

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття ступеня вищої освіти магістр
бакалавр, магістр

на тему: «Інженерно-технологічне обґрунтування режимів роботи трієра при
очистці зернопродуктів від коротких домішок»

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

назва ОПП

спеціальності 133 Галузеве
машинобудування

код та найменування спеціальності

ступеня вищої освіти магістр групи 1
Коваленко Віктор Анатолійович

Прізвище та ініціали здобувача вищої освіти

Керівник: Дідур В. В.

Прізвище та ініціали керівника

Рецензент: Келемеш А. О.

Прізвище та ініціали рецензента

ВСТУП

Аграрний сектор України посідає важливе місце в структурі національної економіки, а результативність його розвитку значною мірою визначається рівнем технічного забезпечення підприємств післязбиральної обробки та зберігання зерна. Стабільні провідні позиції України на світовому ринку зернових культур зумовлюють необхідність забезпечення високої якості зернопродуктів, насамперед за показниками очищення від домішок.

У післязбиральний період зерно надходить на обробку з підвищеним вмістом різноманітних домішок, серед яких особливу небезпеку становлять короткі домішки, близькі за масою та фізико-механічними властивостями до основної культури. Їх наявність погіршує товарні та посівні якості зерна, ускладнює процеси зберігання й переробки та може призводити до зниження виходу готової продукції.

Одним із найефективніших способів відокремлення коротких домішок є трієрна очистка, яка широко застосовується в зерноочисних лініях елеваторів і зернопереробних підприємств. Проте аналіз практики експлуатації трієрів свідчить, що на багатьох підприємствах їхні режими роботи не є оптимальними та часто не враховують особливостей фізико-механічних властивостей зернопродуктів, продуктивності ліній і сучасних вимог до якості очищення.

Невідповідність режимів роботи трієрів призводить до зниження ефективності виділення коротких домішок, збільшення втрат повноцінного зерна, нестабільності процесу очищення та підвищення питомих експлуатаційних витрат. Крім того, відсутність чітко обґрунтованих інженерно-технологічних рекомендацій щодо вибору раціональних режимів роботи ускладнює впровадження трієрів у високопродуктивні технологічні лінії післязбиральної обробки зерна.

З огляду на це, актуальним є проведення інженерно-технологічних досліджень, спрямованих на обґрунтування раціональних режимів роботи трієра при очищенні зернопродуктів від коротких домішок. Це дозволить підвищити якість очищення зерна, зменшити втрати повноцінної продукції, забезпечити стабільність процесу та підвищити ефективність функціонування зерноочисних підприємств у післязбиральний період.

Мета дослідження – підвищення ефективності процесу очищення зернопродуктів від коротких домішок у післязбиральний період шляхом інженерно-технологічного обґрунтування раціональних режимів роботи трієра.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачається вирішення таких завдань:

- провести аналіз сучасних способів очищення зерна від коротких домішок у післязбиральний період;

- дослідити фізико-механічні властивості зернопродуктів і коротких домішок, що впливають на ефективність трієрної очистки;

- проаналізувати конструкцію та принцип дії трієрів, які застосовуються у зерноочисних лініях;

- обґрунтувати вплив основних режимних параметрів трієра на якість очищення зерна;

- встановити раціональні режими роботи трієра, що забезпечують максимальний ступінь виділення коротких домішок за мінімальних втрат повноцінного зерна;

- виконати розрахунок основних технологічних показників процесу трієрної очистки;

- оцінити техніко-економічну ефективність запропонованих режимів роботи трієра.

Об'єкт дослідження – процеси очищення зернопродуктів від коротких домішок у післязбиральний період із застосуванням трієрів.

Предмет дослідження – інженерно-технологічні параметри та режими роботи трієра, що визначають ефективність виділення коротких домішок і втрати повноцінного зерна.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Значення післязбиральної очистки зерна в технологіях зберігання та переробки

Післязбиральна очистка є базовою операцією, яка визначає стабільність зберігання та якість подальшої переробки зерна. Видалення домішок зменшує інтенсивність самозігрівання, розвиток мікрофлори, ураження шкідниками, знижує ризики утворення осередків підвищеної вологості та закупорювання зернових мас у силосах. Для переробних виробництв (борошномельне, круп'яне, комбікормове) очистка є необхідною умовою стабільного технологічного процесу: знижується зношування обладнання, покращуються параметри помелу/лущення, зменшуються втрати основної фракції та підвищується вихід кондиційного продукту.

З технологічної точки зору післязбиральна очистка виконує три ключові функції:

- санітарно-гігієнічну (видалення пилу, органічних домішок, заражених зернівок);
- технологічну (підготовка партії за розміром/формою/щільністю до сушіння, зберігання й переробки);
- економічну (зменшення втрат, енерговитрат, простоїв, витрат на ремонт).

У сучасних потокових лініях очистка реалізується ступенево: попередня (груба) → основна → спеціальна (за потреби: трієрування, каменевідбір, магнітне очищення, калібрування). Саме спеціальна очистка відповідає за домішки, які важко відділяються стандартними методами і суттєво впливають на товарні та технологічні показники зерна.

Характеристика коротких домішок у зернопродуктах

Короткі домішки – це компоненти суміші, що мають меншу довжину (або характерний розмір) порівняно з основною культурою, але часто близькі за масою, щільністю та аеродинамічними властивостями. Вони погано видаляються

решітними та пневматичними машинами і потребують спеціальних методів – насамперед трієрної очистки.

До коротких домішок відносять:

- биті та колоті зернівки основної культури;
- насіння бур'янів (просо куряче, щирія тощо — залежно від регіону);
- зернівки інших культур меншої довжини (у пшениці – домішки ячменю/вівса/просових фракцій; у ячмені – дрібні фракції, биті зернівки тощо);
- мінеральні домішки дрібної фракції (частково) та частинки, що проходять по ширині/товщині.

Негативний вплив коротких домішок:

- погіршення натури, вирівняності, склоподібності (для пшениці);
- зниження виходу крупи/борошна, погіршення зольності, кольору;
- накопичення дрібних фракцій під час сушіння (нерівномірність сушіння, локальні перегріви);
- підвищення пиловиділення й зношування транспортних органів.

З точки зору сепарації короткі домішки складні тим, що відрізняються від зерна переважно геометрією (довжина), а не масою чи аеродинамікою. Тому трієр є найбільш цільовою машиною для їх виділення.

- Огляд обладнання та машин для виділення коротких домішок

1) Решітні (повітряно-решітні) машини

Призначення: попередня/основна очистка за товщиною та шириною (через отвори сит), частково – за аеродинамікою (аспірація).

Переваги: висока продуктивність, універсальність, формування чистої партії перед спеціальною очисткою.

Недоліки щодо коротких домішок: якщо коротка домішка має близьку товщину/ширину, то решітний поділ стає малоефективним; биті зернівки можуть проходити в “корисний” продукт або забивати сита.

Типові вузли: приймальний пристрій, система сит (верхні/нижні), повітряні канали, коливальна система, механізми очищення сит.

Роль у лінії трієрування: забезпечують зменшення загальної засміченості та вирівнювання потоку, знижують навантаження на трієр.

2) Пневмосепаратори (аспіраційні канали, повітряні сепаратори)

Призначення: відділення легких домішок (пил, полова, легке насіння) за аеродинамічними властивостями.

Переваги: добре прибирають легкі домішки, знижують пилове навантаження на машину та поліпшують санітарію.

Недоліки щодо коротких домішок: короткі домішки часто мають близьку швидкість витання, тому повітряний поділ їх не гарантує.

Роль у лінії: підготовка зерна до трієра (зняти легку фракцію, стабілізувати потік).

3) Трієри (циліндричні трієрні машини) – ключова машина для коротких домішок

Призначення: розділення суміші за довжиною: короткі частинки захоплюються комірками трієрного циліндра і відводяться окремо.

Типи за функцією:

- трієр для коротких домішок (відбір коротких частинок);
- трієр для довгих домішок (відбір довгих частинок – овсюг тощо).

Основні конструктивні вузли:

- трієрний циліндр з комірками певного розміру;
- привід і регулювання частоти обертання;
- приймально-розподільний пристрій;
- вивідний жолоб (регулювання положення/кута);
- система видалення домішок та основної фракції;
- (іноді) внутрішні напрямні, шнеки, аспіраційні підключення.

Параметри, що визначають якість виділення коротких домішок:

- розмір і форма комірок (під культуру і домішку);
- частота обертання (впливає на наповнення комірок та момент викиду);
- положення/кут жолоба (відокремлення по траєкторії вильоту);
- подача та рівномірність живлення (перевантаження знижує селективність);

- ступінь заповнення циліндра, довжина робочої зони.

До переваг можна віднести те, що в такий спосіб трієр найкраще розділяє суміші зі слабкою відмінністю за масою/аеродинамікою; підвищує чистоту продукції.

Недоліки/обмеження: чутливість до режимів і завантаження; можливі втрати повноцінного зерна у відходи при невірних налаштуваннях; потреба в попередній очистці.

4) Допоміжні та спеціальні машини, які “працюють разом” з трієром

- Каменевідбірники – вилучають мінеральні домішки (камінці), які можуть пошкоджувати трієр і привід.
- Магнітні сепаратори – видаляють металеві домішки (захист обладнання).
- Калібратори/сортувальники – вирівнюють фракцію перед трієруванням (коли важлива стабільність довжин/розмірів).
- Системи аспірації – знижують запилення, але для коротких домішок є допоміжними.

Для ефективного видалення коротких домішок у післязбиральний період трієр повинен працювати в складі лінії, де:

1. решітно-повітряна машина знімає грубі/легкі домішки і стабілізує потік;
2. трієр виконує точне розділення за довжиною;
3. допоміжні вузли (каміння/магніти) захищають обладнання й стабілізують якість.

Саме тому інженерно-технологічне обґрунтування режимів трієра (частота обертання, подача, положення жолоба, вибір комірок) напряму визначає якість очищення і втрати основної фракції.

1.2. Способи очистки зерна від коротких домішок

Основними зерновими культурами, що вирощуються в Україні, є пшениця та ячмінь, які разом формують переважну частку валового збору зерна. Високі обсяги

виробництва та експорту цих культур зумовлюють підвищені вимоги до якості зернопродуктів, зокрема до рівня їх очищення в післязбиральний період.

Розглядаючи специфіку застосування зерноочисних машин в Україні, слід зазначити, що значна частина зерноочисного обладнання, яке експлуатується на елеваторах і зернопереробних підприємствах, була введена в експлуатацію ще наприкінці ХХ століття. Незважаючи на поступове оновлення матеріально-технічної бази, на багатьох підприємствах і досі використовуються застарілі машини та агрегати, які не повною мірою відповідають сучасним вимогам щодо продуктивності, енергоефективності та якості очищення зерна.

В Україні наявне як вітчизняне, так і імпордне зерноочисне обладнання, однак значна частина сучасних високопродуктивних ліній післязбиральної обробки зерна реалізується із застосуванням іноземних технологій. Одним із прикладів таких рішень є зерноочисні лінії компанії Akyurek Technology, які знаходять застосування на підприємствах різної продуктивності та спеціалізації. Подібні лінії використовуються як для очищення продовольчого зерна, так і для підготовки насіннєвого матеріалу.

Зерновий ворох після збирання врожаю являє собою полікомпонентну суміш, що складається із насіння основної культури, насіння сторонніх культурних і бур'янистих рослин, а також домішок органічного й мінерального походження. Насіння основної культури може містити повноцінні, пошкоджені, щуплі або пусті зернівки, а також зерно у плівках. Неповноцінні зернівки основної культури та зерно інших культур відносять до зернової домішки.

До смітної домішки належать грудки ґрунту, галька, частинки руди та шлаку, фрагменти стебел, остюки, плівки, частини листя, насіння дикорослих (бур'янистих) рослин, а також шкідливі домішки. Смітна домішка, особливо органічного походження, є сприятливим середовищем для розвитку мікроорганізмів, що призводить до прискореного псування зерна під час зберігання.

У зв'язку з цим свіжозібраний зерновий ворох необхідно негайно піддавати післязбиральній очистці, а за підвищеної вологості — сушінню. Залишковий вміст смітної, зернової та важковідокремлюваної домішки істотно впливає на якість готової продукції, яка визначає її ринкову вартість: клас продовольчого зерна та категорію якості насіннєвого матеріалу, що регламентуються відповідними державними стандартами.

Виділення домішкових частинок із зернового вороху ґрунтується на відмінностях їх фізико-механічних властивостей порівняно із зернівками основної культури. Цей принцип лежить в основі роботи різних зерноочисних машин, які здійснюють розділення компонентів за ознаками різниці їх аеродинамічних властивостей, геометричних розмірів, форми, стану поверхні, густини, а також електричних властивостей частинок.

Подальший розвиток способів очищення зерна зумовлений необхідністю підвищення ефективності видалення домішок різного походження та мінімізації втрат повноцінного зерна. Залежно від фізико-механічних властивостей компонентів зернового вороху в зерноочисній техніці застосовують кілька основних методів очищення, які реалізуються відповідними типами машин.

Розділення компонентів зернової суміші, що відрізняються за довжиною частинок, здійснюють за допомогою оберткових рифлених поверхонь. Для реалізації цього способу очищення призначені зерноочисні машини – трієри. Існує кілька конструктивних різновидів трієрів: циліндричні, дискові, лопатеві, стрічкові та гвинтові.

Решітна очистка ґрунтується на відмінностях геометричних розмірів частинок зернової суміші. Розділення здійснюється за шириною та товщиною зернівок шляхом проходження матеріалу через систему решіт із різними розмірами отворів. Решітні та повітряно-решітні машини є основними елементами зерноочисних ліній, оскільки забезпечують виділення як крупних, так і дрібних

домішок. Проте при наявності домішок, близьких за розмірами до зерна основної культури, ефективність решітної очистки знижується.

Технологічний процес очищення зерна в сучасних лініях доцільно поділяти на кілька етапів залежно від призначення готової продукції. Зазвичай розрізняють попередню, первинну та вторинну очистку зерна. Кожен із зазначених етапів включає застосування різних методів і машин, спрямованих на послідовне видалення домішок різного походження та фракційного складу.

На рисунку 1.4 наведено схему технологічних етапів лінії очищення зерна продуктивністю 10 т/год, яка забезпечує повний цикл обробки зернопродуктів — від приймання зерна до його пакування для подальшого зберігання.

Зерновий ворох, що надходить з поля, вивантажується у завантажувальну яму (позиція 1 на рисунку 1.1), що є початковим етапом технологічної лінії. Далі зерноsumіш за допомогою зернової норії (позиція 2) подається до віброситового сепаратора C.SAS-013, який здійснює відокремлення крупних домішок, каміння та рослинних решток. Застосування віброситового сепаратора на даному етапі дозволяє суттєво знизити загальну засміченість зернової маси та підготувати її до подальших, більш точних операцій очищення.

Загальний вигляд віброситового сепаратора та його конструктивно-технологічна схема наведені на рисунку 1.2.

1 – завантажувальна яма; 2 – зернова норія (зерновий елеватор); 3 – віброситовий сепаратор C.SAS-013 з аспіратором і рециркуляцією повітря; 4 – зернова норія; 5 – очисник Excell 208 Turbo Fine Cleaner; 6 – зернова норія; 7 – трієрний блок; 8 – зернова норія; 9 – гравітаційний сепаратор; 10 – зернова норія; 11 – машина для хімічної обробки STL022; 12 – зернова норія; 13 – електронний пакувальний блок; 14 – циклон (пиловловлювальний блок).

А – вхід зерноsumіші; Б – вихід зерноsumіші; В – підключення аспірації; Г – вихідний лоток крупних домішок; Д – вихідний лоток дрібних домішок; Е – сито з великими отворами (верхні сита); Ж – сито з меншими отворами (нижні сита).

Рисунок 1.2 – Вібраційний сепаратор C.SAS-013 та аспіратор з рециркуляцією повітря АРА-150

Сепаратор є машиною попереднього очищення і складається з каменевловлювача, двох ярусів решіт, призначених для відокремлення крупних і дрібних домішок, а також аспіратора з рециркуляцією повітря для видалення основної частини легких домішок.

Вібраційний сепаратор C.SAS-013 призначений для попереднього та первинного очищення зернових культур шляхом поєднання механічного ситового розділення та повітряної сепарації. Зернова суміш подається у приймальну частину машини та рівномірно розподіляється по поверхні сит, які здійснюють коливальні

рухи. У процесі вібрації відбувається розділення матеріалу за геометричними розмірами: крупні домішки затримуються на верхніх ситах, дрібні – проходять крізь нижні сита та відводяться окремими потоками. Одночасно з цим через робочу зону сепаратора здійснюється аспірація повітря, що забезпечує видалення легких домішок і пилу. Використання аспіратора з рециркуляцією повітря дозволяє знизити пилові викиди та підвищити енергоефективність процесу очищення.

Після цього зерновий матеріал за допомогою зернової норії (позиція 4) подається до багатоярусної повітряно-решітної зерноочисної машини первинного очищення Excell 208 Turbo Fine Cleaner (позиція 5), яка оснащена вісьмома решетами загальною площею 24 м² (рисунок 1.6).

Машина виконана у закритому корпусі та обладнана аспіраційною системою, яка містить один витяжний вентилятор у верхній частині машини та два нагнітальні вентилятори в нижній частині. Якість пневмосепарації та решітного очищення зернової суміші регулюється швидкістю обертання вентиляторів і величиною подачі зерна в машину.

На виході з машини Excell 208 Turbo Fine Cleaner зерно має достатньо високий ступінь чистоти, однак, окрім основної культури, ще містить важковідокремлювані домішки, зокрема короткі та довгі бур'янисті домішки, биті та щуплі зернівки основної культури.

Повітряна очистка базується на різниці аеродинамічних властивостей зернівок і домішок. У повітряних каналах або аспіраційних системах під дією повітряного потоку легкі домішки (пил, полова, плівки, легке насіння бур'янів) відокремлюються від основної зернової маси. Цей спосіб широко застосовується на стадіях попередньої та первинної очистки зерна. Його перевагою є висока продуктивність і можливість зниження запиленості технологічних ліній, однак ефективність повітряної очистки щодо домішок, близьких за масою та формою до зерна, є обмеженою.

Відокремлення домішок за допомогою повітряного потоку можливе за наявності різниці аеродинамічних властивостей частинок основної культури та легких домішок, які характеризуються швидкістю обертання – швидкістю повітряного потоку, за якої частинка перебуває у зваженому стані у висхідному потоці.

Принцип роботи зерноочисних машин, що здійснюють розділення компонентів зернової суміші за аеродинамічними властивостями, ґрунтується на подачі зерносуміші у вертикальний, похилий або горизонтальний повітряний потік з подальшим відбором фракцій зернового матеріалу в різних зонах залежно від їхніх фізичних властивостей.

Повітряно-решітні зерноочисні машини, які поєднують способи відокремлення домішкових компонентів за різницею аеродинамічних властивостей і поперечних розмірів частинок зернових сумішей, становлять основу практично всіх технологій очищення зерна. За відсутності у зерновому воросі важковідокремлюваних бур'янистих домішок ці машини забезпечують доведення зерна до кондицій за засміченістю, що пред'являються до продовольчого зерна.

У складі зерноочисних агрегатів сільськогосподарських підприємств найбільшого поширення набули повітряно-решітні машини вітчизняного виробництва (МЗС-25М, ЗВС-20М, ОВС-25С, СВУ60-250, СВП-150-200, СВТ-40, МУЗ-16 та ін.) і зарубіжного виробництва (Petkus K 218, K 531, K 547 та ін.).

Для розділення частинок за товщиною (найменшим розміром зернівки) застосовують решета з видовженими отворами. Для розділення компонентів за шириною частинок (більшим поперечним розміром) використовують решета з круглими отворами.

Для їх виділення зернова суміш за допомогою норії 6 (рисунок 1.4) подається на трієрний блок 7, загальний вигляд і принцип роботи якого наведені на рисунку 1.8.

Трієрний блок ICSLS10020 містить два комірчасті циліндри, розташовані один над одним. У верхній частині встановлено кукольний трієрний циліндр, призначений для виділення коротких домішок, а в нижній — овсюжний циліндр, який відбирає основну культуру у приймальний жолоб, очищуючи її від довгих домішок, що виводяться сходом із циліндра. Регулювання якості трієрної очистки здійснюється шляхом зміни швидкості обертання циліндрів, кутового положення приймального жолоба та величини подачі зерноsumіші.

Після трієрної очистки зерноsumіш за допомогою зернової норії (позиція 8 на рисунку 1.4) подається на гравітаційний сепаратор (позиція 9), який використовується для розділення зерноsumішей однакового розміру залежно від їх густини.

Трієрне та гравітаційне очищення застосовуються під час підготовки насінневого матеріалу, що дозволяє забезпечити високі показники його чистоти та схожості. Далі зерно за допомогою норії (позиція 10 на рисунку 1.4) подається до машини для хімічної обробки STL022, а потім — до електронно керованого пакувального блока.

Для розділення компонентів зернових сумішей, які мають близькі фізико-механічні властивості, але відрізняються формою (наприклад, округле та овальне насіння), застосовують гвинтові гірки або спіральні сепараційні канали (змійки).

Одним із перспективних напрямів розвитку зерноочисної техніки є розділення зернових сумішей за кольоровими властивостями частинок їх компонентів із використанням фотосепараторів. Згідно з даними виробників оптичних сепараторів, чистота продукту після обробки на фотосепараторі може досягати 99,9 %.

Однак значні втрати повноцінного зерна основної культури, а також жорсткі вимоги до мікроклімату в робочому приміщенні фотосепараторів — зокрема щодо рівня запиленості та освітлення — істотно обмежують їх застосування у складі зерноочисних технологій, особливо в умовах сільськогосподарських підприємств.

Пакування насіння здійснюється в мішки масою від 5 до 50 кг залежно від виду насіннєвого матеріалу, після чого продукція направляється на зберігання.

Для запобігання шкідливому впливу пилу на обслуговуючий персонал у технологічній лінії передбачено застосування систем аспірації та пиловловлювання.

