

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

“ _____ ” 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:**

**«Підвищення ефективності роботи скальператорного сепаратора з
обґрунтуванням його параметрів»**

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,
групи ГМ-24М-1

ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Мельник Євген Володимирович
« _____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Дмитро ПЕТРЕНКО

« _____ » _____ 2026 р.

Рецензент

професор, д-р техн. наук

_____ Микола МОРОЗ

« _____ » _____ 2026 р.

м. Кропивницький

АНОТАЦІЯ

Роботу присвячено науковому обґрунтуванню параметрів п'ятисекційного барабанного сепаратора зернових сумішей. Математично доведено доцільність диференційованого підходу до довжини секцій та використання лопатей-розпушувачів, що знижують втрати ефективності при вологості понад 16% до 10...15%. Встановлено раціональні кінематико-геометричні параметри оптимізованого сепаратора. При продуктивності 100 т/год досягнуто чистоту продукту 98,5% при втратах до 1,2%. Результати дозволяють трансформувати очищення у прогнозований процес.

Ключові слова: барабанний сепаратор, очищення зерна, п'ятисекційний барабан, математичне моделювання, лопаті-розпушувачі

ABSTRACT

The work is devoted to the scientific substantiation of the parameters of a five-section drum separator for grain mixtures. The expediency of a differentiated approach to the length of sections and the use of lifting paddles, which reduce efficiency losses at moisture levels over 16% to 10...15%, has been mathematically proven. Rational kinematic and geometric parameters of the optimized separator have been established. At a capacity of 100 t/h, a product purity of 98,5% was achieved with losses of up to 1,2%. The results allow for the transformation of the cleaning process into a predictable one.

Keywords: drum separator, grain cleaning, five-section drum, mathematical modeling, lifting paddles

ЗМІСТ

Номер розділу	Структурна одиниця і розділ
1	Вступ
2	Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень
3	Наукова частина
4	Практична реалізація результатів досліджень
5	Охорона праці
6	Загальні висновки
	Список використаної літератури

1. ВСТУП

Сільськогосподарське машинобудування сьогодні є фундаментом продовольчої безпеки, трансформуючи традиційне землеробство у високотехнологічну індустрію. Завдяки впровадженню інноваційної техніки стає можливим не лише нарощування обсягів виробництва, а й радикальне зниження витрат на робочу силу та мінімізація витрат на отримання врожаю. У цьому контексті обладнання для очищення зерна виступає критичним аспектом якості, що визначає подальшу долю вирощеної й зібраної продукції.

Видалення сторонніх домішок, каміння та битого зерна – це не просто агротехнічна вимога, а стратегічний інструмент підвищення ринкової вартості. Очищене зерно, що відповідає суворим міжнародним стандартам, перетворюється з сировини на ліквідний актив. Однак первинна ланка цього процесу – барабанний сепаратор, який набуває все більшої популярності серед агровиробників, часто стає об'єктом технічних компромісів, де задекларована продуктивність не завжди збігається з реальним якісним показником очищення.

Ефективність роботи скальператора безпосередньо залежить від точності його налаштувань. Сучасні умови вимагають переходу до наукового обґрунтування його параметрів. Оптимізація кінематичних характеристик, геометрії робочих органів та динаміки решітного сепарування є ключем до створення машин нового покоління. Тільки через глибокий аналіз взаємодії зернового потоку з робочими поверхнями можна досягти того рівня технологічної досконалості, який дозволить вітчизняному агросектору вийти на нові горизонти ефективності.

Дана робота присвячена науковому обґрунтуванню параметрів сепаратора барабанного типу, що дозволяє трансформувати процес очищення з випадкового у прогнозований, забезпечуючи максимальну пропускну здатність при стабільно високій якості виділення домішок.

2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Аналіз ефективності функціонування сепараторів барабанного типу.

Одне з центральних місць серед зерноочисних технологій посідають барабанні сепаратори [1, 2]. Їхня робота базується на простому та ефективному принципі: зернова суміш подається на обертовий перфорований барабан, де під дією відцентрових сил та гравітації відбувається фракційний поділ за розмірами. Поки прохідна фракція вільно проходить крізь отвори решета, сходові транспортуються до виходу, забезпечуючи безперервність циклу.

Практичний досвід експлуатації агрегатів із горизонтальною віссю обертання довів їхню незамінність на етапах попереднього та первинного очищення. Основними перевагами таких систем є [1, 2]:

- висока адаптивність – можливість гнучкого налаштування під будь-який тип культури від дрібнонасіненних до сої чи кукурудзи;
- масштабованість – здатність стабільно обробляти масивні потоки зерна на елеваторах високої потужності;
- мінімальний рівень травмування зернівок, що є критично важливим для збереження насіннєвого потенціалу та запобігання розвитку патогенів.

Сьогодні ринок пропонує широкий спектр рішень як від провідних світових брендів, так і від вітчизняних машинобудівних заводів [3-10]. Однак подальший розвиток галузі вимагає не просто механічного копіювання існуючих зразків, а глибокого наукового обґрунтування геометричних та кінематичних параметрів барабана для досягнення максимальної чистоти сепарації при мінімальних енерговитратах.

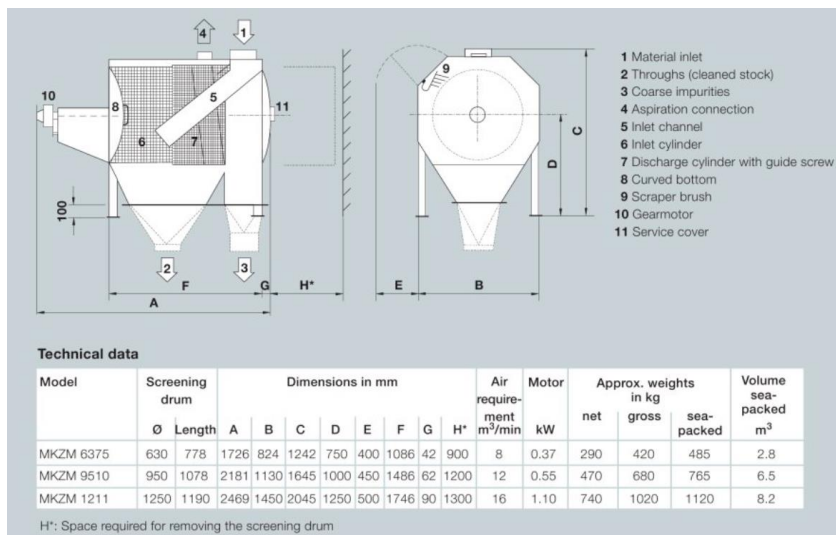
Розглянемо основні характеристики та порівняємо машини барабанного типу різних виробників зерноочисного обладнання (табл. 2.1).

Bühler MKZM (рис. 2.1) – це високопродуктивний скальператор, розроблений спеціально для елеваторів та млинів, де необхідно швидко видалити

грубі домішки (солому, качани, каміння, шматки дерева) перед основним очищенням або закладанням на зберігання [3].

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика барабанних сепараторів та скальператорів [3-10]

Модель / Виробник	Продуктивність (т/год)*	Потужність приводу (кВт)	Маса (кг)	Ефективність очищення (%)	Особливість конструкції
Bühler MKZM	100 – 400	1.5 – 3.0	800 – 1400	90...95	Консольний барабан, швидка зміна решіт
Bühler LAKA	200 – 800	0.55 – 1.5	750 – 2000	90...95	Консольний барабан з гвинтовим шнеком
ЛУЧ ЗСО (ОЛІС)	50 – 300	3.0 – 11.0	1400 – 3500	96...98	Поєднання решітного та повітряного очищення
ПБ1К ПБ2К (ХМЗ)	100 – 200	3.0 – 4.0	1500 – 1800	92...96	Простота, висока надійність приводу
MYSiLO (серія E)	100 – 300	2.2 – 4.0	950 – 1600	90...94	Класичний скальператор (грубе очищення)
MYSiLO (серія T)	50 – 150	5.5 – 11.0	1800 – 3200	97... 99	Подовжений барабан для тонкої сепарації
GCS-1400	80 – 120	5.5	~1450	96...98	Оптимальна геометрія для середніх потоків
OBC-355 (Україна)	100 – 200	3.0 – 4.0	1200 – 1550	92...96	Висока питома продуктивність на кВт
GCU (3S Company)	40 – 150	7.5 – 15.0	2100 – 3800	97...99	Преміум-сегмент, потужна аспірація
KDC (Kongsilde)	40 – 80	3.0 – 5.5	800 – 1300	98.5	Конструкція «барабан у барабані»



а)

б)

Рис. 2.1. Скальператор Bühler MKZM [3]: а) габаритне креслення; б) загальний вигляд

Процес очищення в МКЗМ базується на принципі внутрішньої подачі в консольний барабан. Зерно надходить всередину похилого перфорованого барабана. Чисте зерно проходить крізь отвори решета (прохідна фракція) і збирається у випускному бункері. Великі домішки (схід), які за розміром більші за отвори, залишаються всередині барабана і завдяки його нахилу та обертанню переміщуються до відкритого кінця, де випадають в окремий жолоб.

Зовні барабана зазвичай встановлені щітки або ролики, які очищують отвори від застряглих часток, підтримуючи активну площу решета.

Технічними особливостями є консольне кріплення барабана. Це унікальна риса Bühler, яка дозволяє замінити сито всього за 5...10 хвилин через передні дверцята, не розбираючи весь агрегат.

Застосовано компактний привід – використовується мотор-редуктор безпосередньо на валу або через надійну пасову передачу, що мінімізує вібрації.

Регулювання продуктивності залежить від підбору решіт (з круглими або квадратними отворами) та кута нахилу/швидкості обертання.

Компанія Bühler також пропонує обладнання LAKA / RCDA (рис. 2.2) для екстремально високих навантажень (портові термінали, великі силоси), де продуктивність сягає 800 т/год [3].

Таблиця 2.2 – Переваги та недоліки Bühler MKZM

Переваги	Недоліки
Висока продуктивність – здатність обробляти до 450 т/год при мінімальних габаритах.	Вузька спеціалізація – машина призначена лише для видалення великих домішок (не видаляє дрібні домішки чи біте зерно).
Швидке обслуговування – завдяки консольній конструкції зміна решіт під іншу культуру відбувається швидко.	Висока вартість – має вищу ціну порівняно з вітчизняними аналогами.
Мінімальне травмування – зерно не піддається інтенсивному механічному впливу, що зберігає його цілісність.	Вимогливість до аспірації – для ефективної роботи без пилу потребує підключення до потужної зовнішньої системи аспірації.
Надійність – висока якість матеріалів та підшипникових вузлів забезпечує роботу 24/7 протягом зазначеної тривалості експлуатації.	Чутливість до вологості – при дуже високій вологості (понад 25%) ефективність самоочищення сит може знижуватися.



