ціна досліджень складає 4090,57 грн.

## БІБЛІОГРАФІЯ

- 1 . Адамчук В. В., Прилуцький, А. Н., Заришняк, А. С., Степаненко, С. П. (2014). Концепція комплексного вирішення проблеми післязбиральної обробки і зберігання зерна в сільськогосподарських підприємствах України. В зб.: Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ». Вип. 99. С. 40-56.
- 2 . Войтюк, Д. Г., Гаврилюк Г. Р. (1994). Сільськогосподарські машини. К.: Урожай. 446 с.
- 3 . Войтюк, Д. Г., Гаврилюк, Г. Р. (2004). Сільськогосподарські та меліоративні машини. К.: Вища освіта. 554 с.
- 4 . Kharchenko, S. O. (2017). Intensification of grain sifting on flat sieves of vibration grain separators. Kharkiv: «Діса+». 220 p.
- 5 . Ольшанський, В. П., Бредихін, В. В., Лук'яненко, В. М., Півень, М. В., Сліпченко, М. В., Харченко, С. О. (2017). Теорія сепарування зерна: монографія. Харків: ПланетаПрінт. 803 с.
- 6 . Котов, Б. І., Пастушенко, М. Г., Степаненко, С. П. (2012). Дослідження ефективності вібровідцентрової сепарації зерна на ступінчасто-конічному решеті методом планування експериментів. Конструювання, експлуатація та виробництво сільськогосподарських машин. Випуск 42. Частина 2. С. 70-75.
- 7 . Бредихін, В. В. (2003). Обґрунтування параметрів процесу вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих сумішей за густиною насіння. Автореф. дис. канд. техн. наук. Харків. 20 с.
- 8 . Котов, Б. І., Степаненко, С. П., Пастушенко, М. Г. (2004). Дослідження шляхів підвищення ефективності віброрешітних сепараторів зерна і насіння. Вибрації в техніці і технологіях. № 3 (35). С. 61-63.
- 9 . Дерев'янку, Д. (2015). Дослідження ударної взаємодії травмування насіння поверхнею циліндричного решета вібросепаратора після його сходження

з диска розподільника. Техніка і технології АПК. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, № 6 (69). С. 9-12.

10 . Заїка, П. М., Бакум, М. В., Михайлов, А. Д., Козій, О. Б. (2012). Сепарація насіння льону на вібраційних сепараторах. Вібрації в техніці та технологіях. № 3 (67). С. 106-111.

11 . Clie, C., Chiang, Y. P., Pomeranz, Y. (1989). Image analysis and characterization of cereal grains with a laser range finder and camera contour extractor. Cereal Chem. № 6. P. 466-470.

12 . Thomson, W. H., Pomeranz, Y. (1991). Classification of wheat kernels using three-dimensional image analysis. Cereal Chem. 68. № 34. P. 357-361.

13 . Kiratiratanapruk, K., Sinthupinyo, W. (2011). Color and texture for corn seed classification by machine vision. Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst. "The Decad. Intell. Green Signal Process. Commun. ISPACS. P. 7-11.

14 . Rong, R. V., Sardeshmukh, M. M. (2014). Comparative analysis of Indian wheat seed classification. Iccaci'14. P. 937-942.

15 . Li, J., Liao, G., Xiao, F. (2008). Rapeseed seeds colour recognition by machine vision. Proc. 27th Chinese Control Conf. CCC. P. 146-149.

16 . Хохлов О.М. Застосування програми аналізу зображень ImageJ в дослідженнях об'єктів сортовивчення / О.М. Хохлов // Виноградарство і виноробство. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. Спец. випуск. – Одеса, 2009. – С. 179-185.

17 . Mira Park, Jesse S. Jin, Sherlock L. Au, Suhuai Luo, Yue Cui (2009). Automated Defect Inspection Systems by Pattern. Recognition International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. Vol. 2. No. 2. P. 31-41.

18 . Сухін, В. С., Чорнобай, І. В., Калічава, Г.Т. (2018). Патент на корисну модель UA 122770 U, МПК В07В 4/02 (2006.01), А01F 12/44 (2006.01). Універсальний аеродинамічний сепаратор серії "Сад" з додатковим очищенням зернового матеріалу. Заявник Сухін В. С., Чорнобай І. В., Калічава Г.Т. № u 2017 07797. Заявл. 24.07.2017. Опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2.

