

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ____ ” _____ 20 ____ р.
Зав. кафедри к.т.н., доцент
(науковий ступінь, вчене звання)
А.В. Войтік
(підпис) (ініціали, прізвище)

ДИПЛОМНА РОБОТА

магістр

(освітній рівень)

тема роботи «ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРУТКОВОГО БАРАБАНА
СЕПАРАТОРА ЗЕРНА»

Виконав: студент 2 курсу, групи 22м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності 208
«Агроінженерія»
Лісовий В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент Ковальчук Ю.О.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2023 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ магістр _____
Спеціальність _____ 208 «Агроінженерія» _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ **А.В. Войтік**
“ _____ ” _____ 20 __ р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

студенту _____ **Лісовому Василю Валерійовичу** _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Обґрунтування параметрів пруткового барабана сепаратора зерна»

керівник роботи _____ **Лісовий І.О., к.т.н., доцент** _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
«30» червня 20 23 р. № 01-06/161

2. Строк подання студентом роботи _____ 24.11.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: навчальна, наукова та періодична література за темою роботи;

4. Перелік питань, які потрібно розробити: _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як
додаток до доповіді за темою дипломної роботи:

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		
Техніко-економічне обґрунтування	Ковальчук Ю.О., доцент		

7. Дата видачі завдання 19 квітня 2023 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
7.			
8.			
9.			

Студент

(підпис)

Лісовий В.В.
(прізвище та ініціали)**Керівник роботи**

(підпис)

Ковальчук Ю.О.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПОВІТРЯНОГО ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ	7
1.1 Огляд конструкцій розділення сипких матеріалів	7
1.2 Огляд результатів теоретичних досліджень процесу очищення зернового матеріалу відцентрово-пневматичним сепаратором	11
Висновки, задачі досліджень	15
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	17
2.1. Аналіз об'єкту досліджень	17
2.2 Аналіз диференційних рівнянь та їх часткових розв'язок.	19
Висновки по розділу	26
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	27
3.1 Визначення ефективності розділення зерноsumіші відцентрово-пневматичним сепаратором	27
Висновки по розділу	37
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	38
4.1 Характеристика і аналіз небезпечних та шкідливих факторів, які можуть виникнути під час експлуатації сепаратора	38
4.2 Розробка організаційно-технічних заходів по забезпеченню нормальних санітарно-гігієнічних умов праці на сепараторі	39
4.3 Моделювання небезпечних ситуацій під час роботи на сепараторі	41
Висновки по розділу	43
РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	44
5.1. Техніко-економічне обґрунтування розробки	44
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	50

РЕФЕРАТ

Лісовий В.В. «Обґрунтування параметрів пруткового барабана сепаратора зерна». (Магістерська робота. Умань, Уманський національний університет садівництва, 2023: пояснювальна записка на сторінках, 17 рисунка, 4 таблиць, графічна частина підготовлено ілюстративний матеріал у вигляді презентації 12 слайдів як додаток до доповіді за темою магістерської роботи)

В роботі виявили проблеми сепарації сипких матеріалів; визначили енергоємність процесу переміщення зернової маси у похилому повітряному каналі по поверхні пруткового барабана сепаратора; обґрунтовано конструктивні параметри сепаратора.

Обґрунтували та забезпечили безпечні умови роботи зерно-очисної техніки.

Визначено економічну ефективність.

Ключові слова: ГОРИЗОНТАЛЬНИЙ ПОВІТРЯНИЙ КАНАЛ, ВІДЦЕНТРОВО-ПНЕВМАТИЧНИЙ СЕПАРАТОР, ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА, БАРАБАН, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

ВСТУП

Сучасна Україна позиціонується в світі як держава з високим потенціалом аграрного сектору в сфері вирощування зернових культур, реалізація якого неможлива без впровадження новітніх технологій та забезпечення виробників високоефективною сільськогосподарською технікою. Заключним етапом будь-яких технологій виробництва зерна є його післязбиральне очищення для придання кондиційного і товарного стану.

Розділення зерна повітряним потоком застосовується практично на кожному етапі післязбиральної обробки, починаючи з попереднього очищення продовольчого зерна і закінчуючи підготовкою насіння до посіву. Тому від ефективності роботи пневмосепараторів залежить стан кінцевого продукту, його якість і ціна. Однак переважна більшість наявної в господарствах зерноочисної техніки фізично і морально застаріла, а тому не дозволяє отримати продукцію належної якості при високій продуктивності.

Одним із шляхів підвищення ефективності очищення є подальше вдосконалення повітряних систем, спрямоване на інтенсифікацію процесу пневмосепарації. Аналіз наукових праць дозволяє зазначити, що вирішення поставленої задачі можливо досягти шляхом тонкошарової обробки зернового матеріалу в полі дії штучно створених інерційних сил із застосуванням надкритичних швидкостей повітряного потоку.

Метою досліджень є підвищення продуктивності розділення сипких матеріалів шляхом обґрунтування параметрів конічного барабана з прутковою поверхнею сепаратора.

Об'єктом досліджень є процес розділення сумішей сепаратором під дією інерційних сил конічного барабана з прутковою поверхнею.

Предмет досліджень – параметри відцентрово-пневматичного сепаратора.

Апробація результатів робота заслуговувалась 08 по 10 листопада 2023р. XIV Міжнародну науково-практичну конференцію «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» [1].

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПОВІТРЯНОГО ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ

1.2 Огляд конструкцій розділення сипких матеріалів

Нині виробництво продукції рослинництва включає різноманітні технологічні операції, що мають взаємопов'язані між собою та впливають як на якісні, так і на кількісні показники виробленого кінцевого продукту. Залежно від низки чинників (регіон виробництва продукції, агротехнології, що застосовуються, засоби механізації, що використовуються, наявність певної логістики тощо) вироблений продукт, що має набір властивостей, матиме різну собівартість, і, як наслідок, певну маржинальність і конкурентоспроможність [2]. Системний підхід до вирішення цього питання виробництва дає змогу виокремлювати низку взаємопов'язаних технологічних операцій, представлених на рис. 1, кожна з яких складається з різних технологічних процесів, які, своєю чергою, можуть виконуватися з широкою ймовірністю технологічних параметрів. Кожен параметр технологічного процесу впливатиме на кінцевий результат виробництва з різним ступенем [3].



Рис. 1.1. Надсистема виробництва продукції рослинництва. Системи технологічних операцій: 1 – основного обробітку ґрунту; 2 – поверхневого обробітку; 3 – посіву (садіння); 4 – догляду за посівами; 5 – збирання; 6 – післязбирального обробітку [3].

Одним з елементів системи, що істотно впливає на отримання продукції рослинництва, є система післязбиральної обробки зернового матеріалу, що надходить з поля [2]. Найбільш трудомістких операцій при виробництві зерна – очищення його від сторонніх домішок у короткі строки. При якісному і своєчасному очищенні продовольчого і фуражного зерна підвищуються його

поживні і смакові властивості. При посіві якісно очищеного насіння знижується засміченість полів, підвищується схожість культури і врожайність [4].

За складом зерновий матеріал можна розділити на три основні групи: основна культура – повноцінне насіння, пошкоджене, бите, у плівці, голе, пусте, щупле, недорозвинуте; побічне насіння – насіння культурних рослин і бур'янів; домішки органічного і мінерального походження [5]. Сепарування елементів зернового матеріалу за різними ознаками дозволяє забезпечити необхідну чистоту насіння. В залежності від призначення зерна (для посіву, продовольчих чи фуражних цілей) до зерноочисних машин висувають відповідні вимоги по доведенню зерноsumіші до необхідної чистоти. Так для продовольчого призначення вміст смітних домішок для пшениці і жита допускається не більше 5%, для інших зернових – 8 %, для рису – 10 %; вміст зернових домішок не більше 15 %. Сортова чистота насіння зернових культур I і II класу повинна бути 98 %...99 %, схожість 90 %...95 %; кількість обрушеного насіння 0,5 %...1 %, вологість насіння 14 %... 17 % [6].

Очищення і сортування базуються на використанні різниці фізико-механічних властивостей насіння культурних рослин і домішок, тобто їх розмірів, ваги, властивостей поверхні, форми і інших. Відповідно до властивостей, які найбільш притаманні для зернового матеріалу основної культури, при її очищенні застосовують різні способи розділення на компоненти: на решетах, в електричному полі, за допомогою магнітних полів, фотоелементів, повітряним потоком, способом “псевдозрідження” та ін. Найбільш поширеними способами є розділення матеріалу на решетах і повітряним потоком, які переважно використовуються сумісно, але як окремі елементи зерноочисної машини [5, 7]. При цьому виникає необхідність уніфікації конструкції зерноочисної машини за продуктивністю та розмірами (в основному ширині) повітряної та решітної систем.

Застосування лише повітряної сепарації дозволяє видалити із зернової суміші більше 50 % всіх домішок [8]. Використовуючи різницю аеродинамічних властивостей можна очистити зерновий матеріал від полови, шматочків соломи,

колосків, щуплих і битих насінин та більшості насіння бур'янів, в тому числі і карантинного. До того ж за допомогою повітряного потоку проводиться сортування основної культури за об'ємом, питомою та абсолютною вагою [9]. Тому, на сьогодні, актуальною задачею є вдосконалення процесу очищення зернових матеріалів повітряним потоком.

За час розвитку зерноочисної техніки було запропоновано багато конструктивних рішень виконання пневматичних сепараторів, які можна класифікувати за наступними особливостями (рис.1.2): методом розділення матеріалу, типом, формою і перерізом пневмосепаруючого каналу (ПСК), способом формування умов обробки матеріалу.

Класичними методами розділення матеріалу є методи «зважування» та «відхилення» (рис.1.2). Якщо зерновий матеріал ввести у вертикальний повітряний потік відповідної швидкості, то, згідно різниці аеродинамічних властивостей часток, матеріал розділиться на дві фракції: перша буде виноситись повітряним потоком, а друга падатиме донизу. Якщо ж такий матеріал ввести у похилий потік, то частки будуть відхилятися потоком від лінії вільного падіння на різну величину і розділяться на n -фракцій.

Схема повітряного очищення зерноsumішей методом «зважування» застосовується в пневмосепараторах ОПС-2, СП-2У і т.д., в зерноочисних машинах ОВС-25, МПО-50 [10], К-527А10 «Petkus» (Німеччина), SM-120 «Camas», С800D «Ab Line Machiner» (Швеція) і інші. Принцип очищення зернового матеріалу методом «відхилення» використаний в пневмосепараторах марки САД, УПС-500, зерноочисних машинах АКН-200 «Harple» (Німеччина), «Cimbria» (Данія), «Kamas» (Швеція) та ін.. Провідними науковцями галузі проводились порівняльні дослідження розділення методом «зважування» і «відхилення» [10]. Були отримані різні результати і на сьогоднішній день спільної думки щодо того, які канали забезпечують більш якісний процес сепарації не існує. Деякі дослідники [10] вважають, що дані пневмосепаратори не можна безпосередньо порівнювати, оскільки вони мають як свої переваги, так і недоліки.

