

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет конструювання та дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**В.о. завідувача кафедри
технічного сервісу та інженерного
менеджменту імені
М. П. Момотенка**

_____ **Руслан ШАТРОВ**

«_____» _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Розробка конструкції решіт машини післязбиральної обробки зерна»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Гарант освітньої програми

_____ **Д.Т.Н., професор**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

_____ **Володимир БУЛГАКОВ**
(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

_____ **К.Т.Н., доц.**

_____ **Соломка Олексій Валерійович**

Виконав

_____ **Буртаков Михайло Андрійович**

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

технічного сервісу та інженерного менеджменту

імені М. П. Момотенка

Іван РОГОВСЬКИЙ

(підпис)

(ПІБ)

«___» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Буртакову Михайлу Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи «Розробка конструкції решіт машини післязбиральної обробки зерна»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «15» квітня 2026 р. № 1044 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 20 травня 2026 року

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до дипломного проекту бакалавра Матеріали первинного бухгалтерського обліку, нормативно-методичні матеріали, науково-технічна література

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. підвищити якість очищення _____ ;
2. зменшити втрати зерна; _____
3. збільшити довговічність решіт; _____
4. підвищити продуктивність машини _____
5. Економічне обґрунтування проекту _____
6. Охорони праці _____

Перелік графічних документів: **Електронна презентація на 14 слайдів**

Дата видачі завдання «06» січня 2026 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Соломка Олексій Валерійович

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Буртаков Михайло Андрійович

(підпис)

(прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт бакалавра на тему **«Розробка конструкції решіт машини післязбиральної обробки зерна»** складається з 71 аркушів пояснювальної записки, містить 35 рисунків, 12 таблиць та список використаних джерел.

В умовах сучасного сільськогосподарського виробництва особливої актуальності набуває підвищення ефективності післязбиральної обробки зерна. Одним із перспективних напрямів є удосконалення робочих органів зерноочисних машин, що забезпечують якісне очищення зернового матеріалу при мінімальних енергетичних витратах. Застосування сучасних енергоощадних технологій дозволяє знизити витрати електроенергії у 1,3–1,7 раза порівняно з традиційними технологічними процесами.

Метою дипломного проєкту є розробка та удосконалення конструкції решіт плоскорешітної машини післязбиральної обробки зерна, що забезпечує підвищення якості очищення зернового матеріалу, зниження енергоємності процесу та підвищення продуктивності роботи обладнання.

У дипломному проєкті виконано аналіз сучасних технологій і технічних засобів вітчизняного та зарубіжного виробництва для післязбиральної обробки зерна, розглянуто особливості конструкцій решітних станів та вібросепараторів. Проведено розрахунок основних конструктивних і технологічних параметрів удосконаленого решета, виконано перевірочні розрахунки його працездатності та міцності. Розроблено конструкцію решітного стану, яка сприяє підвищенню ефективності сепарації та зменшенню енергетичних витрат.

Окремий розділ присвячено питанням охорони праці під час експлуатації машин післязбиральної обробки зерна. Також виконано економічне обґрунтування впровадження запропонованої конструкції, яке підтвердило доцільність її використання в умовах сучасних зернопереробних підприємств та фермерських господарств.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ, ТЕХНОЛОГІЙ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА ПЛОСКОРЕШІТНИМИ МАШИНАМИ	7
1.1. Огляд способів і технологій сепарації зерна і насіння.....	7
1.2. Аналіз конструкцій робочих органів машин для сепарації зерна і насіння.....	9
1.3. Аналіз конструкцій машин для сепарації зернових сумішей.....	16
1.4. Аналіз конструкцій вібровідцентрових машин.....	20
1.5. Схема вібропневморешітного сепаратора зерна.....	23
РОЗДІЛ 2. ПЕРЕДУМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛЯХОМ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА ВІБРОПНЕВМОРЕШІТНИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ	26
2.1. Аналіз факторів, які впливають на ефективність і продуктивність вібропневморешітної сепарації.....	26
2.2. Аналіз системи «решето - зернова суміш».....	30
2.3. Аналітичні дослідження руху частки в шарі зернового матеріалу.....	34
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКЦІЯ І МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ МАШИНИ ДЛЯ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА	42
3.1. Конструкція дослідного зразка.....	42
3.2. Методика розрахунку параметрів установки.....	46
РОЗДІЛ 4 ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ	58
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВИКОРИСТАННЯ МАШИНИ ДЛЯ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА	63
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70

ВСТУП

Зернове виробництво є однією з провідних галузей агропромислового комплексу України, а забезпечення високої якості зерна після збирання врожаю має важливе значення для підвищення ефективності його виробництва та конкурентоспроможності на внутрішньому і зовнішньому ринках. Однією з найважливіших технологічних операцій післязбиральної обробки зерна є його очищення та сортування, які здійснюються за допомогою зерноочисних машин різних типів.