Рис. 2.2. Барабанний сепаратор LAKA від Bühler [3]: а) загальний вигляд;
 б) функціональна схема: 1 – вхідний патрубок; 2 – двигун; 3 – вхідний циліндр;
 4 – вихідний циліндр з напрямним гвинтом; 5 – патрубок для аспірації;
 А – чисте зерно; В – крупні домішки

Ці сепаратори працюють за принципом барабанного решета з внутрішнім гвинтовим шнеком. Зернова суміш надходить через вхідний патрубок (1)

безпосередньо у внутрішню частину обертового барабана. Барабан складається з двох зон: вхідного циліндра (3) та вихідного циліндра (4). Зерно проходить крізь перфорацію решета («прохід»), а великі домішки (солома, дерево, качани кукурудзи, каміння) залишаються всередині.

На відміну від простих гравітаційних скальператорів, у LAKA всередині встановлена напрямна гвинтова спіраль (шнек). Вона примусово транспортує схід (домішки) до виходу, що дозволяє машині працювати зі значними об'ємами сміття без ризику забивання.

Сепаратор має патрубок (5) для підключення до системи знепилювання, що створює всередині невелике розрідження повітря, запобігаючи виходу пилу назовні.

Технічними особливостями є розбірний барабан, який складається з окремих секцій, що дозволяє комбінувати різні типи перфорації (наприклад, менші отвори на початку, більші в кінці). Барабан тримається на одній опорі, що робить його «відкритим» з одного боку для надшвидкої заміни. Для великих моделей передбачено поворотний кронштейн для вхідного каналу та стаціонарний візок із таллю для легкого виймання важкого барабана.

Таблиця 2.3 – Переваги та недоліки Bühler LAKA

Переваги	Недоліки
Моделі LAKA 400 здатні обробляти до 800 т/год (на пшениці), що є стандартом для морських портів.	Це машина призначення виключно для грубого очищення. Вона не замінює основний сепаратор.
Висока самоочищуваність – завдяки гвинтовій спіралі та додатковим щіткам-скребкам машина ефективна навіть при роботі з дуже вологим та забрудненим зерном.	Габарити – для монтажу потребує значного простору за довжиною (до 3,5 метрів + місце для виймання барабана).
Енергоефективність – потужність двигуна складає всього 0,55...1,5 кВт.	Ціна обслуговування – оригінальні комплектуючі та ситові циліндри Bühler значно дорожчі за локальні аналоги.
Пилонепроникний корпус забезпечує чистоту в цеху та безпеку персоналу.	Вимоги до встановлення – потребує ідеально рівного фундаменту через велику масу барабана, що обертається.

Сепаратор «ЛУЧ» ЗСО (рис. 2.3), розроблений компанією «ОЛІС», представляє собою технологічний гібрид, який об'єднує принципи гравітаційної сепарації, відцентрової сили та аеродинамічного впливу [4].

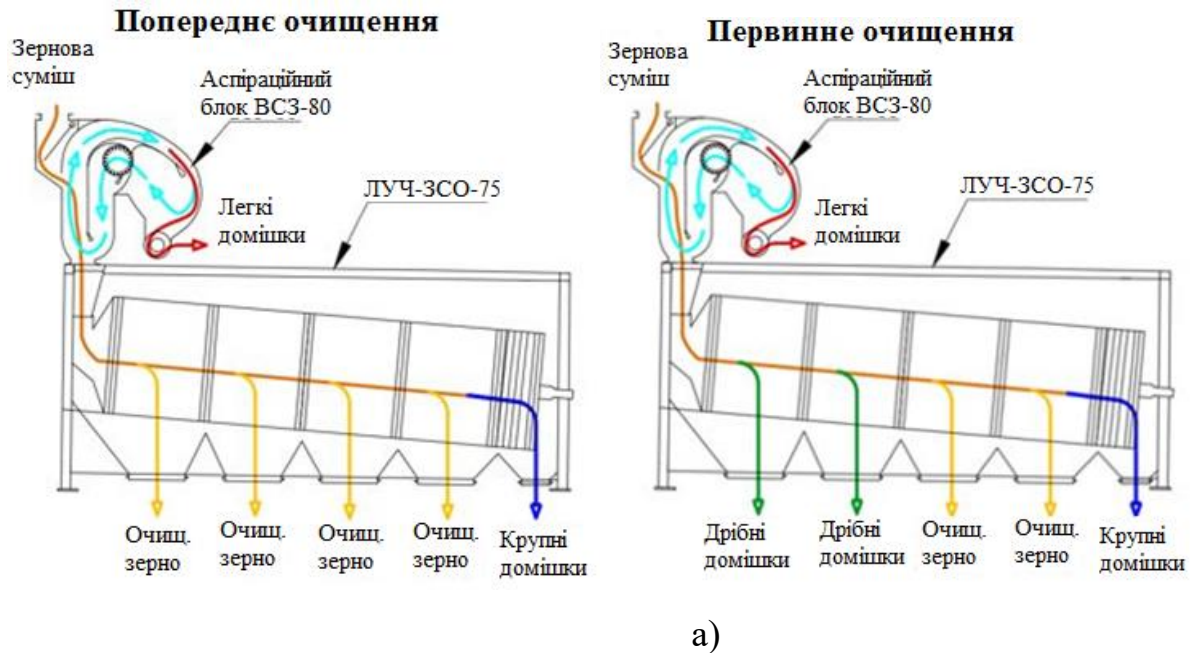


Рис. 2.3. Сепаратор «ЛУЧ» ЗСО [4]: а) функціональні схеми роботи; б) загальний вигляд

Робота сепаратора базується на послідовному проходженні зернового вороху через дві функціональні зони.

Аспіраційна підготовка – спочатку зерносушіш проходить крізь вертикальний повітряний сепаратор. Потужний висхідний потік видаляє з матеріалу пил, полови та дрібні частинки соломи. Видалення легких домішок на старті запобігає забиванню отворів решітного барабана надалі.

Очищене повітрям зерно потрапляє всередину циліндричного барабана, що обертається під нахилом. Завдяки модульній конструкції (до 5 секцій), продукт послідовно проходить крізь решета з різною перфорацією.

Перші секції працюють на «прохід» (видаляють дрібне сміття). Наступні секції відбирають основну культуру. Найбільші домішки рухаються до кінця барабана і виходять «сходом».

Технологічними особливостями моделі є наступні.

Адаптивна кінематика – можливість змінювати як кут нахилу барабана (від 1° до 5°), так і швидкість його обертання, що дозволяє налаштувати машину під специфіку будь-якої культури.

Блок активної регенерації решіт – зовні барабана розташовані щіткові та ролкові механізми, які механічно виштовхують застряглі зернівки з отворів, підтримуючи корисну площу сепарації на рівні 100% протягом усієї зміни.

Відсутність динамічних ударів – на відміну від плоскорешітних сепараторів, «ЛУЧ» працює плавно. Це виключає передачу вібрацій на будівельні конструкції елеватора, що дозволяє встановлювати його на високих поверхах ЗАВів без ризику руйнування опор.

Перевагами даного сепаратора є:

- мінімізація пошкоджень – зерно плавно перекочується по барабану, що мінімізує мікротріщини;
- ефективність на вологому зерні – обертальний рух постійно розпушує масу зерна, не даючи йому злипатися, що є недоліком плоскорешітних систем;
- гнучкість налаштувань – одна машина здатна виконувати функції скальператора, сепаратора первинного очищення та калібрувального вузла залежно від комбінації встановлених решіт.

Обладнання відзначається наступними недоліками:

- енергоспоживання – сумарна потужність (з урахуванням аспірації) може бути вищою, ніж у вузькоспеціалізованих скальператорів;

- габарити – через послідовне розташування секцій барабана машина має значну довжину, що потребує відповідного простору для монтажу та обслуговування;

- металоємність – конструкція відносно важка, що зумовлено необхідністю забезпечення жорсткості довгого валу барабана.

Аналогічну конструкцію мають і сепаратори компанія «MYSiLO» [6]. Барабанні сепаратори GCS-1400 [7] від «Grain Cleaning Solution» також працюють по зазначеній схемі, проте відрізняються ширшим набором регулювань, зокрема розміру барабанних решіт, кута їх встановлення і частоти обертання.

Модель OBC-355Ц (рис. 2.4) від «BIM Agritech» [8] кардинально відрізняється від стандартних скальператорів. Це універсальний сепаратор з вбудованим циклоном, що фактично робить його прямим конкурентом «ЛУЧ» ЗСО.

OBC-355Ц має моноблочну структуру. Циклон та вентилятор інтегровані безпосередньо в корпус машини (або встановлені зверху). Це робить агрегат надзвичайно компактним. Основний акцент зроблено на мобільності та можливості швидкого монтажу без розгалуженої системи зовнішніх повітроводів.

Використовується замкнутий або напівзамкнутий цикл повітря з інтегрованим циклоном. Це дозволяє очищувати зерно від легких домішок і відразу осаджувати пил у бункер відходів, мінімізуючи викиди в приміщення.

Процес роботи полягає в наступному (рис. 2.4). Процес ініціюється в зоні (А), куди подається вихідна неочищена зерносуміш. Перший бар'єр очищення – похилий повітряний потік (В), який реалізує принцип аспірації, видаляючи з потоку легкі частинки. У випадках, коли технологія не передбачає калібрування за розміром, очищене від легкого сміття зерно спрямовується на вивантаження

(С). Найважчі та найбільші сторонні об'єкти, що пройшли крізь барабан, видаляються як крупні домішки (І).

Під час проходження крізь секції решітного барабана відбувається прецизійний розподіл за геометричними ознаками. Крізь перші отвори решіт виділяються дрібні важкі домішки (D) та загальна дрібна фракція (E). Окремо локалізується потік битого або пошкодженого зерна (F), що дозволяє зберегти якість основної партії.