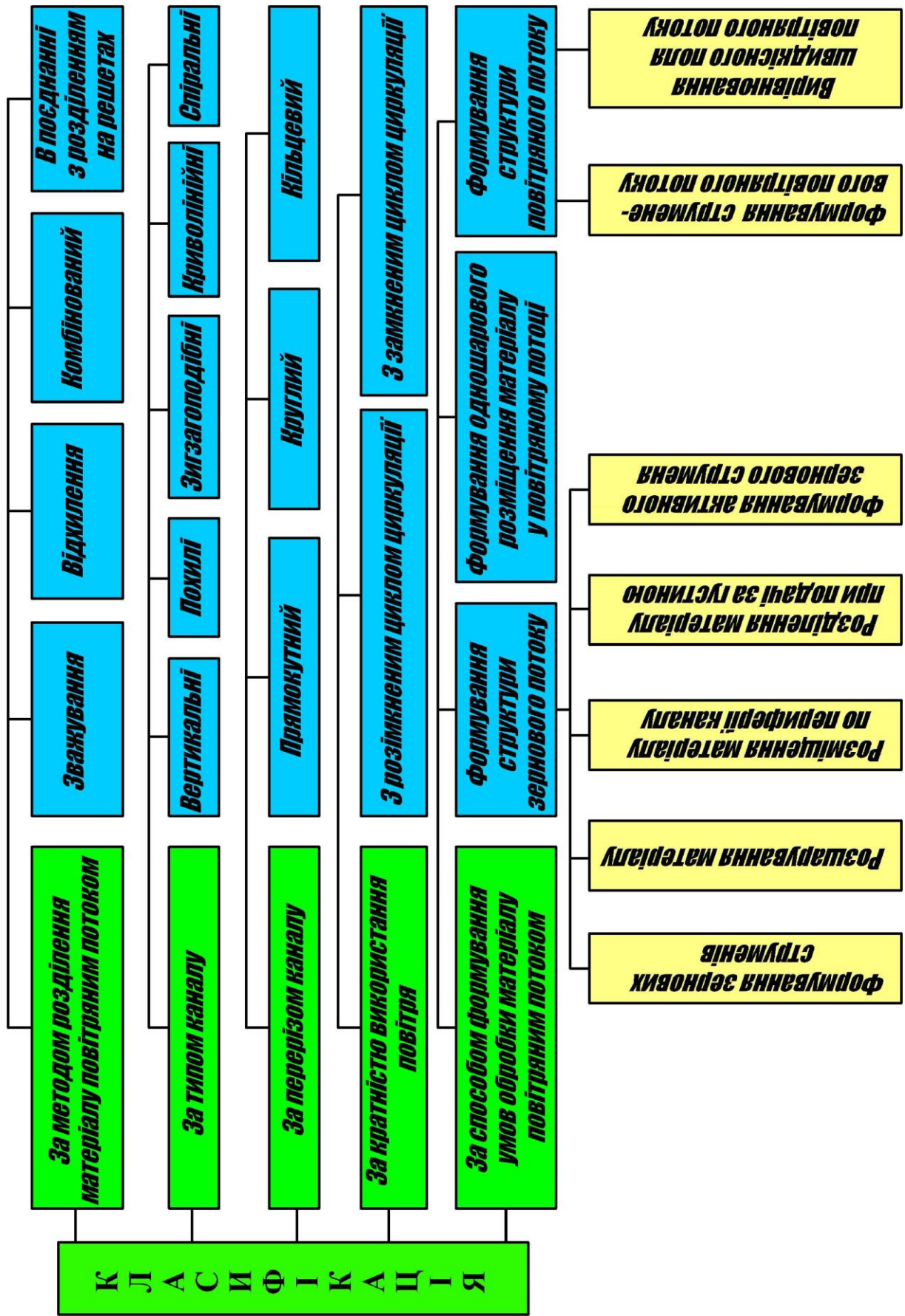


Рис. 1.2. Класифікація пневматичних сепараторів

1.2 Огляд результатів теоретичних досліджень процесу очищення зернового матеріалу відцентрово-пневматичним сепаратором

На сьогоднішній день загальноприйнятої методики теоретичного визначення якості процесу сепарації зерноsumішей повітряним потоком не існує. Тому оцінка можливості розділення матеріалу за аеродинамічними характеристиками проводиться статистичним методом згідно отриманих експериментальних даних. Так всі компоненти зернової суміші можна розділити за швидкістю витання $V_{вит}$ на різні групи за нормальним законом розподілу [12]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.1)$$

де $\bar{x}$ - середнє значення випадкової величини; σ - дисперсія.

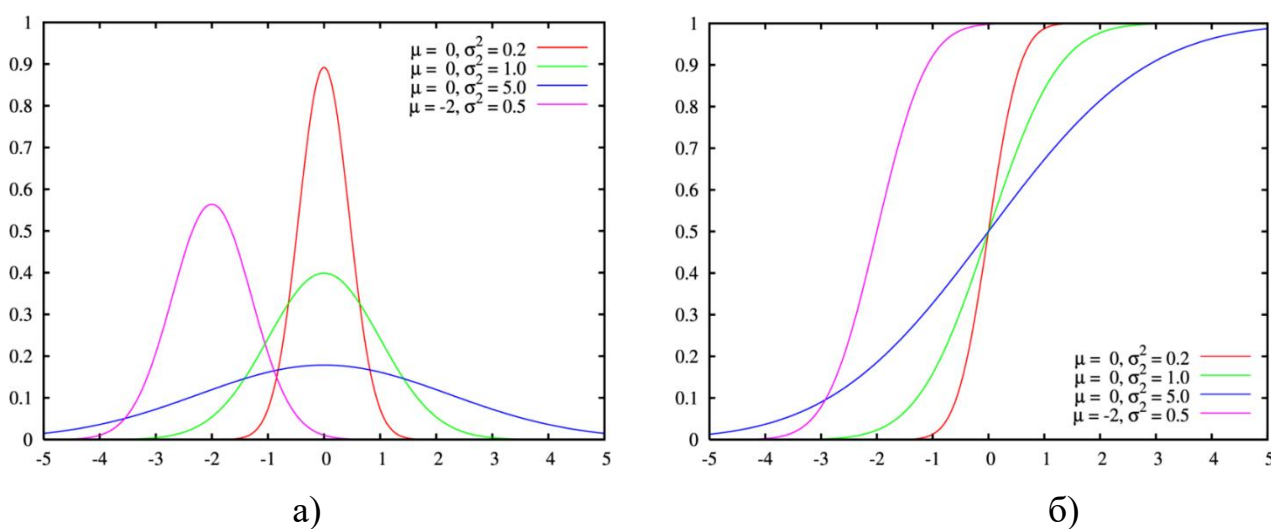


Рис. 1.3. Графіки нормального розподілу величини x : а) диференційні криві; б) інтегральні криві

Перетин кривих розподілу (рис.1.3) вказує на можливість чи неможливість розділення компонентів зерноsumіші за швидкістю витання.

Спробу теоретичного оцінювання якості процесу пневмосепарації реалізовано С.М. Лещенком [13]. Ним запропонована методика проведення статистичного моделювання з застосуванням методу Монте-Карло для дослідження

процесу динаміки руху частинок. Моделюванням при багатократному повторенні процедури розрахунку обчислення траєкторії згідно знайденого закону руху часток будуються криві розподілу $\varphi_i(x)$ випадкових величин.

Кількісну оцінку якості сепарації можна представити відношенням площі дільниць нерозділення фракцій до загальної площі тієї чи іншої фракції. Так як в загальному випадку фракції мають сусідні пересічення з лівого і правого боку (рис. 1.12), то можна записати:

$$k_{\varphi_i} = \frac{S_{\mathcal{L}_i} + S_{n_i}}{S_i}. \quad (1.2)$$

Враховуючи, що кожна з площин перетину фракцій складається з двох частин отримаємо

$$k_{\varphi_i} = \frac{S_{\mathcal{L}_i} + S_{\mathcal{L}_{(i+1)}} + S_{n_{(i-1)}} + S_{n_i}}{S_i}. \quad (1.3)$$

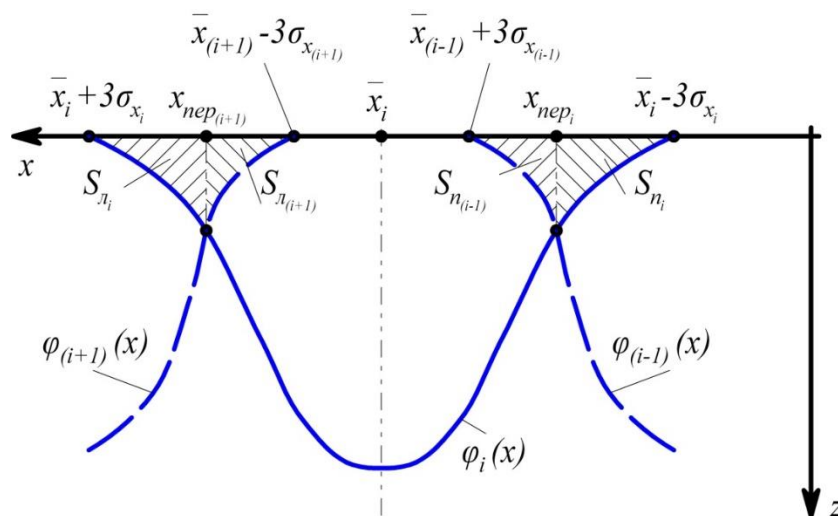


Рис. 1.4. Схема для визначення коефіцієнта сепарації зернової суміші

Таким чином, застосувавши наведену методику стосовно теоретичного рівняння руху часток зернового матеріалу, виявляється можливим визначити якість його розділення.

Вагомий вклад в дослідження переміщення матеріалу по поверхні циліндричного барабана внесли І.П. Безручкін, В.М. Осецький, Г.Д. Терсков, М.Н. Летошнєв, М.Я. Рєзниченко, П.М. Василенко, П.М. Заїка, Б.І. Воротніков і інші.

Так І.П. Безручкіним знайдена аналітична залежність кутової швидкості частки, яка знаходиться на поверхні сітчастого циліндричного решета, від аеродинамічної сили, вектор дії якої знаходиться в горизонтальній площині [14]

$$m \cdot \omega^2 \cdot R = \frac{\cos \psi \cdot (f \cdot G + P_n) - \sin \psi \cdot (G - f \cdot P_n)}{f} \quad (1.4)$$

де ω – кутова швидкість частки, с^{-1} ; G – сила ваги зерна, Н; ψ – кут повороту барабана, град; P_n – сила опору повітряного потоку, Н; R – радіус барабана, м; $f = \text{tg} \varphi$ – коефіцієнт тертя.

Також ним зазначається, що в залежності від величини відцентрової сили і кута тертя зерно може ковзати по поверхні барабана зі швидкістю нижче або вище колової швидкості барабана і потім відриватись від поверхні за умови:

$$m \cdot g \cdot \sin \psi < f \cdot [m \cdot (g \cdot \cos \psi - \omega^2 \cdot R) + P_n \cdot \sin \psi] + P_n \cdot \cos \psi. \quad (1.5)$$

Відзначимо, що при аналізі руху частки по поверхні барабана дослідником не враховані тангенційні сили інерції, які виникають при наявності відносного руху матеріалу по циліндричним поверхням.

Більш ґрунтовно переміщення частки по циліндричним поверхням розглянуто М.Я. Рєзніченко [9]. Ним проведено критичний аналіз досліджень попередників і виявлені закономірності руху матеріалу як по внутрішній поверхні циліндричного барабана, так і по зовнішній.

Зокрема для переміщення по зовнішній поверхні барабана зроблені наступні узагальнення:

- диференційне рівняння руху точки при умові $v_{\text{відн.}} \neq 0$ має вигляд:

$$\kappa = \frac{6 \cdot f}{1 + 4 \cdot f^2} \cdot \sin(\pm \psi) + \frac{2 \cdot (1 - 2 \cdot f^2)}{1 + 4 \cdot f^2} \cdot \cos(\pm \psi) + c \cdot e^{2f(\pm \psi)}, \quad (1.6)$$

де $\kappa = \frac{\omega^2 \cdot R}{g}$ – показник кінематичного режиму;

c – постійна інтегрування, яка залежить від початкових умов;

« $\pm$ » – знак вибирається залежно від напрямку відносної швидкості руху

точки;

- фізично реальне значення величини κ при русі по зовнішній поверхні барабана завжди менше величини $(-\cos \psi)$;

- точка буде знаходитись в стані спокою відносно барабану, якщо:

а) вона лежить в зоні, обмеженій рівняннями:

$$\kappa_{\text{бар}} = \frac{\sin \psi}{f} - \cos \psi \quad \text{та} \quad \kappa_{\text{бар}} = \frac{\sin(-\psi)}{f} - \cos(-\psi); \quad (1.7)$$

б) абсолютна швидкість точки досягне швидкості барабану;

- умова відриву частки від барабана має вигляд:

$$\kappa = -\cos \psi; \quad (1.8)$$

- траєкторія руху після відриву буде описуватись рівнянням (при $R=1$):

$$Y_1 = \frac{(X_1 + \sin^3 \psi_{\text{відр.}})^2}{2 \cdot \cos^3 \psi_{\text{відр.}}} + \frac{\cos \psi_{\text{відр.}}}{2} \cdot (\cos^2 \psi_{\text{відр.}} - 3). \quad (1.9)$$

де X_1, Y_1 – відповідно координати по вісі абсцис і ординат в площині XOY ;

$\psi_{\text{відр.}}$ - кут відриву від поверхні барабана.

П.М. Заїка переходить від розгляду переміщення точки по барабану до руху пласкої частки по зовнішній поверхні горизонтального циліндра, що обертається [12].

На початковому етапі кутова швидкість частки визначається рівнянням:

$$\dot{\psi}^2 = \frac{2 \cdot g}{R \cdot (1 + 4 \cdot f^2)} \cdot \left[\sqrt{1 + f^2} \cdot e^{-2f(\psi+\varphi)} + 3 \cdot f \cdot \sin \psi - (1 - 2 \cdot f^2) \cdot \cos \psi \right], \quad (1.10)$$

а нормальна реакція N виразом

$$N = g \cdot \left\{ \cos \psi - \frac{2}{1 + 4 \cdot f^2} \cdot \left[\sqrt{1 + f^2} \cdot e^{-2f(\psi+\varphi)} + 3 \cdot f \cdot \sin \psi - (1 - 2 \cdot f^2) \cdot \cos \psi \right] \right\}. \quad (1.11)$$

Дані рівняння справедливі, доки $\dot{\psi} < \omega$, $N > 0$.

Зазначені умови і визначають характер руху та місце відриву частки від барабану.

Відзначимо, що при відповідних перетвореннях рівняння, отримані П.М. Заїкою співвідносяться з законом руху, отриманим М.Я. Резніченком.