1.3 Конструкції та принцип дії циліндричних трієрів

В умовах сільськогосподарських товаровиробників у технологіях післязбиральної доробки зерна, а також на насіннеобробних заводах, млинах, круп'яних заводах і елеваторах, переважно застосовуються циліндричні та значно рідше дискові трієри. Інші типи трієрів широкого практичного застосування не набули.

Циліндричні трієри є одним із основних типів зерноочисних машин, призначених для відокремлення домішок і компонентів зернової суміші, що відрізняються за довжиною частинок. Найбільшого поширення вони набули у технологіях післязбиральної очистки зерна, а також на елеваторах, насіннеобробних заводах, млинах і круп'яних підприємствах.

Основним робочим органом циліндричного трієра є обертовий рифлений циліндр, внутрішня поверхня якого вкрита комірками певної форми та розміру. Розміри комірок підбираються залежно від культури та характеру домішок, що підлягають виділенню. Усередині циліндра розміщується вивідний (приймальний) жолоб, положення якого може регулюватися для зміни умов відбору частинок.

За функціональним призначенням розрізняють два основні типи циліндричних трієрів:

кукільні трієри, призначені для виділення коротких домішок (кукіль, біті зерна, дрібне насіння бур'янів);

вівсюжні трієри, у яких відбувається відокремлення довгих домішок (вівсюг, довгі насінини бур'янів) від зерна основної культури.

Принцип роботи циліндричного трієра полягає в наступному. Зернова суміш подається всередину обертового рифленого циліндра та утворює шар матеріалу, який переміщується вздовж його довжини. Частинки, довжина яких є меншою або співмірною з діаметром комірки, захоплюються комірками та під дією обертання циліндра підіймаються на певний кут. У момент, коли сила тяжіння переважає над силами інерції та тертя, частинка випадає з комірки у вивідний жолоб і далі транспортується з машини, зазвичай за допомогою шнека.

Частинки, довжина яких перевищує розміри комірки, не можуть зайняти в ній стійкого положення. Вони випадають із комірок раніше та не потрапляють у вивідний жолоб, а повертаються у циркулюючий шар зернової суміші та виводяться з трієра сходом. Таким чином забезпечується селективне розділення зерна та домішок за довжиною.

Ефективність роботи циліндричних трієрів визначається сукупністю конструктивних і режимних параметрів, зокрема:

- діаметром і довжиною рфленого циліндра;
- формою та розмірами комірок;
- частотою обертання циліндра;
- положенням вивідного жолоба;
- подачею зернової суміші та рівномірністю її розподілу.

Регулювання зазначених параметрів дозволяє адаптувати роботу трієра до конкретних умов очищення, культури та складу домішок. Саме тому циліндричні трієри залишаються одним із найефективніших і технологічно доцільних засобів виділення коротких домішок у післязбиральних технологіях очищення зерна.

Принцип роботи циліндричного трієра пояснюється на рисунку 1.9.

Зернова суміш подається всередину обертового рифленого циліндра. Зернівки, довжина яких є меншою або співмірною з діаметром комірки, потрапляють у неї та під дією обертання циліндра підіймаються на певний кут. У певний момент руху відбувається урівноваження сил інерції та сили тяжіння, що діють на зернівку, внаслідок чого вона випадає з комірки у вивідний жолоб, після чого за допомогою шнека вивантажується з циліндра.

Довгі частинки, розміри яких перевищують діаметр комірки, не можуть зайняти в ній стійкого положення і випадають з комірки раніше, ніж короткі частинки. При цьому довгі домішки не потрапляють у вивідний жолоб, а повертаються у циркулюючий шар зернової суміші на дні циліндра та виводяться з нього сходом.

Трієр, у якому здійснюється технологічний процес очищення основної культури від коротких насінин бур'янистих рослин і битих зерен, називається кукільним трієром. Трієр, у якому зерно або насіння основної культури очищується від довгих насінин бур'янистих рослин та інших довгих домішок, називається вівсюжним трієром.

У кукільному трієрі комірками захоплюються та виносяться у приймальний жолоб частинки коротких домішок, тоді як у вівсюжному трієрі з комірок виводяться зернівки основної культури.

Трієрна очистка є спеціальним методом розділення зернових сумішей за довжиною частинок. Вона базується на використанні трієрних циліндрів з комірками певного розміру, у які захоплюються зернівки або домішки відповідної довжини. Саме трієрні машини є найбільш ефективними для виділення коротких домішок, таких як биті зернівки, дрібне насіння бур'янів або зернівки інших культур меншої довжини.

Якість трієрної очистки істотно залежить від режимів роботи машини, зокрема швидкості обертання циліндра, положення приймального жолоба та величини подачі зернової суміші, що зумовлює необхідність їх інженерно-технологічного обґрунтування.

Гравітаційна очистка використовується для розділення зерна однакових розмірів, але різної густини. Вона застосовується переважно під час підготовки насінневого матеріалу, коли необхідно відокремити біологічно повноцінне зерно від щуплого та пошкодженого. До спеціальних способів очищення також належать магнітна сепарація, каменевідбір та електростатична очистка, які виконують допоміжну функцію та підвищують загальну якість кінцевої продукції.

Історично розвиток зерноочисної техніки відбувався від простих ручних і механічних пристроїв до складних автоматизованих машин і комплексних ліній. На ранніх етапах використовувалися переважно решітні та повітряні пристрої. Подальший розвиток машинобудування зумовив створення повітряно-решітних машин, які поєднували кілька способів очищення в одному агрегаті. Сучасний етап розвитку зерноочисної техніки характеризується впровадженням високопродуктивних машин із регульованими режимами роботи, автоматизованих систем керування та спеціалізованих апаратів, зокрема трієрів і гравітаційних сепараторів. Це дозволяє адаптувати процес очищення до конкретних культур і

умов виробництва, підвищити якість зернопродуктів і знизити експлуатаційні витрати.

Таким чином, трієрна очистка є важливим і невід’ємним етапом сучасних технологій післязбиральної обробки зерна, особливо у випадках, коли необхідно ефективно відокремити короткі домішки. Це визначає доцільність подальших досліджень, спрямованих на інженерно-технологічне обґрунтування режимів роботи трієра та підвищення ефективності процесу очищення зернопродуктів.

1.4. Аналіз наукових досліджень режимів роботи трієрів

Конструкція трієра у вигляді обертового циліндра з комірками на внутрішній поверхні була запропонована ще в середині XIX століття. Проте перші зразки циліндричних трієрів характеризувалися низькою частотою обертання, значними габаритами, обмеженою продуктивністю та складністю експлуатації, у зв’язку з чим їх використання було обмеженим. Однією з основних технічних проблем на ранніх етапах розвитку залишалася складність виготовлення рифлених циліндрів, оскільки під час формування циліндричної поверхні відбувалося спотворення геометрії та розмірів комірок.

Упродовж XX століття питання підвищення продуктивності трієрів та вдосконалення технології виготовлення їх робочих органів активно досліджувалися багатьма науковцями. Значний внесок у формування теоретичних основ процесів розділення зернових сумішей за геометричними ознаками зробили V. Goryachkin, E. Sitkei, H. Pfost, R. Posner, H. Petkus, а також українські вчені О. М. Василенко, В. М. Булгаков, П. М. Коваленко, М. І. Бахмат, у працях яких розглянуто закономірності руху зернового матеріалу в обертових робочих органах машин післязбиральної обробки.

Сучасна конструкція циліндричного трієра, що включає горизонтально розташований рифлений циліндр, співвісно встановлений вивідний жолоб зі шнеком та електропривод, який забезпечує роботу в оптимальному кінематичному

режимі ($k \approx 0,5-0,75$), сформувалася у першій половині XX століття та з того часу зазнала лише часткових конструктивних змін. Подальші наукові дослідження були зосереджені переважно на оптимізації режимів роботи, формі комірок та підвищенні ефективності процесу сепарації.

Рух зернового матеріалу по внутрішній поверхні рифленого циліндра детально аналізувався в роботах Н. Pfost, R. Kepner, J. Barger, E. Sitkei, де зернівка розглядалася як матеріальна точка з урахуванням дії сил тяжіння, інерції та тертя. Подібні підходи застосовувалися і в дослідженнях українських науковців, які вивчали кінематику зернівок у циркулюючому шарі зерносуміші. Хоча ці моделі мають важливе теоретичне значення, вони не повністю відображають реальні умови роботи трієра, де зернові частинки мають складну форму та взаємодіють між собою в багатокomпонентному потоці.

Значна кількість досліджень була присвячена інтенсифікації роботи трієрів шляхом удосконалення геометрії комірок. У працях Н. Petkus, R. Posner, E. Sitkei, а також сучасних дослідженнях європейських виробників зерноочисного обладнання встановлено, що форма та глибина комірки істотно впливають на умови захоплення, утримання та випадання частинок. Доведено, що наявність плавного переходу між боковими поверхнями та дном комірки забезпечує більш надійну фіксацію коротких домішок і стабільність процесу сепарації.

Окремі дослідження присвячені використанню комірок продовгуватої форми, які забезпечують більш сприятливі умови для орієнтації та випадання зернівок. Це стало основою для створення нових конструкцій рифлених поверхонь, які знайшли застосування у сучасних трієрах провідних світових виробників.

Під час аналізу процесу випадання частинок з комірок розглядаються різні механізми — ковзання, перекидання через край комірки або комбінований характер руху. Запропоновані аналітичні залежності дозволяють описати ці процеси, однак їх практичне використання ускладнюється значною неоднорідністю фізико-механічних властивостей зернових матеріалів.

Окремим напрямом досліджень стали спроби створення трієрів з кінематичним режимом $k > 1$, у яких видалення захоплених частинок здійснюється

примусово, зокрема за рахунок дії повітряного потоку або допоміжних механічних пристроїв. Такі рішення дозволяють інтенсифікувати процес очистки, однак потребують складніших конструктивних рішень і підвищених енергетичних витрат.

У провідних європейських виробників трієрів (indented cylinder) ключовий акцент зроблено на спеціальній формі “кишень/вм’ятин”. Наприклад, PETKUS підкреслює використання спеціальної асиметричної форми комірок, що підвищує точність сортування за довжиною і якість відділення коротких/довгих домішок. У каталогах Akumek зазначено застосування круглих і “краплеподібних” (drop-shaped) комірок залежно від задачі сепарації, що по суті є близьким до ідеї оптимізації геометрії “еліпсоїдних” комірок для стабільнішого захоплення й випадання частинок.

Також Sinfra описує індент-циліндри для розділення за довжиною та можливість роботи “в серії” (кілька циліндрів для різних задач), що фактично є інженерним шляхом підвищення якості (комбінування короткого та довгого відбору).

Науковцями розроблено й досліджено швидкохідний трієр із гнучкою робочою поверхнею та еліпсоїдною формою комірок [53, 126] (рисунок 1.15).

За високої швидкості обертання трієрного циліндра випадання захоплених частинок відбувається примусово внаслідок дії пристрою для очищення рифленої поверхні у вигляді стрижневих штовхачів, розміщених у отворах комірок і оснащених механізмом повернення [10].

Усі спроби створення високошвидкісних трієрів з метою підвищення продуктивності призводять до суттєвого ускладнення та здорожчання конструкції, а також до зниження технологічної надійності роботи трієра. У зв'язку з цим основний резерв підвищення ефективності трієрної очистки зерна доцільно вбачати в обґрунтуванні раціональних параметрів і режимів роботи трієра класичної конструкції.

У результаті теоретичних досліджень [23] авторами виявлено суперечності технологічних процесів у наявних трієрних блоках щодо якості виділення коротких і довгих домішок; теоретично встановлено динаміку виділення коротких домішок трієрною поверхнею.

Авторами також розроблено принципово нове стендове обладнання для дослідження рифлених поверхонь циклічної дії [24], яке забезпечує безперервний інтервально-часовий контроль показників процесу (рис. 1.13).

При цьому з'явилася можливість проводити дослідження процесу без обмеження за часом — до повного виділення домішкового компонента. У розробленні стенда з рифленим циліндром на опорних роликах (рисунок 1.13, г) та приладу для розділення проб зернової суміші і дослідження процесів трієрної очистки (рисунок 1.17, д) брав участь і автор даної дисертаційної роботи [25]. Зазначений прилад був використаний автором дисертації під час експериментальних досліджень процесів трієрної очистки ячменю від коротких домішок.

Дослідженням процесів трієрної очистки значну увагу приділяють європейські, китайські, корейські та єгипетські науковці.

Датські вчені Ole Thomsen Buus, Johannes Ravn Jorgensen та Jens Michael Carstensen досліджували траєкторії руху частинок після їх випадання з комірок трієрного циліндра з використанням високошвидкісної відеозйомки [148]. Основну увагу автори зосередили на визначенні кутів випадання насіння з комірок під час роботи трієра. Об'єктом досліджень був лабораторний трієр Westrup L-AT LAT-0801 з рифленим циліндром довжиною 500 мм і діаметром 400 мм.

Циліндр мав фіксоване положення з нахилом до горизонту під кутом $0,7^\circ$. У дослідженнях використовувалися два циліндри з діаметрами комірок 6,0 мм та 7,0 мм. Частота обертання змінювалася в діапазоні від 26 до 49 об/хв із середнім кроком 2,56 об/хв. Менше значення досліджуваної частоти відповідало кінематичному режиму $k = 0,15$, а більше — $k = 0,54$.

Перед відкритим торцем лабораторного трієра на відстані 2,7 м була встановлена кольорова камера Point Grey Grasshopper GRAS-03K2C-C, яка

забезпечувала швидкість зйомки до 260 кадрів за секунду. Розташування камери дозволяло фіксувати у кадрі верхній правий квадрант окружності трієрного циліндра (рисунок 1.13). Для полегшення візуального контролю процесу приймальний лоток було демонтовано.

Як досліджуваний матеріал автори використали модельовану зернову суміш, що складалася з 50 % цілих і 50 % дроблених зерен ячменю. Маса наважки становила 2 кг. Було зафіксовано 20 послідовностей зображень зі швидкістю 260 кадрів/с — для 10 значень частоти обертання циліндра та двох значень діаметра комірок. Після запису всі послідовності були синхронізовані за однаковим положенням циліндра в першому кадрі та містили 1300 кадрів протягом 5 секунд.

У результаті комп'ютерної обробки зображень було отримано графіки траєкторій руху частинок для всіх умов проведених досліджень. На рисунку 1.19 наведено графіки для шести значень частоти обертання циліндра з комірками діаметром 6,0 мм.

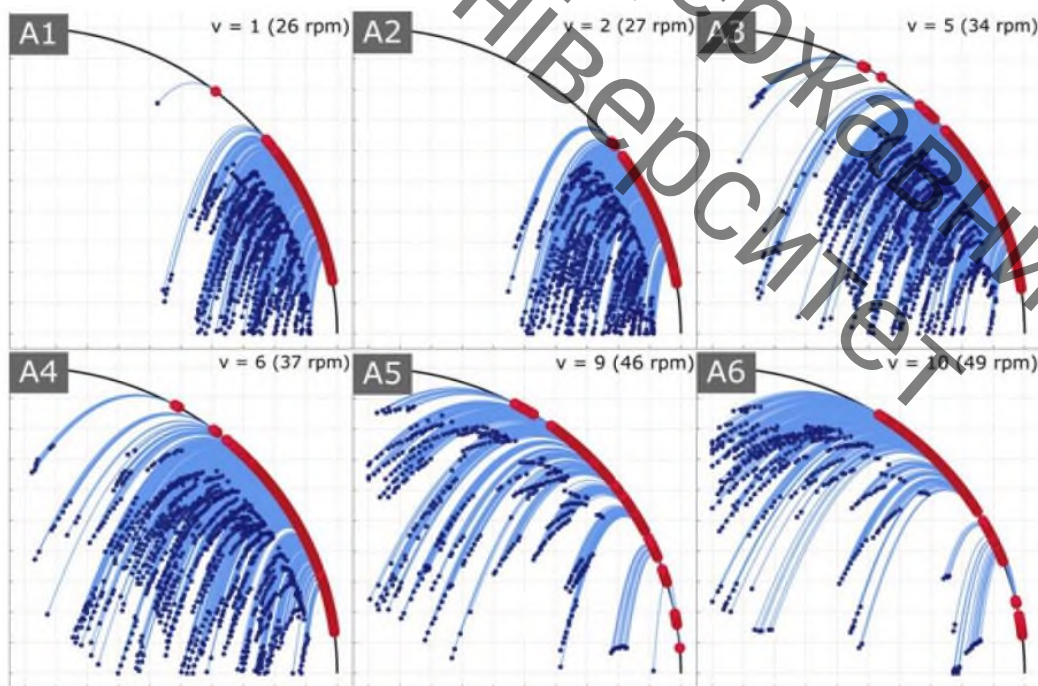


Рисунок 1.14 – Графіки траєкторій руху частинок

Після статистичної обробки результатів досліджень автори встановили,

що сумарні частотні розподіли значень кутів випадання частинок мають вигляд, близький до нормального розподілу.

Угорські науковці Soricà C., Pimă I., Găgeanu P., Marin E., Postelnicu E. здійснили спробу подати якісні параметри робочого процесу циліндричного трієра у вигляді функцій його технологічних параметрів [156]. За основу авторами була прийнята математична модель, запропонована у 1967 році радянським ученим Тіцом З. Л. [95]. Зазначену модель було доопрацьовано, у результаті чого отримано аналітичні залежності для розрахунку якісних показників роботи трієра з урахуванням його геометричних і фізичних параметрів.

Зокрема, авторами запропоновано вираз для визначення взаємозв'язку між відстанню, відлічуваною вздовж основи циліндра від місця подачі зернової суміші, та потоком домішок, що вилучаються.

Експериментальну перевірку запропонованої математичної моделі автори проводили з використанням стендової установки (рисунок 1.22), розробленої Національним інститутом досліджень і розробок машин та установок для сільського господарства і харчової промисловості (INMA, м. Бухарест).

Стендова установка містила рифлений циліндр радіусом 0,125 м і довжиною 0,5 м, електричну панель керування, аналітичні ваги, секундомір та портативний комп'ютер. Експериментальні дослідження проводилися за початкового вмісту домішок у зерновій суміші 1,4 %.

Разом з тим автори не наводять склад домішкового компонента та фізико-механічні властивості його частинок, що ускладнює детальний аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень. Подача зернової суміші становила 0,699 г/с (2,517 т/год), а частота обертання рифленого циліндра змінювалася в діапазоні 20–47 об/хв. Як основний використовувався швидкісний режим з показником кінематичного режиму $k = 0,28$, що відповідало частоті обертання циліндра $n = 45$ об/хв.

Кут нахилу жолоба для збору домішок становив $\alpha = 31^\circ$; однак фіксація цього фактора на одному рівні суттєво обмежує повноту експериментальних досліджень.

Результати експериментальної перевірки підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та можливість її практичного застосування. Автори зазначають, що якість виділення коротких домішок залежить не лише від їх початкового вмісту, а й від величини подачі зернової суміші, хоча кількісної оцінки цього впливу не наведено. Одним із висновків роботи є твердження про еквівалентність якості процесу трієрної очистки матеріалу від коротких домішок у

разі проходження зернової суміші через довгий трієр або багаторазового проходження через короткий трієр.

Висновки до розділу 1

Аналіз сучасного стану зернопереробних підприємств показав, що на багатьох елеваторах та зерноприймальних пунктах експлуатуються технологічні лінії очищення і сушіння зерна, конструктивні рішення яких були розроблені кілька десятиліть тому та не повною мірою відповідають сучасним вимогам енергоефективності, екологічної безпеки й якості післязбиральної обробки зерна.

Встановлено, що, незважаючи на появу нових типів обладнання, базові фізичні принципи процесів очищення, аспірації та сушіння зерна залишаються незмінними. Ключову роль у комбінованих системах відіграють повітряні потоки, які одночасно забезпечують відокремлення легких домішок, транспортування пилу та тепломасообмін під час сушіння зерна.

Продуктивність і якість роботи систем очищення та сушіння зерна суттєво залежать як від конструктивних параметрів обладнання (геометрії аспіраційних каналів, сушильних камер, повітроводів, живильників), так і від властивостей зернового матеріалу, що надходить у технологічну лінію (вологість, засміченість, гранулометричний склад).

Вхідні параметри зернового матеріалу, який подається на сушарку, значною мірою формуються на етапах попереднього та основного очищення. Недостатня ефективність аспірації та нерівномірність подачі зерна призводять до нестабільних режимів сушіння, підвищених енерговитрат і зниження якості готової продукції.

Підвищення ефективності комбінованих систем очищення та сушіння зерна можливе шляхом їх конструктивної модернізації, спрямованої на оптимізацію повітряних трактів, зменшення гідравлічних втрат, стабілізацію швидкості повітря та рівномірності подачі зерна до сушильних і аспіраційних зон.

Зниження травмування зерна, втрат повноцінної продукції та підвищення експлуатаційної надійності обладнання досягається шляхом застосування сучасних конструкційних і зносостійких матеріалів, а також удосконалення вузлів подачі й розподілу зерна в системах очищення та сушіння.

Проведений аналіз підтверджує доцільність розроблення та дослідження удосконаленої комбінованої системи очищення, аспірації та сушіння зерна, що забезпечує підвищення продуктивності, зменшення енерговитрат і поліпшення якості післязбиральної обробки зерна, що й визначає актуальність подальших експериментальних досліджень.

Полтавський державний
аграрний університет

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРІЄРА

2.1 Аналіз роздільності зерна та коротких домішок за довжиною частинок

Дослідження розмірних характеристик проводилися для зернівок таких культур: ячмінь, сорго та вика, які у технологіях післязбиральної обробки зерна можуть виступати як компоненти зернових сумішей або короткі домішки. У процесі досліджень здійснювалося вимірювання довжини, ширини та товщини (найменшого лінійного розміру) частинок.

Для культури ячмінь було визначено лінійні розміри 200 зернівок, а для сорго та вика – по 60 зернівок кожної культури. Такий обсяг вибірки забезпечує достатню репрезентативність результатів і дозволяє коректно оцінити характер розподілу розмірних параметрів досліджуваних матеріалів.