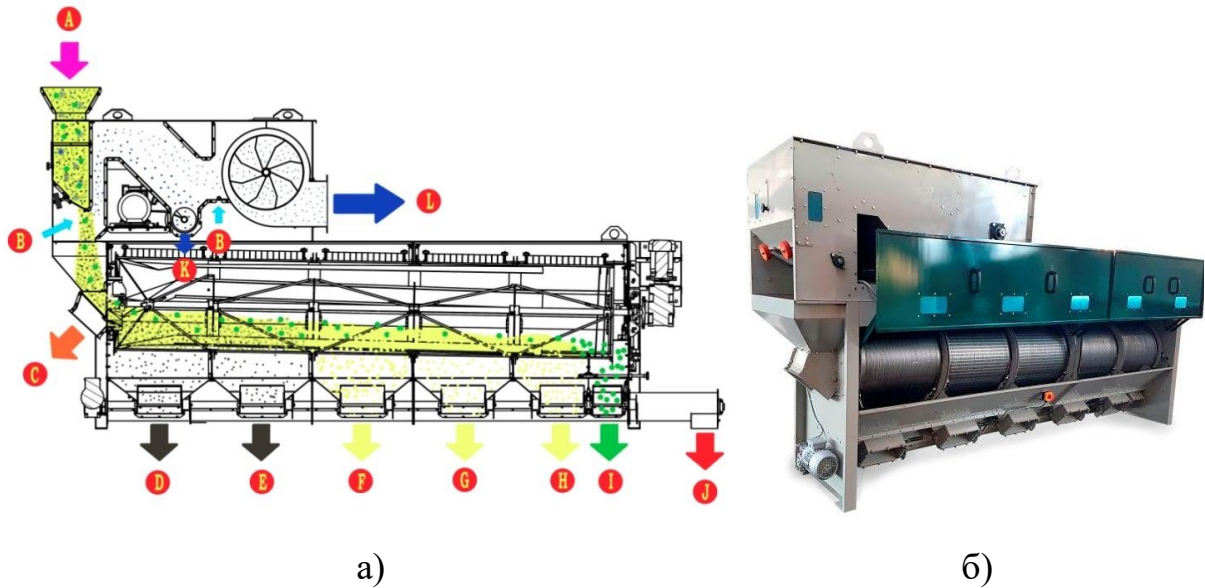


Рис. 2.4. Зерноочисної машини ОВС-355Ц [8]: а) схема роботи; б) загальний вигляд

Центральна частина барабана відповідає за виділення цільових культур: середньої фракції (G) (пшениця, ячмінь) та крупної фракції (H) (горох, соя).

Завершальна стадія пов'язана з виведенням відходів через механізовані вузли. Система (J) забезпечує збір та транспортування легких домішок до спеціального виходу шнека (K).

Фінальним етапом є виведення засміченого повітря (L) після вентилятора, яке спрямовується до циклону для повного очищення повітряного середовища від пилу.

Можемо відзначити такі переваги ОВС-355Ц:

- конструктивна автономність – наявність інтегрованого циклона;

- висока енергоефективність – завдяки тому, що вентилятор і циклон розташовані в єдиному корпусі з сепаратором, шлях повітряного потоку мінімальний. Це знижує аеродинамічний опір і дозволяє використовувати менш потужні двигуни при збереженні високої якості аспірації;

- екологічність та охорона праці – закритий цикл очищення з вбудованим циклоном мінімізує викиди пилу в робочу зону.

- універсальність барабана – використання змінних сегментів решіт дозволяє швидко переходити з режиму грубого скальперування на режим точного калібрування насіння.

Виділимо і деякі недоліки ОВС-355Ц:

- складність доступу до внутрішніх вузлів – інтеграція циклона всередину або безпосередньо на корпус ускладнює візуальний контроль та очищення самого циклона від налипання вологого пилу порівняно з винесеними системами;

- чутливість до вологості – при роботі з надто вологим зерном (понад 25%) дрібний пил та легкі домішки можуть створювати корки всередині інтегрованої системи аспірації, що потребуватиме частіших зупинок для технічного обслуговування;

- фіксована потужність повітряного потоку – у вбудованих системах важче досягти такої ж прецизійної точності налаштування «швидкості витання», як у окремих аспіраційних колонках з незалежним регулюванням.

- шум – оскільки вентилятор знаходиться в загальному корпусі, акустичне навантаження поблизу машини може бути вищим, ніж у систем, де вентилятор винесений за межі робочого приміщення.

Сепаратор серії KDC (Dual Cone) (рис. 2.5) від датської компанії Kongskilde, на відміну від традиційних однобарабанных машин, використовує унікальну концепцію подвійного концентричного барабана [10].

Функціонування сепаратора базується на одночасному розділенні зернового потоку двома незалежними решітними поверхнями, що обертаються на одному валу.

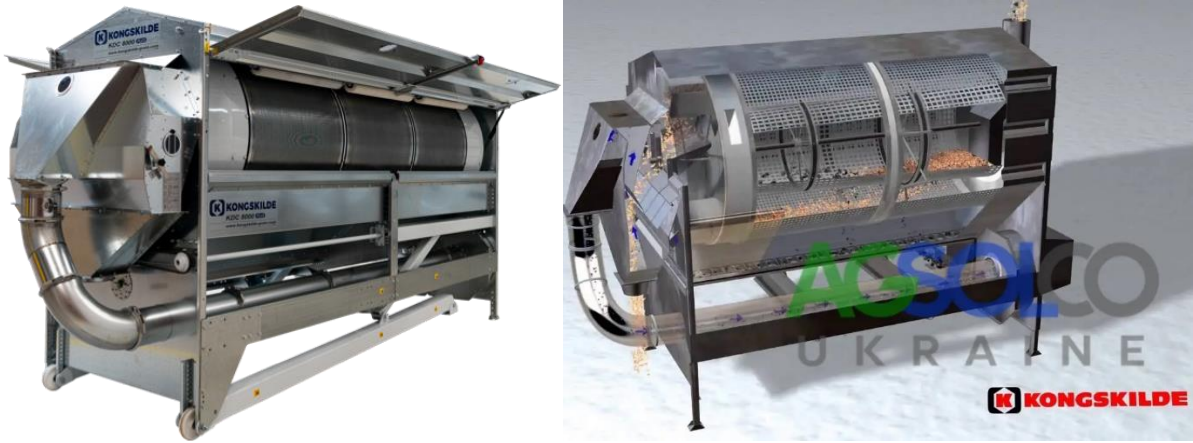


Рис. 2.5. Загальний вигляд зерноочисної машини KDC від Kongskilde [10]

Зерноsumіш потрапляє спочатку у внутрішній циліндр із великими отворами. Тут відбувається миттєве відсікання грубих домішок (солома, каміння, стебла). Велике сміття виводиться через торець внутрішнього барабана.

Основний продукт, пройшовши крізь отвори першого решета, потрапляє на зовнішній барабан із дрібнішою перфорацією. Тут відсіюються підсів, пісок та бите зерно (прохід), а чисте зерно переміщується до вихідного патрубку.

Процес супроводжується активним видаленням легкого пилу через вбудований вентилятор, що забезпечує стабільно високий рівень чистоти на виході.

Техніко-технологічними перевагами машини є:

- компактність при високій продуктивності — завдяки комбінованій структурі барабанів, Kongskilde KDC займає вдвічі менше площі, ніж лінійні сепаратори аналогічної потужності;
- гравітаційне розшарування — конструкція оптимізована для того, щоб зерно розподілялося по всій площі решета рівномірним шаром, що виключає «мертві зони» та підвищує ККД кожної одиниці перфорації;
- гнучка зміна решет — кожна секція барабана легко демонтується, що дозволяє швидко переналаштувати машину з очищення зернових на дрібнонасіннєві культури;

- система подвійного барабана забезпечує чистоту продукту до 98,5% за один прохід, що є одним із найкращих показників у класі компактних машин;
- мінімальна вібрація – ідеальне балансування роторної частини дозволяє монтувати сепаратор на легких металоконструкціях або мобільних платформах без ризику резонансу;
- універсальність – машина однаково ефективно працює як на попередньому очищенні при прийманні зерна, так і на фінішному калібруванні перед відвантаженням.

Серед недоліків слід відзначити:

- складність внутрішнього огляду – через концентричне розташування барабанів візуальний контроль стану внутрішнього решета під час роботи дещо ускладнений;
- вимоги до вологості – при роботі з надзвичайно вологим зерном зазор між барабанами може швидше забиватися, що потребує пильнішої уваги до очисних щіток;
- вартість комплектуючих – оригінальні решета та деталі приводу мають вищу ціну порівняно з вітчизняними аналогами.

2.2. Обґрунтування напряму досліджень

Зважаючи на проведений аналіз конструктивних та технологічних особливостей існуючого зерноочисного обладнання барабанного типу доцільним є удосконалення на основі наукового обґрунтування п'ятисекційного барабанного скальператора (рис. 2.6).

Зважаючи на дослідження [1, 12-16], ключовим ресурсом підвищення ефективності є обґрунтування точного налаштування його кінематичних та геометричних параметрів.

Напрями подальших досліджень.

1. Оптимізація кінематичного режиму роботи. Оскільки барабан має п'ять секцій, час перебування зерна на кожній із них критично впливає на якість очищення. Дослідження впливу частоти обертання – пошук критичної

швидкості, при якій відцентрова сила забезпечує рівномірне розшарування зернового вороху, але не призводить до надмірного притискання зерна до стінок. Динаміка кута нахилу – визначення оптимального кута нахилу осі барабана для різних культур (пшениця, соняшник, кукурудза) з метою забезпечення рівномірної швидкості осевого переміщення зерна вздовж усіх п'яти секцій.