Основним робочим органом більшості машин для післязбиральної обробки зерна є решітний стан, який забезпечує розділення зернової суміші за геометричними розмірами та аеродинамічними властивостями компонентів. Від конструкції решіт, їх геометричних параметрів, режимів роботи та ефективності взаємодії із зерновим потоком значною мірою залежить якість очищення зерна, продуктивність обладнання та енергоємність технологічного процесу.

Аналіз сучасних технічних засобів післязбиральної обробки зерна показує, що існуючі конструкції решітних машин не повною мірою відповідають сучасним вимогам щодо продуктивності, енергоефективності та якості сепарації. Підвищення пропускної здатності обладнання часто досягається шляхом збільшення площі решітної поверхні, що призводить до зростання матеріалоємності конструкції, витрат електроенергії та вартості обладнання.

У сучасних умовах розвитку енергоощадних технологій особливої актуальності набуває пошук нових конструктивних рішень, які дозволяють підвищити ефективність сепарації без суттєвого збільшення габаритів і маси машин. Відомо, що використання удосконалених робочих органів дає можливість зменшити витрати електроенергії у 1,3–1,7 раза та підвищити якість очищення зернової маси.

Незважаючи на значну кількість теоретичних та експериментальних досліджень процесів сепарації зернових сумішей, питання підвищення ефективності роботи решітних машин залишається актуальним. Особливої уваги потребують дослідження закономірностей руху зернового шару по поверхні решета, впливу

конструктивних параметрів отворів та режимів коливань на якість розділення зернових сумішей.

Одним із перспективних напрямів удосконалення зерноочисних машин є розробка нових конструкцій решіт, які забезпечують інтенсифікацію процесу просіювання, підвищення питомого навантаження на решітну поверхню, зменшення втрат зерна та зниження енерговитрат. Реалізація таких технічних рішень дозволяє підвищити продуктивність обладнання без збільшення його габаритів та маси.

У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на удосконалення конструкції решіт машин післязбиральної обробки зерна, є актуальними та мають важливе науково-практичне значення.

Мета дипломного проєкту – розробка конструкції решіт машини післязбиральної обробки зерна, що забезпечує підвищення ефективності сепарації зернової суміші, покращення якості очищення та зниження енерговитрат технологічного процесу.

Об'єкт дослідження – процес сепарації зернових сумішей у машинах післязбиральної обробки зерна.

Предмет дослідження – конструктивні параметри решіт, режими їх роботи та закономірності взаємодії зернового матеріалу з решітною поверхнею, які впливають на ефективність очищення зерна.

Для досягнення поставленої мети в дипломному проєкті передбачено виконати аналіз існуючих конструкцій решітних машин, розробити удосконалену конструкцію решета, провести необхідні інженерні розрахунки, оцінити технічну та економічну ефективність запропонованого рішення, а також розглянути питання охорони праці під час експлуатації обладнання.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ, ТЕХНОЛОГІЙ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА ПЛОСКОРЕШІТНИМИ МАШИНАМИ

1.1. Огляд способів і технологій сепарації зерна і насіння

Післязбиральна обробка зерна є важливою складовою технологічного процесу виробництва зернової продукції. Її основним завданням є очищення зернової маси від домішок, сортування за фізико-механічними властивостями та підготовка зерна до зберігання, переробки або використання як насіннєвого матеріалу. Якість виконання цих операцій значною мірою визначає товарну цінність зерна, його схожість та тривалість зберігання.

Зернова маса, що надходить від зернозбиральних комбайнів, являє собою складну багатокомпонентну суміш, до складу якої входять повноцінні зерна основної культури, зернова домішка, насіння бур'янів, соломисті залишки, полови, пил та інші сторонні включення. Для ефективного розділення цих компонентів використовуються різні способи сепарації, які ґрунтуються на відмінностях їх фізичних та механічних властивостей.