Взаємодія повітряного потоку з часткою, яка рухається по поверхні циліндричного барабану відображена в дослідженнях Н.А. Тагінцева [12]. Ним отримані наступні залежності:

$$\omega^2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot g}{R \cdot (4 \cdot f^2 + 1)} \left[3 \cdot f \cdot \sin \psi + (2 \cdot f^2 - 1) \cdot \cos \psi + (1 - 2 \cdot f^2) \cdot e^{-2 f \psi} \right] + \frac{k_n \cdot V^2}{R} (1 - e^{-2 f \psi}) \quad (1.12)$$

де V – швидкість повітряного потоку, м/с.

Умова відриву частки від поверхні барабану має вигляд:

$$\omega_{\text{відр.}}^2 = \frac{g}{R} \cdot \left(\cos \psi + \frac{k_n \cdot V^2}{g} \right). \quad (1.13)$$

Висновки, задачі досліджень

Існують різні конструкції та способи очищення зерна [4-16]. Однак не всі вони досить ефективні. В даний час найбільш поширені такі способи сортування та очищення [16]: поділ зернового вороху повітряним потоком; поділ зернового вороху на решітних станах за розмірами частинок; розподіл зернового вороху на трієрах по довжині; поділ зернового вороху на підставі різниці у формі та властивостях поверхні частинок; очищення та сортування зернового вороху на підставі різниці за щільністю; методи електричного поділу зернового вороху.

На практиці, крім можливості якісно проводити очищення, сучасні сепаратори повинні мати низку якостей. До машин для очищення зерна пред'являються такі вимоги [16]: Стабільно проводити розподіл зернового вороху за заданими вимогами. Проводити регулювання процесу сепарації, адаптуючись під партії зерна різної якості з різним вмістом домішок. Легкість в управлінні та налаштуванні. Висока якість проведення очищення зернового вороху (відділення 4...5 % сміттєвих домішок за прохід). Довговічність. Мінімальний термін окупності. Низькі експлуатаційні витрати, що включають витрати на електроенергію, зарплату працівникам і т.д. Конструкція сепаратора

повинна бути ремонтпридатною та безпечною. Мінімальне травмування зерна при очищенні [4-16].

Для досягнення вказаної **мети** поставлено наступні **задачі**:

- виявити проблеми сепарації сипких матеріалів;
- визначити енергоємність процесу переміщення зернової маси у похилому повітряному каналі по поверхні пруткового барабана сепаратора;
- обґрунтування конструктивних параметрів сепаратора;
- забезпечити безпечні умови роботи зерно-очисної техніки.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Аналіз об'єкту досліджень

В даному різноманітті ми вирішили продовжити роботу над вдосконаленням [10] пристроїв для очищення зерна від домішок, що відрізняються парусністю, у процесі транспортування зерна пневматичними транспортерами.

Недоліком конструкції є те, що засипна щілина повинна встановлюватися в таких сепараторах тиском маси зерна на площу живильного клапана зсередини розвантажувальної ємності та зростання опору сітчастого барабану при збільшенні частоти обертання, що призводить до незадовільної роботи сепаратора.

Високий ефект пневмосепарації може досягаться в тому випадку, якщо в розвантажувальній ємності перебуває певний рівень зерна, чого неможливо досягти застосуванням даної конструкції живильних пристроїв.

Задачею запропонованого вдосконалення є підвищення ефективності процесу сепарації за рахунок покращення умов сепарації, а саме за рахунок усунення вказаних недоліків.

Вирішення поставленої задачі досягаться в сепараторі, який має бункер, вентилятор, конічний барабан, механізм його приводу, пневмосепаруючий канал, вивантажувальні канали тим, що конічний барабан має зовнішню поверхню з отворами по колу або утворену спіраллю, фокусує траєкторію зерен, що очищаються в відбивний екран [17].

Суть вдосконалення відцентрово-пневматичного сепаратора із конічним барабаном та відбивним екраном пояснюється (рис. 2.1), де на (рис. 2.1, а) зображено поперечний розріз відцентрово-пневматичного сепаратора, траєкторії руху часток, що сепаруються; (рис. 2.1, б) – конічний барабан, який має зовнішню поверхню утворену спіраллю, боковин із отворами, відбивний екран.

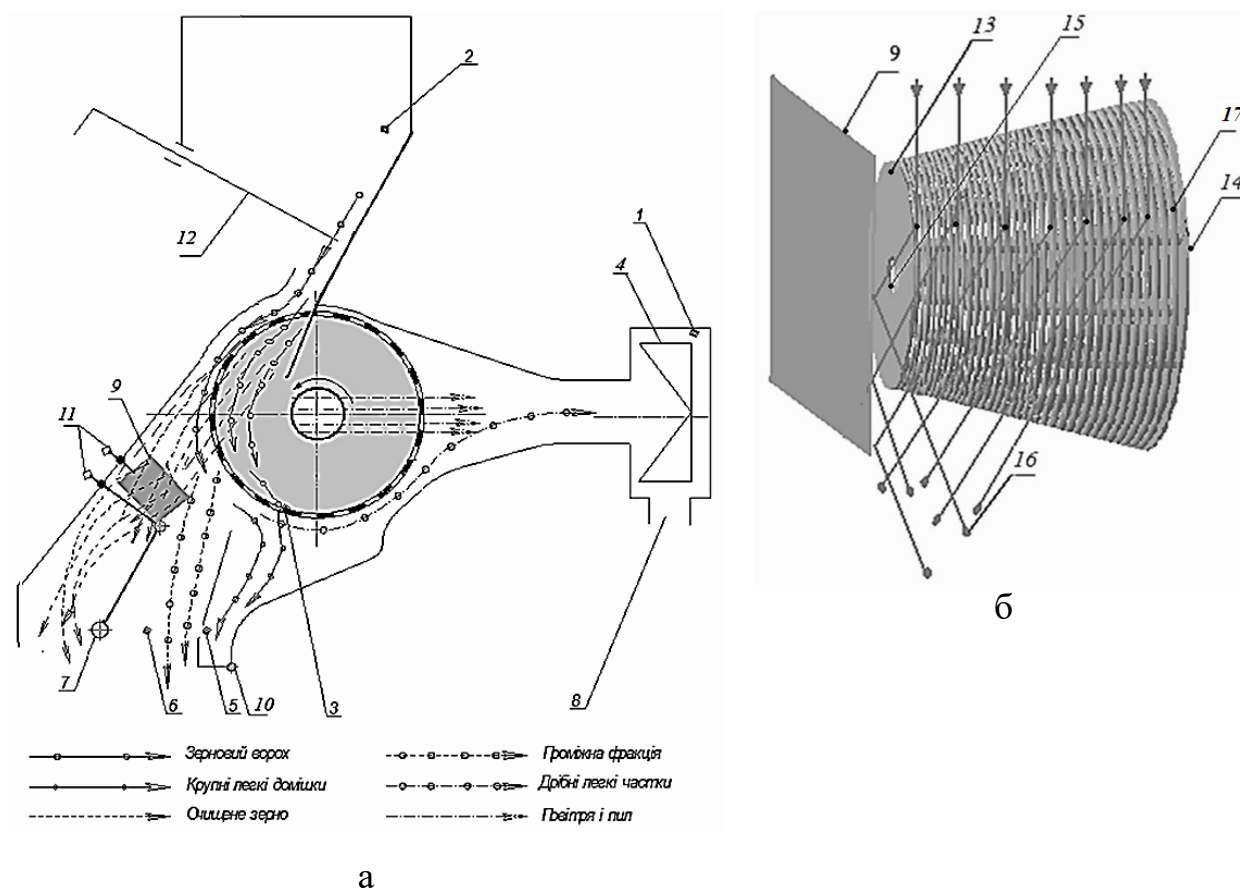


Рис. 2.1 Відцентрово-пневматичного сепаратора із конічним барабаном та відбивним екраном [17]

Відцентрово-пневматичний сепаратор із конічним барабаном та відбивним екраном (рис. 1, а) складається із корпусу 1, бункера 2, конічного барабану 3, вентилятора 4, вивантажувальних каналів: вивантажувальний зерновий приймальний канал 7, канал крупних легких домішок 5, приймальний канал проміжної фракції 6, викидного колектора 8, відбивного екрану 9, ємність для вивантаження крупних легких домішок 10, важелів регулювання відбивного екрану та вивантажувального каналу 11, засувки живильної щілини 12.

Відцентрово-пневматичний сепаратор із конічним барабаном та відбивним екраном (рис. 2.1, б) складається із спіралі 17, боковин 13, 14, повітряного отвору 15.

Відцентрово-пневматичний сепаратор із конічним барабаном та відбивним екраном працює таким чином. Зерно завантажується в бункер 2,

звідки через засувки живильної щілини 12 подається на конічний барабан 3. При його обертанні зерно за рахунок механічного удару, та удару об відбивний екран 9, під дією відцентрової сили розділяється на кілька фракцій, який концентрує очищене зерно на вивантажувальний зерновий приймальний канал 7. За рахунок направленої повітряного потоку, більш легкі фракції лушпиння потрапляють у приймальний канал проміжної фракції 6 та канал крупних легких домішок 5. Найбільш легкий матеріал виноситься повітряним потоком до викидного колектора 8, завдяки вентилятору 4. Крупні легкі домішки після їх накопичування у ємності для вивантаження крупних легких домішок 10 вивантажуються [17].

На (рис. 2.1, б) показані траєкторії руху зерна 16 відповідно конічного барабану та відбивного екрану 9. Конічна форма барабану на відміну від циліндричного, дозволяє відкидати зерно у бік на відбивний екран, що сприяє додатковому очищенню зерна та більш щільній концентрації його у вивантажувальному зерновому приймальному каналі 7.

2.2 Аналіз диференціальних рівнянь та їх часткових розв'язків.

1. За постановкою задачі початкова швидкість руху зернини V_0 повинна бути меншою колової швидкості поверхні барабана, тобто $V_0 < \omega_D R$. В протилежному випадку відбуватиметься уповільнення руху зернини, як наслідок порушення одношарового руху матеріалу (він буде рухатись в два і більше шарів).

2. Після попадання частки на решето вона може:

2.1) Рухатись уповільнено: до повної зупинки і почати рухатись в протилежну сторону; до деякої швидкості $V \in (0, V_0)$, після чого продовжити рух з прискоренням, при умові:

$$\sin \varphi - \frac{k_{\pi} U^2}{g} \left(\frac{R^2 \dot{\varphi}^2}{U^2} + \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} \right) < 0, \quad (2.1)$$

і

$$\left| \sin \varphi - \frac{k_{\pi} U^2}{g} \left(\frac{R^2 \dot{\varphi}^2}{U^2} + \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} \right) \right| > \frac{f}{\sin \beta} \left(\frac{k_{\pi} U^2}{g} \frac{k_d + \sin \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} + \cos \varphi - \frac{R}{g} \dot{\varphi}^2 \right) \quad (2.2)$$

Вказаних явищ потрібно уникати, оскільки при уповільненні порушується одношаровість руху матеріалу.

2.2) Частка буде рухатись прискорено у випадках:

$$\begin{aligned} \text{а) } & \left| \sin \varphi - \frac{k_{\pi} U^2}{g} \left(\frac{R^2 \dot{\varphi}^2}{U^2} + \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} \right) \right| < \\ & < \frac{f}{\sin \beta} \left(\frac{k_{\pi} U^2}{g} \frac{k_d + \sin \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} + \cos \varphi - \frac{R}{g} \dot{\varphi}^2 \right); \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\text{б) } \sin \varphi - \frac{k_{\pi} U^2}{g} \left(\frac{R^2 \dot{\varphi}^2}{U^2} + \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} \right) > 0. \quad (2.4)$$

3. В момент, коли кутові швидкості частки і барабана вирівнюються частка може:

а) стати нерухомою по відношенню до поверхні барабана, якщо $\dot{\varphi} \leq 0$ або

$$-(k_{\pi}R - f_1)\frac{R}{g}\dot{\varphi}^2 + \sin \varphi - f_1 \cos \varphi - \frac{k_{\pi}U^2}{g} \frac{f_1(k_d + \sin \varphi) + \cos \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} \leq 0. \quad (2.5)$$

б) продовжувати прискорений рух при $\ddot{\varphi} > 0$

$$-(k_{\pi}R - f_1)\frac{R}{g}\dot{\varphi}^2 + \sin \varphi - f_1 \cos \varphi - \frac{k_{\pi}U^2}{g} \frac{f_1(k_d + \sin \varphi) + \cos \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} > 0 \quad (2.6)$$

4. Якщо частка зупиниться на поверхні барабана, то рух відносно барабана оновиться в момент коли $\ddot{\varphi} > 0$ або

$$\begin{aligned} \sin \varphi - \frac{k_{\pi}U^2}{g} \left(\frac{R^2\omega_D^2}{U^2} + \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} \right) > \\ > \frac{f}{\sin \beta} \left(\frac{k_{\pi}U^2}{g} \frac{k_d + \sin \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} + \cos \varphi - \frac{R}{g}\dot{\varphi}^2 \right). \end{aligned} \quad (2.7)$$

5. Відрив частки від барабана наступить при виконанні умови

$$\frac{k_{\pi}U^2}{g} \frac{k_d + \sin \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} + \cos \varphi - \frac{R}{g}\dot{\varphi}^2 < 0. \quad (2.8)$$

Рівняння не має аналітичного розв'язку, тому проаналізуємо його за допомогою ЕОМ.