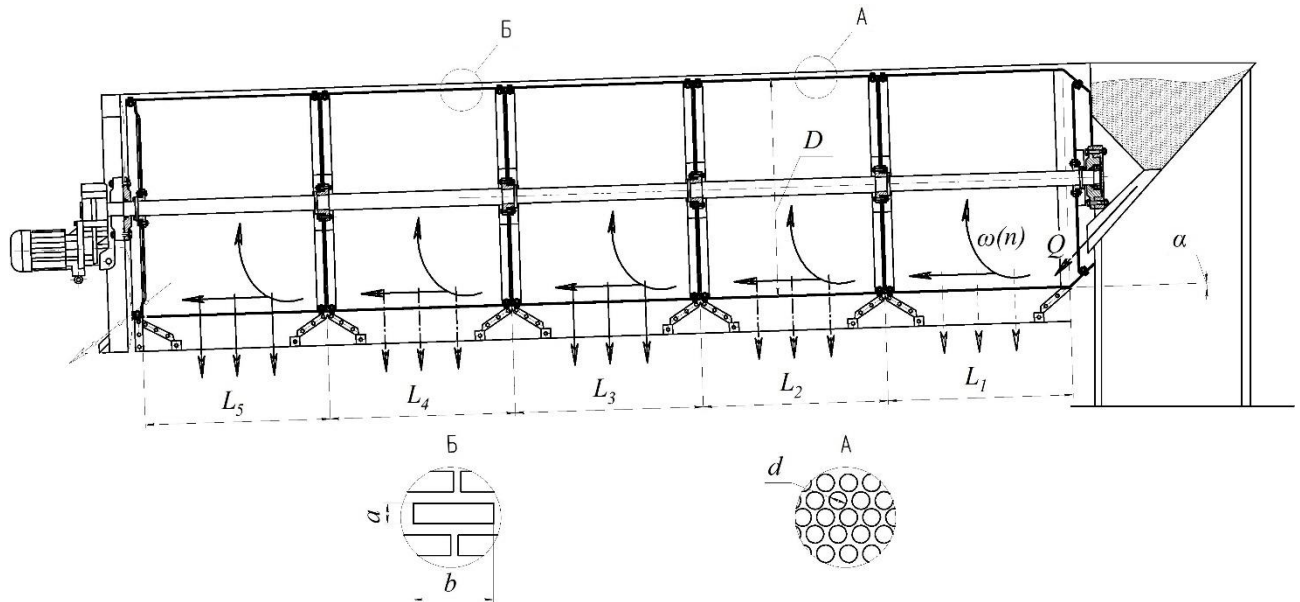


Рис. 2.6. Схема об'єкта досліджень

2. Геометричне обґрунтування конфігурації решіт. П'ятисекційна структура дозволяє реалізувати складні схеми сепарації за один прохід. Рациональний розподіл типів перфорації – дослідження ефективності послідовності решет (наприклад, комбінація круглих, поздовжніх та тригранних отворів) на різних ділянках барабана. Адаптивність кроку перфорації – аналіз пропускної здатності кожної секції залежно від зміни складу суміші (адже після кожної секції концентрація домішок у потоці змінюється).

3. Інтенсифікація процесу внутрішніми пристроями. Спираючись на досвід Bühler LAKA, доцільно дослідити введення додаткових елементів у конструкцію одинарного барабана. Вплив внутрішніх гвинтових напрямних – розрахунок параметрів спіралі (крок, висота), яка б примусово транспортувала великі домішки (схід) до виходу, запобігаючи перевантаженню останніх секцій барабана. Дослідження перекидних лопатей – встановлення лопатей-ворушилок

для активного перемішування шару зерна, що особливо актуально для вологої сировини.

4. Енергетична ефективність та надійність. Зниження питомої металоємності – обґрунтування конструкції валу та опорних вузлів для п'ятисекційного барабана, що дозволить зберегти жорсткість при мінімальній вазі. Аналіз енерговитрат – створення математичної моделі споживання енергії залежно від завантаження барабана та фізико-механічних властивостей зерна.

Висновки по розділу

У результаті проведеного аналізу сучасного стану та тенденцій розвитку вітчизняного та світового сільськогосподарського машинобудування в галузі зерноочисного обладнання, можна зробити наступні висновки.

Сучасний ринок вимагає від сепараторів не лише високої продуктивності, а й здатності забезпечувати прецизійну чистоту (98...99%) при мінімальному травмуванні зернівок. Аналіз існуючих конструкцій виявив два основні напрями розвитку: спеціалізовані скальператори (Bühler LAKA, OBC-355), орієнтовані на значні потужності та грубу очистку за рахунок спрощення кінематики; універсальні багатофункціональні системи («ЛУЧ» ЗСО, OBC-355C, MYSiLO серії Т), які поєднують повітряну аспірацію та багатосекційні барабани для комплексного циклу підготовки зерна; ефективність інтегрованих рішень.

Одинарний п'ятисекційний барабан визначено як найбільш раціональну конструктивну схему, що поєднує надійність скальператорів із гнучкістю універсальних машин. Така структура дозволяє реалізувати складну траєкторію руху фракцій та здійснювати поетапний відбір домішок різного калібру за один технологічний прохід.

Головною метою досліджень є створення універсального математичного алгоритму, який дозволить автоматично підбирати кут нахилу, швидкість обертання та конфігурацію решіт для одинарного п'ятисекційного барабана залежно від вологості та засміченості вхідної сировини.

3. НАУКОВА ЧАСТИНА

З метою реалізації зазначених напрямів досліджень детально розглянемо фізико-математичну модель процесу сепарації з урахуванням багатошарового руху зерноsumіші по внутрішній поверхні барабанного сепаратора.

Основними геометричними параметрами досліджуваної системи є (рис. 2.6):

L_{Σ} – загальна довжина барабана, м;

D – внутрішній діаметр барабана, м;

$R = D/2$ – радіус барабана, м;

α – кут нахилу осі барабана до горизонту, град;

L_i – довжина i -ї секції ($i = 1 \dots 5$), причому $\sum L_i = L_{\Sigma}$;

d_i – діаметр отворів перфорації в i -й секції.

Основними кінематичними параметрами досліджуваної системи є (рис. 2.6):

n – частота обертання барабана, об/хв;

$\omega = 2\pi n/60$ – кутова швидкість, рад/с;

$v_{\varphi} = \omega R$ – окружна швидкість на внутрішній поверхні, м/с.

Для моделювання використовуємо найбільш відповідну циліндричну систему координат (r, φ, z) :

z – осьова координата вздовж барабана ($z = 0$ на вході);

φ – кутова координата ($\varphi = 0$ внизу);

r – радіальна координата від осі барабана.

Проаналізуємо рух частинок на поверхні обертового циліндра. Рівняння руху частинки маси m в системі координат, що обертається:

- радіальна складова:

$$F_r = m \cdot \omega^2 \cdot R - N$$

де N – нормальна реакція поверхні барабана, Н;

$m \cdot \omega^2 \cdot R$ – відцентрова сила, Н;

- тангенціальна складова (в напрямку φ):

$$m \cdot a_{\varphi} = -m \cdot g \cdot \sin \varphi - F_{mp, \varphi},$$

де a_{φ} – прискорення у тангенційному напрямку, м/с²;

$F_{mp, \varphi}$ – сила тертя в тангенціальному напрямку, Н.

- осьова складова (вздовж барабана):

$$m \cdot a_z = m \cdot g \cdot \sin \alpha - F_{mp, z} - F_{um},$$

де a_z – прискорення у осьовому напрямку, м/с²;

$F_{mp, z}$ – сила тертя при осьовому русі, Н;

F_{um} – опір шару матеріалу, Н.

Змоделюємо критичну величину частоти обертання. Умова відриву частинки від поверхні ($N = 0$):

$$m \cdot \omega^2 \cdot R = m \cdot g \cdot \cos \varphi.$$

Величина критичної кутової швидкості при цих умовах становитиме:

$$\omega_{\lim} = \sqrt{\frac{g \cdot \cos \varphi}{R}},$$

і, відповідно, критична частота обертання:

$$n_{\lim} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \cdot \cos \varphi}{R}}.$$

Робочий режим становить: $n = (0,3 \dots 0,6) n_{\lim}$.

Змоделюємо тепер багат шаровий рух зерноsumіші, зважаючи на наступні параметри її шару:

$h(z, t)$ – товщина шару в перерізі z у момент часу t , м;

$\rho_{\text{сум}}$ – насипна щільність суміші, кг/м³;

ε – пористість шару (0,35...0,45 для зерна);

$\mu_{\text{в}}$ – коефіцієнт внутрішнього тертя в шарі;

$\mu_{\text{з}}$ – коефіцієнт тертя зерна об стінку барабана.

Змоделюємо проходження частинки через шар зерноsumіші як найбільш несприятливий випадок сепарації.

Час проходження частинки через шар товщиною h – частинка масою m_1 , що знаходиться на відстані y від поверхні барабана ($0 \leq y \leq h$), рухається до поверхні під дією:

- гравітаційної складової:

$$F_g = m_1 \cdot g \cdot \cos \beta,$$

де β – кут між напрямком руху через шар і вертикаллю;

- вібраційного ефекту від обертання барабана, де опір шару:

$$F_{\text{сум}} = C_{\text{cev}} \cdot v_{\text{np}}^2 \cdot S_{\text{ekv}},$$

де C_{cev} – коефіцієнт опору середовища (залежить від пористості);

v_{np} – швидкість проникнення через шар;

S_{ekv} – площа еквівалентного перерізу частинки, що залежить від її форми.

Рівняння руху часток через шар зерноsumіші:

$$m_1 \cdot \frac{dv_{\text{np}}}{dt} = m_1 \cdot g \cdot \cos \beta - C_{\text{cev}} \cdot v_{\text{np}}^2 \cdot S_{\text{ekv}} - \mu_{\text{в}} \cdot N_{\text{cev}},$$

де N_{cev} – нормальний тиск від верхніх шарів.

Спрощена модель для відносно часу проходження крізь шар суміші:

$$t_{np} = \frac{h}{v_{np}},$$

де швидкість проходження залежить від інтенсивності перемішування:

$$v_{np.\sim} = \kappa_{\text{вiбp}} \sqrt{g \cdot h},$$

де $\kappa_{\text{вiбp}}$ – коефіцієнт вібраційної активності (0,1...0,3), що залежить від частоти обертання та наявності лопатей.

Умова проходження частинки через отвір матиме наступний вигляд. Частинка діаметром $d_{\text{ч}}$ може пройти через отвір діаметром $d_{\text{отв}}$, якщо:

$$d_{\text{ч}} \prec \kappa_{np} \cdot d_{\text{отв}}$$

де $\kappa_{np} = 0,85...0,95$ – коефіцієнт проходження (враховує форму і орієнтацію частинок).

Ймовірність проходження частинки через секцію циліндричного решета:

$$P_{np}(d_{\text{ч}}, i) = 1 - e^{-\lambda_i \cdot t_{\kappa, i}},$$

де λ_i – інтенсивність сепарації в i -й секції;

$t_{\kappa, i}$ – час контакту з решетом i -ї секції.

Інтенсивність сепарації при цьому становитиме:

$$\lambda_i = \left(\frac{F_{\text{отв}, i}}{S_{n, i}} \right) \cdot f_{op} \cdot v_{\text{вiд}} \cdot \eta_{np},$$

де $\frac{F_{\text{отв}, i}}{S_{n, i}}$ – частка живого перерізу (відношення площі отворів до загальної площі);

f_{op} – коефіцієнт орієнтації частки (0,3...0,7);

v_{bid} – відносна швидкість частинки відносно решітної поверхні;

η_{np} – ефективність проходження (враховує забивання отворів).