19 . Сухін, В. С., Чорнобай, І. В., Калічава, Г. Т. (2018). Патент на винахід UA 116073 C2, МПК B07B 4/02 (2006.01), B07B 11/06 (2006.01), B07B 11/08 (2006.01), A01F 12/44 (2006.01). Спосіб сепарації з додатковим очищенням зернового матеріалу та аеродинамічний сепаратор "Сад" для його реалізації. Заявник Сухін В. С., Чорнобай І. В., Калічава Г.Т. № а 2017 01824. Заявл. 27.02.2017. Опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2, 2018 р.

20 . Фадєєв, Л. В. (2008). Патент на корисну модель UA 36999 U, МПК B07B 4/02 (2008.01). Струминний сепаратор Фадєєва. Заявник Фадєєв Л. В. № u200808062. Заявл. 13.06.2008. Опубл. 10.11.2008, Бюл. № 10.

21 . Гапонюк, О. І., Гросул, Л. Г., Мосієнко, Г. А., Яцкова, Т. Й., Гончарук, Г. А. (2011). Патент на корисну модель UA 63368 U, МПК B07B 4/04 (2006.01). Повітряно-гравітаційний сепаратор. Заявник Одеська національна академія харчових технологій. № u201102177. Заявл. 24.02.2011. Опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.

22 . Кирпа, М. Я., Скотар, С. О., Рослик, О.О. (2014). Дослідження процесу та параметрів аеродинамічного сепарування однокомпонентних насіннєвих сумішей. Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. № 2 (34). С. 95-98.

23 . Гросул, Л. Г., Гапонюк, О. І., Мосієнко, Г. А., Яцкова, Т. Й., Гончарук, Г. А. (2011). Повітряно-гравітаційний сепаратор для попередньої обробки збіжжя. Зернові продукти і комбікорми. № 2 (42). С. 40-42.

24 . Рудь, А. В., Дуганець, В. І., Павельчук, Ю. Ф., Мошенко, І. О., Мельник, В. В. (2013). Результати дослідження технологічної доцільності використання аеродинамічних сепараторів. Збірник наукових праць. За редакцією доктора с.-г. наук, професора, академіка АН ВО України, Заслуженого діяча науки і техніки України, ректора університету (голова) М.І. Бахмата. № 21. Кам'янець-Подільський. С. 372-377.

25 . Міщенко, М. І., Ріда, В. П. (2000). Патент на корисну модель UA 553 U, МПК (2006) B07B 9/00. Зерноочищувальний сепаратор. Заявник Відкрите



акціонерне товариство "Хорольський механічний завод". № 99105723. Заявл. 19.10.1999. Опубл. 15.09.2000, Бюл. № 4.

26 . Савицький, С. М., Колісник, С. О., Дубовецький, А. О. (2018). Патент на корисну модель UA 127890 U, МПК (2018.01) B07B 1/00. Сепаратор зерноочисний. Заявник Савицький С. М., Колісник С. О., Дубовецький А. О. № u 2018 02500. Заявл. 12.03.2018. Опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16.

27 . Іхно, М. П., Фадеев, Л. В. (2002). Патент на винахід UA 51792 C2, МПК B07B1/46. Калібрувальна машина. Заявник Харківський державний політехнічний університет, Акціонерна компанія "Контакт". № 99126926. Заявл. 20 12 1999. Опубл. 16 12 2002, Бюл № 12.

28 . Фадеев, Л. В. (2011). Патент на корисну модель UA 58428 U, МПК (2011.01) B07B 13/00. Очищально-калібрувальна машина. Заявник Фадеев Л. В. № u201011738. Заявл. 04.10.2010. Опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7.

29 . Верещинський, О. П. (2017). Патент на винахід UA 115191U, МПК (2017.01), A01F 12/44 (2006.01), B07B 1/00. Ситовий сепаратор. Заявник Верещинський О. П. № а 2016 03746. Заявл. 07.04.2016. Опубл. 25.09.2017, Бюл.№ 18.

30 . Ловейкін, В. С., Кулик, В. П. (2012). Патент на винахід UA 97155 C2, МПК A01F 12/44 (2006.01), B07B 1/28 (2006.01). Зерноочисна машина. Заявник Національний університет біоресурсів і природокористування України № а200913871. Заявл. 29.12.2009. Опубл. 10.01.2012, Бюл.№ 1.

31 . Galkin, V., Hanlrikov, V., Kozlovskiy, I. (2012). Increase of efficiency of cleaning of seeds on a vibration pneumatic separator. Механізація на земеделието (Софія). №4. С. 7-10.