Алгоритм розв'язування рівняння (2.45) наступний

- 1) Задаємо параметри задачі $\varphi_0, f, R, l_1, l_2, U, d_{\text{гр}}, d_e, \Delta, V_0, \omega_D$.
- 2) Задаємо крок по часу Δt
- 3) Знаходимо мінімальний кут $\varphi = \varphi_m$, при якому можна подавати

зерновий потік. З (2.19) отримуємо рівняння для знаходження кута φ_m

$$-(k_{\Pi}R - f_1) \frac{V_0^2}{gR} + \sin \varphi_m - f_1 \cos \varphi_m - \frac{k_{\Pi} U^2}{g} \frac{f_1(k_d + \sin \varphi_m) + \cos \varphi_m}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi_m}} = 0. \quad (2.9)$$

Згідно отриманого рівняння будуємо графік залежності кута введення матеріалу до повітряного каналу φ_m від коефіцієнта парусності k_{Π} (рис. 2.2) (на прикладі зерноsumіші соняшника).

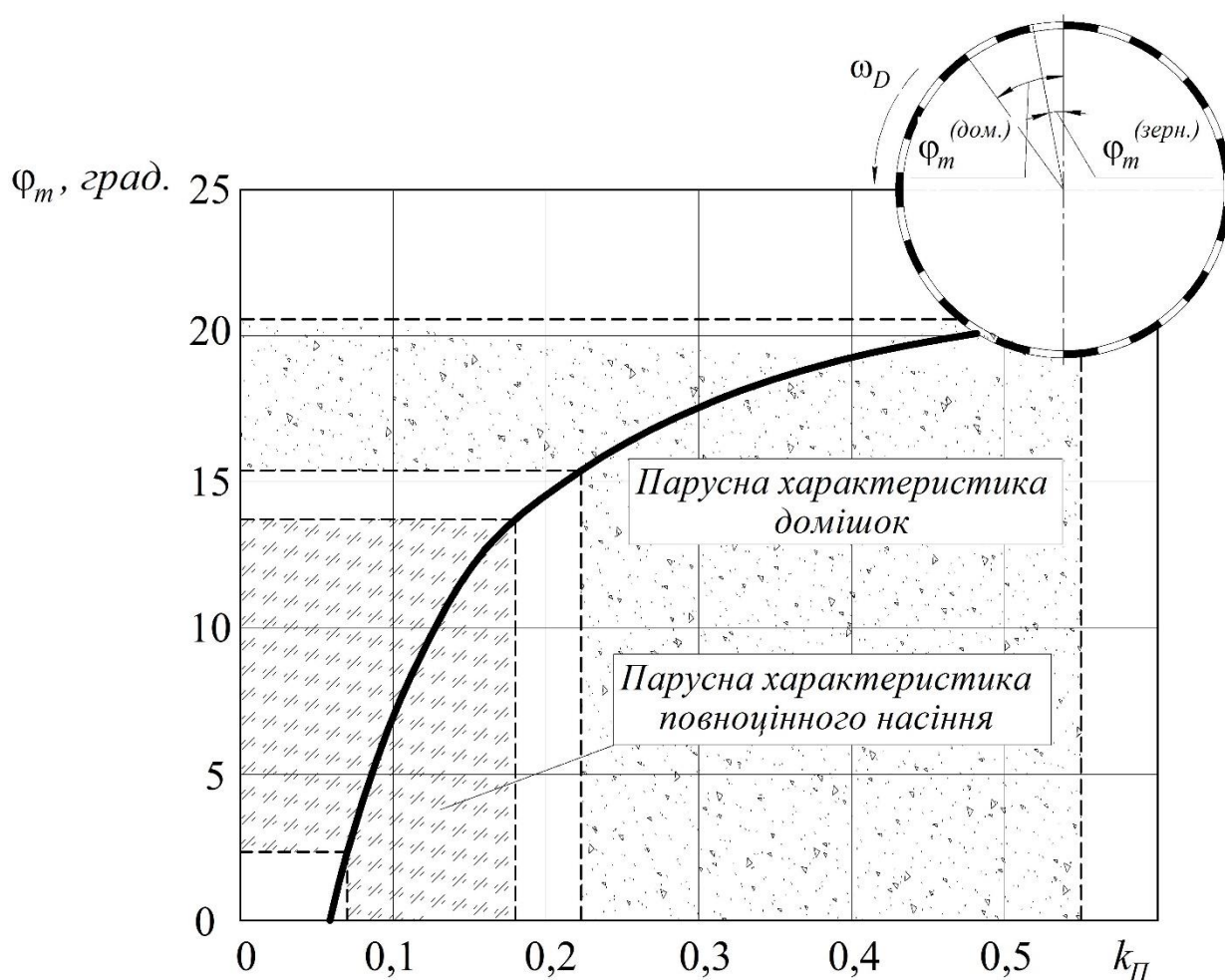


Рис. 2.2. Залежність кута введення матеріалу в повітряний канал від коефіцієнтів парусності елементів (на прикладі зерноsumіші соняшника)

Значення діапазону коефіцієнтів парусності приймаємо згідно даних пошукових дослідів по визначенню аеродинамічних властивостей зерноsumіші [18]:

повноцінне насіння – $k_{\pi} = 0,07...0,18$;

некондиційне насіння – $k_{\pi} = 0,14...0,32$;

домішки – $k_{\pi} = 0,23...0,55$.

Аналіз залежності (рис.2.2) показує, що мінімальний кут подачі по дузі кола барабана становить:

для коефіцієнтів парусності $k_{\pi} = 0,07...0,18 - \varphi_m = 3^{\circ}...13^{\circ}$,

для коефіцієнтів парусності $k_{\pi} = 0,23...0,55 - \varphi_o = 15^{\circ}...21^{\circ}$.

Для забезпечення стабільного руху з прискоренням, для даних початкових умов, необхідний кут подачі зернового матеріалу складає $\varphi_m > 21^{\circ}$. Зменшення кута введення призведе до уповільнення швидкості руху частки, переміщення в протилежному напрямку, і, відповідно, накопичення матеріалу в зоні подачі. Збільшення кута подачі призведе до зменшення якості очищення внаслідок зменшення зони дії повітряного потоку.

4) Знаходимо кут $\varphi = \varphi_{\omega_D}$, при якому швидкість зернини вирівнюється з швидкістю барабана, для чого з отримуємо рівняння

$$b_1 e^{-a\varphi_{\omega_D}} + a_1 \sin \varphi_{\omega_D} + a_2 \cos \varphi_{\omega_D} - \\ - 2be^{-a\varphi_{\omega_D}} \int_{\varphi_0}^{\varphi_{\omega_D}} \frac{f_1(k_d + \sin \varphi_{\omega_D}) + \cos \varphi_{\omega_D}}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi_{\omega_D}}} e^{a\varphi_{\omega_D}} d\varphi_{\omega_D} - \frac{g}{R} \omega_D^2 = 0. \quad (2.10)$$

Згідно отриманого рівняння будуємо графік залежності кута зміни напрямку сили тертя φ_{ω_D} від коефіцієнта парусності k_{π} (рис. 2.3).

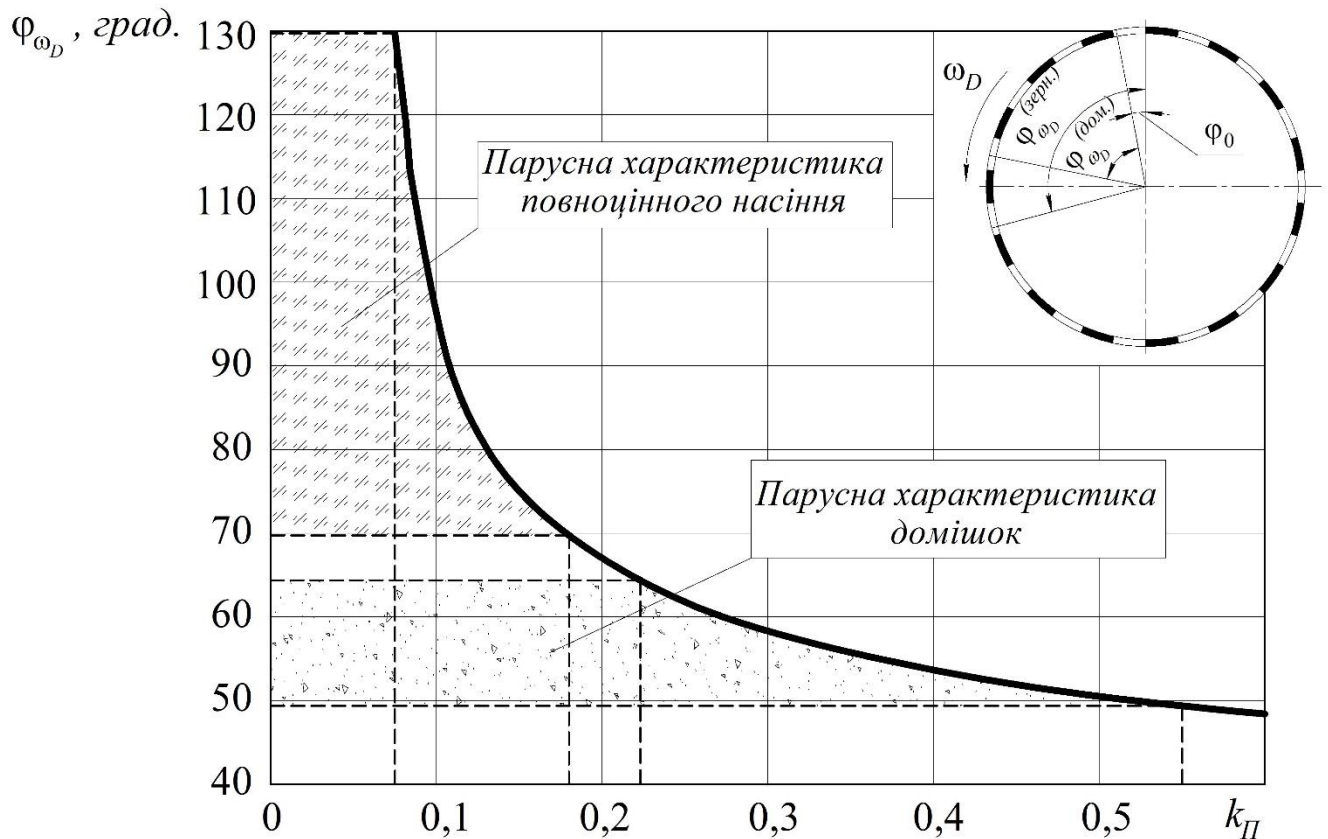


Рис. 2.3. Залежність кута зміни напрямку сили тертя від коефіцієнтів парусності елементів зерносуміші

Отримана графічна залежність (рис. 2.3) свідчить про те, що домішки мають більше прискорення ніж зерно, і відповідно кут, при якому відбудеться вирівнювання кутової швидкості часток зернового матеріалу і поверхні циліндричного барабана (кут зміни напрямку сили тертя) становитиме:

для коефіцієнтів парусності $k_{\Pi} = 0,07 \dots 0,18 - \varphi_{\omega_D} = 70^{\circ} \dots 129^{\circ}$,

для коефіцієнтів парусності $k_{\Pi} = 0,14 \dots 0,32 - \varphi_{\omega_D} = 57^{\circ} \dots 76^{\circ}$,

для коефіцієнтів парусності $k_{\Pi} = 0,23 \dots 0,55 - \varphi_{\omega_D} = 49^{\circ} \dots 65^{\circ}$.

Таке розшарування матеріалу відбувається внаслідок дії на частки домішок більшої притискної сили (більший коефіцієнт парусності).

5) Знаходимо кут $\varphi = \varphi_{\text{відр.}}$ відриву зернини від барабана

$$\frac{k_{\Pi} U^2}{g} \frac{k_d + \sin \varphi_{\text{відр.}}}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi_{\text{відр.}}}} + \cos \varphi_{\text{відр.}} - \frac{R}{g} \dot{\varphi}_{\text{відр.}}^2 < 0 \quad (2.11)$$

або

$$\begin{aligned} & \frac{k_{\Pi} U^2}{g} \frac{k_d + \sin \varphi_{\text{відр.}}}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi_{\text{відр.}}}} + \cos \varphi_{\text{відр.}} - b_1 e^{-a\varphi_{\text{відр.}}} - a_1 \sin \varphi_{\text{відр.}} - a_2 \cos \varphi_{\text{відр.}} + \\ & + 2be^{-a\varphi_{\text{відр.}}} \int_{\varphi_0}^{\varphi_{\text{відр.}}} \frac{f_1(k_d + \sin \varphi_{\text{відр.}}) + \cos \varphi_{\text{відр.}}}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi_{\text{відр.}}}} e^{a\varphi_{\text{відр.}}} d\varphi_{\text{відр.}} = 0, \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\text{де } b_1 = \left(\frac{\dot{\varphi}_0^2 R}{g} - a_1 \sin \varphi_0 - a_2 \cos \varphi_0 \right) e^{a\varphi_0}, \quad (2.13)$$

$\varphi_0 = \max(\varphi_{\omega_D})$ – кут початку прискорення більший за кут п. 4).