Тривалість контакту з поверхнею решета:

$$t_{\kappa,i} = \frac{L_i}{v_{z,сep}},$$

де $v_{z,сep}$ – середня осьова швидкість руху матеріалу в i -й секції.

Далі розглянемо кінетику осьового переміщення. Осьова складова швидкості залежить від кута нахилу та режиму обертання:

$$v_z = \frac{g \cdot \sin \alpha \cdot \tau_{\kappa m}}{1 + \mu_{ekv}}$$

де $\tau_{\kappa m}$ – час контакту частинки з поверхнею за один оберт барабана;

μ_{ekv} – еквівалентний коефіцієнт тертя (враховує внутрішнє тертя в шарі).

Для барабана з додатковими елементами – лопатями для активізації шару зерноsumіші:

$$v_z = v_{z,сp} + v_{z,лон},$$

де $v_{z,сp}$ – складова гравітаційної швидкості частки;

$v_{z,лон}$ – додаткова складова швидкості частки внаслідок дії лопатей:

$$v_{z,лон} = k_l \cdot n \cdot h_l \cdot \sin \alpha_l,$$

де k_l – коефіцієнт ефективності лопаті (0,2...0,5);

h_l, α_l – відповідно висота і кут встановлення лопаті;

Час перебування в i -й секції:

$$t_i = \frac{L_i}{v_{z,i}}.$$

Загальний час обробки становить:

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^5 t_i.$$

Змоделюємо розподіл фракцій по секціях відповідно до системи диференціальних рівнянь. Для фракції розміром d_k в секції i :

$$\frac{dm_{k,i}}{dt} = Q_{вх,k,i} - Q_{вих,k,i} - Q_{np,k,i},$$

де $dm_{k,i}$ – маса фракції k в секції i в момент t ;

$Q_{вх,k,i}$ – потік на вході в секцію;

$Q_{вих,k,i}$ – потік на виході (схід);

$Q_{np,k,i}$ – потік через отвори (прохід).

Потік фракції, який йде на проходження, матиме значення:

$$Q_{np,k,i} = \lambda_{i(d_k)} \cdot m_{k,i},$$

де $\lambda_{i(d_k)}$ – інтенсивність проходу фракції k в секції i ;

$m_{k,i}$ – маса проходу фракції k в секції i .

Потік фракції, який йде на сходження:

$$Q_{вих,k,i} = \frac{m_{k,i}}{t_i}.$$

У матричній формі модель для k -фракцій та 5 секцій матиме вигляд:

$$d / dt[M] = [A] \cdot [M] + [B] \cdot [Q_{ex}],$$

де $[M]$ – вектор мас розміру $(k \times 5)$;

$[A]$ – матриця коефіцієнтів (враховує λ_i та $1/t_i$);

$[Q_{ex}]$ – вектор вхідних потоків.

Надалі виконуємо оптимізацію кінематичного режиму. Цільовою функцією є максимізація ефективності очищення:

$$\eta_{ef} = \frac{m_{ок.нр}}{m_{ок.вх}} \cdot \left(1 - \frac{m_{д.нр}}{m_{д.вх}} \right).$$

Обмеження:

- по відцентровій силі:

$$n < 0,6 \cdot n_{lim};$$

- по продуктивності:

$$Q_{ex} \leq Q_{max} = \pi \cdot R \cdot L \cdot v_z \cdot \rho \cdot k_3,$$

де $k_3 = 0,15 \dots 0,25$ – коефіцієнт заповнення барабана.

- по часу обробки:

$$t_{заг} \geq t_{min},$$

де $t_{заг}$ – загальний час циклу обробітку;

t_{min} – мінімально необхідний час циклу обробітку.

Дослідимо вплив частоти обертання циліндричного решета n на розшарування. Критерій розшарування – відношення відцентрової сили до сили тяжіння:

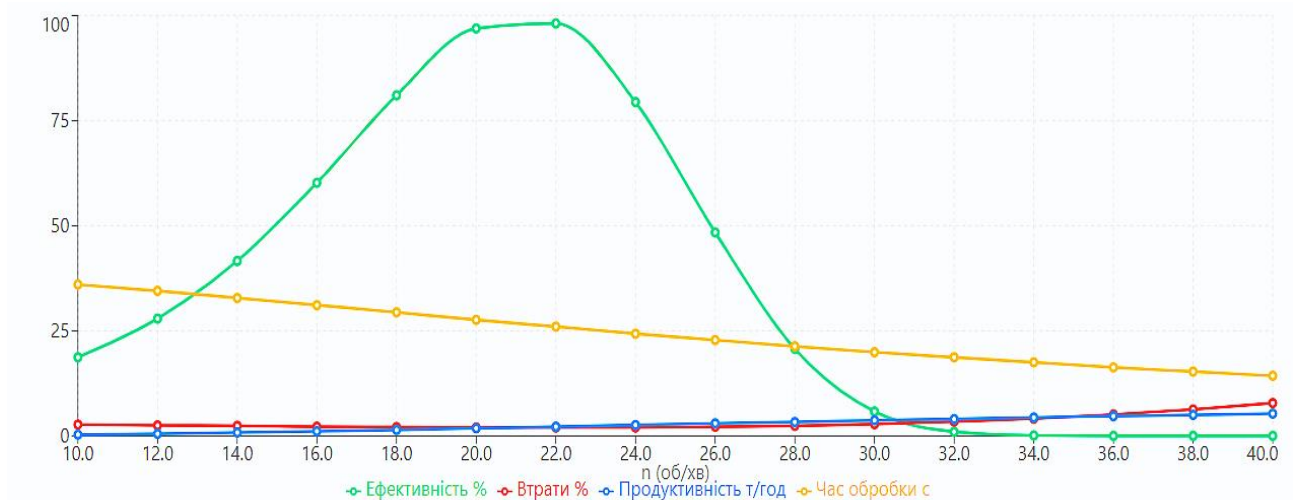
$$F_r = \frac{\omega^2 \cdot R}{g \cdot \cos \varphi}.$$

Оптимальний діапазон знаходиться в межах $F_r = 0,15 \dots 0,35$, що відповідає:

$$n_{opt} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{F_r \cdot g \cdot \cos \varphi}{R}}.$$

Для $R = 0,5$ м, $\varphi = 30^\circ$, $F_r = 0,25$ (рис. 3.1):

$$n_{opt} \approx 20 \dots 25 \text{ об/хв.}$$



Висновок: Оптимум при $n = 20-26$ об/хв

Рис. 3.1. Вплив частоти обертання циліндричного решета на ефективність сепарації

Оптимізуємо кут нахилу осі циліндричного решета. Осьова швидкість залежить від кут нахилу α :

$$v_{z(\alpha)} = \frac{C_1 \cdot \sin \alpha}{1 + C_2 \cdot \cos \alpha},$$

де C_1, C_2 – емпіричні коефіцієнти.

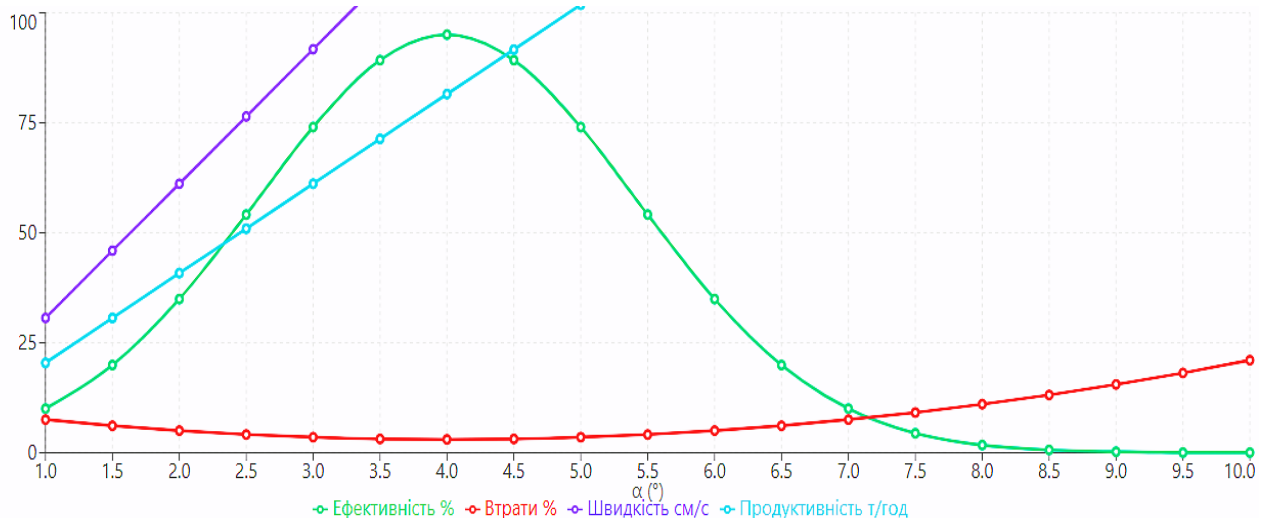
Оптимальний кут забезпечує:

- достатній час контакту: $t_i \geq t_{\min}$;
- відсутність застою: $v_z \succ v_{\min}$.

Для забезпечення рівномірності навантаження по секціях типовими значеннями кута нахилу осі циліндричного решета (рис. 3.2):

- шениця: $\alpha_{opt} = 3^\circ \dots 5^\circ$;
- соняшник (легший): $\alpha_{opt} = 2^\circ \dots 4^\circ$;
- кукурудза (важча): $\alpha_{opt} = 4^\circ \dots 6^\circ$.

Метод підбору: варіювання α з кроком $0,5^\circ$ та аналіз розподілу тривалості t_i .



Висновок: Оптимум $\alpha = 3-5^\circ$

Рис. 3.2. Вплив кута нахилу барабана на ефективність сепарації зерноsumіші пшениці

Проаналізуємо ефективність інтенсифікації потоку зерноsumіші додатковими лопатями, які забезпечать інтенсивне перемішування, що зменшить час переміщення t_{np} в 2...3 рази, руйнування склепінь для вологого зерна, додаткове осьове переміщення.

Конструктивні параметри лопатей:

$z_{\text{лон}}$ – кількість лопатей по колу (4...8 шт);

$h_{\text{лон}}$ – висота лопаті (0,05...0,15 м);

$L_{\text{лон}}$ – довжина лопаті вздовж барабана;

$\alpha_{\text{лон}}$ – кут встановлення (10...30° до радіуса).