32 . Gulling Michael John, Blurray Benedict Mark. (1981). Sorting objects. Gunson`s Sortex Ltd. Заявка Великобритани, кл. B 07 C 5/342, G 01 И 21/00. НКИ G 1 A, N2091415. Заяви 19.01.81 N8101541. Опубл. 28.07.82.

33 . Galling Michael John, Deefholts Murray Benedict Mark. (1981). Sorting objects. Gunson`s Sortex Ltd. Заявка Великобритани, кл. B 07 C 5/02, G 01 N 21/00, НКИ. G 1 A. Заявл. 19.01.81, N 8101542. Опубл. 28.07.82.

- 34 . Lockett James F. (1982). Univeisal sorting apparatus. Патент США, кл. В 07 С. 5/342, НКІ 209/564, N4344539. Заявл. 05.05.78, N 903050. Опубл. 17.08.82.
- 35 . Runmann, K. (1990). Beaiigong durch elektronische Farb-sortierung. Muhle Mischfutter-fechn. 1990. 127, №19. P. 244-245.
- 36 . Osborne, D. Y., Berfrand, D. (1992). Image analysis and spectroscopic techniques. Rapp 9 Congr. Int. Cereals et pain, Paris, 1-5 juin 1992. Ind. cereal. № 77. P. 10-12.
- 37 . Barrozo, M., Silva, A., Oliveira, D. (2008). The use of curvature and bias measures to discriminate among aquilibrium moisture equations for mustard seed. Journal of Stored Products Research. 2008. Vol. 44. P. 65-70.
- 38 . Baumler, E., Cuniberti, A., Nolasco, S., Riccobene I. (2006). Moisture dependent physical and compression properties of safflower seed. Journal of Food Engineering. Vol. 72. P. 134-140.
- 39 . Gupta, R. K., Das, S. K., (2000). Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive Loading. J. Food Eng. 46. P. 1-8.
- 40 . Khazaei J., Sarmadi, M., Behzad, J. (2008). Physical properties of sunflower seeds and kernels ralated to harvesting and dehulling. Lucrari Stiintifice. P. 49.
- 41 . Білокопитов, О. О. (2012). Аналіз результатів визначення критичної швидкості та коефіцієнту парусності складових зернового вороху. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь. Вип. 2. Т. 5. С. 198-207.
- 42 Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., Koshul'ko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. Acta Periodica Technologica, APTEFF, 50, P. 12-22.
- 43 Nykyforov, A., Antoshchenkov, R., Halych, I., Kis, V., Polyansky, P., Koshulko, V., Tymchak, D., Dombrovska, A., Kilimnik, I. (2022). Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines involving measures to reduce the harmful influence of the

aerodynamic factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (116)), 24–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253657> (Scopus).

44 В.С.Кошулько, Ю.О. Чурсінов. Н.А. Сова. Вплив динамічної нерівномірності коливань робочого столу падді-машини на сепаруваннязернових сумішей. Ст. 90-98. Сільськогосподарські машини. Вип. 49. ЛНТУ, Луцьк, 2023. 142с. ( 0,12 др. арк.)

45 Aliiev E., Aliieva O., Maliehin R. Technical and technological provision of complex waste processing of plant raw oil cultures in food for organic animals. *Scientific Horizons*. 2020. № 07 (92). P. 112-19. DOI: 10.33249/2663-2144-2020-92-7-112-119.

46 Shevchenko I. Aliiev E. Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 6/1 (108). P. 6-13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409

47 Paliy, A., Aliiev, E., Paliy, A., Ishchenko, K., Shkromada, O., Musiienko, Y., Plyuta, L., Chekan, O., Dubin, R., Mohutova, V. (2021). Development of a device for cleansing cow udder teats and testing it under industrial conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(1 (109)), 43–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224927>

48 Shevchenko, I., Aliiev, E., Viselga, G., Kaminski, J. R. (2021). Modeling Separation Process for Sunflower Seed Mixture on Vibro-Pneumatic Separators, 27(4), 311–320. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.27647>

49 Paliy A., Aliiev E., Nanka A., Bogomolov O., Bredixin V., Paliy A., Shkromada O., Musiienko Y., Stockiy A., Grebenik N.. Identifying changes in the technical parameters of milking rubber under industrial conditions to elucidate their effect on the milking process. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, Issue 1 (111), 2021. 21–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231917>