Наведемо графіки залежності кута відриву $\varphi_{\text{відр.}}$ частки від коефіцієнта парусності k_{Π} .

Аналіз графічних залежностей дозволяє зробити наступні висновки.

Залежність кута відриву часток зернової суміші від їх коефіцієнта парусності носить параболічний характер. Збільшення значення коефіцієнту парусності веде до збільшення кута відриву.

Для зернової маси, що характеризується значеннями $k_{\Pi} = 0,07...0,18$ – для повноцінного, $k_{\Pi} = 0,14...0,32$ – для некондиційного насіння та $k_{\Pi} = 0,23...0,55$ для смітних домішок, діапазон кутів відриву відповідно становить $\varphi_{\hat{\alpha}\hat{\alpha}\hat{\delta}\hat{\delta}}^{(i.\hat{\varsigma}\hat{\alpha}\hat{\delta}\hat{\delta})} = 75^{\hat{i}}...111^{\hat{i}}$, $\varphi_{\hat{\alpha}\hat{\alpha}\hat{\delta}\hat{\delta}}^{(i.\hat{\varsigma}\hat{\alpha}\hat{\delta}\hat{\delta})} = 99^{\hat{i}}...145^{\hat{i}}$, $\varphi_{\hat{\alpha}\hat{\alpha}\hat{\delta}\hat{\delta}}^{(\hat{a}\hat{i}\hat{i})} = 129^{\hat{i}}...162^{\hat{i}}$, що дає змогу чітко розмежовувати фракції, встановивши подільник у відповідних положеннях.

Місце встановлення подільника очищеного насіння визначає зона перетину інтегральних кривих некондиційного насіння та домішок, яка для даних умов становить $\varphi_{\text{д}} = 135^{\circ} \dots 140^{\circ}$.

Висновки по розділу

1. Отримане рівняння руху частки по прутковій поверхні циліндричного барабана дозволяє визначити залежність швидкості руху матеріалу по дузі кола від ряду факторів: фрикційних властивостей робочої поверхні барабана і матеріалу f , геометричних параметрів отворів пруткового барабана $d_{\text{пр}}$ і Δ , кута подачі на барабан φ_0 , початкового кінематичного режиму матеріалу κ_0 , показника кінематичного режиму барабана κ_p , а також коефіцієнту парусності частки k_n .

2. Встановлено, що для забезпечення стабільного руху зернового матеріалу з прискоренням необхідний кут подачі має бути $\varphi_m > 21^{\circ}$ для зернової маси, яка характеризується значеннями коефіцієнтів парусності $k_n = 0,07 \dots 0,18$ – для повноцінного, $k_n = 0,14 \dots 0,32$ – для некондиційного насіння та $k_n = 0,23 \dots 0,55$ для смітних домішок. При цьому діапазон кутів відриву відповідно становить $\varphi_{\text{вд.}}^{(\text{і.сдд.і.})} = 75^{\circ} \dots 111^{\circ}$, $\varphi_{\text{вд.}}^{(\text{і.сдд.і.})} = 99^{\circ} \dots 145^{\circ}$, $\varphi_{\text{вд.}}^{(\text{і.сдд.і.})} = 129^{\circ} \dots 162^{\circ}$, що дає змогу чітко розмежовувати фракції.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Визначення ефективності розділення зерноsumіші відцентрово-пневматичним сепаратором

Для забезпечення потрібної якості розділення на фракції необхідно визначити місце встановлення подільників зерна, дослідивши «віяло розсіву», яке визначається значеннями коефіцієнтів парусності елементів зерноsumіші. З цією метою верхній 2 та нижній 3 подільники зерна були закріплені шарнірно, а відбір фракцій здійснювали, встановлюючи їх у відповідному положенні (рис. 3.1). За методикою, описаною, визначали на парусному класифікаторі аеродинамічні характеристики отриманих фракцій.

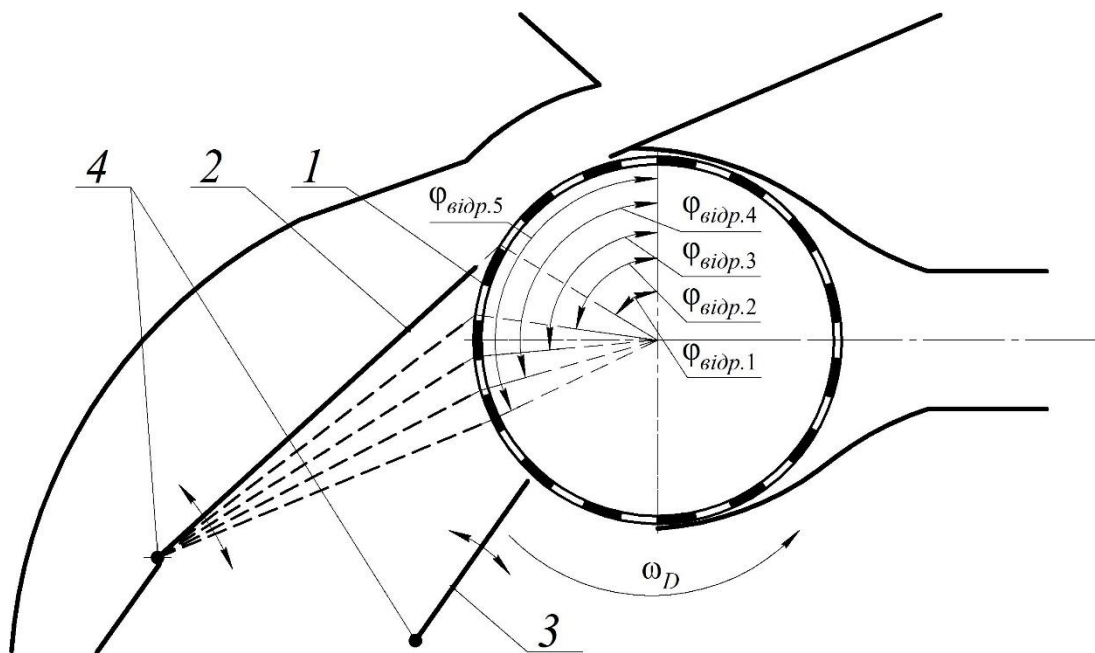


Рис. 3.1. Схема визначення місця встановлення подільника зерна:

1 – прутковий барабан; 2 – верхній подільник зерна;

3 – нижній подільник зерна; 4 – шарнір

Ефективність сепарації характеризується двома показниками: якістю сепарації ε , % та чіткістю сепарації z , %.

Показник якості сепарації визначає кількість виділених із зернового матеріалу домішок відносно їх початкової кількості; показник чіткості сепарації характеризує кількість повноцінного зерна, яке потрапило в виділені домішки.

Дані показники розраховували наступним чином [80]:

$$\varepsilon = \frac{A - B}{B} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

$$z = \frac{B}{A} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

де ε - якість сепарації, %;

z - чіткість сепарації, %;

A - кількість виділеної повітряним потоком легкої фракції, кг;

B - кількість легкого компонента у вихідному матеріалі, кг;

B - вміст важкого компоненту у виділеній повітряним потоком легкій фракції, кг.

Визначення показників ефекту очищення та чіткості сепарації проводили на циліндричному барабані з прутковою поверхнею та на парусному класифікаторі за методикою наведеною в.

В бункер експериментальної установки завантажували зерновий матеріал з відомими аеродинамічними характеристиками та засміченістю, за рахунок частоти обертання робочого колеса вентилятора та відповідного положення дросельної заслінки встановлювали необхідну швидкість повітряного потоку в робочій зоні в межах $U = 12 \dots 16$ [м/с] та відкривали заслінку дозуючого пристрою. При цьому змінювали питоме зернове навантаження $q_b = 1000 \dots 4000$ [кг/дм·год] та показник кінематичного режиму циліндричного барабана $k = 7,5 \dots 30$. Потім зважували домішки, що виділилися в осадових камерах установки, та пропускали їх з метою визначення вмісту повноцінного зерна через парусний пневмокласифікатор.

4.3. Залежність технологічних показників роботи відцентрово-пневматичного сепаратора від швидкості повітряного потоку у каналі, показника кінематичного режиму роботи циліндричного барабана та питомої продуктивності

Під час проектування експериментальної установки її конструкція була виконана з можливістю регулювання кожного з параметрів, що виходячи з теоретичних досліджень мають найбільш суттєвий вплив на процес очищення повітряним потоком. Метою першої серії дослідів було реалізація матриці центрального композиційного плану 2^{3+} зіркові точки, результатом яких було встановлення впливу на якість та чіткість повітряного очищення відцентрово-пневматичним сепаратором наступних чинників: питомого зернового навантаження на одиницю ширини каналу q_B , швидкості повітряного потоку U , показника кінематичного режиму барабана κ .

Матриця випробувань центрального композиційного плану $N = 2^{3+}$ зіркові точки наведена в табл.3.1.

Таблиця 3.1.

Результати реалізації матриці планування експерименту 2^{3+} зіркові точки

Номер дослідів	q_B , т/дм·год	κ	U , м/с	ε , %	z , %
	x_1	x_2	x_3	Y_1	Y_2
1	3	4	5	6	7
1	3,0	42,6	14	76	0,65
2	4,0	30	16	65	0,5
3	4,0	30	12	36	0
4	2,0	7,5	12	71	0,25
5	3,0	2,8	14	78	1,4
6	4,0	7,5	16	69	1,4
7	2,0	30	12	39	0
8	2,0	30	16	75	1,2
9	4,0	7,5	12	37	0,2
10	3,0	18,75	14	79	1,2
11	3,0	18,75	17,5	84	1,84

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6
12	2,0	7,5	16	87	1,75
13	3,0	18,75	10,5	54	0,15
14	4,76	18,75	14	55	1,2
15	1,24	18,75	14	62	0,3
16	3,0	18,75	14	79	0,95

На рис.3.2 наведені фракції, отримані після проведення досліду на зерноsumіші соняшнику.



Рис.3.2. Фракції, отримані після сепарації зерноsumіші соняшнику (табл.3.1 дослід № 13)

Для обробки експериментальних даних застосовували пакет прикладних програм STATISTICA 6.0. Після реалізації матриці експерименту отримали статистичні математичні моделі для ефекту очистки $\varepsilon (Y_1)$ та чіткості сепарації $z (Y_2)$ при натуральних значеннях фактора

$$Y_1 = 75,57 - 10,771 \cdot x_1 - 6,95 \cdot x_2 + 23,421 \cdot x_3 - 14,58 \cdot x_1^2 - 0,402 \cdot x_2^2 - 7,99 \cdot x_3^2 + 9,687 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,687 \cdot x_1 \cdot x_3 + 4,437 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (3.3)$$

$$Y_2 = 1,036 + 0,068 \cdot x_1 - 0,42 \cdot x_2 + 1,038 \cdot x_3 - 0,293 \cdot x_1^2 - 0,054 \cdot x_2^2 - 0,136 \cdot x_3^2 - 0,075 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,25 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,25 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (3.4)$$

Проведена статистична оцінка одержаних моделей за критерієм Кохрена підтвердила відтворюваність проведених дослідів, оскільки розрахункові значення критерію G^P для параметрів ε (Y_1) та z (Y_2) становлять $G_1^P = 0,214$ та $G_2^P = 0,056$, що є меншими табличного $G^T = 0,282$.

Значимість отриманих коефіцієнтів перевіряли за допомогою критерію Стюдента. Табличне значення критерію для рівня надійності $P = 95\%$ і ступенів свободи $f = 15$ складає $t = 2,13$. Дисперсії знайдених коефіцієнтів складають:

$$(S_b)_1^2 = 2,15; \quad (S_b)_2^2 = 0,006$$

Величина довірчого інтервалу становить:

$$\Delta b_1 = 3,9; \quad \Delta b_2 = 0,013$$

Таким чином отримані коефіцієнти кожного з рівнянь регресії є значимими для всіх факторів, що слідує з їх порівняння з розрахунковим довірчим інтервалом.

Адекватність рівнянь регресії перевіряли за критерієм Фішера, табличне значення якого для рівня надійності $P_H = 0,95$ і числа ступенів свободи $f = 15$ складає $F^T = 3,0$. Розрахункові значення $F_1^P = F_2^P = 0,083$ не перевищують табличне $F^T \geq F^P$, що підтверджує адекватність статистичних математичних моделей.

Провівши аналіз Парето-карти (додаток Е) можна зробити висновок, що швидкість повітряного потоку (параметр x_3) має найбільш значний вплив на показник ефекту очистки $Y_1(\varepsilon)$. Графіки поверхонь відгуку та ліній рівного виходу для ефекту очищення ε наведені на рис. 3.3.