Метою проведених досліджень є встановлення можливості розділення зазначених культур як компонентів зернових сумішей за допомогою відомих робочих органів зерноочисних машин, зокрема трієрів, принцип дії яких ґрунтується на відмінності частинок за довжиною.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

побудувати варіаційні ряди розподілу отриманих значень лінійних розмірів зернівок кожної культури;

сформулювати сумісні варіаційні криві для однойменних ознак (довжини, ширини, товщини);

оцінити можливість розділення культур за кожною з розмірних ознак;

визначити величину неминучих втрат зерна основної культури під час розділення за відповідним параметром (у даному дослідженні – зерна ячменю).

Отримані експериментальні дані щодо лінійних розмірів частинок досліджуваних матеріалів наведені у додатку А.

Найменше значення довжини частинок сорго у досліджуваній вибірці становило 3,6 мм, ширини – 3,0 мм, товщини – 2,0 мм. Найбільше значення довжини частинок сорго становило 4,7 мм, ширини – 3,7 мм, товщини – 2,6 мм.

Для побудови дискретного ранжованого варіаційного ряду довжини зерновок сорго відсортуюмо ряд за зростанням показника та підрахуємо кількість повторень для кожного значення ряду, таблиця 2.1.

Таблиця 2.1 - Варіаційний ряд розподілу довжини частинок сорго

Довжина частинок сорго, x_i	3,6	3,7	3,8	3,9	4	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7
Частота, f_i	2	3	4	6	9	6	9	5	5	4	4	3

Побудуємо полігон розподілу частот цієї ознаки, рисунок 2.1.

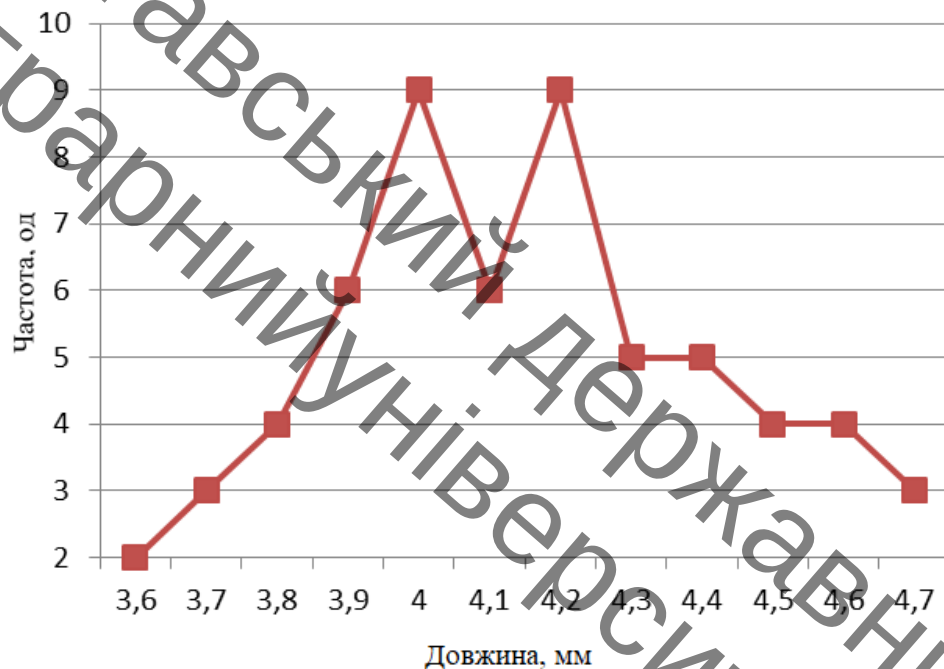


Рисунок 2.1 – Полігон розподілу ознаки довжини частинок сорго

Знайдемо показники центру розподілу та показники варіації: Для цього складемо таблицю з необхідними розрахунковими даними, таблиця 2.2.

Таблиця 2.2 - Дані для розрахунку показників

x_i	Частота, f_i	$x_i \cdot f_i$	Накопичена частота, S	$ x - x_{сеп} ^2 f_i$	$(x - x_{сеп})^2 f_i$	Відносна частота, f_i/f
3,6	2	7,2	2	1,11	0,616	0,033
3,7	3	11,1	5	1,365	0,621	0,05
3,8	4	15,2	9	1,42	0,504	0,067
3,9	6	23,4	15	1,53	0,39	0,1
4	9	36	24	1,395	0,216	0,15
4,1	6	24,6	30	0,33	0,0182	0,1
4,2	9	37,8	39	0,405	0,0182	0,15
4,3	5	21,5	44	0,725	0,105	0,083
4,4	5	22	49	1,225	0,3	0,083
4,5	4	18	53	1,38	0,476	0,067
4,6	4	18,4	57	1,78	0,792	0,067
4,7	3	14,1	60	1,635	0,891	0,05
Итого	60	249,3		14,3	4,949	1

Середня зважена (вибіркова середня) визначається за формулою:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i \times f_i}{\sum f_i}, \quad (2.1)$$

де x – варіант числових значень кількісної ознаки, f_i – абсолютна чисельність окремих варіантів ряду.

$$\bar{x} = \frac{249,3}{60} = 4,2.$$

Існують два показники з однаковим значенням частоти $f = 9$. Ряд має дві моди, тобто. є бімодальним.

Знаходимо медіану, відповідну значенню ряду, при якому накопичена частота буде більшою за $\sum f/2 = 31$. Медіана дорівнює $Me = 4,2$ мм.

Розмах варіації - різниця між максимальним і мінімальним значеннями.
 $R = x_{max} - x_{min} = 4,7 - 3,6 = 1,1$.

Середнє лінійне відхилення визначається за такою формулою:

$$d = \frac{\sum |x_i - \bar{x}| \cdot f_i}{\sum f_i}, \quad (2.2)$$

$$d = \frac{14,3}{60} = 0,2.$$

Дисперсія визначається за такою формулою:

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot f_i}{\sum f_i}, \quad (2.3)$$

$$D = \frac{4,949}{60} = 0,0825.$$

Незмінена оцінка дисперсії:

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot f_i}{\sum f_i - 1}, \quad (2.4)$$

$$S^2 = \frac{4,949}{59} = 0,0839.$$

Середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad (2.5)$$

$$\sigma = \sqrt{0,0825} = 0,287.$$

Оцінка середньоквадратичного відхилення:

$$s = \sqrt{S^2}, \quad (2.6)$$

$$s = \sqrt{0,0839} = 0,29.$$

Коефіцієнт варіації:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}}, \quad v = \frac{0,287}{4,2} \times 100\% = 6,91\% \quad (2.7)$$

Оскільки $v \leq 30\%$, то сукупність однорідна і отриманим результатам можна довіряти.

Лінійний коефіцієнт варіації визначається за такою формулою:

$$K_d = \frac{d}{\bar{x}}, \quad (2.8)$$

$$K_d = \frac{0,2}{4,2} \times 100\% = 4,81\%.$$

Для перевірки гіпотези про розподіл довжини частинок сорго скористаємося критерієм згоди Пірсона [46].

$$K = \sum \frac{(f_i - f_i^*)^2}{f_i^*}, \quad (2.9)$$

де f_i^* - теоретичні частоти:

$$f_i^* = \frac{N \cdot h}{\sigma} \varphi(u_i), \quad u_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \text{ и } \varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (2.10)$$

Тоді:

$$f_i^* = \frac{60 \cdot 0,1}{0,287} \varphi(u_i) = 20,89 \varphi(u_i).$$

Розраховані значення наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Розрахунок теоретичних частот довжини частинок сорго

Номер варіанту (i)	Значення (x_i)	u_i	φ_i	f^*	f (відн)
1	3,6	-1,9326	0,0608	1,27	2,20
2	3,7	-1,5843	0,1127	2,355	4,08
3	3,8	-1,2361	0,1849	3,863	6,70
4	3,9	-0,8879	0,2685	5,61	9,73
5	4	-0,5397	0,3448	7,204	12,49
6	4,1	-0,1915	0,391	8,169	14,17
7	4,2	0,1567	0,3939	8,23	14,27
8	4,3	0,5049	0,3503	7,319	12,69
9	4,4	0,8531	0,2756	5,758	9,99
10	4,5	1,2013	0,1919	4,009	6,95
11	4,6	1,5495	0,12	2,507	4,35
12	4,7	1,8977	0,0656	1,371	2,38

Межа критичної області статистики Пірсона $K_{кр} = \chi^2(k-1; \alpha)$ знаходимо за таблицями розподілу χ^2 [16, 19].

$$K_{кр}(11; 0,05) = 19,67514; K_{спост} = 5,38$$

Значення статистики Пірсона, що спостерігається, не потрапляє в критичну область ($K_{спост} < K_{кр}$), тому немає підстав відкидати гіпотезу про нормальний розподіл вибірки довжини частинок сорго.

Нормальна крива розподілу, побудована спільно з графіком експериментально одержаних частот довжини частинок сорго (у відносних одиницях), представлена на рисунку 2.2.

Дослідження проводилися на попередньо розробленому компактному приладі для розділення проб зерноsumішей та дослідження трієрних процесів. При обґрунтуванні параметрів приладу обрано значення діаметра циліндра $D_{\text{ц}} = 0,3$ м та довжини циліндра $l_{\text{ц}} = 0,3$ м, за яких забезпечується величина кута нахилу днища лотка $\beta = 30^\circ$, що цілком достатньо для безперервного відведення потоку домішок, які надходять у лоток із певною початковою кінетичною енергією. Безперервна інтервальна оцінка дозволить визначити динаміку виділення компонентів домішок.

Загальний вигляд і схема запропонованого приладу наведено на рисунку 2.22.

Прилад працює наступним чином. У комірчастий циліндр 1 завантажують зерноsumіш 7 масою m_c вмикають привідний диск 3. Частинки домішок захоплюються комірками й подаються в лоток 2, прикріплений торцевою стінкою 10 до кронштейну 6 рами 9, і скочуються по похилому днищу 5 лотка 2 в ємність 8. Через рівні інтервали часу, що контролюються за допомогою секундоміра, ємності 8 змінюють.

Після закінчення процесу привід вимикають, знімають стопорне кільце 4 і вивантажують зернівки основної культури.

Для забезпечення порівнянних умов захоплення та викидання частинок домішок у лоток 2 при зміні розмірів комірчастого циліндра 1 необхідно виконати умову кінематичної подібності процесу [4]:

$$K_p = \frac{\omega^2 R}{g} = const \quad (2.11)$$

де K_p – коефіцієнт кінематичного режиму;

ω – кутова швидкість комірчастого циліндра, рад/с;

R – радіус циліндра, м;

g — прискорення вільного падіння, м/с.

Комірчастий циліндр із $R = 0,3$ м забезпечує ефективне виділення компонента домішок при $\omega = 4,2$ с⁻¹ (40 об/хв), коли $K_p = 0,73$. Аналогічні умови перебігу процесу, коли $R = 0,15$ м, згідно з рівнянням (2.11), забезпечуються при $\omega = 5,86$ с⁻¹ (56 об/хв).

Висота сегмента може бути визначена за рівнянням:

$$h = m_n / \alpha R_{\text{ц}} \ell_{\text{ц}} \rho K_{\text{рс}}, \quad (2.12)$$

де ρ — насипна щільність зерноsumіші, кг/м³.

При значеннях маси проб $m_n = 1; 1,5; 2$ кг і характерних для пшениці величинах $\rho = 750$ кг/м³ та коефіцієнті розуцільнення $K_{\text{рс}} = 0,78$, значення h відповідно становитимуть: $h_1 = 24,2$ мм; $h_2 = 36,3$ мм; $h_3 = 48,4$ мм. Тому стопорне кільце з внутрішнім радіусом $r_k = 0,09$ м, коли $R_{\text{ц}} - r_k > h_3$, буде надійно запобігати самовільному витіканню зерноsumіші з циліндра.

Для оцінки динаміки процесу необхідно визначити число циркулюючих шарів у сегменті, а також кількість частинок основної культури та компонента домішок у контактуючому шарі при різних значеннях m_n , h та Z_n . Як компонент домішок прийнято зернівки проса з масою тисячі зернівок $m_{1000\text{пр}} = 0,007$ кг. Діапазон вихідної засміченості прийнято $Z_n = 1; 2$ і 3%, оскільки існуючі трієрні блоки не забезпечують очищення пшениці до залишкової засміченості $Z_o = 0,5\%$ при вихідній засміченості $Z_n > 3\%$.

Тоді кількість шарів у сегментах буде $n_{\text{ш}} = \frac{h}{b}$ (\$b\$ — середній поперечний розмір зернівок основної культури — 3,07 мм):

$$\begin{cases} Z_{n1} = 1\%; & m_{np1} = 1,27 \text{ г}; & n_{np1} = 181 \text{ шт}; \\ Z_{n2} = 2\%; & m_{np2} = 2,54 \text{ г}; & n_{np2} = 362 \text{ шт}; \\ Z_{n3} = 3\%; & m_{np3} = 3,81 \text{ г}; & n_{np3} = 543 \text{ шт}. \end{cases} \quad (2.13)$$

Кількість зернівок основної культури в контактуючих шарах становитиме:

$$n_{cl} = S_c \cdot n_{зпш} = \alpha \cdot R_y \cdot l_y \cdot n_{зпш} = 3168 \text{ шт}, \quad (2.14)$$

де S_c – площа контактуючого шару, m^2 ;

$n_{зпш}$ – кількість зернівок основної культури, що припадає на $1 m^2$ $n_{зпш} = 44840 \text{ шт}/m^2$), $шт/m^2$.

Маса контактуючого шару:

$$m_{cl} = n_{cl} \cdot m_{1000зпш} / 1000 = 126,7 \text{ г}, \quad (2.15)$$

де $m_{1000зпш}$ – маса 1000 зернівок пшениці (40 г), г.

Тоді маса ($m_{пр}$) і кількість частинок домішок ($n_{пр}$) у контактуючих шарах при різних значеннях $З_{и}$ становитимуть:

$$\begin{cases} З_{и1} = 1\%; m_{пр1} = 1,27 \text{ г}; n_{пр1} = 181 \text{ шт}; \\ З_{и2} = 2\%; m_{пр2} = 2,54 \text{ г}; n_{пр2} = 362 \text{ шт}; \\ З_{и3} = 3\%; m_{пр3} = 3,81 \text{ г}; n_{пр3} = 543 \text{ шт}. \end{cases} \quad (2.16)$$

Для оцінки динаміки виділення частинок домішок необхідно зіставити величину $n_{прmax} = 543 \text{ шт.}$ із кількістю комірок, що взаємодіють із контактуючим шаром у першому циклі виділення n_k . Якщо $n_k < n_{прmax}$, то крива інтенсивності виділення частинок домішок міститиме горизонтальну ділянку протягом декількох циклів – до вирівнювання $n_{прi}$ з n_k . Якщо $n_k > n_{прmax}$, то крива інтенсивності виділення частинок домішок буде безперервно спадною з 1-го циклу.

Кількість $n_{яц}$ визначається за рівнянням:

$$n_{яц} = S_y \cdot n_{цп} = \pi D_y l_y n_{цп} = 6840 \text{ шт}, \quad (2.17)$$

де $n_{цп}$ – щільність розміщення комірок на циліндрі, $шт./m^2$.

Порівняння $n_{яц}$ з $n_{прmax}$ дозволяє стверджувати, що крива інтенсивності виділення частинок домішок буде безперервно спадною.

Розрахунки взаємозв'язків поточної залишкової засміченості з кількістю циклів виділення ($N_{ц}$) і часом використання приладу (t_p) проводили за розробленим нами алгоритмом та рівнянням [21]:

$$Z_{i+1} = Z_{II} \left(1 - \sum_1^{i+1} n_{np_i} / P \right), \quad (2.18)$$

де Z_{i+1} – засміченість зерноsumіші після $(i+1)$ -го циклу, %;

n_{np_i} – кількість частинок домішок, виділених у i -му циклі, шт;

P – початкова кількість частинок у сегменті, шт.

Як приклад виконаємо розрахунки інтенсивності виділення частинок домішок для вихідних умов: $m_n = 1$ кг; $Z_{II} = 3\%$; $P = n_{np} p_i = 4290$ шт.

Результати розрахунків представлені в таблиці 2.4. У таблиці 2.4 наведено розрахунки динаміки виділення компонента домішок із зерноsumіші за 40 циклів. Ця кількість циклів є порівнянною з умовами роботи стандартних трієрних блоків при робочій довжині комірчастих циліндрів 2,25 м та осьовому зміщенні умовного сегмента на 53-63 мм за цикл (за один оберт комірчастого циліндра) [21].

Таблиця 2.4 — Динаміка виділення коротких домішок із зерноsumішей

Кратність виділення із сегмента, (N)	Кількість шарів $n_{ск} = 7,9$ Початкова засміченість зерноsumіші $Z_{II} = 3\%$ Кількість частинок домішок у сегменті $P = 4290$			
	n_{np_i} , шт	Z_i , шт	P_i , шт	$\sum_1^i n_{np}$
1	543	2,62	3747	543
2	471	2,29	3273	1017
3	414	2,0	2859	1431
4	362	1,75	2497	1793
5	316	1,53	2181	2109
6	276	1,33	1905	2385
7	241	1,16	1664	2626
8	211	1,02	1453	2837
9	184	0,89	1269	3021
10	161	0,78	1108	3182
11	140	0,68	968	3322
12	123	0,59	845	3445
13	107	0,52	738	3552
14	93	0,45	645	3645
15	82	0,39	563	3727
16	71	0,34	492	3798
17	62	0,30	430	3860
18	54	0,26	376	3914

Кратність виділення із сегмента, (N)	Кількість шарів $n_{ск} = 7,9$ Початкова засміченість зерноsumіші $Зи = 3\%$ Кількість частинок домішок у сегменті $P = 4290$			
	n_{np_i} , шт	$З_i$, шт	P_i , шт	$\sum_1^i n_{np}$
19	48	0,23	328	3962
20	42	0,20	286	4004
21	36	0,175	250	4040
22	32	0,15	218	4072
23	28	0,13	190	4100
24	24	0,12	166	4124
25	21	0,10	145	4145
26	18	0,009	127	4163
27	16	0,078	111	4179
28	14	0,068	97	4193
29	12	0,059	85	4205
30	11	0,052	74	4216
31	9	0,045	65	4225
32	8	0,040	57	4233
33	7	0,035	50	4240
34	6	0,031	44	4246
35	6	0,027	38	4252
36	5	0,023	33	4257
37	4	0,020	29	4261
38	4	0,018	25	4265
39	3	0,015	22	4268
40	3	0,013	19	4271

Графічно теоретична динаміка виділення коротких домішок представлена на рисунку 2.3.

Рисунок 2.3 — Теоретична динаміка виділення коротких домішок

Обґрунтовані габарити комірчастого циліндра ($D_{\text{ц}} = 0,3$ м, $l_{\text{ц}} = 0,3$ м) та кут нахилу лотка $\beta = 30^\circ$ забезпечують роботу приладу з пробами масою 1-2 кг, коли висота сегмента становить 0,024 - 0,048 м. Внутрішній діаметр стопорного кільця, що дорівнює 0,18 м, запобігає самовільному витіканню зерноsumіші з комірчастого циліндра. Встановлена теоретична динаміка виділення короткої домішки є безперервно спадною.

2.3 Вплив режимних параметрів на процес очистки

Процес трієрної очистки зернопродуктів від коротких домішок визначається складною взаємодією зернової суміші з ячеїстою поверхнею обертового циліндра. Основними режимними параметрами, що безпосередньо впливають на якість і ефективність розділення, є частота обертання трієрного циліндра, величина подачі зерноsumіші, а також положення і кут нахилу вивідного жолоба.

Частота обертання трієрного циліндра визначає кінематичний режим його роботи та умови захоплення і випадання частинок з ячеек. За низьких значень

частоти обертання інтенсивність захоплення коротких домішок є недостатньою, що призводить до зниження повноти їх виділення. Зі збільшенням частоти обертання підвищується кількість частинок, які потрапляють у ячейки, та зростає швидкість їх транспортування до вивідного жолоба.

Разом з тим надмірне збільшення частоти обертання призводить до передчасного випадання частинок з ячеек, погіршення селективності процесу та зростання втрат зерна основної культури. Таким чином, для кожної культури та складу зерноsumіші існує раціональний діапазон частоти обертання, за якого забезпечується оптимальне співвідношення між якістю очистки та продуктивністю трієра.

Величина подачі зерноsumіші істотно впливає на формування шару матеріалу всередині циліндра та умови його циркуляції. За малої подачі трієр працює нестабільно, що знижує продуктивність установки. За надмірної подачі відбувається перевантаження ячеїстої поверхні, ускладнюється захоплення коротких домішок і зростає ймовірність їхнього проходження разом із зерном основної культури.

Властивості колотих зернівок збігаються з властивостями частинок основної культури за винятком їхньої довжини ($l = 5,1$ мм). Цей варіант зерноsumіші є унікальним – інтенсивність виділення компонента домішок не залежить від його сегрегації в циркулюючих шарах сегмента, оскільки її немає – відсутнє «осадження» та «спливання», рисунок 2.4. Динаміка інтенсивності виділення колотих зернівок ячменю, представлена на рисунку 2.4, близька до теоретичної – рівномірно спадної, коли закономірність отримана з умов: частинки домішок у циркулюючих шарах розподіляються рівномірно; вміст частинок домішок у циркулюючому сегменті зменшується зі спадною інтенсивністю; частинки домішок, що знаходяться в контактуючому шарі, виділяються за 1 цикл повністю через багаторазове перевищення сепаруючих впливів у кукільному циліндрі відносно реальної кількості частинок домішок у контактуючому шарі.

Рисунок 2.4 — Динаміка виділення частинок колотого ячменю із зерноsumіші при $n = 40$ об/хв і $\gamma_n = 35^\circ$.

Для сформульованих умов аналітичної оцінки динаміки виділення частинок домішок із зерноsumіші справедливим є рівняння:

$$Z_i = Z_n \left(1 - \sum_{j=1}^{i=K} n_{\text{чп}i} / P \right), \quad (2.18)$$

де Z_i — засміченість сегмента після i -го циклу виділення домішки, %;

Z_n — вихідна засміченість зерноsumіші, %;

K — кількість циклів виділення, шт;

$n_{\text{чп}i}$ — кількість частинок домішок, виділених у i -му циклі, шт;

P — початкова кількість частинок домішок у сегменті, шт.