Додаткова швидкість від лопаті становитиме:

$$\Delta v_z = \frac{k_{\text{лон}} \cdot h_{\text{лон}} \cdot \omega \cdot \sin \alpha_{\text{лон}}}{z_{\text{лон}}}.$$

де $k_{\text{лон}}$ – коефіцієнт, що характеризує вплив вологості і кута тертя на інтенсивність взаємодії лопаті з зерноsumішшю.

Частота перемішування:

$$f_{\text{пер}} = \frac{n \cdot z_{\text{лон}}}{60},$$

оптимально $f_{\text{пер}} = 2...5$ Гц.

Вплив на вологу сировину – для вологості $W > 16\%$ (рис. 3.3):

- без лопатей: ефективність очищення η знижується на 30...40%;

- з лопатями ефективність очищення η знижується лише на 10...15%.

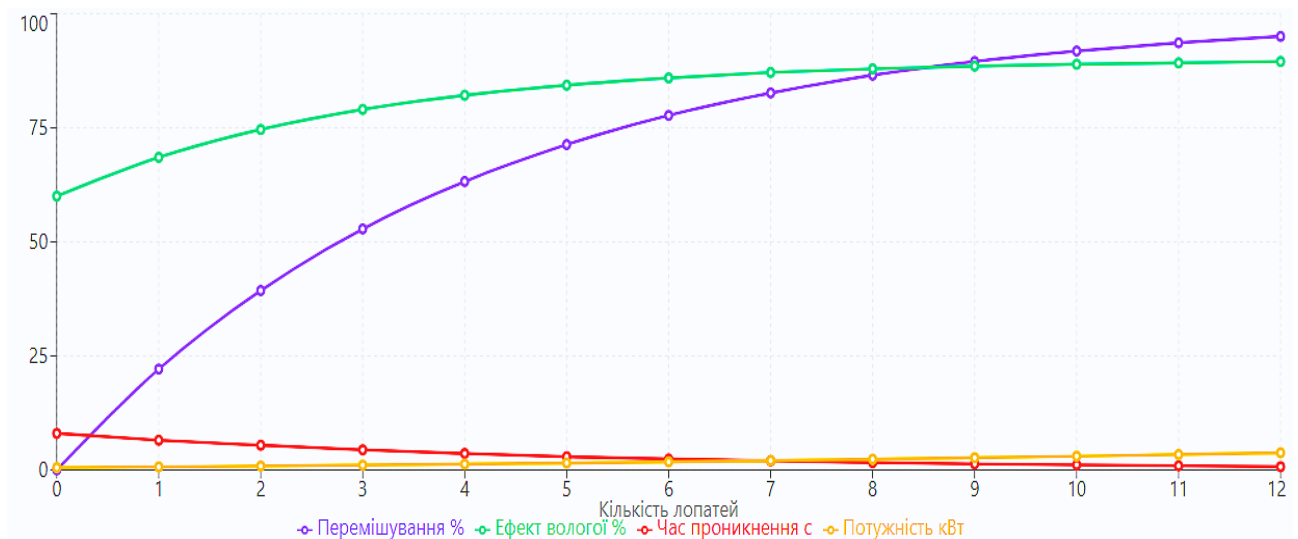


Рис. 3.3. Вплив додаткових лопатей на ефективність сепарації зерноsumіші

Додаткова потужність, що виникає при встановленні розпушуючих лопатей:

$$\Delta N_{\text{лоп}} = k_e \cdot z_{\text{лоп}} \cdot h_{\text{лоп}} \cdot L_{\text{лоп}} \cdot \omega^2 \cdot \rho_{\text{cev}} \cdot \mu,$$

де $k_e = 0,1 \dots 0,2$ – емпіричний коефіцієнт.

Висновки по розділу

Шляхом математичного моделювання досліджено вплив конструктивних і кінематичних параметрів циліндричного решета барабанного сепаратора на ефективність очищення зерноsumішей від домішок.

Представлені математичні моделі дозволяють:

- прогнозувати ефективність сепарації для різних режимів і конфігурацій;
- оптимізувати кінематичні параметри (n , α) для конкретних культур;
- оцінити вплив лопатей-розпушувачів на інтенсивність сепарації;
- мінімізувати втрати та максимізувати якість очищення.

Зокрема шляхом оптимізації параметрів встановлено, що робочий режим становить $n = (0,3 \dots 0,6)n_{\text{lim}}$, при цьому при радіусі барабана 0,5 м, оптимальні значення його частоти обертання перебувають в діапазоні $n_{\text{opt}} \approx 20 \dots 25$ об/хв.

Для забезпечення рівномірності навантаження по секціях типовими значеннями кута нахилу осі циліндричного решета є: для зерноsumіші пшениці $\alpha_{\text{opt}} = 3^\circ \dots 5^\circ$; соняшника $\alpha_{\text{opt}} = 2^\circ \dots 4^\circ$; кукурудзи $\alpha_{\text{opt}} = 4^\circ \dots 6^\circ$.

Аналіз впливу підвищеної вологості зерноsumіші ($W > 16\%$) дозволяє констатувати: без розпушуючих лопатей ефективність очищення η знижується на 30...40%, а з розпушуючими лопатями ефективність очищення η знижується лише на 10...15%, що підтверджує доцільність встановлення додаткових елементів для інтенсифікації сепарації.

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Геометричне обґрунтування конфігурації решіт

Пропускную здатність секції можемо оцінити за формулою:

$$Q_{\text{прох},i} = F_{\text{отв},i} \cdot v_{\text{відн},i} \cdot \rho \cdot \eta_i \cdot k_{\text{заб},i},$$

де $F_{\text{отв},i}$ – загальна площа отворів секції, м²;

$v_{\text{відн},i}$ – відносна швидкість переміщення часток у секції, м/с;

ρ – насипна щільність зерноматеріалу, кг/м³;

η_i – ефективність просіювання (сепарації) відповідної секції;

$k_{\text{заб},i}$ – коефіцієнт забивання отворів (0,1...0,3).

Динаміка концентрації домішок на кожній секції має наступний вигляд:

$$c_{\text{дом},i} = c_{\text{дом},i-1} \cdot (1 - P_{\text{прох},\text{дом},i-1}),$$

де $c_{\text{дом},i-1}$ – концентрація домішок на попередній секції;

$P_{\text{прох},\text{дом},i-1}$ – частка виділених на попередній секції домішок.

Якщо після секції i концентрація домішок $c_{\text{дом},i} < 5\%$, то в секції $(i+1)$ можна збільшити параметри отворів $d_{\text{отв}}$ на 10...15% для підвищення пропускної здатності.

Раціональний розподіл перфорації решіт по секціях наведено в таблиці 4.1.

Аналіз графічних залежностей впливу параметри отворів $d_{\text{отв}}$ на селективність циліндричного решета (рис. 4.1) дозволяють констатувати:

- у секції 1-2 видаляється 70...80% дрібного сміття;
- у секції 3-4 відбирається 85...95% зерна основної культури;
- у секції 5 присутній залишок основної культури на рівні до 2% та максимальна концентрація на рівні 80% великих домішок.

Таблиця 4.1 – Рекомендований розподіл перфорації для п'ятисекційної схеми барабанного сепаратора при очищенні зерноsumіші пшениці:

Секція	Призначення	Тип отворів	Розмір, мм	Частка живого перерізу
1	Видалення дрібного сміття	Круглі	2,0-2,5	15-20%
2	Видалення дрібного сміття	Круглі	2,5-3,0	18-22%
3	Відбір основної культури	Поздовжні	3,0×20	25-30%
4	Відбір основної культури	Поздовжні	3,5×20	25-30%
5	Дочищення	Круглі/Тригранні	4,0	20-25%

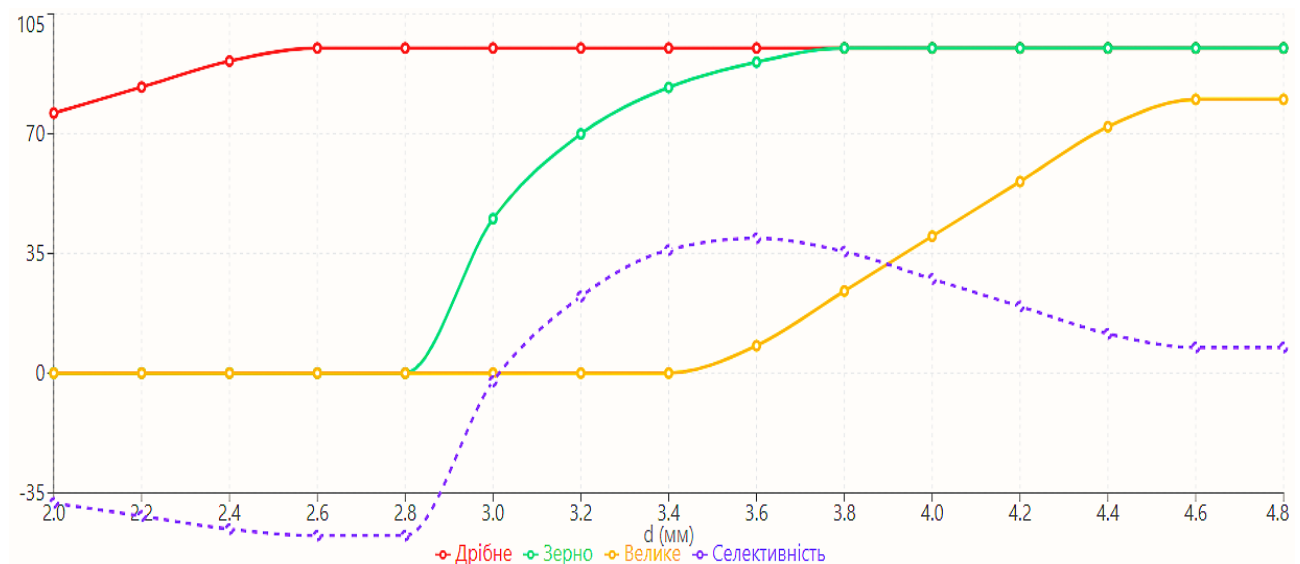


Рис. 4.1. Залежність впливу параметрів отворів $d_{отв}$ на селективність циліндричного решета

Аналіз залежності селективності решіт від частки їх живого перерізу (рис. 4.2) демонструють, що $f_{жив,опт} = 0,20...0,30$.