Найвище значення ефекту очищення ε (рис. 3.3) досягається при наступних значеннях чинників:

$$x_1 \rightarrow q_B = 1800 \dots 3000 \text{ кг/дм}\cdot\text{год};$$

$$x_2 \rightarrow \kappa = 3 \dots 18;$$

$$x_3 \rightarrow U = 15 \dots 17 \text{ м/с}.$$

Проаналізувавши Парето-карту для чіткості сепарації z (додаток Е), відмічаємо максимальний вплив на критерій оптимізації Y_2 параметру x_3 , який напрямку пов'язаний зі швидкістю повітряного потоку [19].

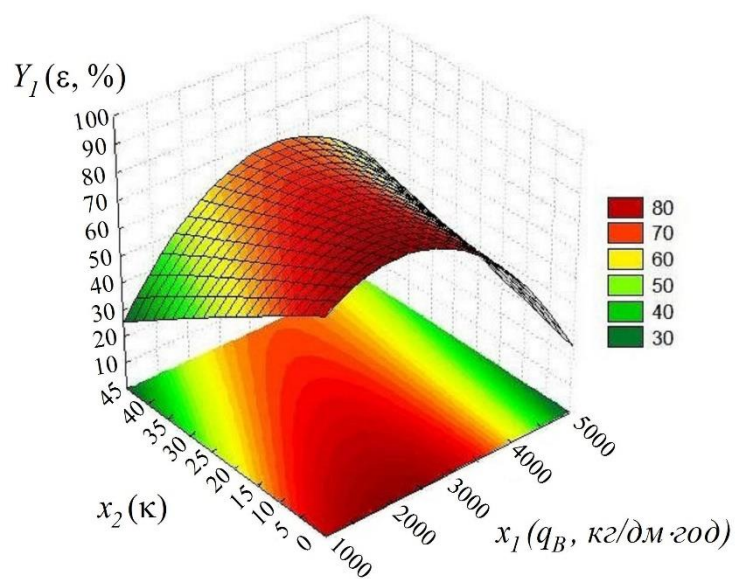
Графіки поверхонь відгуку та ліній рівного виходу для чіткості сепарації z , наведені на рис. 3.4, дозволяють відмітити, що найменшого виносу повноцінного зерна у домішки можна досягти при наступних значеннях чинників:

$$x_1 \rightarrow q_B = 1200 \dots 2000 \text{ кг/дм}\cdot\text{год};$$

$$x_2 \rightarrow \kappa = 30 \dots 45;$$

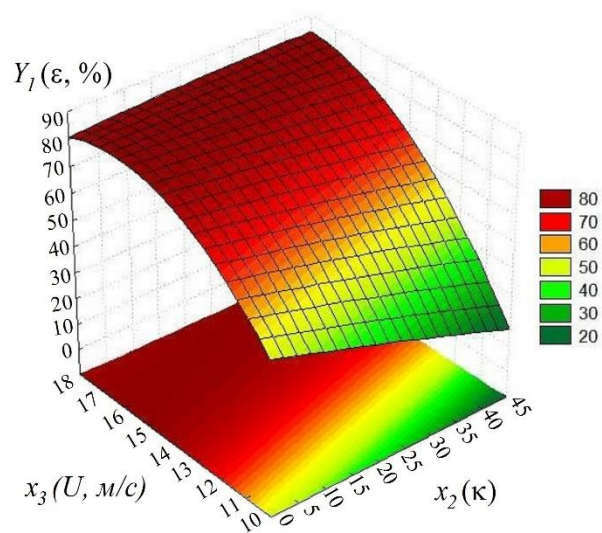
$$x_3 \rightarrow U = 10 \dots 12 \text{ м/с}.$$

Досягнення максимальних значень показників ефективності процесу пневмосепарації $Y_1(\varepsilon)$ та $Y_2(z)$ одночасно неможливе, оскільки вони мають обернено-пропорційний зв'язок, про що свідчить різниця в раціональних значеннях насамперед параметру $x_3(U)$. Тому при виборі раціональних параметрів відцентрово-пневматичного сепаратора керуються необхідним кінцевим результатом процесу пневмосепарації, а саме яку якість очищення необхідно досягти і скільки повноцінного зерна може бути втрачено згідно агрономічних до попереднього, первинного чи вторинного очищення.

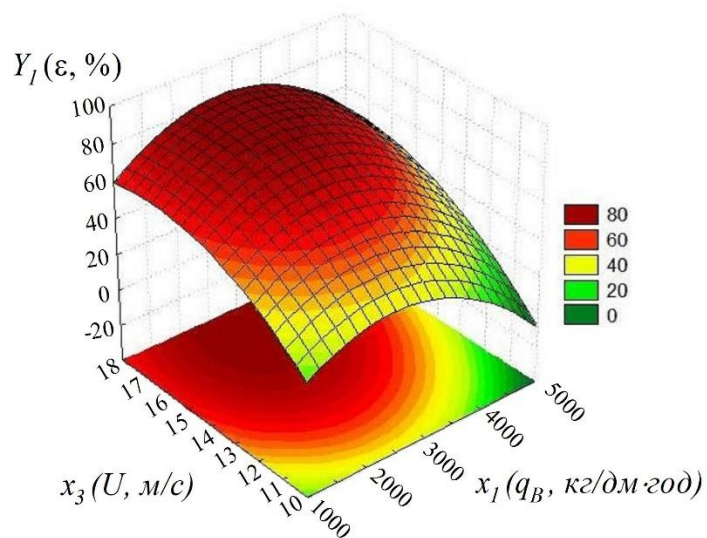


а)

б)

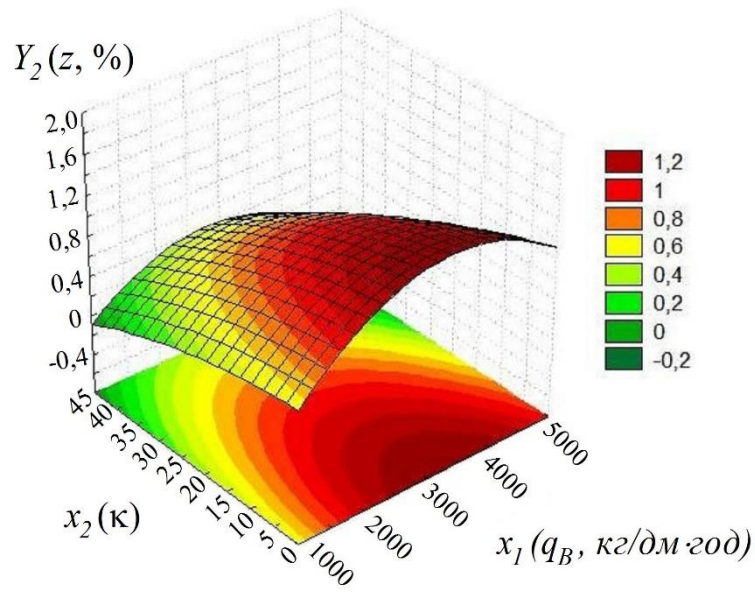


б)

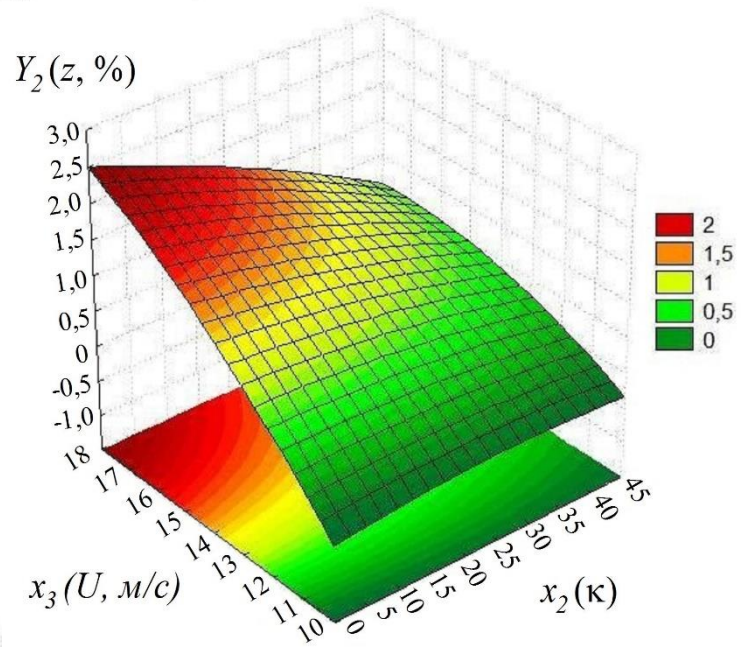


в)

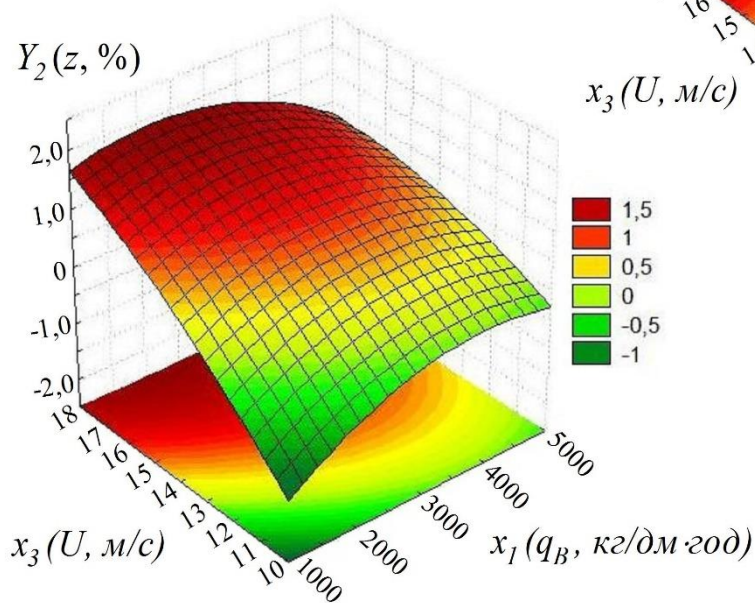
Рис. 3.3 Графіки поверхонь відгуку та ліній рівного виходу для ефекту очищення $Y_I(\varepsilon)$: а) - $Y_I = f(x_1 x_2)$; б) - $Y_I = f(x_2 x_3)$; в) - $Y_I = f(x_1 x_3)$



a)



б)



в)

Рис. 4.4 Графіки поверхонь відгуку та ліній рівного виходу для чіткості сепарації $Y_2(z)$: а) - $Y_2 = f(x_2 x_1)$; б) - $Y_2 = f(x_3 x_1)$; в) - $Y_2 = f(x_3 x_2)$

Наведені графіки (рис. 3.3, 3.4), отримані експериментальним шляхом, характеризують взаємний вплив чинників на критерії оптимізації. Для більш детального аналізу експериментальних даних безпосередньо по кожному з факторів побудуємо графіки їх індивідуального впливу на ефект очистки $Y_1(\epsilon)$ та чіткість сепарації $Y_2(z)$ при фіксованих значеннях двох інших параметрів (рис. 3.5 – 3.7).

Розглянувши сумісно Парето-карти, графіки поверхонь відгуку, ліній рівного виходу та двомірні графіки впливу кожного з чинників можна зазначити, що:

- зі зменшенням значення параметру $x_1(q_B)$ спостерігається підвищення значення показників ефективності процесу, раціональні значення питомого навантаження в цьому випадку становлять $q_B = 1800 - 3000$ кг/дм·год;

- параметр $x_2(\kappa)$ теж має прямий зв'язок з продуктивністю машини і виходячи з сумісного аналізу критеріїв оптимізації $Y_1(\epsilon)$ та $Y_2(z)$ лежить в межах $\kappa = 3...18$;

- на якість очищення та чіткість сепарації найбільший вплив має параметр $x_3(U)$, раціональні значення якого лежать в межах $U = 15...17$ м/с.