За аналогією з рівнянням (2.18) для процесу виділення частинок домішок з інтервальною за часом оцінкою виділених мас у i -му інтервалі можна записати:

$$Z_i = Z_n \left(1 - \sum_{j=1}^{j=K} m_j / M \right), \quad (2.19)$$

де m_j — маса домішок, виділених із сегмента в j -му часовому інтервалі, г;

M — початкова маса домішок у сегменті, г.

Аналіз динаміки виділення колотих зернівок ячменю за формулою (2.19) дозволив установити, що залишкова засміченість зерноsumіші навіть після закінчення часу 100 с, який у 1,8 раза перевищує тривалість процесу в стандартному кукільному циліндрі, становить 0,42%. Це вище за допустимі значення навіть при $Z_{\text{и}} = 1\%$. На стандартній довжині комірчастого циліндра залишкова засміченість є ще вищою ($Z_0 = 0,504\%$) при ступені виділення $C_{\text{вст}} = 49,6\%$.

Очищення зерноsumіші з колотими зернівками ячменю із $Z_{\text{и}} = 2\%$ забезпечує порівнянні значення ступеня виділення домішок за час процесу в стандартному кукільному циліндрі – $C_{\text{вст}} = 48\%$; наприкінці періоду $t = 100$ с ступінь виділення $C_{\text{в}} \sim 58\%$ в обох варіантах вихідної засміченості – у першому $C_{\text{в}} = 58,4\%$, а в другому $C_{\text{в}} = 57,9\%$. Однак залишкова засміченість зерноsumіші при $Z_{\text{и}} = 2\%$ становить 1,04%, що приблизно у 2 рази вище, ніж у першому випадку – при $Z_{\text{и}} = 1\%$.

У цьому полягає принципова відмінність зерноsumішей із колотими частинками основної культури від зерноsumішей із легковиділюваними домішками (насінням гірчиці, проса, сорго, вики). У перших відсутній ефект динамічної сегрегації, і процес виділення домішок затягується, а в других – вихідна концентрація компонентів домішок ($Z_{\text{и}}$) визначає потенціал динамічної сегрегації та тривалість їх виділення, яка практично не залежить від величини $Z_{\text{и}}$.

Оцінка динаміки процесу виділення колотих зернівок ячменю із зерноsumіші за періоди часу (55 і 100 с) підтвердила порівнянність значень $C_{\text{вст}}$ і $C_{\text{в}}$ незалежно від $Z_{\text{и}}$. Однак із рисунка 4.1 можна помітити, що на початкових інтервалах часу замірів співвідношення абсолютних значень виділених мас домішок < 2 . Це пояснюється переважанням ефекту «виїдання» частинок домішок із комірок на зазначених проміжках часу перебігу процесу при $Z_{\text{и}} = 2\%$ порівняно з умовами, коли $Z_{\text{и}} = 1\%$.

Взаємозв'язок динаміки виділення колотих зернівок ячменю з основної культури зі швидкісним режимом роботи представлено на рисунку 2.5. Із рисунка 2.5 видно, що приріст маси виділеного компонента домішок із

зерноsumіші за перший інтервал часу $t = 10$ с зі збільшенням n від 40 до 55 об/хв склав 241%.

У наступних інтервалах часу перебігу процесу співвідношення мас, що виділяються, [змінюється/стабілізується]. Значна різниця m_i у першому інтервалі при максимальному збільшенні швидкісного режиму роботи пояснюється зростанням повноти охоплення факела викидання частинок домішок кромками вивідного лотка. Однак, навіть при $n = 55$ об/хв і $\gamma_n = 35^\circ$ за $t = 100$ с частинки домішок виділяються із зерноsumіші лише на 89%. Пояснюється це тим, що середня довжина частинок домішок ($l = 5,1$ мм) перевищує розмір комірок. При цьому збільшується ймовірність раннього випадання частинок із комірок і розширення кута охоплення факела їх викидання. Ефект інерційного утримання частинок зі зростанням n не дозволяє компенсувати розширення факела викидання через їхні лінійні розміри.

з основної культури зі швидкістю (n) обертання комірчастого барабана при $\gamma_n=35^\circ$; $m_n=1000$ г; $3_{\text{и}}=2$ %

Рисунок 2.6 – Взаємозв'язок динаміки виділення колотих зернівок ячменю з основної культури зі швидкістю (n) обертання комірчастого барабана при $\gamma_n=55^\circ$; $m_n=1000$ г; $z_n=2\%$

Збільшення швидкісного режиму лише до 50 об/хв призводить до зростання маси виділених домішок у першому інтервалі часу $t=30$ с у 6,44 раза (від 0,86 до 5,54 г). При $\gamma_n=55^\circ$ та $n=40$ об/хв вивідний лоток захоплює верхню частину факела викидання частинок комірками – незначну за кутом охоплення. Очевидно, що швидкісний режим роботи $n=40$ об/хв при $\gamma_n=55^\circ$ є недостатнім. Тому на стандартній довжині комірчастого циліндра виділяється лише 7,1% маси домішки. За період часу $t=180$ с, що еквівалентно перебігу процесу в комірчастому циліндрі завдовжки 7,2 м, виділяється 24,6% домішок. Зі зростанням n до 50 об/хв ступінь виділення домішок підвищується незначно. На стандартній довжині ($l=2,2$ м) комірчастого циліндра вона склала 20,4% при $z_{\text{ост}}=1,593\%$, що не задовольняє вимогам до якості процесу.

Слід зазначити, що стендовому швидкісному режиму роботи $n=40$ об/хв відповідають режим роботи натурального комірчастого циліндра $n_n=28,3$ об/хв та коефіцієнт кінематичного режиму $k_1=0,268$. Це нижня межа швидкісного режиму

роботи натурального трієра. Однак і при $n=50$ об/хв $n_n=35,4$ об/хв; $k_3=0,419$) необхідна ступінь виділення колотих зернівок ячменю не досягається.

Оптимальна подача забезпечує формування рівномірного циркулюючого шару зерноsumіші, що сприяє стабільному захопленню частинок ячейками та підвищенню ефективності трієрної очистки.

Положення та кут нахилу вивідного жолоба визначають момент і умови випадання частинок з ячeyок. Зміна положення жолоба дозволяє регулювати межу між частинками, що потрапляють у відбір коротких домішок, і тими, що повертаються у циркулюючий шар зерноsumіші.

Таблиця 2.5 – Взаємозв'язок технологічних втрат (D) з n та γ_n при $Z_n = 2\%$ і $m_n = 1000$ г

№ п/п	Кут підйому лотка (γ_n), град.	Частота обертання циліндра (n), об/хв	Втрати зернівок на l_{ct} , шт.	Втрати за 20 інтервалів, шт.	Величина інтервалу часу замірів, с	Тривалість дослідів, с
1	2	3	4	5	6	7
1	35	40	15	26	5	100
2	45	40	13	25	10	200
3	55	40	8	71	15	300
4	35	45	14	27	5	100
5	45	45	7	41	10	200
6	55	45	16	56	15	300
7	35	50	30	44	5	100
8	45	50	33	86	10	200
9	55	50	9	91	15	300
10	35	55	75	122	5	100
11	45	55	24	80	10	200
12	55	55	11	49	15	300

Із таблиці 4.3 видно, що зі збільшенням початкової засміченості до $Z_n=2\%$ при $\gamma_n=35^\circ$ та $n=40$ об/хв технологічні втрати зросли на 67%. Зі зростанням γ_n до 55° вони знижуються на стандартній довжині комірчастої поверхні $l_{ct}=2,2$ м до 8 зернівок основної культури. Зі збільшенням тривалості дослідів до $t=300$ с, що еквівалентно довжині комірчастої поверхні $l_{ckb}=12$ м, технологічні втрати

нелінійно зросли до 71 зернівки основної культури. У частковому співвідношенні вони становлять:

$$\begin{aligned} \Pi &= (m_{1000} \cdot n_{\text{зя}}/1000) / m_{\text{н}} \cdot 100\% = (51,3 \cdot 71/1000)/1000 \cdot 100 = \\ &= 0,364\%, \end{aligned} \quad (2.20)$$

де Π – технологічні втрати, %; m_{1000} — маса 1000 зернівок ячменю (51,3 г), г; $n_{\text{зя}}$ – кількість виділених зернівок ячменю, шт.; $m_{\text{н}}$ – маса зерноsumіші в циліндрі стенда, г.

Отриманий результат (Π) потрібно співвідносити з основним показником технологічного процесу – залишковою засміченістю ($З_0$). Попри тривалість процесу $t=300$ с і величину $l_{\text{скв}}=12$ м, вимоги щодо залишкової засміченості зерна при $n=40$ об/хв і $\gamma_n=55^\circ$ не забезпечені – виділено $C_B=24,6\%$ (4,91 г), а залишилося 15,09 г $\rightarrow З_0=1,509\%$ при $З_{\text{н}}=2\%$. Звідси впливає: технологічні втрати при забезпеченні вимог до $З_0$ із заданими вище n та γ_n і тривалістю процесу будуть ще більшими; для забезпечення $З_0$ необхідно зменшити γ_n до 35° , а швидкісний режим роботи обирати за компромісним значенням інтегрального показника якості

$$K = B_{\Pi} \Pi + B_{З_0} З_0 \rightarrow \min, \quad (2.21)$$

де B_{Π} – вагомість показника технологічних втрат;

$B_{З_0}$ – вагомість показника залишкової засміченості зерна. Швидкісний режим роботи трієра суттєво впливає на технологічні втрати. Так, зі зростанням n від 40 до 55 об/хв технологічні втрати при $\gamma_n=35^\circ$ збільшилися в 5 разів – $n_{\text{зя}}=75$ шт. замість 15 шт. Можливості скорочення Π на високих швидкісних режимах роботи (n) пов'язані зі збільшенням γ_n .

Наприклад, зі збільшенням γ_n від 35° до 45° при $n=55$ об/хв технологічні втрати на стандартній довжині комірчастого циліндра падають у 3 рази, а зі збільшенням γ_n до 55° - у 7 разів. Однак при цьому різко знижується ступінь

виділення колотих зернівок ячменю через їх нестійке розміщення в комірках кукулярного циліндра.

Неправильне положення жолоба може призвести до підвищених втрат зерна основної культури або, навпаки, до неповного виділення коротких домішок. Тому вибір раціонального положення жолоба є одним із ключових чинників забезпечення високої якості трієрної очистки.

Таким чином, процес трієрної очистки зернопродуктів від коротких домішок є результатом спільного впливу частоти обертання циліндра, подачі зерносуміші та положення вивідного жолоба. Зміна одного з параметрів неминує впливає на оптимальні значення інших, що зумовлює необхідність комплексного обґрунтування режимів роботи трієра. Саме встановлення таких раціональних режимів дозволяє забезпечити високу якість очистки зерна за мінімальних втрат основної культури та стабільної роботи обладнання

2.4 Обґрунтування раціональних режимів роботи трієра

Раціональні режими роботи трієра мають забезпечувати максимальну повноту виділення коротких домішок за мінімальних втрат зерна основної культури, стабільної продуктивності та надійної роботи обладнання. Обґрунтування таких режимів базується на узагальненні результатів аналізу роздільності зерна і домішок за довжиною частинок (підрозділ 2.1), кінематики руху частинок у ячеїстому циліндрі (підрозділ 2.2) та впливу режимних параметрів на процес очистки (підрозділ 2.3).

Частота обертання циліндра визначає кінематичний режим роботи трієра та умови захоплення частинок ячейками. З урахуванням теоретичних положень і результатів попередніх досліджень, доцільним є вибір такого діапазону частот, за якого короткі домішки надійно захоплюються комірками, а зернівки основної культури не мають стійкого положення в ячейках.

За занижених значень частоти обертання інтенсивність захоплення коротких домішок є недостатньою, що призводить до зниження повноти їх

виділення. Надмірне збільшення частоти обертання спричиняє передчасне випадання частинок, зростання втрат зерна основної культури та погіршення селективності процесу. Отже, раціональний діапазон частоти обертання визначається як компроміс між якістю очистки та продуктивністю трієра і підлягає подальшому уточненню експериментальним шляхом.

Кут γ_n є критичним параметром, що визначає, яку частину «факела викидання» захопить лоток.

- При $\gamma_n = 35^\circ$: Забезпечується максимальний ступінь виділення домішок (зокрема колотого ячменю), оскільки лоток захоплює більшу частину траєкторії випадіння часток. Проте це призводить до зростання технологічних втрат.
- При $\gamma_n = 55^\circ$: Технологічні втрати мінімальні, але ступінь виділення колотих зернівок різко падає (до 7–20%), оскільки вони випадають із комірок раніше, ніж лоток зможе їх підхопити.
- Раціональне рішення: Для важковиділюваних домішок (колоте зерно) доцільно підтримувати нижчі значення кута $\gamma_n \sim 35 - 45^\circ$

Подача зерноsumіші істотно впливає на формування циркулюючого шару матеріалу в ячеїстому циліндрі. За оптимальної подачі забезпечується рівномірний розподіл зернового матеріалу по внутрішній поверхні циліндра, що створює сприятливі умови для стабільного захоплення коротких домішок.

Частота обертання впливає на відцентрову силу, яка утримує зерно в комірках.

- Нижня межа ($n \sim 40$ об/хв): Недостатня для інерційного утримання довгих часток, що призводить до їх раннього випадання і низької ефективності виділення.
- Верхня межа ($n = 55$ об/хв): Значно підвищує продуктивність у перші секунди процесу, але призводить до критичного зростання втрат основної культури (у 5 разів порівняно з $n = 40$ об/хв).
- Кінематичний показник: Для натурних машин раціональним є режим, що відповідає коефіцієнту $k = 0,3 - 0,4$.

Перевищення раціональної подачі призводить до перевантаження ячеїстої поверхні, погіршення умов селекції та збільшення частки домішок, що проходять разом із зерном основної культури. Занадто мала подача, навпаки, знижує продуктивність трієра та ефективність використання обладнання. Тому величина подачі повинна узгоджуватися з частотою обертання циліндра та його геометричними параметрами.

Положення і кут нахилу вивідного жолоба визначають момент випадання частинок з ячеек і межу між фракціями, що відбираються та повертаються у циркулюючий шар зерноsumіші. Раціональне положення жолоба повинно забезпечувати селективний відбір коротких домішок без захоплення зернівок основної культури.

Зміна положення жолоба є ефективним засобом оперативного регулювання якості трієрної очистки в умовах змінного складу зерноsumіші. Водночас фіксація цього параметра без урахування інших режимних факторів обмежує можливості оптимізації процесу, що підтверджує необхідність його комплексного врахування.

Комплексний показник якості (K)

Оскільки покращення одного параметра призводить до погіршення іншого, вибір режиму має базуватися на мінімізації цільової функції (рівняння 2.20):

- Якщо пріоритетом є насіннєвий матеріал, вагомість B_{30} збільшується (вимоги до чистоти вищі).
- Якщо очищується товарне зерно, збільшується вагомість B_{Π} (важливо зберегти масу продукту).

Таким чином, раціональні режими роботи трієра формуються в результаті узгодження частоти обертання циліндра, величини подачі зерноsumіші та положення вивідного жолоба. Оптимізація кожного з параметрів окремо не забезпечує максимальної ефективності процесу, тоді як їх спільний вплив визначає якість трієрної очистки та рівень втрат зерна основної культури.

Отримані теоретичні положення слугують основою для постановки та проведення експериментальних досліджень, спрямованих на кількісне визначення раціональних режимів роботи трієра під час очищення зернопродуктів від коротких домішок.

Висновки до розділу 2

Теоретичні дослідження дозволили глибше зрозуміти закономірності процесу трієрної очистки та сформувані науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору режимних параметрів.

Частота обертання циліндра є визначальним фактором у формуванні траєкторії руху частинок. При надмірному збільшенні швидкості виникає інтенсивне захоплення не лише коротких домішок, але й повноцінного зерна, що призводить до технологічних втрат. Занадто низька швидкість, навпаки, знижує ймовірність потрапляння домішок у комірки, що погіршує якість очищення. Таким чином, оптимальний діапазон швидкостей має забезпечувати селективність процесу без перевантаження системи.

Подача зерноsumіші повинна бути узгоджена з геометрією та довжиною циліндра. Надмірна подача спричиняє перевантаження робочої поверхні, зниження селективності та нерівномірність розділення. Оптимальний рівень подачі забезпечує стабільність процесу та рівномірне наповнення комірок.

Положення вивідного жолоба визначає момент відділення частинок і баланс між якістю очищення та втратами зерна. Зміна кута жолоба дозволяє регулювати траєкторію випадання частинок, що є ключовим для досягнення високої точності відбору.

Взаємодія параметрів: ефективність трієрної очистки формується не окремим впливом кожного параметра, а їх комплексною взаємодією. Лише

узгоджене регулювання частоти обертання, подачі та кута жолоба забезпечує оптимальний режим роботи.

Практичне значення: результати теоретичного аналізу створюють основу для подальших експериментальних досліджень, спрямованих на уточнення діапазонів параметрів для різних культур і типів домішок. Це дозволяє перейти від загальних рекомендацій до конкретних інженерно-технологічних рішень.

Полтавський державний
аграрний університет

РОЗДІЛ 3.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Мета і завдання експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження виконувались з метою перевірки теоретичних положень, отриманих у попередньому розділі, та обґрунтування раціональних режимів роботи трієра під час очищення зернопродуктів від коротких домішок у післязбиральний період.

Метою експериментальних досліджень є визначення впливу основних режимних параметрів роботи трієра на показники якості процесу очищення зерна від коротких домішок, а також встановлення їх раціональних значень, що забезпечують високу повноту виділення домішок за мінімальних втрат зерна основної культури.

Завдання експериментальних досліджень

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено виконання таких завдань:

експериментально дослідити процес трієрної очистки зернопродуктів від коротких домішок;

встановити вплив частоти обертання ячеїстого циліндра на повноту виділення коротких домішок та втрати зерна основної культури;

визначити вплив величини подачі зерносуміші на якість і стабільність процесу трієрної очистки;

дослідити вплив положення та кута нахилу вивідного жолоба на показники селективності розділення;

встановити взаємозв'язок між режимними параметрами роботи трієра та основними показниками якості очищення;

визначити раціональні режими роботи трієра, що забезпечують оптимальне співвідношення між якістю очищення і продуктивністю;

здійснити обробку та аналіз експериментальних даних із використанням методів математичної статистики.

Результати експериментальних досліджень використано для порівняльної оцінки різних режимів роботи трієра та формування практичних рекомендацій щодо їх застосування в умовах післязбиральної обробки зерна.

Програма експериментальних досліджень передбачає наступні етапи:

підготувати компоненти запланованих до досліджень зерноsumішей у кількості, достатній для проведення експериментальних досліджень;

дослідити фізико-механічні властивості досліджуваних зернових компонентів за допомогою існуючих приладів і методик, а також розробленого нами приладу для визначення кута природного укусу сипких матеріалів;

розробити часткову методику експериментальних досліджень процесу трієрного очищення ячменю від коротких домішок;

підготувати до роботи експериментальне обладнання для досліджень процесу очищення ячменю від коротких домішок за допомогою комірчастих поверхонь;

провести експериментальні дослідження процесу виділення коротких домішок із ячменю за допомогою комірчастих поверхонь.

3.2 Опис експериментальної установки

У наявній теорії трієрів [54, 64] у процесі трієрного розділення зерноsumішей розглядається умовний сегмент зерноsumіші, який переміщується в осьовому напрямку зі зниженням вмісту компонента, що виділяється. Реалізація моделі процесу трієрного розділення зерноsumішей з екстраполяцією отриманих результатів на довільну довжину комірчастих поверхонь можлива за допомогою стенда з циклічним моделювальним завантаженням зерноsumіші в комірчастий циліндр при безперервному відведенні з нього виділюваного компонента.

Застосування стенда циклічної дії в експериментальних дослідженнях забезпечить розширення діапазонів досліджуваних факторів і скорочення витрат

на дослідження. Для цього необхідно обґрунтувати параметри та споживану потужність привода.

Комірчастий циліндр 1 радіусом R розміщений в опорних роликах 2. У середині комірчастого циліндра 1 знаходиться сегмент 3 досліджуваної зерноsumіші з кутом охоплення α , масою m і зміщенням відносно вертикальної осі на кут β .

Величину зміщення (e) центра ваги сегмента зерноsumіші відносно вертикалі можна визначити за формулою:

$$e = (R - h) \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \beta\right). \quad (3.1)$$

1 – комірчастий циліндр; 2 – опорні ролики; 3 – сегмент зерноsumіші; 4 – фрикційний ролик; 5 – платформа; 6 – пружина; 7 – рама

Рисунок 3.2 – Розрахункова схема для визначення потужності привода

Висота шару (h) сегмента зерноsumіші залежить від величини її подачі (W) всередину комірчастого циліндра і розраховується згідно з теорією трієрів [24].

Для розглянутого стенда умови завантаження моделюються розрахунковою величиною маси (m) зерноsumіші, що завантажується в комірчастий циліндр стенда. При виділенні коротких домішок $m \sim \text{const}$, оскільки частка компонента домішок незначна – 1 - 3%.

Кількість циклів виділення ($n_{\text{ц}}$) є інваріантною відносно ширини та кількості умовних сегментів (довжини комірчастого циліндра стенда), оскільки залишкова засміченість і ступінь виділення компонента домішок із зерноsumіші вимірюються у відносних величинах — у %.

При роботі стенда привідний момент $M_{\text{пр}}$ урівноважується моментом опору $M_{\text{с}}$ обертанню комірчастого циліндра на холостому ході та моментом опору $M_{\text{тр}}$ від сил тертя сегмента об внутрішню поверхню комірчастого циліндра. Однак визначити величину $M_{\text{тр}}$ розрахунковим або експериментальним шляхом

важко через циркуляцію шарів у сегменті та варіативний контакт зернівок основної культури з частинками компонента домішок, що знаходяться в комірках.