При $f_{жив} < 0,15$ спостерігається низька продуктивність, а при $f_{жив} > 0,35$ – зниження селективності, коли відбувається проходження великих домішок.

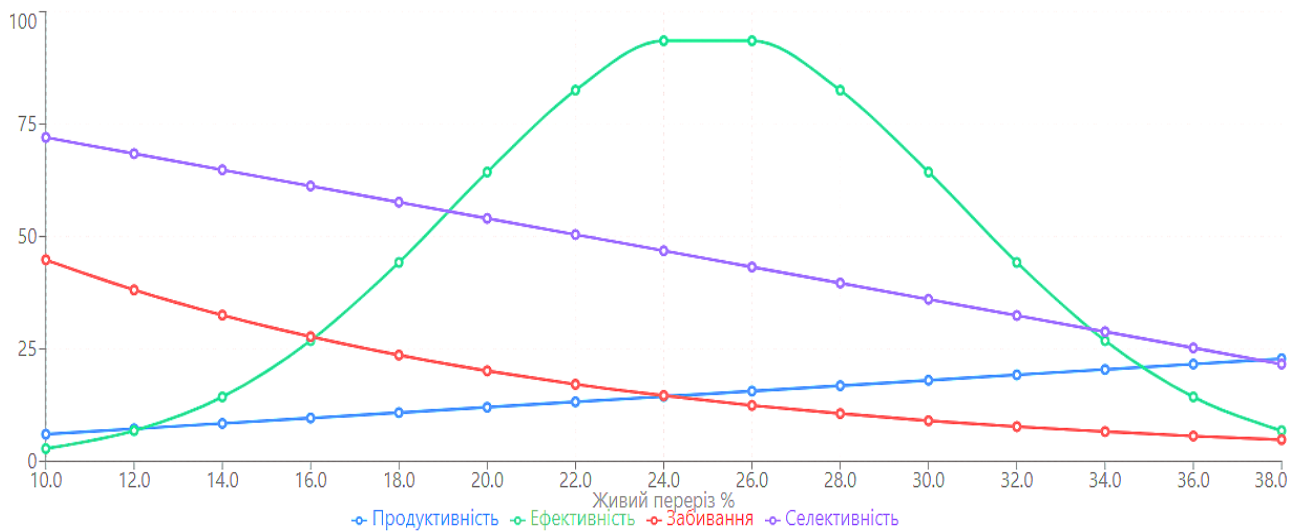


Рис. 4.2. Залежність селективності решіт від частки їх живого перерізу

4.2. Моделювання кінематично-геометричних параметрів циліндричного решета

Цільовими критеріями ефективності сепарації є [17]:

- максимізація чистоти основної культури в проході:

$$\max: \mathcal{Q}_{\text{прох}} = m_{\text{осн,прох}} / (m_{\text{осн,прох}} + m_{\text{домішок,прох}}),$$

де $m_{\text{осн,прох}}$, $m_{\text{домішок,прох}}$ — маса відповідно основного проходу та домішок;

- мінімізація втрат:

$$\min: B = m_{\text{осн,схід}} / m_{\text{осн,вхід}},$$

де $m_{\text{осн,схід}}$, $m_{\text{осн,вхід}}$ — відповідно маса основного сходу та основного входу;

- максимізація продуктивності:

$$\max: Q = m_{\text{вхід}} / t_{\text{заг}},$$

де $m_{\text{вхід}}$ — уся маса зерноsumіші; $t_{\text{заг}}$ — загальний час обробітку.

Комплексним критерієм ефективності системи буде:

$$F_{\text{ком}} = w_1 \cdot \mathcal{Q}_{\text{прох}} + w_2 \cdot (1 - B) + w_3 \cdot (Q / Q_{\text{ном}})$$

де w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$).

Основними змінними оптимізації є:

n – частота обертання в діапазоні $0,3 \cdot n_{кр} \dots 0,6 \cdot n_{кр}$;

α – кут нахилу осі циліндричного решета в діапазоні $2^\circ \dots 8^\circ$.

Додатковими змінними оптимізації є:

$d_{отв,i}$ – розміри отворів по секціях;

L_i – довжини секцій (при $\Sigma L_i = \text{const}$);

$z_{лон}, h_{лон}, \alpha_{лон}$ – параметри лопатей розпушувачів.

Ймовірність виділення домішок описується рівнянням:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\mu \cdot L_i}$$

де ε – повнота виділення домішок (0,95...0,98);

μ – питомий коефіцієнт інтенсивності сепарації.

Загальна раціональна довжина барабана для $D = 1,0$ м зазвичай становить 3,5...4,5 м. Візьмемо для розрахунку $L_{total} = 4,0$ м.

Секція №1 та №2, де відбувається основне виділення (підсів та дрібні домішки), має функцію найінтенсивнішого процесу просівання дрібної фракції.

Раціональною довжиною є $L_1 = L_2 = 0,8$. При діаметрі 1,0 м площа кожної секції складе:

$$S = \pi \cdot D \cdot L_i = 3,14 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 2,5 \text{ м}^2.$$

Це забезпечує високу пропускну здатність саме там, де концентрація засміченості найвища.

У секції №3 відбувається контрольне очищення – виділення важковідокремлюваних домішок, що мають розміри, близькі до основної культури. Раціональною довжиною є $L_3 = 0,9$ м, і її збільшуємо на 10...15%, щоб компенсувати зниження концентрації домішок (згідно з законом експоненти,

чим менше домішок залишилося, тим довший шлях вони мають пройти для випадкового випадання в отвір).

Секція №4 призначення для калібрування або фінішного очищення, тобто розділення зерна на фракції або остаточного доочищення. Рациональною довжиною при цьому є $L_4 = 0,9$, оскільки вимагає максимального часу контакту для досягнення чистоти 99%.

Секція №5 фіналізує очищення і тут відбувається скальперація, тобто видалення грубих домішок сходом. Ці домішки відокремлюються дуже швидко, тому рациональною довжиною буде $L_5 = 0,6$ м, оскільки великі домішки не можуть пройти крізь отвори та відразу формують «схід».

Проводимо розрахунок для зерноsumіші пшениці, що має параметри:

- основна культура (90%): $d_{осн} = 3,5$ мм;
- дрібна домішка (7%): $d_{дріб} = 1,5$ мм;
- крупна домішка (3%): $d_{вел} = 7,0$ мм.

Вхідна продуктивність: $Q_{вх} = 100$ т/год = 27,8 кг/с.

Розрахунок критичної частоти:

$$n_{кр} = \frac{42,3}{\sqrt{0,5}} = 59,8 \text{ об/хв},$$

робочий режим:

$$n_p = 0,4 \cdot n_{кр} = 24 \text{ об/хв}, \omega = 2,51 \text{ рад/с}.$$

Перфорація секцій: секція 1: $d_1 = 2,2$ мм; секція 2: $d_2 = 2,8$ мм; секція 3: $d_3 = 3,2 \times 20$ мм; секція 4: $d_4 = 3,5 \times 20$ мм; секція 5: $d_5 = 4,2$ мм.

Кут нахилу $\alpha = 4^\circ$.

За наслідками моделювання отримаємо наступні результати:

- дрібне сміття: 95% пройшло в секціях 1-2;
- основна культура: 92% пройшло в секціях 3-4;

- велике сміття: 98% вийшло сходом з секції 5.

Таким чином, загальна ефективність очищення становить $\eta = 98,5\%$, втрати основної культури не перевищують $B = 1,2\%$, час обробки однієї порції склав $t_{заг} = 28$ с.

4.3. Технологічна ефективність розробки

Для об'єктивного порівняння візьмемо за основу стандартний барабанний сепаратор «ЛУЧ» ЗСО 150 (як один із найбільш масових) та оптимізований сепаратор, параметри якого були обґрунтовані вище (діаметр 1,0 м, 5 секцій, змінна довжина секцій та наявність перекидних лопатей).

Порівняння проводиться суто за механіко-технологічними показниками ситового кузова, без урахування повітряно-очисної частини (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Порівняльна характеристика решітних барабанів

Параметр порівняння	Сепаратор «ЛУЧ» ЗСО 150 (ОЛІС)	Оптимізований сепаратор (проект)	Технологічна перевага оптимізації
1	2	3	4
Діаметр барабана (D)	0,8 м	1,0 м	Збільшення активної площі сита на 25% при тій же довжині.
Кількість секцій	4 – 5	5	Можливість більш тонкого фракціонування зерна за один прохід.
Розподіл довжини секцій	Рівномірний (однакові)	Диференційований (збільшення до кінця)	Компенсація експоненціального зниження імовірності просівання.
Внутрішня інтенсифікація	Пасивне перекочування	Активні перекидні лопаті	Руйнування «застійних зон» у шарі зерна, виведення дрібних домішок на поверхню решета.
Кінематичний фактор	Статичний (0,4...0,5)	Адаптивний (0,5...0,6)	Робота на межі критичної швидкості для кращого розшарування вороху.

Параметр порівняння	Сепаратор «ЛУЧ» ЗСО 150 (ОЛІС)	Оптимізований сепаратор (проект)	Технологічна перевага оптимізації
1	2	3	4
Товщина шару зерна (h)	Вища (через менший D)	Нижча (на 15%...20%)	Тонший шар забезпечує швидший доступ кожної зернівки до отворів решета.
Відношення L/D	4,8	4,0	Краща жорсткість вала та компактність при вищій продуктивності.
Ефективність сепарації	96...98%	98,5...99,2%	Досягається за рахунок інтенсифікації та збільшеного часу контакту на фінішних секціях.

Висновок по розділу

На основі проведеного аналізу та моделювання кінематично-геометричних параметрів циліндричного решета можна сформулювати наступні висновки.

Для барабана діаметром $D = 1,0$ м встановлено загальну раціональну довжину 4,0 м. Доведено ефективність диференційованого підходу до довжини секцій: секції №1 та №2 ($L = 0,8$ м) призначені для найінтенсивнішого виведення дрібних домішок; секція №3 ($L = 0,9$ м) забезпечує контрольне очищення важковідокремлюваних домішок; секція №4 ($L = 0,9$ м) фокусується на фінішному калібруванні для досягнення 99% чистоти; секція №5 ($L = 0,6$ м) виконує скальперацію (видалення великих домішок сходом).

Встановлено оптимальну частку живого перерізу решіт у межах $f_{жив,онт} = 0,20...0,30$. Відхилення від цих значень призводить або до низької продуктивності, або до зниження селективності.