Найбільш поширеним способом є сепарація за геометричними розмірами частинок, що здійснюється за допомогою решітних машин. У цьому випадку розділення матеріалу відбувається залежно від ширини, товщини та довжини зернівок. Через отвори решіт проходять дрібні домішки або зерно певного розміру, тоді як більші частинки переміщуються по поверхні решета та виводяться окремим потоком. Саме решітна сепарація є основною технологічною операцією в більшості зерноочисних машин.

Широкого застосування набула також повітряна сепарація, яка базується на різниці аеродинамічних властивостей компонентів зернової суміші. Під дією повітряного потоку легкі домішки, полови, пил та щупле зерно відокремлюються від основної маси. Для реалізації цього способу використовують аспіраційні канали, пневмосепаратори та повітряно-решітні машини.

Одним із найбільш ефективних способів очищення насіннєвого матеріалу є сепарація за питомою масою, яка здійснюється на пневмосортувальних столах. При цьому зернівки розділяються залежно від їх густини та маси. Повноцінне важке зерно концентрується в одній частині робочої поверхні, а щупле та пошкоджене переміщується в іншу. Такий спосіб широко використовується для підготовки високоякісного посівного матеріалу.

Для підвищення точності сортування застосовується сепарація за довжиною частинок, що реалізується за допомогою трієрів. Робоча поверхня трієра має спеціальні комірки, які захоплюють частинки певної довжини та відокремлюють їх від основної маси. Трієрні установки використовуються для очищення зерна від коротких і довгих домішок.

Останніми роками активно розвиваються технології оптичного сортування зерна, які базуються на використанні цифрових камер, лазерних сенсорів та систем комп'ютерного аналізу зображень. Такі системи дозволяють розділяти зерно за кольором, формою, ступенем пошкодження та іншими характеристиками. Оптичні сортувальники забезпечують високу якість очищення, проте характеризуються значною вартістю обладнання.

У сучасному зерноочисному обладнанні найчастіше використовуються комбіновані технології сепарації, які поєднують декілька способів розділення зернової суміші. Найбільш поширеними є повітряно-решітні машини, в яких одночасно реалізуються сепарація за аеродинамічними властивостями та геометричними розмірами частинок. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити ефективність очищення зерна та знизити втрати продукції.

Аналіз сучасних технологій показує, що найбільш перспективним напрямом розвитку машин для післязбиральної обробки зерна є вдосконалення конструкції решітних робочих органів. Саме решета виконують основну частину роботи із розділення зернової суміші, а їх конструктивні параметри безпосередньо впливають на продуктивність, якість очищення та енергоємність процесу.

Тому розробка нових конструкцій решіт, здатних забезпечити підвищення ефективності сепарації зерна при одночасному зниженні енергетичних витрат, є

актуальним напрямом розвитку сучасного сільськогосподарського машинобудування.

1.2. Аналіз конструкцій робочих органів машин для сепарації зерна і насіння

Ефективність післязбиральної обробки зерна значною мірою залежить від конструкції робочих органів машин, які забезпечують розділення зернової суміші на окремі фракції. Робочі органи визначають продуктивність обладнання, якість очищення зерна, енергоємність процесу та експлуатаційну надійність машин. Тому аналіз існуючих конструкцій є важливим етапом обґрунтування напрямів їх удосконалення.

У сучасних зерноочисних машинах використовуються різні типи робочих органів, які реалізують сепарацію за геометричними, аеродинамічними, фізико-механічними та іншими властивостями зернової суміші. Найбільш поширеними є решітні, пневматичні, трієрні та комбіновані робочі органи.

Решітні робочі органи

Решітні робочі органи є основними елементами більшості зерноочисних машин. Вони здійснюють розділення зернового матеріалу за шириною та товщиною частинок. Залежно від конструкції отворів решета поділяють на:

- круглоотвірні;
- щілинні;
- прямокутні;
- жалюзійні;
- перфоровані спеціального профілю.

Круглі отвори застосовують переважно для відокремлення дрібних домішок. Щілинні решета забезпечують сортування зерна за товщиною та широко використовуються при очищенні зернових культур. Жалюзійні решета додатково сприяють перемішуванню зернового шару та підвищують ефективність сепарації.