Тим часом $M_{тр}$ є зовнішнім впливом на сегмент 3 зерноsumіші. Результатом цього впливу є зміщення центра ваги сегмента 3 на величину e . Зміщена маса сегмента 3 створює момент опору, еквівалентний $M_{тр}$. Тому:

$$M_{mp} = M_m = mg[(R - h)\sin(\alpha/2 - \beta)]. \quad (3.2)$$

З урахуванням рівнянь (3.1) і (3.2) можна записати:

$$M_{np} = M_c + mg[(R - h)\sin(\alpha/2 - \beta)]. \quad (3.3)$$

Величину M_c можливо визначити лише експериментально, оскільки вона є нестабільною через похибки форми комірчастого циліндра (наявність стику тощо) та мінливі умови його контакту з опорними роликами. Для визначення величини M_c на комірчастому циліндрі 1 закріплювали один кінець нитки, намотували на нього кілька її витків, а другий кінець (вільний) кріпили на гаку електронного динамометра. Потім, натягуючи нитку через електронний динамометр, заміряли дотичне зусилля (F_k) повороту з інтервалом у 45° . Вимірювання F_k проводили для двох варіантів: із приєднаним приводом, коли фрикційний ролик 4 контактує з комірчастим циліндром 1; із від'єднаним приводом. Результати вимірювань і розрахунків представлені в таблиці 3.1.

Із таблиці 3.1 видно, що при куті повороту комірчастого циліндра 1 на 180° спостерігається «викид» вимірюваних величин.

Таблиця 3. 1 – Варіація M_{c1} із приводом та M_{c2} без привода

Кут повороту, град.	0	45	90	135	180	225	270	315	360
Дотичне зусилля (F_k), кгс	3,43	2,86	3,40	3,6	7,8	3,8	3,4	2,7	3,43
Момент опору M_{c1} , Н·м	10,3	8,6	10,2	10,8	23,4	11,4	10,2	8,1	10,3
Дотичне зусилля (F_k), кгс	2,2	2,0	3,1	3,7	4,0	2,6	3,2	2,2	2,2

Кут повороту, град.	0	45	90	135	180	225	270	315	360
Момент опору (M_{c2}), Н·м	6,6	6,0	9,3	11,1	12,0	7,8	9,6	6,6	6,6

Це пояснюється тим, що вимірювання при повороті комірчастого циліндра на 180° збіглося з проходженням стикового шва стандартного комірчастого циліндра через опорний ролик. Враховуючи достатню інерційність мас, що обертаються, для розрахунку потужності привода можна використовувати середні значення моментів опору $M_{c1} = 11,5 \text{ Н·м}$ та $M_{c2} = 8,4 \text{ Н·м}$.

Величину m можна визначити за формулою:

$$m = S_c l_{\text{ц}} \rho K_{\text{ц}}, \quad (3.4)$$

де S_c – площа сегмента, м^2 ;

$l_{\text{ц}}$ – довжина комірчастого циліндра, м ;

ρ – насипна щільність зерноsumіші, кг/м^3 ;

$K_{\text{ц}}$ – коефіцієнт, що враховує зниження щільності сегмента при циркуляції шарів (для пшениці $K_{\text{ц}} = 0,78$) [121].

Площа сегмента буде:

$$S_c = \frac{\alpha}{2\pi} \pi [R^2 - (R-h)^2] \quad (3.5)$$

З урахуванням рівнянь (3.4) і (3.5) отримаємо:

$$m = \alpha l_{\text{ц}} \rho K_{\text{ц}} [R^2 - (R-h)^2] / 2. \quad (3.6)$$

При $\omega = 4,2 \text{ с}^{-1}$ величина $\alpha = 1,57$ рад, а при завантаженні близькому до максимально можливої при відділенні коротких домішок із зерноsumішей $h = 0,05 \text{ м}$. Насипна маса пшениці $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$, $l_{\text{ц}} = 0,6 \text{ м}$. Із врахуванням прийнятих значень $m = 7,6 \text{ кг}$.

Величина M_m визначатиметься за формулою:

$$M_m = mge = mg(R-h)\sin(\alpha/2 - \beta) = 13 \text{ Н·м}. \quad (3.7)$$

Сумарний момент опору обертання комірчастого циліндра для завантаження, близького до максимального, становитиме:

$$M_{\Sigma} = \overline{M}_{c_1} + M_m = 11,5 + 13 = 24,5 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.8)$$

Сумарний момент опору обертанню комірчастого циліндра долається моментом ($M_{\text{тр}}$), що створюється силою тертя ($F_{\text{тр}}$) фрикційного ролика 4. Для його визначення складемо рівняння рівноваги моментів, що діють на платформу 5 відносно точки О:

$$F_p l_p = (F_{\text{пж}} - m_{\text{мп}} g) L_n, \quad (3.9)$$

де F_p – реактивна сила від сили нормального тиску (F_n), Н;

l_p – відстань від точки О до фрикційного ролика, м;

$F_{\text{пж}}$ – зусилля розтягнутої пружини, Н;

$m_{\text{мп}}$ – зведена до точки А маса привода, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

L_n – довжина платформи.

Обрана для підтискання фрикційного ролика 4 пружина має попереднє напруження та спадну жорсткість зі зростанням її розтягування (Δl). Для встановлення розрахункових значень жорсткості пружини (c_p) її навантажували зусиллями розтягування в діапазоні 30 – 117 Н, щоб охопити весь діапазон регулювання сили $F_{\text{пж}}$, передбачений у конструкції стенда.

Результати динамометрування представлені на рисунку 2.6.

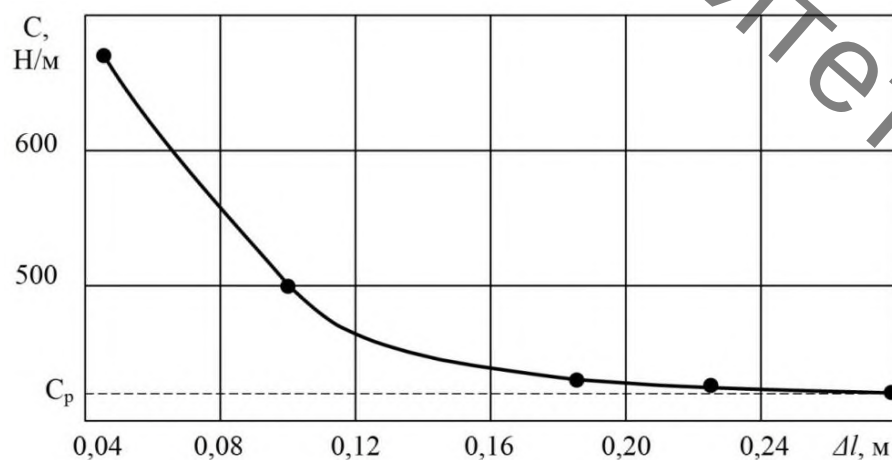


Рисунок 2.26 – Взаємозв'язок жорсткості (c) попередньо напруженої пружини з величиною її деформації (Δl)

Із рисунка 2. 6 видно, що при $\Delta l = 0,255$ м величина $c = 420$ Н/м. Беручи до уваги $l_p = 0,29$ м; $L_{\pi} = 0,7$ м; $m_{\pi\pi} = 5,4$ кг, отримаємо:

$$F_p = F_N = (\Delta l c - m_{\pi\pi} g) L_{\pi} / l_p = 130,8 \text{ Н.} \quad (3.10)$$

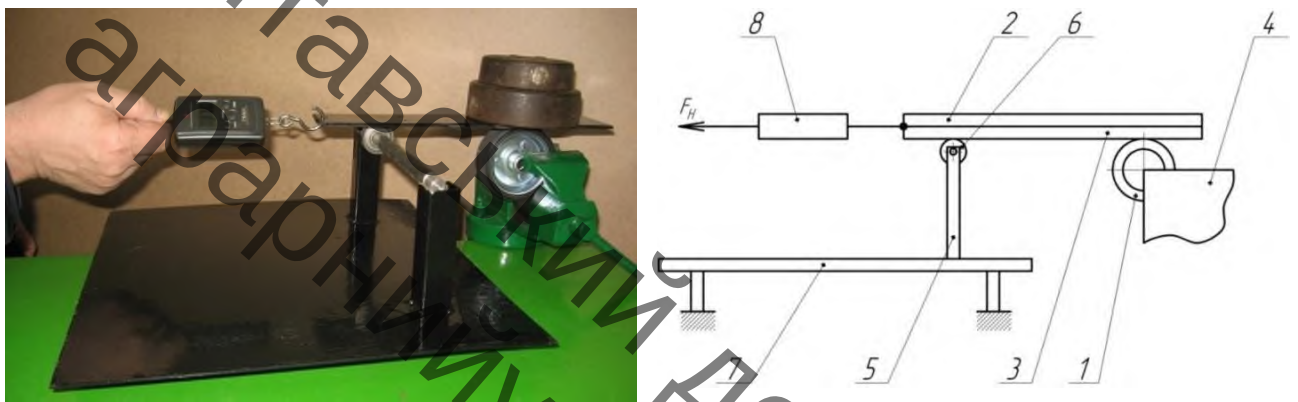
Величина моменту тертя буде:

$$M_{\pi\pi} = F_N f_{\pi\pi}, \quad (3.11)$$

де $f_{\pi\pi}$ – коефіцієнт сили тертя спокою фрикційного ролика по опорній (прогумованій) поверхні комірчастого циліндра.

Для визначення $f_{\pi\pi}$ розроблено прилад, представлений на рисунках 2.7 і 2.

8.



1 – фрикційний ролик; 2 – планка; 3 – гумова накладка; 4 – затискач; 5 – стійка; 6 – підшипник кочення; 7 – платформа; 8 – електронний динамометр

Рисунок 3.7 – Прилад для визначення коефіцієнта сили тертя спокою фрикційного ролика

З його використанням встановлено величину $f_{\pi\pi} = 0,75$ у всьому діапазоні притискних зусиль (F_N) із максимальним відхиленням показників електронного динамометра у 2,7%.

Отже: $M_{\pi\pi} = 130,8 \cdot 0,75 = 98,1$ Н·м. Тобто величина $M_{\pi\pi}$ у 4 рази перевищує M_{Σ} , що дозволяє долати його пікові значення (див. таблицю 3.10) і забезпечувати задані режими роботи стенда без буксування.

Споживана потужність становитиме:

$$N_{\pi} = M_{\Sigma} \omega = 24,5 \times 4,2 = 103 \text{ Вт.} \quad (3.12)$$

Установлена потужність привода у 380 Вт забезпечує надійну роботу стенда та розширення його можливостей щодо завантаження; вона в 3,7 раза перевищує потрібну величину.¹⁰³

Комірчастий циліндр є основним робочим органом установки. Він виготовлений у вигляді сталевго циліндра з внутрішньою поверхнею, на якій рівномірно розташовані комірки заданого розміру. Геометричні параметри циліндра (діаметр, довжина, форма і розмір комірок) відповідають вимогам лабораторних досліджень і забезпечують відтворення реального процесу трієрної очистки.

Привід установки реалізований на базі електродвигуна з регульованою частотою обертання. Зміна швидкості обертання ячеїстого циліндра здійснюється за допомогою частотного регулятора, що дозволяє досліджувати вплив цього параметра на процес виділення коротких домішок.

Система подачі зерноsumіші забезпечує рівномірне надходження матеріалу всередину трієра. Величина подачі регулюється зміною маси навантаження або швидкості подачі зерна, що дає змогу досліджувати вплив продуктивності на якість очищення.

Вивідний жолоб призначений для збору коротких домішок, які випадають з комірок під дією відцентрових і гравітаційних сил. Конструкція жолоба дозволяє змінювати його кут нахилу та положення відносно циліндра, що є важливим фактором керування селективністю процесу розділення.

Приймальні ємності використовуються для роздільного збору очищеного зерна та домішок з метою подальшого зважування і визначення показників якості процесу.

Циклічне завантаження комірчастого циліндра зерноsumішшю $m = 7,6$ кг моделює умови роботи реального трієрного циліндра при максимальних навантаженнях. Блокувальне кільце з різницею зовнішнього та внутрішнього діаметрів у 0,07 м надійно утримуватиме сегмент зерноsumіші висотою 0,05 м від самовільного витікання. Стенд забезпечує оцінку якості процесу з екстраполяцією результатів на довільну довжину комірчастої поверхні.

Аналіз полігонів розподілу товщини зернівок ячменю, сорго та вики дозволяє обрати решета ($b_1 = 3,8$ мм та $b_2 = 2,6$ мм) для повного видалення домішкових компонентів сходом (насіння вики) та проходом (насіння сорго). При цьому втрати основної культури становитимуть 6,14%. При підборі решет для виключення технологічних втрат ($b_1 = 3,9$ мм та $b_2 = 2,5$ мм) вміст домішок в очищеному зерні ячменю становитиме: 6,06% від початкового вмісту сорго; 3,14% від початкового вмісту вики.

Полігони розподілу ширини зернівок ячменю, вики та сорго вказують на низьку якість процесу при виділенні із зерноsumіші насіння сорго за цією ознакою. Технологічні втрати становитимуть 9,51% навіть при невисокому ступені виділення насіння сорго ($C_v = 73,9\%$), а при $C_v = 97,11 - 99,43\%$ втрати сягатимуть 25,5 - 37,1%.

Оцінка полігонів розподілу довжини зернівок ячменю, сорго та вики дозволяє визначити діапазон вибору діаметрів комірок трієрного циліндра з умов повного виділення домішок та виключення технологічних втрат. У цьому діапазоні (6,2 - 7,5 мм) наявні типові діаметри комірок – 6,3 та 7,1 мм. Однак, технологічні втрати від випадкового захоплення комірками кукільного циліндра зернівок ячменю запобігти не можна — їх слід оцінити експериментально.

Експериментальна установка дозволяє:

- змінювати частоту обертання трієрного циліндра в заданому діапазоні;
- регулювати величину подачі зерноsumіші;
- змінювати положення та кут нахилу вивідного жолоба;
- здійснювати відбір і аналіз розділених фракцій;
- проводити серійні та повторні досліді з високою відтворюваністю

результатів.

Таким чином, використана експериментальна установка забезпечує комплексне дослідження процесу трієрної очистки зернопродуктів від коротких домішок і створює необхідні умови для визначення раціональних режимів роботи трієра.

Для дослідження закономірностей процесів трієрного очищення ячменю від коротких домішок нами було визначено перелік домішкових компонентів, частинки яких за поперечними розмірами є порівнянними із зернівками ячменю, що ускладнює їх відокремлення за допомогою решітних машин, але які відрізняються довжиною, що передбачає їх виділення за допомогою комірчастих поверхонь трієрів. Як домішки було використано насіння сорго білого, вики, березки березковидної (гречишки в'юнкової), проса та колоті зернівки ячменю.

3.3 Характеристика досліджуваного зернопродукту

У дослідженнях застосовувалися двокомпонентні зерноsumіші, що включали як основну культуру ячмінь та один із домішкових компонентів. Початкова засміченість наважок задавалася на рівнях 1; 2 та 3%, що відповідає реальній засміченості зерна, яке після первинного очищення на повітряно-решітних машинах надходить на трієрне очищення в умовах зерноочищувальних технологій.

Для забезпечення чистоти експерименту в частині умов відтворюваності дослідів необхідно встановити основні фізико-механічні властивості досліджуваних середовищ. Вологість, фракційний склад, засміченість зерноsumішей, насипна щільність визначалися згідно зі стандартними методами визначення [32]. Параметри тертя частинок досліджуваних зернових матеріалів по різних поверхнях визначали за допомогою приладів для визначення коефіцієнта сили тертя спокою [32].

З огляду на виявлені нами суттєві недоліки існуючих приладів і методів визначення кутів природного укусу сипких матеріалів, дослідженню цієї властивості компонентів ми приділили особливу увагу.

Нами розроблено новий прилад для визначення кута природного укусу сипких матеріалів, який виключає невизначеність умов формування зернового конуса досліджуваного матеріалу та його розмірних характеристик, а також похибки, пов'язані з властивостями матеріалу опорної поверхні. Конструктивно-

Прилад працює таким чином. У вихідному положенні на горизонтальній опорній площині 1 встановлено чашу 2 з горизонтальним ободом 3, а на диск 5 із буртиком 6, закріплений на підставці 4, встановлюють порожнистий циліндр 7. Потім порожнистий циліндр заповнюють досліджуванним сипким матеріалом 8. Після цього механізмом підйому 11 за допомогою нитки 10 і поводка 9 повільно піднімають порожнистий циліндр. Матеріал, що висипається, формує моноліт конусної форми, а його надлишкова частина скочується по конусній поверхні в чашу 2. Далі на кутомірі 12 встановлюють контрольну стрілку 13 паралельно твірним конуса, що знаходяться під кутами α до горизонту. Переміщуючи кутомір по горизонтальному ободу з кутовим кроком γ , виконують n вимірювань ($n = 360^\circ/\gamma$) природного укосу. За величинами виконаних замірів розраховують середнє значення кута природного укосу сипкого матеріалу ($\bar{\alpha}$).

Після цього сипкий матеріал із диска висипають у чашу і разом із надлишковою частиною пересипають у резервну ємність, встановлюють усі складові частини приладу у вихідне положення і повторюють дослід.

Розміщення в новому приладі диска на підставці, встановлений у чаші, виключає безповоротні втрати досліджуваних сипких матеріалів при їх витіканні з порожнистого циліндра. Надлишкова частина матеріалів, обсипаючись по твірних конусного моноліту, визначає їхній природний кут нахилу до горизонту. Виконання підставки з однаковим розміщенням по висоті з горизонтальним ободом спрощує контроль твірних конуса. Покрокові заміри α_i у кількості $n = 360^\circ/\gamma$ у кожному досліді забезпечують підвищення точності вимірювань.

Однією з головних причин неточності результатів замірів кута природного укосу є матеріал опорної площини та його якісний стан. Тому нами було заплановано оцінити варіативність замірів властивостей одних і тих самих сипких матеріалів, конусні моноліти яких формуються на площинах із різних матеріалів із суттєво відмінними властивостями поверхні. Для зіставлення результатів різних методів визначення кута природного укосу нами використано (крім нашого приладу) цифровий кутомір у вигляді мобільного додатка, що визначає кутові

значення за фотозображенням. Приклад визначення кута природного укусу колотого ячменю з його допомогою представлений на рисунку 3.10.

Крім того, вимірювання кута природного укусу виконувалося за методикою, запропонованою авторами [30], коли визначалися висота і діаметр основи конуса, сформованого з досліджуваного сипкого матеріалу, і за виразом $\alpha = \arctg h/r$ визначалася величина досліджуваного кута.

3.4 Методика проведення експериментів

Планування експериментальних досліджень виділення коротких домішкових компонентів із ячменю виконано відповідно до загальновідомих методик [39] на основі класичного однофакторного експерименту.

Пошукові дослідження процесу трієрного очищення за допомогою станда циклічної дії з розміщенням комірчастого циліндра на опорних роликах виявили суттєві обмеження його застосування, які пов'язані з недостатньою стабільністю роботи станда та биттям циліндра через особливості його конструкції. У зв'язку з цим основна частина досліджень закономірностей процесу трієрного очищення ячменю від коротких домішок виконана за допомогою приладу для досліджень

Як досліджувані фактори, що впливають на якісні показники процесу, були прийняті: маса наважки (m_n), частота обертання (n) комірчастого циліндра приладу, кутове положення (γ_n) верхньої кромки передньої стінки вивідного лотка, початковий вміст смітної домішки в зерноsumіші (Z_n) перед початком дослідів. Діапазони та рівні варіювання досліджуваних факторів представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Досліджувані фактори, діапазони та інтервали їх варіювання

Найменування факторів	Умовне позначення	Од. вим.	Діапазон варіювання	Інтервал варіювання
Частота обертання циліндра	n	хв^{-1}	40–55	5
Кутове положення вивідного лотка	γ_n	град	35–65	10
Засміченість зерноsumіші	Z_n	%	1–3	1
Маса наважки	m_n	кг	0,75–1,25	0,25

Експеримент проводився у такій послідовності. Перед початком дослідів встановлювалися задані настроювальні та режимні параметри роботи приладу згідно з планом експерименту (додаток Б). Після цього в комірчастий циліндр завантажуються окремо компоненти зерноsumіші: основна культура (ячмінь) та один із домішкових компонентів. Для ефективного перемішування зерноsumіші всередині циліндра короткочасно вмикається електропривод на низьких значеннях швидкості обертання, щоб запобігти можливості випадіння коротких частинок у приймальний лоток.

Для забезпечення рівних за часом інтервалів контролю параметрів досліджуваного процесу було підготовлено аудіофайли зі звуковою сигналізацією через 5, 7 та 10 секунд, що визначає тривалість відповідних інтервалів часу замірів.

Під час відтворення одного із зазначених аудіофайлів (у момент початку відліку інтервалу) вмикається електропривод і, відповідно до звукових сигналів, змінюються приймальні ємності з короткими частинками. Після закінчення дослідів з проб виділялися частинки основної культури та домішки, компоненти

зважувалися на електронних вагах ВК-600 з точністю до 0,01 г. При малій кількості частинок їхня маса визначалася за допомогою показника маси 1000 насінин відповідної культури. Отримані результати заносилися у форму реєстрації дослідних даних (таблиця 3.3), виділені частинки повертали у комірчастий циліндр, змінювалися умови досліду і експеримент повторювався у тій самій послідовності.

Таблиця 3.2 – Форма реєстрації експериментальних даних

Дата _____										Основна культура _____										Домішка _____										
№ оп.	Умови досліду		Маса виділених компонентів за інтервали замірів, г																											
	n= γ _л = З _и , = m _н =	Маса короткої домішки, г																												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15														
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30														
		Кількість виділених частинок основної культури / Маса частинок основної культури:																												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15														
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30														

При зміні виду зерноsumіші або її початкової засміченості комірчастий циліндр очищується, а зерноsumіш готується заново. При обробці отриманих експериментальних даних визначалися залишкова засміченість (З_о) зерноsumіші всередині комірчастого циліндра та ступінь виділення (С) домішкового компонента після кожного інтервалу часу замірів та після закінчення всього часу досліду:

$$Z_{oi} = \frac{Z_n \cdot m_n / 100 - \sum_{i=1}^n m_{ni}}{m_n} \times 100\% \quad (3.13)$$

де Z_u – початковий вміст смітної домішки в зерноsumіші, заданий умовами досліду, %;

m_n - маса наважки зерноsumіші в циліндрі до початку досліду, г;

m_{Pi} – маса домішкового компонента, виділена в i -й інтервал часу замірів.