За результатами моделювання для зерноsumіші пшениці при завантаженні 100 т/год та робочій частоті 24 об/хв досягнуто високих показників сепарації.

Видалено 95% дрібного сміття, 92% основної культури та 98% крупних домішок. Загальна ефективність очищення становить 98,5% при мінімальних втратах основної культури (1,2%) та тривалості обробки порції 28 с.

Порівняння з поширеним сепаратором «ЛУЧ» ЗСО 150 підтверджує переваги оптимізованого проекту. Застосування активних перекидних лопатей руйнує «застійні зони» у шарі зерна, що пришвидшує доступ часток до решета. Перехід на адаптивний кінематичний фактор (0,5...0,6) дозволяє працювати на межі критичної швидкості для кращого розшарування вороху. Збільшення діаметра барабана до 1,0 м розширює активну площу сита на 25%, а оптимізоване відношення $L/D = 4,0$ забезпечує кращу жорсткість вала та компактність при вищій продуктивності.

Таким чином, запропонована п'ятисекційна схема з диференційованою довжиною секцій та активними розпушувачами забезпечує вищу якість сепарації (98,5%...99,2%) порівняно зі стандартними аналогами.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Забезпечення безпечної експлуатації барабанного сепаратора є комплексним завданням, оскільки обладнання поєднує в собі потужні механічні вузли, що обертаються, електричні компоненти та зони підвищеного запилення.

Наведемо перелік ключових заходів з охорони праці, структурований за основними векторами безпеки.

1. Конструктивна та механічна безпека – основним ризиком барабанних сепараторів є наявність відкритих рухомих частин та інерційність масивного барабана, тому повинні бути передбачені наступні безпекові елементи.

1.1. Захисні огороження. Усі пасові, ланцюгові та зубчасті передачі, а також виступаючі кінці валів повинні бути закриті суцільними або сітчастими металевими кожухами.

1.2. Блокування доступу. Дверцята та оглядові люки сепаратора мають бути обладнані кінцевими вимикачами, які автоматично зупиняють привод при спробі відкриття корпусу під час роботи.

1.3. Контроль вібрації. Оскільки оптимізований режим передбачає роботу на межі критичної швидкості, обов'язковим є встановлення віброгасильних опор та регулярна перевірка дисбалансу барабана.

2. Електробезпека та автоматизація.

2.1. Система екстреної зупинки. Кнопки «СТОП» грибоподібної форми мають бути розташовані як на пульті управління, так і безпосередньо біля завантажувальних і вивантажувальних вузлів.

2.2. Заземлення. Корпус сепаратора, електродвигуни та шафи управління повинні мати надійне заземлення для запобігання ураженню електричним струмом та накопиченню статичної напруги.

2.3. Попереджувальна сигналізація. Перед кожним запуском повинна спрацьовувати звукова та світлова сигналізація, що попереджає персонал про початок руху механізмів.

3. Протипожежна безпека та аспірація. Оскільки робота з зерновими сумішами супроводжується утворенням вибухонебезпечного органічного пилу обов'язковими є наступні заходи.

3.1. Герметичність з'єднань. Місця стикування сепаратора з норіями та самопливними трубами повинні бути ущільнені для запобігання викиду пилу в приміщення.

3.2. Ефективна аспірація. Система аспірації повинна забезпечувати розрядження всередині сепаратора, щоб виключити можливість створення вибухонебезпечної концентрації пилу.

3.3. Вибухозахищене виконання. Електрообладнання та освітлення в зоні встановлення сепаратора повинні відповідати класу вибухонебезпечної зони.

4. Гігієна праці та обслуговування.

4.1. Процес сепарації супроводжується ударами зерна об решета, рівень шуму може перевищувати 80 дБА, що вимагає дотримання відповідних правил і вимог. Персонал зобов'язаний використовувати засоби індивідуального захисту (беруші або навушники).

4.2. Безпека під час заміни решіт. Заміна решітних полотен повинна проводитися виключно при повному знеструмленні агрегата та вивішуванні таблички «Не вмикати! Працюють люди».

4.3. Освітлення. Зони виходу фракцій (від А до L) та оглядові вікна повинні бути якісно освітлені для безпечного візуального контролю процесу.

6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі проведеного наукового обґрунтування параметрів та математичного моделювання п'ятисекційного барабанного сепаратора сформульовано наступні загальні висновки по роботі.

Аналіз світових тенденцій підтвердив необхідність переходу від випадкового до прогнозованого сепарування. Визначено, що одинарний п'ятисекційний барабан є найбільш раціональною схемою, яка поєднує надійність скальператорів із гнучкістю універсальних машин. Запропонована структура дозволяє реалізувати поетапний відбір домішок різного калібру за один технологічний прохід.

За результатами математичного моделювання створено алгоритм, що дозволяє оптимізувати кінематичні параметри, зокрема частоту обертання n і кут встановлення решітного барабана α для конкретних культур. Встановлено, що для барабана радіусом 0,5 м оптимальна частота обертання становить 24 об/хв. Визначено раціональні кути нахилу осі α для забезпечення рівномірності навантаження: 4° для пшениці, 6° для соняшника та 5° для кукурудзи.

Доведено, що встановлення розпушувальних лопатей мінімізує падіння ефективності при роботі з вологим зерном ($W > 16\%$) з 30%...40% до 10%...15%.

Обґрунтовано раціональну довжину барабана 4,0 м ($D = 1,0$ м) з диференційованим розподілом секцій: секції №1 та №2 (довжина 0,8 м кожної) – інтенсивне виведення дрібних домішок; секція №3 (довжиною 0,9 м) – контроль важковідокремлюваних домішок; секція №4 (довжина 0,9 м) – фінішне калібрування до чистоти 99%; секція №5 (довжина 0,6 м) – швидка скальперація великих домішок.

Встановлено оптимальну частку живого перерізу решіт $f_{жив} = 0,20 \dots 0,30$ для забезпечення балансу продуктивності та селективності.

При завантаженні 100 т/год досягнуто загальну ефективність очищення 98,5% при втратах основної культури лише 1,2%.

Порівняно з аналогами, оптимізований сепаратор забезпечує на 25% більшу активну площу решіт та вищу якість сепарації (98,5...99,2%) за рахунок активних лопатей та адаптивного кінематичного фактора (0,5...0,6).

Обґрунтовано комплекс заходів з охорони праці, що враховує механічну безпеку, аспірацію для пилопригнічення та захист від вибухонебезпечних концентрацій органічного пилу.

Запропоновані рішення дозволяють стабілізувати процес очищення та підвищити продуктивність обладнання при збереженні високих якісних показників кінцевого продукту.

Список використаної літератури

1. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, М. Г. Пастушенко. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кіровоград. 2003. Вип. 33. С. 53-61.
2. Машини і обладнання для зберігання та комплексної обробки зерна / А.С. Кобець, Ю.О. Чурсінов, С.А. Черних, М.П. Сабадаш, Н.В. Грекова, В.П. Канунніков – Дніпропетровськ: ДДАУ, 2013. – 766 с.
3. Каталог продукції фірми Bühler. Drum sieve. URL: https://www.buhlergroup.com/global/en/products/drum_sieve.html.
4. Каталог продукції компанії «Olis». Зерноочисне обладнання. URL: <https://www.olis.com.ua/>.
5. Каталог продукції Хорольського механічного заводу. Сепаратори зерноочищувальні. URL: <https://mehzavod.com.ua/ua/>.
6. Каталог продукції компанії «MYSiLO». Обладнання для очищення зерна. URL: <https://mysilo.com.ua/>.
7. Каталог продукції компанії «Grain Cleaning Solution». GCS-1400 Rotary Drum Grain Cleaner. URL: https://gcsgraincleaner.com/gcs_products/gcs-1400-drum-cleaner/.
8. Каталог техніки компанії «ЗСМ ВІМ». Універсальна багатофункціональна зерноочисна машина OBC-355. URL: <https://bim-agritech.com/uk/bagatofunkcionalnyy-zernoochysnyy-separator-ovs-355>.
9. Каталог продукції «3S Company». Барабанні очисники GCU. URL: <https://com3s.com/uk/barabannye-ochistiteli-gcu/>.
10. Каталог продукції фірми Kongskilde. Dual Cleaners – KDC PLUS. URL: <https://kongskilde-industries.com/grain/usa/product/dual-cleaners-kdc-plus/>.
11. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне

- вентилювання, охолодження) : колект. монографія / Котов Б. І. та ін.; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". Київ; Ніжин : Лисенко М. М. [вид.], 2017. 551 с.
12. Topilnytskyu, V., Rebot, D., Sokil, M., Velyka, O., Liaskovska, S., Verkhola, I., Kovalchuk, R., & Dzyubyk, L. (2017). Modeling the dynamics of vibratory separator of the drum type with concentric arrangement of sieves. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7 (86), 26–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.95615>.
 13. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics*. 2019. 10 (4). P. 137-143.
 14. The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer / I.L. Rogovskii, S.P. Stepanenko, A.V. Novitskii, V.I. Rebenko. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 13. pp.1-7.
 15. V. Topilnytskyu and V. Vyshatytskyu, "Developing a mathematical model for describing the motion of a vibratory type separator with sequential screens," *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, vol. 10, no. 1, pp. 70–76, 2024. Doi: <https://doi.org/10.23939/ujmems2024.01.070>.
 16. J. Li, Q. Zeng, J. Deng, H. Shen, and K. Xiong, "Screening process analysis for multi-dimensional parallel vibrating screen and optimization of screen surface movement," *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, Vol. 47, pp. 399–407, 2016, DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020377>.
 17. Алієв Е.Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.
 18. Підручник дослідника : навч. посіб. для студ. агротехн. спец. / О. М. Васильковський, С. М. Лещенко, К. В. Васильковська, Д. І. Петренко. Кіровоград : Мачулін, 2016. 204 с.

19. Васильковський О., Лещенко С., Васильковська К., Петренко Д. Основи наукових досліджень. Перші наукові кроки. : навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. Харків : Мачулін, 2019. 164 с.
20. Самсонов В.В., Сільвестров А.М., Тачиніна О.М. Методологія наукових досліджень та приклади її використання : навч. посібник. Київ : НУХТ, 2022. 385 с.
21. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин / П.М. Заїка. Харків: Око, 2006. 407 с.
22. Рудь Ю.С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. 492 с.
23. Войналович О. В. Охорона праці у сільському господарстві: навч. підруч. Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ: Центр учбової літератури, 2018. 690 с.