Основними перевагами решітних робочих органів є простота конструкції, висока продуктивність і відносно невеликі експлуатаційні витрати. До недоліків

належать забивання отворів, нерівномірність розподілу матеріалу по поверхні решета та зниження ефективності очищення при збільшенні навантаження.

Вібраційні решітні стани

У більшості сучасних зерноочисних машин використовуються плоскорешітні вібраційні стани. Робочий процес відбувається за рахунок коливального руху решіт, який забезпечує транспортування зернового матеріалу та його інтенсивне просіювання.

Ефективність роботи таких систем залежить від:

- частоти коливань;
- амплітуди коливань;
- кута нахилу решета;
- форми та розмірів отворів;
- товщини шару зернової маси.

Перевагою вібраційних решіт є висока якість очищення та можливість роботи з різними культурами. Недоліком залишається значна енергоємність процесу та поступове зниження ефективності при збільшенні продуктивності машини.

Пневматичні робочі органи

Пневматичні сепаратори використовують різницю в аеродинамічних властивостях компонентів зернової суміші. Основними робочими органами є аспіраційні канали, вентилятори та повітророзподільні системи.

Під дією повітряного потоку від зернової маси відокремлюються:

- пил;
- полови;
- легкі рослинні домішки;
- щупле зерно.

Перевагами пневматичних систем є висока якість очищення від легких домішок та відсутність механічного пошкодження зерна. Недоліками є значне споживання електроенергії та залежність ефективності роботи від рівномірності подачі матеріалу.

Трієрні робочі органи

Трієрні установки використовуються для розділення зернової суміші за довжиною частинок. Основним робочим органом є циліндрична або дискова поверхня з комірками певного розміру.

У процесі роботи короткі або довгі домішки захоплюються комірками та відокремлюються від основної маси зерна.

Перевагою трієрів є висока точність сортування. До недоліків належать складність конструкції, порівняно невисока продуктивність та підвищені вимоги до технічного обслуговування.

Пневмосортувальні столи

Для очищення насіннєвого матеріалу використовують пневмосортувальні столи, які забезпечують розділення зерна за питомою масою.

Робочий орган складається з перфорованої деки, через яку подається повітря, та механізму коливань. Під дією вібрації та повітряного потоку відбувається самосортування зернової суміші.

Такі машини дозволяють отримувати високоякісний посівний матеріал, проте характеризуються відносно невеликою продуктивністю та значною складністю конструкції.

Комбіновані робочі органи

Найбільшого поширення набули комбіновані зерноочисні машини, в яких поєднуються декілька способів сепарації. До складу таких машин входять:

- аспіраційна система;
- решітний стан;
- трієрний блок;
- система транспортування матеріалу.

Комбінування різних принципів розділення дозволяє суттєво підвищити якість очищення зерна та зменшити втрати продукції.

Висновки

Проведений аналіз показав, що основним робочим органом більшості машин для післязбиральної обробки зерна залишаються решета плоскорешітних вібраційних сепараторів. Саме вони забезпечують основний обсяг очищення

зернової маси та значною мірою визначають продуктивність і якість роботи обладнання.

Разом із тим існуючі конструкції решіт мають ряд недоліків: недостатню інтенсивність просіювання, забивання отворів, нерівномірний розподіл зернового шару та підвищені енергетичні витрати. У зв'язку з цим удосконалення конструкції решітних робочих органів є перспективним напрямом підвищення ефективності машин післязбиральної обробки зерна.