Ступінь виділення домішки у відсотках визначали за формулою:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n m_{Pi} \cdot 10^4}{Z_u \cdot m_n}. \quad (3.14)$$

За розрахованими значеннями ступеня виділення домішок і залишкової засміченості зерноsumіші встановлюються закономірності якісних показників трієрного очищення ячменю від коротких домішок залежно від впливу досліджуваних факторів.

Висновки до розділу 3

Обґрунтовано програму досліджень, яка базується на вивченні процесу відокремлення важковідокремлюваних коротких домішок (сорго, вика, березка, просо, колоте зерно) від ячменю. Вибір компонентів зумовлений їхньою розмірною подібністю до основної культури за шириною та товщиною, що робить трієрне очищення єдиним ефективним методом їх сепарації.

Розроблено та запатентовано новий прилад для визначення кута природного укусу сипких матеріалів. Конструкція приладу з використанням диска з буртиком та механізму плавного підйому циліндра дозволяє нівелювати вплив щорсткості опорної поверхні та динамічних ударів, що забезпечує високу точність вимірювання фізико-механічних властивостей зерноsumішей.

Удосконалено лабораторну базу шляхом застосування спеціалізованого приладу для дослідження кінетики трієрного очищення. На відміну від стендів на роликівих опорах, дана конструкція виключає вібрації та биття циліндра, забезпечуючи стабільність режимних параметрів під час експерименту.

Застосовано методику дискретного контролю часу за допомогою акустичної сигналізації, що дозволило зафіксувати масу виділених компонентів через рівні

проміжки часу (5, 7, 10 с) у 30 інтервалах. Це забезпечує отримання детальної інформації про динаміку процесу та мінімізує похибку «людського фактора».

Визначено ключові фактори та рівні їх варіювання для проведення однофакторного експерименту: частота обертання циліндра ($n = 40\text{--}55 \text{ хв}^{-1}$), кутове положення лотка ($\gamma_{\text{л}} = 35\text{--}65^\circ$), початкова засміченість ($Z_{\text{и}} = 1\text{--}3\%$) та маса наважки ($m_{\text{н}} = 0,75\text{--}1,25 \text{ кг}$). Такий діапазон охоплює реальні виробничі режими первинної очистки зерна.

Сформульовано математичний апарат для оцінки ефективності процесу за показниками залишкової засміченості ($Z_{\text{о}}$) та ступеня виділення домішок (C). Запропоновані залежності дозволяють аналізувати якість очищення як на кожному етапі заміру, так і сумарно за весь цикл роботи приладу.

РОЗДІЛ 4.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Обґрунтування взаємозв'язку режимів роботи та показників якості процесу очищення ячменю від колотих зернівок базується на фізико-механічних властивостях компонентів та кінематиці руху зернового сегмента.

Головною особливістю суміші ячменю з колотими зернівками є ідентичність їхніх властивостей (густини, стану поверхні, ширини). Різниця полягає лише в довжині (l). Через це в зерновому сегменті відсутня динамічна сегрегація — колоті частинки не «спливають» і не «осідають», а рівномірно розподілені по всьому об'єму. Це обґрунтовує необхідність тривалого контакту всієї маси зерна з комірчастою поверхнею, оскільки процес вилучення підпорядковується виключно ймовірнісному закону захоплення частинок, що потрапили в контактний шар.

4.1 Вплив частоти обертання трієра

Швидкість обертання циліндра визначає величину відцентрової сили, яка утримує зернину в комірці.

- При низьких обертах ($n=40$ об/хв): інерційного утримання недостатньо для довгих частинок ($l=5,1$ мм). Вони випадають із комірок завчасно, не досягаючи кромки лотка.

- При високих обертах ($n=55$ об/хв): кут випадку частинок зміщується вище за напрямком обертання. Це дозволяє вловлювати більше домішок, проте одночасно створює ризик захоплення повноцінного зерна, що лінійно збільшує технологічні втрати (B).

Властивості колотих зернівок збігаються з властивостями частинок основної культури, за винятком їхньої довжини ($l = 5,1$ мм). Цей варіант зерноsumіші є унікальним — інтенсивність виділення домішкового компонента не

залежить від його сегрегації в циркулюючих шарах сегмента, оскільки вона відсутня — немає «осадження» і немає «спливання» (рисунок 4.1).

Динаміка інтенсивності виділення колотих зернівок ячменю, представлена на рисунку 4.1, близька до теоретичної — рівномірно спадної, коли закономірність отримана з умов: домішкові частинки в циркулюючих шарах розподіляються рівномірно; вміст домішкових частинок у циркулюючому сегменті зменшується зі спадною інтенсивністю; домішкові частинки, що знаходяться в контактуючому шарі, виділяються за 1 цикл повністю через багаторазове перевищення сепарувальних впливів у кукільному циліндрі щодо реальної кількості домішкових частинок у контактуючому шарі.

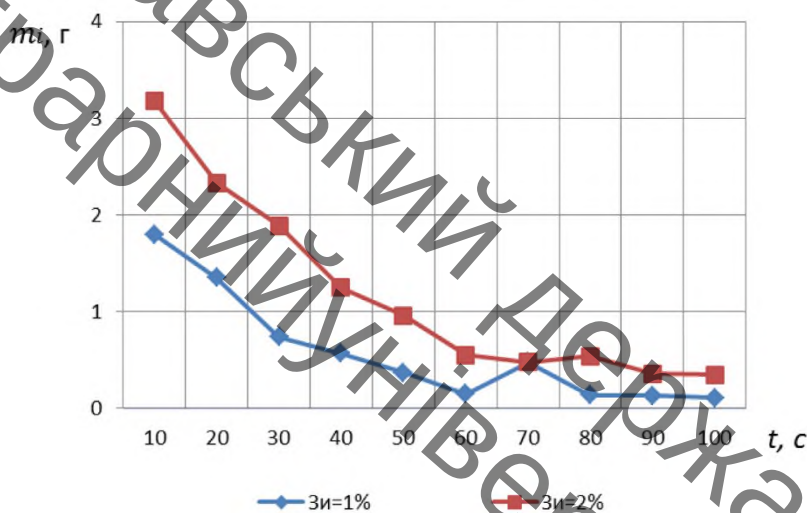


Рисунок 4.1 – Динаміка виділення частинок колотого ячменю із зерноsumіші при $n=40$ об/хв і $\gamma_L=35^\circ$

Для сформульованих умов аналітичної оцінки динаміки виділення домішкових частинок із зерноsumіші справедливим є рівняння:

$$Z_i = Z_{\text{и}} \left(1 - \sum_{1}^{i=k} n_{\text{чп}i} / P \right), \quad (4.1)$$

де Z_i – засміченість сегмента після i -го циклу виділення домішки, %;

$Z_{\text{и}}$ – початкова засміченість зерноsumіші, %;

k – кількість циклів виділення, шт;

$n_{\text{чп}i}$ – кількість домішкових частинок, виділених у i -му циклі, шт;

P — початкова кількість домішкових частинок у сегменті, шт.

За аналогією з рівнянням (4.1) для процесу виділення домішкових частинок з інтервальною за часом оцінкою в i -му інтервалі виділених мас можна записати:

$$Z_i = Z_{\text{и}} \left(1 - \sum_{j=1}^{j=k} m_j / M \right), \quad (4.2)$$

де m_j — маса домішок, виділених із сегмента в j -му часовому інтервалі, г;

M — початкова маса домішки в сегменті, г.

Аналіз динаміки виділення колотих зернівок ячменю за формулою (4.5) дозволив встановити, що залишкова засміченість зерноsumіші навіть після закінчення часу в 100 с, який в 1,8 раза перевищує тривалість процесу в стандартному кукільному циліндрі, становить 0,42%. Це вище за допустимі значення навіть при $Z_{\text{и}}=1\%$. На стандартній довжині комірчастого циліндра залишкова засміченість ще вища ($Z_0=0,504\%$) при ступені виділення $C_{\text{вст}}=49,6\%$.

Очищення зерноsumіші з колотими зернівками ячменю з $Z_{\text{и}}=2\%$ забезпечує порівнянні значення ступеня виділення домішки за час процесу в стандартному кукільному циліндрі — $C_{\text{вст}}=48\%$, наприкінці періоду $t=100$ с ступінь виділення $C_{\text{в}} = 58\%$ в обох варіантах початкової засміченості — у першому $C_{\text{в}}=58,4\%$, а у другому $C_{\text{в}}=57,9\%$. Однак залишкова засміченість зерноsumіші при $Z_{\text{и}}=2\%$ становить 1,04%, що приблизно у 2 рази вище, ніж у першому випадку — при $Z_{\text{и}}=1\%$.

У цьому полягає принципова відмінність зерноsumішей із колотими частинками основної культури від зерноsumішей із легковиділюваними домішками (насінням гірчиці, проса, сорго, вики). У перших відсутній ефект динамічної сегрегації і процес виділення домішок затягується, а в других — початкова концентрація домішкових компонентів ($Z_{\text{и}}$) визначає потенціал динамічної сегрегації та тривалість їх виділення, яка практично не залежить від величини $Z_{\text{и}}$.

Оцінка динаміки процесу виділення колотих зернівок ячменю із зерноsumіші за періоди часу (55 і 100 с) підтвердила порівнянність значень $C_{вст}$ і C_v незалежно від Z_n . Однак із рисунка 4.1 можна помітити, що на початкових інтервалах часу замірів співвідношення абсолютних значень виділених мас домішок < 2 . Це пояснюється переважанням ефекту «виїдання» домішкових частинок із комірок на зазначених проміжках часу перебігу процесу при $Z_n = 2\%$ порівняно з умовами, коли $Z_n = 1\%$.

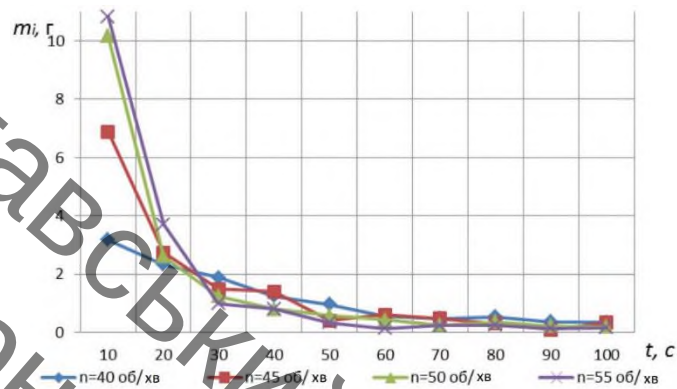


Рисунок 4.2 – Взаємозв'язок динаміки виділення колотих зернівок ячменю з основної культури зі швидкістю (n) обертання комірчастого барабана при $\gamma_{л}=35^{\circ}$; $m_n=1000$ г; $Z_n=2\%$

Ще більш контрастна динаміка виділення колотих зернівок ячменю із зерноsumіші отримана при збільшенні $\gamma_{л}$ до 55° , рисунок 4.3.

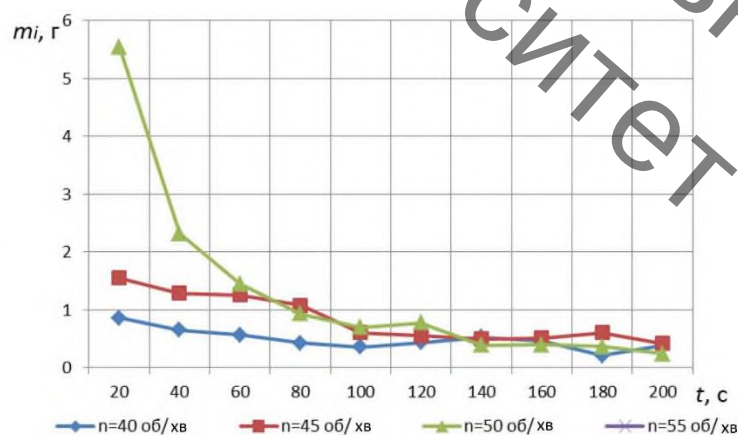


Рисунок 4.3 – Взаємозв'язок динаміки виділення колотих зернівок ячменю з основної культури зі швидкістю (n) обертання комірчастого барабана при $\gamma_{л}=55^{\circ}$; $m_n=1000$ г; $Z_n=2\%$

Збільшення швидкісного режиму лише до 50 об/хв призводить до зростання маси виділених домішок у першому інтервалі часу $t=30$ с у 6,44 рази (від 0,86 до 5,54 г). При $\gamma_{\text{л}}=55^\circ$ та $n=40$ об/хв вивідний лоток захоплює верхню частину факела викиду частинок комірками — незначну за кутом охоплення.

Очевидно, що швидкісний режим роботи $n=40$ об/хв при $\gamma_{\text{л}}=55^\circ$ є недостатнім. Тому на стандартній довжині комірчастого циліндра виділяється лише 7,1% маси домішки. За період часу $t=180$ с, що еквівалентно перебігу процесу в комірчастому циліндрі довжиною 7,2 м, виділяється 24,6% домішок. Зі зростанням n до 50 об/хв ступінь виділення домішок підвищується незначно. На стандартній довжині ($l=2,2$ м) комірчастого циліндра вона склала 20,4% при $Z_{\text{ост}}=1,593\%$, що не задовольняє вимогам до якості процесу.

Слід зазначити, що стендовому швидкісному режиму роботи $n=40$ об/хв відповідають режим роботи натурального комірчастого циліндра $n_{\text{н}}=28,3$ об/хв і коефіцієнт кінематичного режиму $k_1=0,268$. Це нижня межа швидкісного режиму роботи натурального трієра. Однак і при $n=50$ об/хв ($n_{\text{н}}=35,4$ об/хв; $k_3=0,419$) необхідна ступінь виділення колотих зернівок ячменю не досягається. Подальше збільшення частоти обертання призводить до зростання технологічних втрат.

4.2 Вплив положення вивідного жолоба

Кут установки лотка виступає в ролі «сепаративного порогу»:

- Низьке положення ($\gamma_{\text{л}}=35^\circ$): лоток перехоплює широкий факел викиду, що забезпечує високу повноту вилучення домішок (С), але призводить до максимальних втрат основного зерна (В), яке також випадає в цій зоні.

- Високе положення ($\gamma_{\text{л}}=55^\circ$): лоток вловлює лише ті частинки, що піднялися найвище. Це гарантує мінімальні втрати (В), але різко знижує ефективність очищення, оскільки більшість колотих зернівок через свою довжину випадають раніше.

У дослідах із наважкою $m_{\text{н}}=1000$ г, $n=40$ об/хв та початковою засміченістю $Z_{\text{и}}=1\%$ технологічні втрати зменшувалися зі зростанням $\gamma_{\text{л}}$ від 35 до 55° від 9-ти

зернівок основної культури до 2-х, що не перевищує 0,046%. Результати експериментальної оцінки технологічних втрат (В) при виділенні із зерноsumіші колотих зернівок ячменю при $Z_n=2\%$ представлені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.1 – Взаємозв'язок технологічних втрат (В) з n та $\gamma_{\text{л}}$ при $Z_n=2\%$ і $m_n=1000$ г

№ з/п	Кут підйому лотка ($\gamma_{\text{л}}$), град.	Частота обертання циліндра (n), об/хв	Втрати зернівок на $l_{\text{ст}}$, шт	Втрати за 20 інтервалів, шт	Величина інтервалу часу замірів, с	Тривалість дослідів, с
1	35	40	15	26	5	100
2	45	40	13	25	10	200
3	55	40	8	71	15	300
4	35	45	14	27	5	100
5	45	45	7	41	10	200
6	55	45	16	56	15	300
7	35	50	30	44	5	100
8	45	50	33	86	10	200
9	55	50	9	91	15	300
10	35	55	75	122	5	100
11	45	55	24	80	10	200
12	55	55	11	49	15	300

Із таблиці 4.3 видно, що зі збільшенням початкової засміченості до $Z_n=2\%$ при $\gamma_{\text{л}}=35^\circ$ і $n=40$ об/хв технологічні втрати зросли на 67%. Зі зростанням $\gamma_{\text{л}}$ до 55° .

Вони знижуються на стандартній довжині комірчастої поверхні $l_{\text{ст}}=2,2$ м до 8 зернівок основної культури. Зі збільшенням тривалості дослідів до $t=300$ с, що еквівалентно довжині комірчастої поверхні $l_{\text{екв}}=12$ м, технологічні втрати нелінійно зросли до 71 зернівки основної культури. У частковому співвідношенні вони становлять:

$$B = (m_{1000} \cdot n_{\text{зя}} / 1000) / m_n \cdot 100\% = (51,3 \cdot 71 / 1000) / 1000 \cdot 100 = 0,364\%, \quad (4.3)$$

де B – технологічні втрати, %;

m_{1000} – маса 1000 зернівок ячменю (51,3 г), г;

$n_{з\text{я}}$ – кількість виділених зернівок ячменю, шт.;

m_n — маса зерноsumіші в циліндрі стенда.

Отриманий результат (B) потрібно співвідносити з основним показником технологічного процесу – залишковою засміченістю ($З_о$). Незважаючи на тривалість процесу $t=300$ с і величину $l_{\text{екв}}=12$ м, вимоги щодо залишкової засміченості зерна при $n=40$ об/хв і $\gamma_{\text{л}}=55^\circ$ не забезпечені – виділено $C_{\text{в}}=24,6\%$ (4,91 г), а залишилося 15,09 г $\rightarrow З_о=1,509\%$ при $З_n=2\%$. Звідси випливає: технологічні втрати при забезпеченні вимог до $З_о$ із заданими вище n і $\gamma_{\text{л}}$ та тривалість процесу будуть ще більшими; для забезпечення [$З_о$] необхідно зменшити $\gamma_{\text{л}}$ до 35° , а швидкісний режим роботи обирати за компромісним значенням комплексного показника якості (K).

$$K = B_{\text{п}} + B_{\text{зо}} \rightarrow \min, \quad (4.4)$$

де $B_{\text{п}}$ – вагомість показника технологічних втрат;

$B_{\text{зо}}$ – вагомість показника залишкової засміченості зерна.

Швидкісний режим роботи трієра суттєво впливає на технологічні втрати. Так, із ростом n від 40 до 55 об/хв технологічні втрати при $\gamma_{\text{л}}=35^\circ$ збільшилися в 5 разів – $n_{з\text{я}}=75$ шт. замість 15 шт.

Можливості скорочення B на високих швидкісних режимах роботи (n) пов'язані зі збільшенням $\gamma_{\text{л}}$.

Наприклад, зі збільшенням $\gamma_{\text{л}}$ з 35 до 45° при $n=55$ об/хв технологічні втрати на стандартній довжині комірчастого циліндра падають у 3 рази, а зі збільшенням $\gamma_{\text{л}}$ до 55° - у 7 разів. Однак при цьому різко знижується ступінь виділення колотих зернівок ячменю через їхнє нестійке розміщення в комірках кукільного циліндра.

4.3 Взаємозв'язок режимів і якості

Оскільки фактори n та $\gamma_{\text{л}}$ мають протилежний вплив на чистоту (Z_o) та втрати (B), обґрунтованим є використання комплексного показника якості (K). Це дозволяє математично знайти такий режим, при якому сумарна шкода від недоочищення та втрат корисної продукції буде мінімальною.

Обґрунтування зв'язку між стендовими дослідженнями та натурними випробуваннями базується на збереженні показника кінематичного режиму

$$k = \omega^2 \cdot R / g.$$

Це дозволяє стверджувати, що виявлені закономірності (наприклад, неефективність очищення від колотого ячменю на стандартних довжинах циліндра) будуть справедливими і для промислових трієрних блоків.

Обґрунтування режимів і параметрів процесу виконано на основі: теоретичних досліджень, коли вперше було отримано розрахункову закономірність динаміки виділення коротких домішок кукільним трієром; результатів широких експериментальних досліджень процесів виділення коротких домішок із ячменю, виконаних із використанням принципово нової моделі фізичного процесу з інтервально-часовим контролем результативних показників.

Встановлено, що раціональний діапазон швидкісного режиму роботи натурального циліндра з $R = 0,3$ м становить 35,4...38,9 об/хв. Висока ступінь виділення домішкових компонентів (на рівні $C_{\text{вст}} = 99 - 100 \%$) стандартним комірчастим циліндром ($l = 2,25$ м) забезпечується при установці вивідного лотка під кутом $\gamma_{\text{л}} = 35 - 45^\circ$. Підтверджено, що $\gamma_{\text{л}} = \gamma_{\text{лmin}} = 35^\circ$ відповідають максимальні технологічні втрати, але вони не перевищують допустимий рівень $[B] < 0,3\%$.

Тривалість процесу виділення насіння вики, сорго, проса, берізки польової (гречишки в'юнкової) мало залежить від початкової засміченості зерноsumіші в межах $Z_{\text{и}} = 1 - 3\%$ через ефект динамічної сегрегації домішкових компонентів у

циркулюючих шарах сегмента – концентрація ($Z_{\text{и}}$) визначає потенціал динамічної сегрегації. Зернова домішка (колате зерно) не має контрасту фізико-механічних властивостей з основною культурою і не піддається динамічній сегрегації, тому потребує більшої довжини комірчастої поверхні (таблиця 4.14).