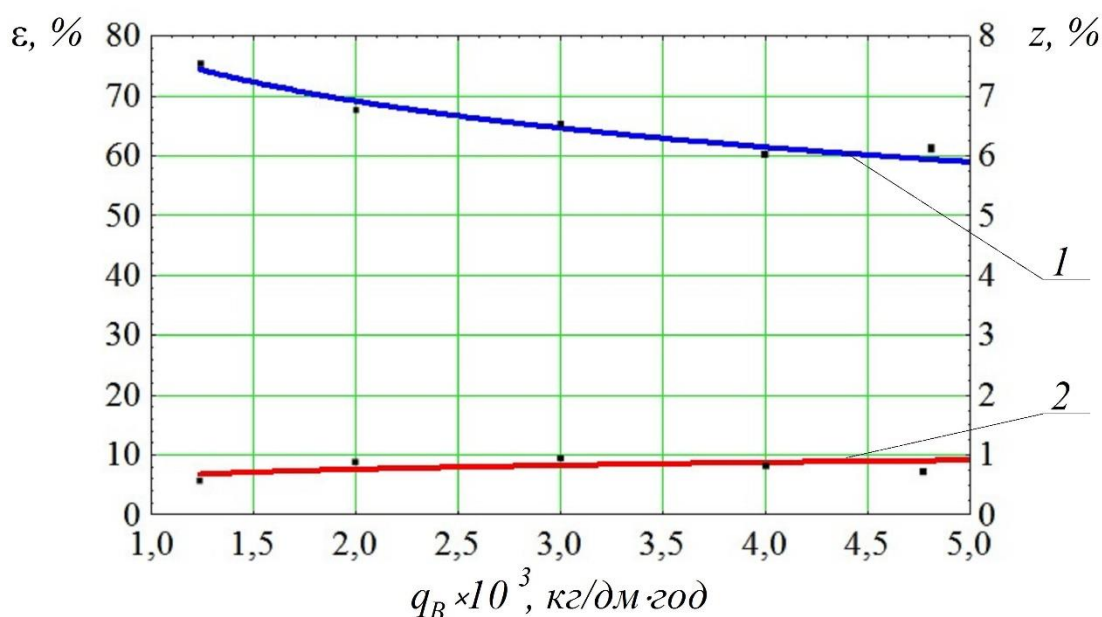


Рис. 3.5. Вплив питомого зернового навантаження q_B , кг/дм·год на:

1 – ефект очищення; 2 – чіткість сепарації

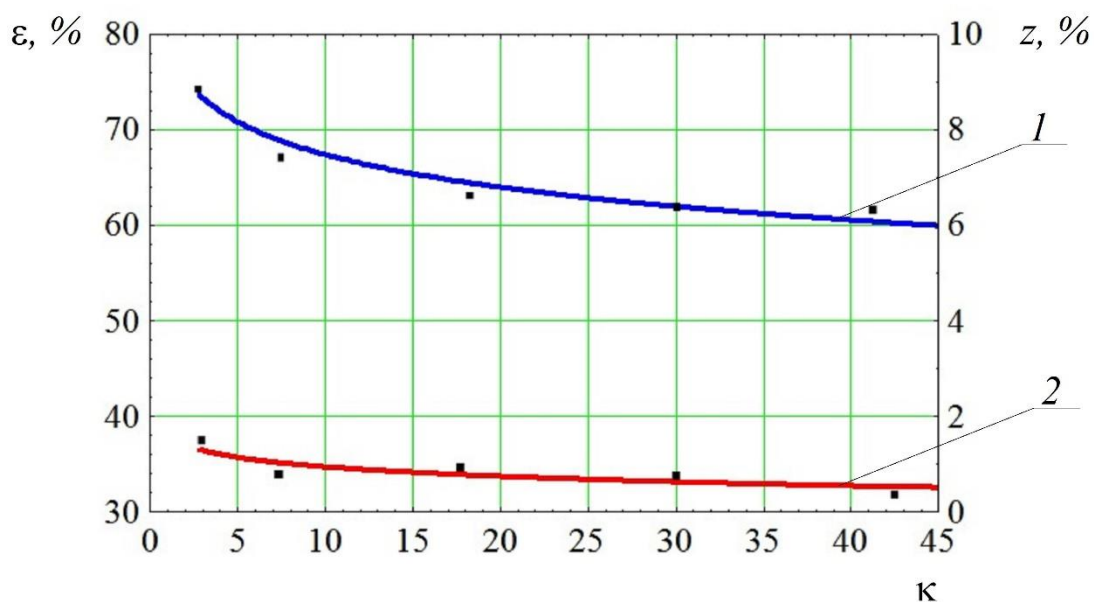


Рис. 3.6. Вплив показника кінематичного режиму барабана k з прутковою поверхнею на: 1 – ефект очищення; 2 – чіткість сепарації

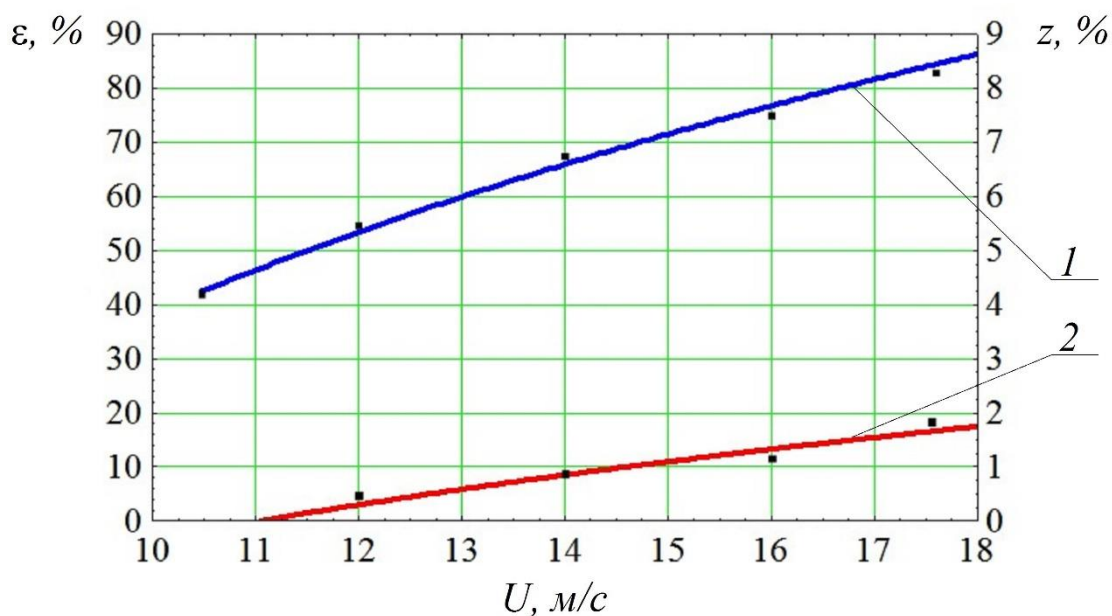


Рис. 3.7. Вплив швидкості повітряного потоку $U, \text{m/s}$ на:

1 – ефект очищення; 2 – чіткість сепарації

Таким чином проведені експериментальні дослідження дозволяють встановити раціональні значення основних параметрів відцентрово-пневматичного сепаратора, та доводять доцільність заміни сітчастого барабана

на барабан з прутковою поверхнею, особливо при підвищених питомих навантаженнях.

Висновки по розділу

1. Встановлено, що при збільшенні показника кінематичного режиму барабана погіршується ефект очистки i , навпаки, покращується показник чіткості сепарації. Зміна показника кінематичного режиму в межах $\kappa = 7,5 \dots 30$ призводить до зменшення ефекту очистки ε на 8% – 12%, але забезпечує зменшення кількості повноцінного зерна у відходах z на 0,6% – 0,8%.

2. Найбільший вплив на показники якості очистки здійснює швидкість повітряного потоку в каналі сепаратора. Так збільшення швидкості повітряного потоку U від 12 м/с до 16 м/с покращує ефект очистки ε на 18% – 20 %, але при цьому чіткість сепарації z погіршується на 0,8% – 1,0%.

3. Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити раціональний діапазон зміни параметрів розділення зерноsumіші запропонованим відцентрово-пневматичним сепаратором: питома продуктивність $q_v = 1800 - 3000$ кг/дм·год, швидкість повітряного потоку $U = 15 \dots 17$ м/с, показник кінематичного режиму пруткового барабана $\kappa = 3 \dots 18$. При роботі сепаратора в режимах, що відповідають діапазону обґрунтованих числових значень параметрів забезпечується ефект очищення $\varepsilon \approx 70\%$, при цьому чіткість сепарації не перевищує $z \approx 1,8\%$, що відповідає агроvимогам. Це доводить ефективність застосування нового робочого органу у конструкції відцентрово-пневматичного сепаратора особливо при підвищених зернових навантаженнях.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Для ефективної роботи службі охорони праці доцільно розробляти план організаційно-технічних заходів з охорони праці. Ця важлива функція управління охороною праці має вирішальне значення для підвищення ефективності роботи з охорони праці. Планування, це процес обґрунтування рішень і розподілу ресурсів (матеріальних, фінансових, людських, інформаційних, часових) для їх реалізації. План є засобом досягнення встановленої мети. Метою планування заходів з охорони праці є визначення необхідних вкладень у заходи з охорони праці для ефективного впливу на стан охорони праці. Планування не може бути успішним без прогнозування як важливого елемента передпланової роботи. Прогнозування – це ймовірне визначення перебігу дальших подій, воно дає змогу скласти цільові програми з охорони праці з певних напрямів роботи (боротьба з травматизмом, зниження рівня захворювань, поліпшення мікроклімату в приміщеннях, боротьба з шумом тощо). Такі цільові програми є основою для складання планів роботи з охорони праці. Прогнозування заходів охорони праці повинно бути скероване на розв'язання таких завдань, як імовірна оцінка тенденцій динаміки травматизму, захворювань, умов праці у зв'язку з розвитком виробництва і визначення на період прогнозування необхідних заходів [20].

4.1 Характеристика і аналіз небезпечних та шкідливих факторів, які можуть виникнути під час експлуатації сепаратора

Під час її експлуатації на працівників можуть вплинути такі фізичні небезпечні та шкідливі виробничі фактори: рух самої машини при виконанні технологічного процесу очищення зерна; рухомі частини і механізми приводу зерноочисної машини (відкриті обертові і рухомі частини поперечного, завантажувального та вивантажувального транспортерів, вентилятора, механізму самопересування, решітної частини); підвищена запиленість повітря робочої зони (виділення пилу із оброблюваного матеріалу на решітних станах та

повітряній частині, пневмотранспортері відходів); підвищена температура повітря робочої зони (роботи виконуються в жаркий період року); підвищений рівень шуму та вібрації на робочому місці (виникає під час роботи транспортерів, вентилятора, решітної частини, механізму очищення решіт); підвищене значення напруги в електричному ланцюгу, замикання якого може пройти через тіло людини (сама машина, яка може випадково виявитися під напругою внаслідок пошкодження струмоведучих частин; двигуни приводів; шафа управління; струмоведучі кабелі живлення); недостатня освітленість робочої зони під час виконання робіт в темний час доби; гострі краї, задирки, шорсткість на поверхнях рами, решіт та елементах конструкції зерноочисної машини; розміщення на значній висоті відносно поверхні землі точок змащення та обслуговування верхніх секцій завантажувального та вивантажувального транспортерів, вентилятора, приймальної камери [21].

4.2 Розробка організаційно-технічних заходів по забезпеченню нормальних санітарно-гігієнічних умов праці на сепараторі

Балансувальні вантажі віброживильника, кузова сепаратора, ексцентрикові коливачі, муфти та пасові передачі шнеків огорожуються. Огородження встановлюються з дотриманням зазначеної в експлуатаційній документації відстані між стінками огорожень і деталями, що обертаються, та пасовими передачами. Приводи сепараторів, що мають напівперехресні пасові передачі, обладнуються пасоутримувачами [22].

Вантажі у балансирах каменевідбірників та сепараторів з круговим поступальним рухом закріплюють болтами або шпильками з контргайками та шплінтами. Клапани, шлюзові затвори і оглядові вікна надійно ущільнюють для унеможливлення виділення пилу та підсмоктування повітря. Перед пуском конструкцій сепараторів та каменевідбірників потрібно переконатися у рівновазі кузова під час роботи на холостому ході та надійному утриманні решіткових рам, у відсутності стуків та підвищеної вібрації [22].

Регулюючий механізм рухомої стінки продувного каналу пневмосепараторів забезпечує поступове змінювання ширини каналу.

У каменевідбірників та сепараторів з круговим поступальним рухом троси підвіски кузова мають однаковий натяг, який систематично перевіряється. Трос замінюється новим у разі, якщо кількість обірваних дротів становить 5 % від їх загального числа на відрізок, рівному кроку завивки. Кінці тросів запаковуються обплетенням мідного дроту та припаюються [22].

Корпуси і кузови сепаратора та каменевідбірника заземлюються. Рівновагу гратчастих корпусів сепараторів періодично перевіряють, а ротори вентиляторів балансують відповідно до паспорта експлуатаційної документації. У виробничих спорудах елеваторів керування електродвигунами сепараторів, їх пуск та зупинку виконують з місцевого пульта, що знаходиться на поверсі, де розташований сепаратор.

Радіальні чи повздовжні бичі до вала і розеток закріплюються надійно, щоб виключити можливість їх відриву. Кожну розетку та бичовий барабан у зборі відбалансовують. Для безпеки обслуговування лапки розеток не повинні виступати за кромки бичів, головки болтів напівкруглі розташовуються зі сторони бичів, а гайки з контргайками - зі сторони лапок розеток [22].

Бичі оббивальних машин виготовляються з однорідної сталі, рівного розрізу, без тріщин та надломів; для запобігання іскроутворенню забороняється доторкання бичами внутрішньої поверхні бичового барабана. Зерно перед надходженням його в оббивальні машини очищають від металевих домішок.

Наждачна поверхня абразивних барабанів міцна, без тріщин та відшарувань від оббивачів. Дверцята, оглядові люки та випускні пристрої ущільнюють від проникання пилю. Під час роботи оббивальних машин забороняється проводити їхній ремонт та обслуговування [22].