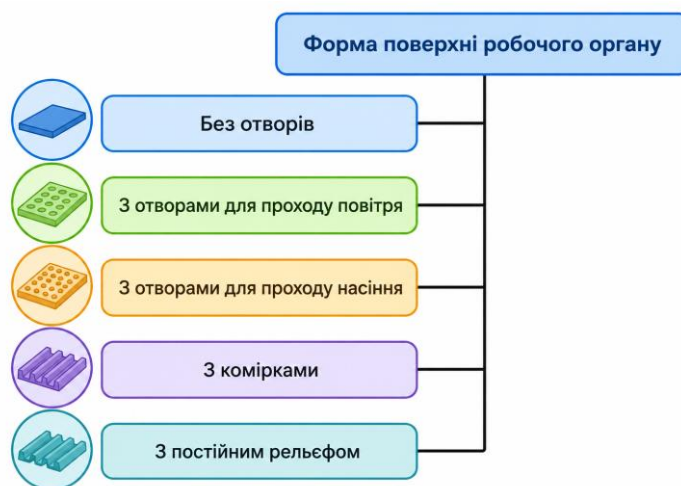


Рис. 1.1. Ознаки класифікації засобів для розділення зерноsumішей

На поверхні робочого каналу можуть бути відсутні отвори, тоді розділення компонентів має місце за рахунок різниці в їх траєкторіях, спеціально створеного підбору параметрів розташування та руху робочого органу. Отвори на поверхні робочих органів можуть бути призначені для проходу насіння або повітря, який використовується для створення зусиль, діючих на частку, якщо вона рухається ізольовано, або для пошарового розподілу компонентів суміші, в залежності від щільності матеріалу часток компонентів, якщо частки рухаються шаром.

На поверхні робочого органу можуть знаходитися комірки, в яких розміщуються частки суміші тільки відповідних діапазонів розмірів. На поверхні можливо розміщувати регулярний рельєф за допомогою елементів різноманітної форми, які використовують для зміни траєкторій руху часток, що мають властивості, які реагують різним чином на зіткнення з елементами регулярного рельєфу.

Матеріал, який знаходиться на робочій поверхні, може рухатись шаром, в якому окремі частки сипкого середовища рухаються за однією траєкторією; рухатись ізольовано, де частки переміщуються по траєкторіях, які відрізняються. В останньому випадку подача матеріалу на робочий орган суттєво менша, що відповідним чином впливає на продуктивність решета. При розділенні за аеродинамічними властивостями використовують вертикальний, похилий та

горизонтальний повітряні канали, з різною формою поперечного перетину: круглі, прямокутні, кільцеві.

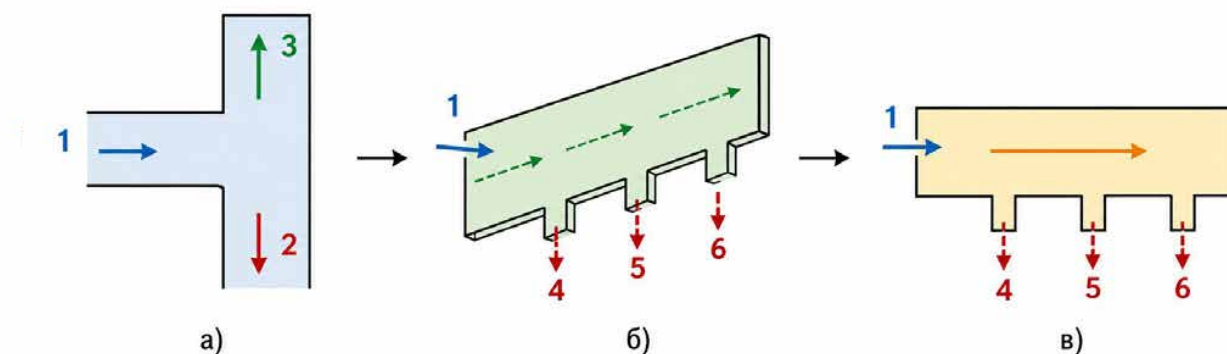


Рис. 1.2. Розділення у повітряному потоці

а, б, в – вертикальний, похилий, горизонтальний канали

1 – подача	3 – вихід легкої фракції
2 – виходи двох фракцій	4, 5, 6 – виходи збільшеного числа фракцій

Рис. 1.2. Розділення у повітряному потоці:

а, б, в – вертикальний, похилий, горизонтальний канали;

1 – подача; 2, 3 – виходи двох фракцій; 4, 5, 6 – виходи збільшеного числа фракцій

Горизонтальні повітряні канали дають можливість розділити суміш на декілька фракцій, проте при цьому ускладнюється конструювання машин.

На робочому органі у вигляді решета можливо розділення насіння основної культури за ознаками ширини та товщини. Розділення по довжині насіння основної культури на решетах неможливо, оскільки вірогідність здійснення відповідного процесу незначна через прохід часток отворами решета у похилому положенні [9].