Таблиця 4.2 – Обґрунтовані технологічні режими та параметри процесу трієрного очищення ячменю від коротких домішок

№ з/п	Найменування режимів і параметрів	Розмірність	Значення
1	Швидкісний режим за стендом з $R_{\text{ц}} = 0,15$ м	об/хв	50...55
2	Швидкісний режим за коефіцієнтом кінематичного режиму (k)	—	0,42...0,508
3	Швидкісний режим натурального циліндра з $R = 0,3$ м	об/хв	35,4...38,9
4	Кут підйому кромки вивідного лотка ($\gamma_{\text{л}}$)	град.	35...45
5	Допустимі технологічні втрати (B)	%	< 0,3
6	Ступінь виділення насіння сорго, проса, вики, берізки польової стандартним циліндром ($l = 2,2$ м)	%	99...100
7	Рівень залишкової засміченості ($Z_{\text{о}}$)	%	< 0,2
8	Технологічна довжина комірчастої поверхні для виділення зернової домішки	м	> 4

4.4 Порівняння базового та удосконаленого режимів

Із таблиці 4.3 видно, що характер зміни $C_{\text{вст}}$ при $\gamma_{\text{л}} = 35^\circ$ і 45° є ідентичним. Величина $C_{\text{вст}}$ із ростом швидкісного режиму (n) зростає зі спадною інтенсивністю. При збільшенні $\gamma_{\text{л}}$ від 35° до 55° величина $C_{\text{вст}}$ колотих зернівок ячменю з $Z_{\text{и}}=2\%$ різко знижується: при $n = 40$ об/хв – у 4,9 раза; $n = 50$ об/хв – у 3,8 раза.

Відносно невелика різниця $C_{\text{вст}}$ (28%) у верхній частині діапазону швидкісного режиму роботи трієра пояснюється зростанням впливу на процес ефекту інерційного утримання домішкових частинок у комірках. Цей фізичний ефект більшою мірою проявляє себе, коли домішкові частинки мають порівнянні

або більші габарити порівняно з розмірами комірок – середня довжина колотих зернівок ячменю ($l = 5,1$ мм) перевищує їх.

Частота обертання $n=40$ об/хв ($K_1=0,268$) є недостатньою для забезпечення рівня вимог до залишкової засміченості зерна при $\gamma_{\text{л}}=35^\circ$ та невисокій початковій засміченості зерноsumіші колотими зернівками ячменю $Z_{\text{и}}=1\%$ – во на становить 0,5%. Збільшення довжини комірчастої поверхні до 4 м також не дозволить забезпечити прийнятний рівень залишкової засміченості – $Z_o = 0,416\%$. Зі збільшенням $\gamma_{\text{л}}$ ступінь виділення колотих зернівок ячменю різко падає (рисунок 4.4). При $\gamma_{\text{л}}=65^\circ$ і $n=40$ об/хв величина $C_{\text{вст}}$ не перевищує 3,1%. Навіть збільшення робочої довжини комірчастого циліндра до 16 м.п. не забезпечить необхідний рівень якості процесу – $Z_o=0,774\%$. Зі збільшенням швидкісного режиму роботи до $n=45$ об/хв ($K_2=0,34$) можна забезпечити якість процесу за залишковою засміченістю тільки при $\gamma_{\text{л}}=35^\circ$ і довжині комірчастого циліндра в 4 м ($Z_o=0,343\%$), таблиця 4.4 і рисунок 4.5.

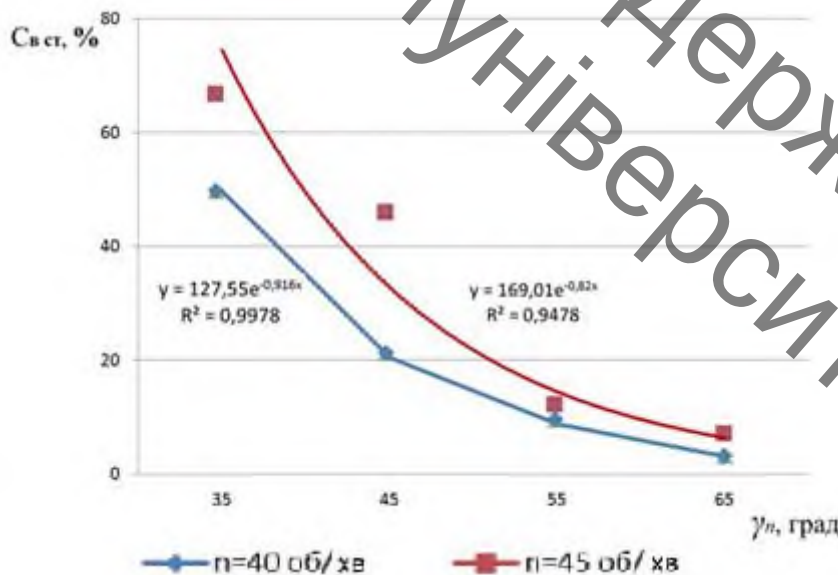


Рисунок 4.4 – Взаємозв'язок ступеня виділення ($C_{\text{вст}}$) колотих зернівок ячменю з основної культури з кутом підйому кромки вивідного лотка ($\gamma_{\text{л}}$) при різних n та $Z_{\text{и}}=1\%$

Таблиця 4.4 – Взаємозв'язок ступеня виділення колотих частинок ячменю з основної культури (ячменю) з n та $\gamma_{\text{л}}$

№ з/п	Швидкість обертання комірчастого циліндра, об/хв, (n)	Кут підйому кромки лотка, град., (γл)	Ступінь виділення на l=2,2 м, %, (C _{вст})	Ступінь виділення на l _{екв} , (Секв)	Ступінь виділення на довжині l _{екв} –l _{ост} , % (C(–))	l _{екв}	Залишкова засміченість після l _{ст} , %, (З _{ост})
при m _н =1000 г і З _н =1%							
1	40 (28,3)* K ₁ =0,268**	35	49,6	58,4	8,8	4	0,5
		45	20,5	39,8	19,3	8	0,785
		55	8,8	23,6	14,8	12	0,912
		65	3,1	18,5	15,4	16	0,97
2	45 (31,8)* K ₂ =0,34	35	65,7	73,9	8,2	4	0,343
		45	45,0	64,2	19,2	8	0,55
		55	11,2	28,3	17,1	12	0,888
		65	6,8	22,6	15,8	16	0,932
при m _н =1000 г і З _н =2%							
3	40 (28,3)* K ₁ =0,268	35	48,0	57,9	9,9	4	1,04
		45	15,0	34,4	19,4	8	1,69
		55	7,1	24,6	17,5	12	1,858
4	45 (31,8)* K ₂ =0,34	35	65,4	73,5	8,1	4	0,692
		45	38,8	61,5	22,7	8	1,225
		55	13,4	41,6	28,2	12	1,733
5	50 (35,4)* K ₃ =0,419	35	78,3	84,3	6,0	4	0,434
		45	58,9	79,8	19,9	8	0,812
		55	20,4	65,6	45,2	2	1,593
6	55 (38,9)* K ₄ =0,508	35	84,7	89,0	4,3	4	0,305
		45	79,4	90,0	10,6	8	0,413
		55	66,2	84,0	17,8	12	0,676

Збільшення початкової засміченості зерноsumіші до 2% знижує ступінь виділення домішкових частинок та збільшує залишкову засміченість зерноsumіші порівняно із засміченістю в 1% при аналогічних режимах роботи та налаштувальних параметрах. Причому ступінь виділення домішки із зерноsumіші комірчастою поверхнею стандартної довжини знижується незначно — на 3–14%, а залишкова засміченість зростає у 2 рази і більше.

При $\gamma_{\text{л}} = 35^\circ$ тривалість процесу виділення домішки скорочується з ростом швидкісного режиму роботи (n). Уже при $n = 45$ об/хв максимальну ступінь виділення домішки забезпечує стандартна довжина ($l = 2,2$ м) комірчастої поверхні. Зі збільшенням n до 55 об/хв, що відповідає значенню коефіцієнта кінематичного режиму $K = 0,508$, тривалість виділення домішки скорочується на 27,3%.

При $\gamma_{\text{л}} = 45^\circ$ та $n = 40$ об/хв стандартна довжина комірчастої поверхні забезпечує виділення лише 98,5% домішки. Хоча рівень залишкової засміченості зерноsumіші при цьому є прийнятним і становить $z_{\text{ост}} = 0,03\%$. Збільшення n до 45 об/хв підвищує ступінь виділення домішки до 99,1%, а при $n = 55$ об/хв $C_{\text{вст}} = 100\%$ навіть при частковому використанні довжини стандартного трієрного циліндра (73% — 1,6 м). З точки зору зниження технологічних втрат необхідно збільшувати $\gamma_{\text{л}}$, але при цьому знижується ступінь виділення домішки на порівнянній довжині комірчастого циліндра. Так, при $n = 40$ об/хв та $\gamma_{\text{л}} = 55^\circ$ ступінь виділення домішки знижується до $C_{\text{вст}} = 71,3\%$, а тривалість процесу збільшується майже у 2 рази. Разом з тим при великих значеннях $\gamma_{\text{л}}$ знижуються технологічні втрати (B) (рисунк 4.7) і збільшується тривалість процесу.

Із рисунка 4.7 видно, що захоплення та викид зернівок основної культури комірками є випадковим процесом. Велика частина факела викиду потрапляє у вивідний лоток при $\gamma_{\text{л}} = 35^\circ$. У цьому положенні верхньої кромки вивідного лотка з ростом n у діапазоні 40-55 об/хв технологічні втрати зростають у 4,6 рази. При $\gamma_{\text{л}} = 45^\circ$ та 55° відповідний приріст технологічних втрат із ростом швидкісного режиму роботи нижчий — у 5 та 1,25 рази. Це пов'язано з тим, що верхня межа факела викиду домішкових частинок із ростом швидкісного режиму роботи приростає менш інтенсивно. Разом з тим абсолютні значення втрат знаходяться в допустимих межах.

Із виконаного аналізу можна помітити, що зміна умов перебігу процесу призводить до неоднозначних співвідношень виділених мас домішки за довжиною циліндра. Наприклад, із рисунка 4.6 видно, що в першому інтервалі замірів при $\gamma_{\text{л}} = 35^\circ$ і максимальному швидкісному режимі ($n = 55$ об/хв) величина m_i в 1,95 раза більша, ніж m_i при мінімальній частоті обертання ($n = 40$ об/хв). У другому інтервалі замірів співвідношення m_i змінюється на протилежне і становить 0,54.

З викладеного вище випливає, що порівняння динаміки необхідно проводити за першими інтервалами замірів, оскільки результати в наступних інтервалах залежать від залишкового вмісту домішкового компонента в зерноsumіші. У наведеному вище зіставленні, зокрема, у другому інтервалі часу замірів у відповідний лоток подається більший за кутовим розміром факел домішкових частинок, але причина зниження m_i полягає в іншому – щільність факела різко падає після першого інтервалу часу реалізації процесу.

Результати порівняння динаміки процесів за першими інтервалами часу вимірювань представлені на рисунку 4.8.

Полтавський державний аграрний університет

При мінімальному швидкісному режимі роботи залежність мас виділених частинок домішкового компонента від величини $\gamma_{\text{л}}$ є найбільшою. Зі збільшенням $\gamma_{\text{л}}$ від 35° до 55° величина $m_i(1)$ падає в 5,76 рази. Це пояснюється тим, що при $n = 40$ об/хв лише мала частина факела викиду частинок долає стінку вивідного лотка, розташовану під кутом $\gamma_{\text{л}} = 55^\circ$ до горизонту.

При цьому тривалість процесу різко збільшується. За 200 с, коли еквівалентна довжина комірчастої поверхні становить 8 м (у 3,6 рази більше за довжину стандартного кукільного циліндра), виділяється $S_{\text{в}} = 97,5\%$ домішки із зерноsumіші з початковою засміченістю 2%. На стандартній довжині виділяється лише 71,3% домішки, а залишкова засміченість $Z_{\text{ост}} = 0,574\%$, що перевищує допустимий рівень.

З ростом швидкісного режиму роботи до 55 об/хв величина $m_i(1)$ змінюється у вузькому діапазоні – у 2,15 рази. При $\gamma_{\text{л}} = \gamma_{\text{лmin}} = 35^\circ$ величина $m_i(1) = m_{i(1)\text{max}} = 15,72$ г.

Тобто вивідний лоток у цьому режимі охоплює максимальний за кутовим розміром факел викиду домішкових частинок. Ступінь виділення домішок на

стандартній довжині досягає 99,55%, що при $Z_n=2\%$ забезпечує рівень залишкової засміченості $Z_{ост} = 0,009\%$.

Висновки до розділу 4

Диференціація домішок за характером виділення. Встановлено принципову різницю в кінетиці сепарації коротких домішок. Виділення насіння бур'янів (берізка польова, сорго, вика) має лавиноподібний характер завдяки ефекту динамічної сегрегації. На противагу цьому, виділення колотих зернівок ячменю відбувається рівномірно з низькою інтенсивністю через відсутність фізико-механічного контрасту з основною культурою.

Вплив швидкісного режиму (n). Збільшення частоти обертання циліндра від 40 до 55 об/хв (що відповідає зростанню k до 0,508) суттєво розширює кутовий факел викиду частинок. Для берізки польової це призводить до скорочення тривалості процесу на 27,3%, тоді як для колотого ячменю дозволяє лише частково компенсувати його передчасне випадання з комірок через велику довжину ($l = 5,1$ мм).

Критична роль положення вивідного лотка (γ_l). Кут установки лотка є визначальним для чистоти кінцевого продукту. Встановлено, що при $\gamma_l = 35^\circ$ забезпечується максимальне захоплення домішок, проте зростають технологічні втрати основного зерна (до 75 шт. при $n = 55$ об/хв). Збільшення кута до 55° мінімізує втрати, але робить вилучення колотого ячменю практично неможливим (ефективність падає у 4,9 раза).

Обґрунтування технологічної довжини (l). Доведено, що стандартна довжина трієрного циліндра ($2,2$ м) є цілком достатньою для вилучення насіння бур'янів (ефективність 99,5–100%). Однак для очищення від колотого зерна ячменю залишкова засміченість при $l = 2,2$ м залишається вищою за норму ($Z_0 = 0,3-1,5\%$). Для досягнення насінневих кондицій необхідна еквівалентна довжина комірчастої поверхні понад 4 метри.

Оптимізація процесу. Для вибору раціональних режимів обґрунтовано використання інтегрального показника якості (K), який враховує вагомість

залишкової засміченості та технологічних втрат. Встановлено, що для натурального трієра ($R = 0,3$ м) оптимальним діапазоном є $n = 35,4-38,9$ об/хв при куті лотка $\gamma_{\text{л}} = 35-45^\circ$. Методологічна значущість інтервальних замірів. Доведено, що оцінку динаміки процесу слід проводити за першими інтервалами часу ($t = 5-10$ с), оскільки в подальшому щільність факела викиду різко падає через вичерпання концентрації домішки, що може викривити результати аналізу впливу конструктивних параметрів.

Полтавський державний
аграрний університет

РОЗДІЛ 5.

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ

5.1 Охорона праці при експлуатації трієра

Забезпечення безпеки при роботі з трієрними блоками (типу БТМ-12) базується на запобіганні травматизму від рухомих механізмів та мінімізації впливу шкідливого виробничого середовища.

До обслуговування трієра допускаються лише особи, які пройшли спеціальне навчання та інструктажі. Основними зонами ризику є приводні механізми (паси, зірочки) та внутрішній обертовий циліндр.

Цілісність захисту: Заборонено запускати машину, якщо знято захисні кожухи з пасових передач. Навіть під час короточасних налаштувань захист має бути на місці.

Блокування при обслуговуванні: Будь-які роботи з очищення внутрішньої порожнини циліндра або регулювання вивідного лотка дозволяються лише після повної зупинки двигуна та вимкнення живлення на головному пульті.

Заземлення: Оскільки трієр працює у вібраційному режимі, необхідно щозміни перевіряти цілісність заземлювального провідника, щоб уникнути ураження струмом через корпус.

Процес трієрування супроводжується інтенсивним виділенням зернового пилу, який може викликати алергічні реакції та захворювання дихальних шляхів.

Аспіраційна система: Трієр обов'язково має бути герметично з'єднаний з витяжною вентиляцією. Робота при несправній аспірації призводить до накопичення пилу, що створює не тільки загрозу здоров'ю, а й ризик вибуху пилоповітряної суміші.

Засоби захисту: Працівник повинен використовувати пилозахисні окуляри та респіратори. У приміщеннях з кількома працюючими трієрами обов'язковим є використання протишумових навушників, оскільки постійний гуркіт зерна об метал перевищує допустимі санітарні норми.

Після закінчення терміну експлуатації (зазвичай 7–10 років) або в разі критичного зносу комірчастої поверхні, трієр підлягає списанню та утилізації. Це багатоетапний процес, спрямований на повернення ресурсів у виробництво та захист довкілля.

Процес починається з повної дезактивації машини. Трієр очищують від залишків насіння та пилу, оскільки органічні рештки в закритих порожнинах можуть стати причиною корозії або займання під час механічного розрізання корпусу. Найважливішим етапом є видалення мастильних матеріалів. Відпрацьоване масло з редукторів є небезпечним відходом. Його зливають у герметичні ємності та передають спеціалізованим компаніям. Виливання мастила в ґрунт або каналізацію суворо заборонено законодавством України.

Трієрний блок – це джерело цінної вторинної сировини. При розбиранні матеріали сортуються:

Чорний метал: Складає понад 85% ваги. Це сталеві листи корпусу, рама та самі трієрні циліндри. Після демонтажу вони відправляються на металургійні комбінати для переплавки.

Кольорові метали: Мідь міститься в обмотках електродвигунів, а латунь або бронза – у деяких втулках підшипникових вузлів. Ці метали відокремлюються вручну, оскільки їхня вартість значно вища за чорний брухт.

Полімери та гума: Приводні паси та гумові ущільнювачі не підлягають переплавці з металом. Їх відправляють на термічну утилізацію або на підприємства, що виготовляють гумову крихту (наприклад, для покриття спортивних майданчиків).

Правильна утилізація дозволяє підприємству не тільки уникнути штрафів від екологічної інспекції, а й отримати «ліквідаційну вартість». Кошти, отримані від здачі металобрухту, часто покривають витрати на демонтаж і транспортування, а іноді стають початковим внеском на придбання нового, більш сучасного обладнання. Таким чином, життєвий цикл трієра завершується повною рециркуляцією матеріалів, що відповідає принципам сталого розвитку та "зеленої" економіки.

Пожежна небезпека трієрного блока БТМ-12 обумовлена наявністю горючого середовища (зерно, зерновий пил, соломисті домішки) та можливих джерел запалювання (несправне електрообладнання, іскри при терті механізмів, статична електрика).

Основним методом боротьби з пожежами є їх попередження через суворий контроль за технічним станом агрегату та чистотою приміщення.

Контроль тертя: Необхідно регулярно змащувати підшипникові вузли. Перегрів підшипника через відсутність мастила може призвести до тління зернового пилу, що накопичився на корпусі, з подальшим займанням.

Запобігання іскроутворенню: Слідкувати за натягом пасових передач. Проковзування паса призводить до його нагрівання та появи специфічного запаху гару, що є першою ознакою потенційної пожежі.

Електротехнічний нагляд: Усі з'єднання в клемних коробках двигунів мають бути щільно затягнуті. Слабкий контакт викликає іскріння та обвуглювання ізоляції.

Зерновий пил у зваженому стані при певній концентрації здатний до миттєвого вибуху від найменшої іскри.

Герметичність: Усі з'єднання аспіраційних каналів та приймальних патрубків трієра мають бути герметичними. Вихід пилу в об'єм приміщення недопустимий.

Вологе прибирання: Пил, що осів на станині трієра та будівельних конструкціях, необхідно видаляти за графіком. Товстий шар сухого пилу є ідеальним провідником для поширення вогню.

Статична електрика: Під час тертя зерна об металевий циліндр накопичується статичний заряд. Для його безпечного відведення корпус машини обов'язково з'єднується з контуром заземлення.

Місце встановлення трієра повинно бути обладнане первинними засобами пожежогасіння згідно з нормами.

Вогнегасники: Поруч із трієрним блоком мають бути встановлені порошкові (типу ВП) або вуглекислотні (типу ВВ) вогнегасники. Вуглекислотні вогнегасники

є пріоритетними для гасіння електрообладнання, оскільки вони не пошкоджують вузли агрегату залишками порошку.

Ящик із піском та лопата: Використовуються для локалізації розливів мастила під редукторами.

Негайна зупинка: Натиснути кнопку «Стоп» на пульті та повністю знеструмити лінію (вимкнути ввідний автомат).

Оповіщення: Подати сигнал тривоги та викликати пожежну охорону.

Локалізація: Приступити до гасіння вогню наявними вогнегасниками, не допускаючи поширення полум'я на зернові бункери та аспіраційні повітроводи, через які вогонь може миттєво поширитися на весь завод.

Особлива обережність потрібна при демонтажі старого обладнання із застосуванням газового різання або "болгарок".

Вогневі роботи: Дозволяються лише після повного видалення зернового пилу та залишків ПММ у радіусі 5 метрів від місця робіт.

Чергування: Після завершення робіт із розрізання металу необхідно організувати спостереження за місцем робіт протягом 2 годин, щоб виключити приховане тління в щілинах або конструкціях.

5.3 Екологічна експертиза

Екологічна безпека сучасного агропромислового виробництва базується на принципах мінімізації викидів, раціонального використання ресурсів та відповідального поводження з відходами на всіх етапах життєвого циклу техніки.

Процес виготовлення трієрних блоків на машинобудівних підприємствах супроводжується низкою техногенних впливів:

Металообробка: Основними відходами є металева стружка та обрізки листової сталі. Вони підлягають обов'язковому збору та поверненню на металургійні заводи для переплавки, що замикає цикл використання ресурсів.

Фарбування та антикорозійний захист: Використання сучасних порошкових фарб замість традиційних рідких емалей дозволяє практично повністю виключити викиди летких органічних сполук у атмосферу та зменшити обсяги стічних вод.

Енергоспоживання: Використання енергоефективних верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК) дозволяє знизити питомі витрати електроенергії на одиницю виготовленої продукції.

Під час експлуатації трієрів на насіннєвих заводах та зернотоках основними екологічними факторами є:

Запиленість повітря: Трієрне очищення генерує значну кількість легких органічних домішок. Впровадження ефективних циклонів та фільтрів дозволяє вловлювати до 99% зернового пилу, який надалі може використовуватися як компонент для виробництва паливних брикетів або в комбікормовій промисловості.

Шумове забруднення: Робота барабанних трієрів створює вібрацію та шум. Встановлення обладнання на віброізольовані опори та використання сучасних звукопоглинальних матеріалів у цехах знижує акустичне навантаження на прилеглі території.