Кожен диск і ротор дискового трієра в зібраному вигляді має бути відбалансованим. Гнізда трієрної поверхні не повинні мати зазублин та задирок. Між нерухомими частинами машини і шнека мають бути зазори, які виключають тертя між ними [22].

4.3 Моделювання небезпечних ситуацій під час роботи на сепараторі

Враховуючи тісний взаємозв'язок між здоров'ям працівників і станом навколишнього середовища, розробку технологій, проектування машин і обладнання, а також організацію виробничих процесів у сільському господарстві на всіх етапах потрібно здійснювати з урахуванням мінімальної негативної дії на людину [4].

Отже, проаналізувавши та виявивши небезпечні зони можна змоделювати виникнення небезпечних умов, а в подальшому і ситуацій при недотриманні хоча б однієї з вище перерахованих вимог [4. 19].

Таблиця 4.1.

Моделювання виробничих небезпек при проведенні

Технологічні операції	Небезпека			Можливі наслідки
	Небезпечна умова	Небезпечна дія	Небезпечна ситуація	
1	2	3	4	5
Очищення зерна	Недотримання вимог безпеки	відкриті обертові і рухомі частини	Затягування, обертовими і рухомими частини одягу, сторонніх предметів	Порушення технологічного процесу, аварія, травмування, хронічні захворювання
	виділення пилу із оброблюваного матеріалу на решітних станах та повітряній частині, пневмотранспорте рі відходів	Відсутність індивідуальних засобів захисту	підвищена запиленість повітря робочої зони	
	роботи транспортерів, вентилятора, решітної частини, механізму очищення решіт		підвищений рівень шуму та вібрації на робочому місці	

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
Технічне обслуговування комбайна	Некваліфіковані кадри	Проведення регулювальних робіт	Пошкодження конструктивних елементів машини	Порушення технологічного процесу, аварія, травмування, хронічні захворювання
	Відсутність спеціального інструменту	Демонтаж конструктивних елементів	Неможливість проведення ряду ремонтних робіт	
Транспортування машини	Нерівність дорожнього покриття	Рух з підвищеною швидкістю	Втрата керованості агрегату	
			Перекидання агрегату	
	Недотримання вимог транспортування техніки		Деформація елементів конструкцій під час руху	

Наприклад розглянемо по одній небезпечній умові, що може виникнути в кожній небезпечній зоні (додаток рис. 1). Небезпечна умова один НУ1 – пошкоджено ізоляцію кабелів живлення. НУ2 – машина не зафіксована на стопори. НУ3 – не встановлена попереджувальна табличка «Не відкривати, працюють люди!». НУ4 – працівник не провів ТО у встановлений строк. НУ5 – рухомі частини агрегату не захищені. НУ6 – механізатор не пройшов інструктаж перед початком робіт. НУ7 – нехтування вимогами виробничої санітарії [18, 23].

Наведені вище небезпечні умови при поєднанні з небезпечними діями працівника можуть призвести до виникнення небезпечних ситуацій, а в подальшому і до отруєнь, аварій, травм чи захворювання. Так, НД1 – працівник дотикається до пошкодженого кабелю. НД2 – не бажані переміщення машини. НД3 – несанкціоноване увімкнення. НД4 – налагодження чи проведення технічного огляду. НД5 – робота без засобів індивідуального захисту. НС1 – ураження електричним струмом. НС2 – розрив кабелю. НС3 – травмування робочими елементами. НС4 – травмування працівника при налагодженні машини. НС5 – потрапляння пилу в організм працівника [18, 23].

Для попередження виникнення аварій, травм, отруєнь чи захворювання необхідно дотримуватись всіх вимог безпеки в усіх небезпечних зонах, так як

порушення хоч однієї з них в кінцевому результаті може призвести до небажаних наслідків [23, 18].

Висновки по розділу

Практика свідчить, поодинокі заходи з охорони праці на підприємствах не дають необхідного ефекту у забезпеченні дотримання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці, створення на робочих місцях в кожному структурному підрозділі належних здорових та небезпечних умов праці. Для цього потрібний системний підхід, за якого заходи з охорони праці будуть застосовуватися виважено, взаємопов'язано, комплексно. Отже, комплексне управління охороною праці з боку роботодавця та працівників здатне забезпечити підвищення ефективності у цій сфері. З цією метою на підприємстві, з урахуванням його особливостей, розробляється система управління охороною праці [20, 24].

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

5.1. Техніко-економічне обґрунтування розробки

Визначення техніко-економічних показників сепаратора виконано за загальною методикою [25, 26].

Таблиця 5.1.

Техніко-економічні показники машин, що порівнюються

№ п.п.	Показники	Одиниця виміру	Серійний аналог ЗАВ-40.02.000	Дослідна
1	2	3	4	5
1	Маса машини	кг	450	437
2	Маса покупних виробів	кг	230	214
3	Ціна машини	грн.	94300	107095
4	Собівартість машини	грн.	82300	81870,9
5	Вартість покупних виробів	грн.	66100	65450
6	Продуктивність	т/год	20	27
7	Потужність електродвигуна	кВт.	6,6	6,6
8	Коефіцієнт використання часу зміни: робочого експлуатаційного	—	0,82 0,76	0,83 0,78
9	Кількість обслуговуючого персоналу	чол.	1	1

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз отриманих закономірностей руху часток зерноsumіші по поверхні пруткового барабана в повітряному каналі дозволив визначити значення кутів відриву:

- $\varphi_{\text{відр.}}^{(п.зерн.)} = 75^\circ \dots 111^\circ$ для повноцінного зерна при значеннях коефіцієнту парусності $k_{\pi} = 0,07 \dots 0,18$;
- $\varphi_{\text{відр.}}^{(ш.зерн.)} = 99^\circ \dots 145^\circ$ для некондиційного насіння при $k_{\pi} = 0,14 \dots 0,32$;
- $\varphi_{\text{відр.}}^{(дом.)} = 129^\circ \dots 162^\circ$ для смітних домішок при $k_{\pi} = 0,23 \dots 0,55$, що дає змогу чітко розмежовувати фракції, встановивши подільники у відповідних положеннях.

2. Встановлено, що зменшення діаметру прутків циліндричного барабана в межах $d_{\text{пр}} = 4 \dots 1$ мм має значний вплив на живий переріз повітряного каналу і забезпечує збільшення продуктивності сепаратора q_v від 700 до 1800 кг/дм·год. Однак при виборі раціонального значення діаметра прутка потрібно враховувати технологічні особливості виготовлення циліндричного барабана, оскільки при значеннях $d_{\text{пр}} < 3$ мм і діаметрі навивки $D > 150$ мм погіршується якість роботи сепаратора в результаті втрати жорсткості конструкції.

3. Економічний ефект від застосування сепаратора з конічним барабаном складає 16532 грн. на одну одиницю в рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петренко Д.І., Лісовий В.В., Ковальчук Ю.О. Вдосконалення та обґрунтування параметрів пруткового барабана сепаратора зерна. Матеріали XIV Міжнародну науково-практичну конференцію «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» 08 по 10 листопада 2023р С. 15-16.
2. Савченко С.В., Хоменко С.В. Сучасні технології та технічні засоби для післязбирального очищення насіння зернових культур. Наукові читання— 2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. Т. 3. С. 135-140.
3. Хоменко С. В. Удосконалення технології та технічних засобів для післязбиральної очистки насіння зернових культур : кваліфікаційна робота : спец. 208 «Агроінженерія». Поліський нац. ун-т, каф. агроінженерії та технічного сервісу ; наук. кер. Савченко В. М. – Житомир, 2023. – 41 с.
4. Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Kalinichenko, R. i Hryshchenko, V. Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. Journal of Central European Agriculture, 24 (1), 2023. 225-235. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732>
5. Kharchenko, S.; Samborski, S.; Kharchenko, F.; Mitura, A.; Pa'snik, J.; Korzec, I. Identification of the Natural Frequencies of Oscillations of Perforated Vibrosurfaces with Holes of Complex Geometry. Materials 2023, 16, 5735. <https://doi.org/10.3390/ma16175735>
6. Kharchenko S, Samborski S, Kharchenko F, Paśnik J. Numerical Study of the Natural Oscillations of Perforated Vibrating Surfaces with Holes of Complex Geometry. Advances in Science and Technology Research Journal. 2023;17(6).
8. Харченко С.О., Артёмов М.П., Гаєк Є.А., Бажинова Т.О., Ліньов А.О. Ковалишин С.Й. Ідентифікація енерговитрат зернових пневмосепараторів / Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів.

- 2021. № 23 – С. 234 – 240. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/jspui/bitstream/123456789/1339/1/ZHurnal_TSALTK_23_2021_247_254.pdf
9. Васильковський, О. М., Лещенко, С. М., Мороз, С. М., Петренко, Д. І., Нестеренко, О. В.. Попередні дослідження струнного решета. In The 14 th International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects”(October 16-18, 2022) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2022. 113-118
 10. Petrenko D.I., Lisoviy I.O., Raichenko D.P. Justification of the parameters of the centrifugal-pneumatic grain cleaning machine. International scientific conference «Interaction between science and technology in modern conditions»: conference proceedings (November 3–4, 2022. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2022. 109–111. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-264-7-29>
 11. Stepanenko, S., Kotov, B., Spirin, A., Kucheruk, V. Scientific foundations of the movement of components of grain material with an artificially formed distribution of air velocity. *Bulletin of Karaganda University Series "Physics"*. 2022. № 1(105). P. 43-57. URL: <http://dx.doi.org/10.31489/2022PH1/43-57>
 12. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин (Т.2, ч. 2, кн. 2.). Зернозбиральні машини / П. М. Заїка. – Харків : ОКО, 2004. – 404 с.
 13. Лещенко С.М. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючої системи інерційного прямооточного сепаратора зерна : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 „Машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва”/ С.М. Лещенко. – Кіровоград, 2010. – 21 с.
 14. Kharchenko, S.; Kharchenko, F.; Samborski, S.; Paśnik, J.; Kovalyshyn, S.; Sirovitskiy, K. Influence of Physical and Constructive Parameters on Durability of Sieves of Grain Cleaning Machines. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* **2022**, 16, 156–165. . DOI <https://doi.org/10.12913/22998624/156128>
 15. Гаєк Є. А. Підвищення ефективності роботи зерноочисної техніки від шкідливого впливу дисперсного пилу. Науковий журнал «Інженерія

- природокористування». 2020. №. 3 (17). С. 53-57. URL: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/137>
16. Гаєк, Є. А.; Тарасенко, А. О. Підвищення ефективності роботи повітряно-шнекового сепаратора для очищення зернових сумішей. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Технічний прогрес в АПВ». 2023. С. 133 – 136. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/37961/1/MVNP_K_Tehnichnyj_progres_v_APV_2023-133-135.pdf
 17. Заявка № u202300541 Відцентрово-пневматичний сепаратор із конічним барабаном та відбивним екраном. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1723564/>
 18. Райченко Д.П. Обґрунтування параметрів машини для поверхневого внесення добрив. Магістерська робота. Умань, УНУС. 2022р 77с.
 19. J. Shimoizaka, A. Kounosu, Y. Hayashi and K. Saito, A new type sink-float separator for waste plastics, J. Min. Metall. Inst. Japan, 92 (1976), 675–679,
 20. Охорона праці в галузі : навчальний посібник / В. М. Курепін, Д. Д. Марченко, Д. В. Курепін. Миколаїв : МНАУ, 2023. 586 с. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/13157>
 21. Бородін О.С. Лузан П.Г. Охорона праці при експлуатації зерноочисних машин. Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 321-323.
 22. Про затвердження Правил охорони праці для працівників, зайнятих на роботах зі зберігання та переробки зерна. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1288-17#Text> (дата звернення: 18.11.2023).
 23. Прокопенко Е.В. Моделювання виробничих небезпек та зменшення їх шкідливого впливу при проведенні механізованих робіт [Електронний ресурс] / Е.В. Прокопенко, І.О. Лісовий, Т.С. Лісова // Збірник наукових праць Уманського НУС. – Умань, 2015. – Вип. 87. – Ч. 1: Агрономія. – С. 79–86

24. Лебідь С. В. Основні чинники поліпшення стану охорони праці на сучасних підприємствах. Актуальні проблеми трудових відносин під час воєнного стану : тези доповідей здобувачів вищої освіти інженерно-енергетичного факультету та інших учасників освітнього процесу за результатами тематичного «круглого столу» на інженерно-енергетичному факультеті, м. Миколаїв, 27 квітня 2022 року. Миколаїв : МНАУ, 2022. С. 15-17. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/11727>.
25. Янович, В.П. Техніко-економічна оцінка вібраційних машин для механічної обробки сипкої сировини/ В.П. Янович // Всеукраїнський науково– технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». – 2017. – № 4 (99). – С. 70–77.
26. ДСТУ 4397: 2005 «Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробувань» К.: Соцінформ, 2005. – 6 с.
27. Derevjnko, D., Sukmaniuk, E. & Derevjnko, O. (2017). Grain crops injuries and drying modes while seeds preparation. INMATEH – Agricultural Engineering, 53 (3), 89–94.

ДОДАТКИ