Утилізація відходів очищення: Випущені домішки (жукі, вівсюг, бите зерно) повинні чітко розділятися. Невикористані залишки бур'янів підлягають термічній утилізації або компостуванню, щоб запобігти їх повторному потраплянню на поля.

Застосування обґрунтованих нами раціональних режимів роботи трієра безпосередньо покращує екологічні показники:

Зменшення втрат: Менша кількість зерна, що потрапляє у відходи, означає ефективніше використання земельних та водних ресурсів, витрачених на вирощування врожаю.

Подовження ресурсу: Оптимальна частота обертання знижує темпи зносу металу, що відтерміновує необхідність виготовлення нової машини та подальшої утилізації старої.

Виробництво та експлуатація трієрів за умови дотримання сучасних технологічних стандартів та запропонованих нами режимів є екологічно

виправданими. Основна перевага полягає в можливості повної переробки (рециклінгу) основних вузлів машини після завершення терміну її служби, що відповідає європейській стратегії безвідходного виробництва.

5.3 Економічна ефективність удосконалення

Для оцінки економічної ефективності застосування результатів нашої роботи, що полягають в обґрунтуванні раціональних технологічних режимів і параметрів процесу трієрного очищення ячменю, розглянемо ефективність роботи трієрного блока БТМ-12 (або аналогічного вітчизняного виробництва, наприклад, ПрАТ «Хорольський механічний завод») у звичайних умовах експлуатації в умовах сільгосп підприємства та з урахуванням наших рекомендацій щодо його налаштування й регулювання. Технічні характеристики розглянутого трієрного блока наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики трієрного блока (типу СТ-12 / БТМ-12)

Найменування показника	Значення
Встановлена потужність, кВт, не більше	6
у тому числі:	
- привід вівсюжного блока	3
- привід кукільного блока	3
Габаритні розміри в робочому положенні, мм, не більше:	
- довжина	4200
- ширина	1200
- висота	2600
Маса виробу з комплектом робочих органів, кг, не більше	1820
Номінальна продуктивність на очищенні насіння пшениці (вологістю 14%, вмістом довгих і коротких домішок 5%), т/год	10*
Діаметр циліндра, мм	800
Довжина трієрного сегмента, мм	3000
Частота обертання циліндра, не більше:	
- для відокремлення довгих домішок (вівсюжний), об/хв	39,0±1
- для відокремлення коротких домішок (кукільний), об/хв	36,0±1
Призначений термін служби, років	10

у базовому варіанті прийнято згідно з агровимогами до вторинного очищення зерна та насіння за допомогою трієрів (3% втрат + 0,1% подрібнення) [82]; у запропонованому – за результатами досліджень.

При базовому варіанті підготовки насіння ячменю застосовується трієрний блок СТ-12 при режимах та налаштувальних параметрах, рекомендованих заводом-виготовлювачем, коли робота трієра визначається за виходом довгих домішок із вівсюжного циліндра. Вівсюжний циліндр завантажують до такого стану, поки разом із домішками не піде зерно основної культури. Потім завантаження зменшують до відсутності у відходах чистого зерна. У запропонованому варіанті регулювання та налаштування трієрного блока СТ-12 здійснюється відповідно до обґрунтованих нами параметрів, що забезпечує вищу якість процесу очищення.

Для розрахунку приймемо дані про посівні площі СТОВ «Відродження» (або Агрофірма «Світанок») Полтавського району Полтавської області. Площа посіву ячменю в господарстві становить 1700 га.

Для такої площі необхідно (M_c) 365,5 тонн насіння при нормі висіву 215 кг/га. На вторинне очищення насіннєвого матеріалу до трієрного блока БТМ-12 зерноsumіш надходить після попереднього та первинного очищення.

Приймаємо засміченість зерноsumіші перед трієрним очищенням на рівні 3% відповідно до ДСТУ та агровиимог щодо якості первинного очищення насіння.

Втрати повноцінного зерна у відходи (фураж) при трієрному очищенні за базовим варіантом (згідно з нормативами експлуатації) приймаємо на рівні 3,1%, з яких 0,1% припадає на подрібнення, що при підготовці насіннєвого матеріалу рівноцінно втратам.

Згідно з нашими дослідженнями, втрати повноцінного зерна при впровадженні раціональних режимів і налаштувальних параметрів трієра (запропонований варіант) не перевищують 0,3%. Тоді для отримання необхідної кількості насіння знадобиться така кількість ячменю після первинного очищення ($M_{я1}$):

$M_{я1} = M_{яc} \left(1 + \frac{P_{\phi} + (Z_u - Z_o)}{100} \right),$	(5.1)
--	-------

де M_c – необхідна маса насіння ячменю, т;

P_{ϕ} – втрати зерна у фуражні відходи, %;

Z_u – вміст бур'янистої домішки перед трієрним очищенням, %;

Z_0 – вміст бур'янистої домішки після трієрного очищення, %.

Залишкова засміченість після трієрного очищення у базовому варіанті з урахуванням агровимог становить 0,8%. У запропонованому варіанті, згідно з нашими дослідженнями, залишкова засміченість не перевищує 0,2%.

Розрахунок за базовим варіантом:

$$M_{яI(\bar{o})} = 372 \left(1 + \frac{3,1 + 3 - 0,8}{100}\right) = 391,7 \text{ т.}$$

За запропонованим варіантом

$$M_{яI(\text{запр})} = \frac{M_c \cdot 100}{100 - (П_{\phi} + Z_{\Pi} - Z_0)} = \frac{365,5 \cdot 100}{100 - (0,3 + 3,0 - 0,2)} = \frac{36550}{96,9} \approx 377,19 \text{ т}$$

Річне напрацювання (завантаження) трієрного блока при підготовці насіння ячменю складе:

$H_z = \frac{M_{яI}}{W},$	(5.2)
---------------------------	-------

де W — продуктивність трієрного блока.

Для базового варіанту річне напрацювання складе:

$$H_{z(\bar{o})} = \frac{M_{яI(\bar{o})}}{W} = \frac{391,7}{10} = 39,2 \text{ ч.}$$

Для запропонованого варіанта:

$$H_{z(\Pi)} = \frac{M_{яI(\Pi)}}{W} = \frac{383,5}{10} = 38,4 \text{ ч.}$$

Календарне завантаження (завантаженість) визначається за формулою:

$$K_{\partial} = \frac{H_z}{24 \cdot K_c},$$

де K_c – коефіцієнт добового завантаження.

$$K_{\partial(\bar{o})} = \frac{39,2}{24 \cdot 0,85} = 1,92 \approx 2 \text{ дня.}$$

$$K_{\partial(\Pi)} = \frac{38,4}{24 \cdot 0,8} = 2 \text{ дня.}$$

Визначимо абсолютні економічні показники [37]. Прямі експлуатаційні витрати на одиницю напрацювання (1 мотогодину) розраховуються за формулою:

$$C_{\text{год}} = Z_{\text{п}} + E + A + P$$

де: $Z_{\text{п}}$ – витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу, грн/год;

E – витрати на електроенергію, грн/год;

A – амортизаційні відрахування, грн/год;

P – витрати на поточний ремонт та технічне обслуговування (ТО), грн/год.

$$Z = n_{\text{оп}} \cdot Z_{\text{од}},$$

де $n_{\text{оп}}$ – чисельність операторів, осіб;

$Z_{\text{од}}$ – годинна оплата праці.

Витрати на електроенергію визначаємо за формулою:

$$G = q_{\text{е}} \cdot C_{\text{е}},$$

де $q_{\text{е}}$ – годинна витрата електроенергії, кВт;

$C_{\text{е}}$ – ціна 1 кВт·год електроенергії, грн.

Для обох варіантів витрати на електроенергію складуть:

$$G = q_{\text{е}} \cdot C_{\text{е}} = 6 \text{ кВт} \cdot 7,50 = 45,00 \text{ грн/год}$$

Витрати коштів на ремонт і ТО:

$$P = B \cdot r_{\text{р}} \quad (5.7)$$

де B – ціна техніки, грн;

$r_{\text{р}}$ – коефіцієнт відрахувань на ремонт і технічне обслуговування техніки.

Згідно з ГОСТ 34393-2018 (або аналогічним ДСТУ) [33], відрахування на ремонт і технічне обслуговування для зерноочисних машин, сушарок, зерноочисних агрегатів і комплексів становить 1,5% від ціни на 100 годин роботи. Тоді $r_{\text{р}} = 1,5 \cdot 10^{-4}$.

Для обох розглянутих варіантів підготовки насіння ячменю витрати коштів на ремонт і ТО складуть:

$$P(б) = P(п) = 560000 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 84 \text{ грн/год.}$$

Годинні витрати на амортизацію трієрного блока визначимо за формулою:

$$A = \frac{B}{R_m},$$

де R_m – значення амортизаційного ресурсу техніки, год.

Амортизаційний ресурс зерноочисних машин, агрегатів і комплексів становить 3600 год [33].

В обох розглянутих варіантах витрати на амортизацію трієрного блока складуть:

$$A_{(б)} = A_{(п)} = \frac{560000}{3600} = 155,6 \text{ грн/год}$$

Оскільки в нашому випадку $З_{п(б)} = З_{п(п)}$; $E_{(б)} = E_{(п)}$; $P_{(б)} = P_{(п)}$, то для базового та запропонованого варіантів підготовки насіннєвого ячменю годинні експлуатаційні витрати згідно з (5.4) складуть:

$$З_{п(б)} = З_{п(п)} = 250 + 39 + 84 + 155,6 = 528,6 \text{ грн/год}$$

У перерахунку на одиницю оброблюваної зерноsumіші експлуатаційні витрати можна визначити за формулою:

$$З_y = \frac{З}{W}$$

Тоді:

$$З_{y(б)} = З_{y(п)} = \frac{528,6}{10} = 52,9 \text{ грн/т}$$

Для оцінки економічної ефективності розглянутих варіантів отримання насіння ячменю визначимо витрати на виробництво насіння за обома варіантами, порівняємо отримані результати для базового та запропонованого варіантів, а також із варіантом придбання необхідної кількості насіння за ринковою ціною.

Для визначення категорії отриманого насіння за показником кількості насіння бур'янів приймемо як смітну домішку насіння гірчака березкоподібного (гречишки вьюнкової), яке при вологості 12,6% має масу 1000 насінин, що дорівнює 7,0 г [15].

У базовому варіанті згідно з агровиимогами [82], при вмісті перед трієрним очищенням 600 шт. насіння гірчака березкоподібного на 1 кг та повноті виділення домішок не менше 0,8, після очищення залишиться:

$$n_{\text{спб}} = 600 \cdot (1 - 0,8) = 120 \text{ шт.}$$

що не відповідає жодній із категорій насіння ячменю згідно з ДСТУ 4138-2002 (або ДСТУ 2240-93). Таким чином, потрібен другий пропуск через трієрний блок, після чого:

$$n_{\text{спб}} = 120 \cdot (1 - 0,8) = 24 \text{ шт./год}$$

що відповідає категорії РН (репродуктивне насіння), при цьому експлуатаційні витрати подвоюються. Ринкова ціна такого насіння у весняний період 2024-2025 рр. в Україні становила в середньому 12 000–15 000 грн/т (або 12-15 грн/кг) [87].

Для розрахунків приймемо середнє значення $\Pi_{\text{я(РН)}} = 13,5$ грн/кг. Тоді витрати на виробництво насіння можна визначити за формулою:

Для базового варіанта:

$$C_{\text{с(П)}} = \frac{M_{\text{яI(П)}} \cdot \Pi_{\text{яп}}}{M_{\text{с}}} + I_{\text{у}} - \frac{M_{\text{яI(П)}} \cdot \Pi_{\text{ф(П)}} \cdot \Pi_{\text{яф}}}{M_{\text{с}}} \quad (5.9)$$

де $\Pi_{\text{яп}}$ – ціна продовольчого ячменю, грн/кг;

$\Pi_{\text{яф}}$ – ціна фуражного ячменю, грн/кг.

Згідно з ринковими даними, приймемо: $\Pi_{\text{яп}} = 11,0$ грн/кг, $\Pi_{\text{яф}} = 8,5$ грн/кг.

$$\begin{aligned} C_{\text{с(б)}} &= \frac{385,95 \cdot 11 - (385,95 \cdot 0,031 \cdot 8,5)}{372} + 2 \cdot 0,0529 = 11,14 + 0,11 \\ &= 11,25 \text{ грн/кг} \end{aligned}$$

Економічний ефект отримання насіння категорії РН (репродуктивне) за базовим варіантом порівняно з купленим насінням становить:

$$E_{\text{(б)}} = \Pi_{\text{я(РН)}} - C_{\text{с(б)}} = 13,5 - 11,25 = 2,25 \text{ грн/кг}$$

Річний економічний ефект у базовому варіанті складе:

$$E_{Г(б)} = E_{(б)} \cdot M_c = 2,25 \cdot 372 \cdot 10^{-3} = 837,000 \text{ грн.}$$

Для запропонованого варіанта:

Завдяки оптимальним параметрам ступінь виділення коротких домішок досягає 99%. Після одноразового пропуску залишиться $n_{сп(п)} = 600 \cdot (1 - 0,99) = 6$ шт./кг, що відповідає вищій категорії насіння (РС — репродуктивне сортове). Ринкова ціна такого насіння становить приблизно 18,5 грн/кг.

Витрати на виробництво за запропонованим варіантом:

$$C_{с(п)} = \frac{377,19 \cdot 11 - (377,19 \cdot 0,003 \cdot 8,5)}{372} + 0,0529 + 11,13 + 0,05$$

$$= 11,18 \text{ грн/кг}$$

Економічний ефект отримання насіння категорії РС порівняно з купленим становить:

$$E_{(п)} = C_{я(рс)} - C_{с(п)} = 18,5 - 11,18 = 7,32 \text{ грн/кг.}$$

Річний економічний ефект у запропонованому варіанті:

$$E_{р(п)} = E_{(п)} \cdot M_c = 7,32 \cdot 372 \cdot 10^3 = 2723040 \text{ грн.}$$

Економічний ефект запропонованого варіанта порівняно з базовим:

На 1 кг насіння:

$$\Delta E = E_{(п)} - E_{(б)} = 7,32 - 2,25 = 5,07 \text{ грн/кг.}$$

Річний економічний ефект порівняно з базовим виробництвом:

$$\Delta E_{Г} = E_{Г(п)} - E_{Г(б)} = 2723040 - 837,000 = 1886040 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.3 – Показники економічної оцінки результатів досліджень

Показник	Базовий варіант	Запропонований варіант
1. Маса насіння, що надходить на очищення ($M_{яI}$), т	385,95	377,19
2. Вихід кондиційного насіння (M_c), т	372	372
3. Кількість пропусків через трієрний блок, од.	2	1
4. Річне напруження трієрного блока ($T_{рік}$), год	77,2*	37,7
5. Питомі експлуатаційні витрати ($З_y$), грн/т	105,8**	52,9
6. Категорія отриманого насіння	РН (РСт)	РС

7. Собівартість виробництва насіння (C_c), грн/кг	11,25	11,18
8. Ринкова ціна насіння відповідної категорії (C_y), грн/кг	13,50	18,50
9. Економічний ефект на 1 кг насіння (E), грн/кг	2,25	7,32
10. Річний економічний ефект (E_r), грн	1886040	2723040

Висновки до розділу 5

Практична реалізація розробки довела її ефективність у трьох аспектах:

Охорона праці та безпека: впровадження аспіраційних систем, захисних кожухів і протипожежних заходів мінімізує ризики травматизму та вибухонебезпечності.

Екологічний ефект: оптимальні режими роботи знижують запиленість, втрати зерна та продовжують ресурс обладнання, що відповідає принципам «зеленої» економіки.

Економічна ефективність: удосконалені режими зменшують втрати зерна з 3,1% до 0,3%, забезпечують отримання насіння вищої категорії (PC) та дають річний економічний ефект понад 2,7 млн грн, що майже у 3,3 раза перевищує базовий варіант.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано інженерно-технологічне обґрунтування раціональних режимів роботи трієра при очищенні зернопродуктів від коротких домішок у післязбиральний період. Актуальність теми зумовлена тим, що короткі домішки мають близькі фізико-механічні характеристики до зерна основної культури, через що погано відокремлюються традиційними методами, а нераціональні режими трієрів призводять до підвищення втрат повноцінного зерна та зниження ефективності очищення.

У процесі виконання роботи проведено аналіз сучасних методів очищення зерна та встановлено, що трієрна очистка є одним із найефективніших способів відокремлення коротких домішок у складі зерноочисних ліній. Обґрунтовано, що стабільність технологічного процесу та якість очищення значною мірою залежать від правильного вибору режимних параметрів трієра.

У теоретичній частині досліджено кінематику руху частинок у комірчастому циліндрі та визначено вплив основних режимних параметрів (частоти обертання, подачі зерноsumіші, положення вивідного жолоба) на селективність відбору домішок та втрати зерна. Теоретичні положення стали основою для подальших експериментальних досліджень.

У ході експериментальної частини встановлено закономірності впливу частоти обертання трієра та положення вивідного жолоба на показники якості очищення. Доведено, що зміна режимів роботи суттєво впливає як на ступінь виділення коротких домішок, так і на величину втрат повноцінного зерна.

На основі комплексної оцінки отриманих результатів визначено раціональні режими роботи трієра, які забезпечують максимальну ефективність виділення коротких домішок за мінімальних втрат основної фракції. Запропоновані рекомендації можуть бути використані для

налаштування трієрних блоків у складі зерноочисних ліній підприємств різної продуктивності.

Виконано техніко-економічну оцінку запропонованих режимів роботи трієра та підтверджено доцільність їх впровадження у виробничі умови. Встановлено, що застосування обґрунтованих режимів сприяє зниженню втрат зерна, підвищенню стабільності процесу та покращенню загальної ефективності зерноочисного підприємства.

Практична реалізація результатів роботи підтверджує, що впровадження раціональних режимів є екологічно виправданим, оскільки сприяє зменшенню втрат продукції, зниженню пиловиділення та підвищенню культури виробництва.

Полтавський державний
аграрний університет

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бабенко В. О. Механізація післязбиральної обробки зерна : підручник. К. : Аграрна освіта, 2016. 412 с.
2. Барабаш В. М. Технології зберігання і переробки зерна. К. : Урожай, 2014. – 368 с.
3. Бойко І. М. Пневмосепараційні процеси в зерноочисних машинах : монографія. Харків : ХНАУ, 2017. 256 с.
4. Василенко П. М. Машини та обладнання для післязбиральної обробки зерна. К. : Вища школа, 2013. 480 с.
5. Гаврилюк М. М. Проектування зерноочисних і сушильних комплексів. – Львів : НУБіП, 2018. 295 с.
6. Гапоненко О. І. Енергоефективні технології очищення зерна // Вісник аграрної науки. 2020. № 4. С. 52–58.
7. Тишанінов Н. П. Взаємозв'язок інтенсивності виділення зерна трієром із режимом роботи // *Техніка і технології АПК*. 2025. С. 10–17.
8. Assessment of the sensitivity of the trier grain cleaning process to operating modes / **N. P. Tishaninov** // *Agris (FAO)* 2024.
9. Improvement of the process of indented cylinder (trier) cleaning of grain mixtures from short impurities / *ResearchGate* 2025.
10. Абидуев А. А., Пехутов А. С., Бадмациренов Д. Ц. Б. та ін. Очистка семенного зерна ячменя // *Вестник Бурятской государственной с.-х. академии* 2024.
11. Optimization Strategies for Maximizing Efficiency in Grain Cleaning Machines / Y. U. Hodiboev // *Int. J. of Business, Economics and Agriculture* 2023.
12. Мехатронні системи для цільового поділу зернових сумішей / E. Aliiev et al. —2024.
13. *Principles and methods used for cleaning / sorting seeds* (Cab International). 2021.

14. *Особливості конструкції сучасних трієрів* // Міністерство освіти і науки України, ТНТУ. 2025
15. Міщенко В. О. Проектування аспіраційних мереж елеваторів // Вісник ХНТУСГ. 2019. № 198. С. 75–82.
16. Нормативи питомих витрат електроенергії на сушіння зерна. К. : Мінагрополітики України, 2018. 24 с.
17. Погорілий Л. В. Машина для очищення і сортування зерна. К. : Урожай, 2010. 384 с.
18. Правила охорони праці у зерновому господарстві. К. : Держпраці, 2020. – 96 с.
19. Сидоренко О. М. Екологічна безпека елеваторів. Харків : ХНУБА, 2019. 214 с.
20. Степаненко С. П., Базалук О. В. Дослідження процесу повітряної сепарації зернового матеріалу // Journal of Central European Agriculture. 2023. Vol. 24, No. 3. P. 455–468. URL: https://jcea.agr.hr/articles/772075_Research_of_the_process_of_air_separation_of_grain_material_in_a_vertical_zigzag_channel_en.pdf
21. Bazaluk O. et al. Improving Energy Efficiency of Grain Cleaning Technology // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 10. 5190. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/10/5190>
22. Тарасенко Є. Г. Моделювання пневмосепараційних процесів. К. : НУБіП, 2020. 243 с.
23. Технологічні регламенти роботи зерносушильних комплексів. К. : Мінагрополітики, 2019. 62 с.
24. Хоменко В. С. Аспірація та пиловловлювання в агропромисловості. Дніпро : Нова ідея, 2016. 188 с.
25. Цапко В. Г. Системи пиловидалення на елеваторах // Енергетика АПК. 2018. № 5. С. 33–38.
26. Шарапа М. Г. Зерносушарки: конструкції та режими роботи. – К. : Агроосвіта, 2017. 256 с.
27. GEAPS. Grain Drying Systems Handbook. USA, 2018. 144 p.
28. FAO. Grain Handling and Storage Systems. Rome, 2016. 210 p.

29. KMZ Industries. Grain Dryers and Aspiration Systems Catalogue. Karlivka, 2022. 96 p.

30. ZEO. Системи аспірації елеваторів та зерносушарок. 2023
URL: <https://zeo.ua/article/systema-aspiratsiyi-elevatora-ta-yoho-ekolohichna-bezpeka>

Полтавський державний
аграрний університет