На решетах можливо також відокремлення часток, максимальний розмір яких суттєво відрізняється від довжини насіння основної культури.

Зазвичай використовують площинні решета, якими передають коливальні рухи порівняно великої амплітуди і малої частоти з тим, щоб збільшити вірогідність проходження часток крізь отвори. Вказана вірогідність збільшується при використанні обертальних циліндричних решіт за рахунок дії відцентрової сили. При цьому продуктивність машини суттєво збільшується, проте конструкція ускладнюється.

При наявності на робочій поверхні комірок є можливість розміщення в них часток на площині, у зв'язку з чим в комірки потрапляють тільки частки, довжина яких менше діаметра комірок. Форма робочої поверхні обрана циліндричною з тим щоб забезпечити винос із зони завантаження часток, які потрапили до комірок.

При наявності на робочій поверхні отворів для проходу повітря, який подається під поверхню та коливального руху має місце пошарова сепарація часток компонентів суміші за ознаками щільності їх матеріалу. У зв'язку з тим, що щільність відповідним чином розташована відносно горизонту і напрямку коливань, частки різної щільності рухаються за різними траєкторіями.

При неможливості розділення сумішей за аеродинамічними властивостями, за розмірами та щільністю матеріалу часток на вказаних пристроях застосовуються технічні засоби, в яких частки рухаються ізольовано. Це потребує зменшення подачі зернової суміші з відповідним зниженням продуктивності.

До таких засобів відноситься полотняна гірка [10] рис. 1.3. При виборі визначеного кута нахилу можливо досягти руху часток вгору або вниз в залежності від їх фізико-механічних властивостей. При зміні напрямку руху транспортного полотна гірки та локальній подачі матеріалу, можливо досягти збільшення якості розділення через те, що частки можуть рухатись під різними кутами траєкторій, проте при цьому продуктивність гірки знижується.

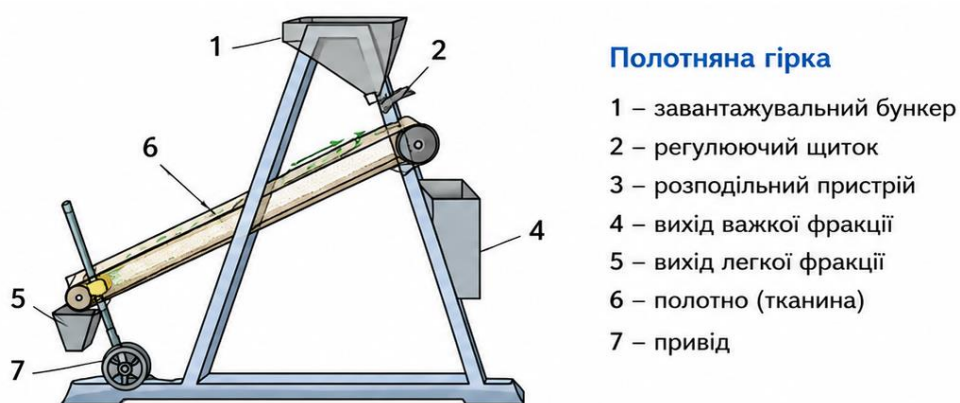


Рис. 1.3. Полотняна гірка:

1 – завантажувальний бункер; 2 – падаючий валик; 3 – регульована заслінка; 4 – приймач компонентів; 5 – приймач круглого насіння; 6 – безкінечна стрічка; 7 – регулюючий механізм

Найбільш простим пристроєм, що розділяє суміші при ізольованому русі часток компонентів суміші [10], є “змійка” рис. 1.4. Тут суміш подається до верхньої частини гвинтової поверхні. В процесі руху часток в нижню частину, через дії відцентрової сили округлі частки відкидаються в другий канал, відділений перегородкою. Недоліком цих пристроїв є низька продуктивність та висока якість розділення.



1.3. Аналіз конструкцій машин для сепарації зернової суміші

У відцентрово-пневматичному сепараторі частки суміші, що подаються на обертальний сітчастий барабан [11], піддаються сумісній дії сили тяжіння та відцентровій силі та дії повітряного потоку. В залежності від властивостей часток вони скачуються з поверхні барабану, або утримуються на ньому ще деякий час. При одержанні відповідного положення, коли дія повітряного потоку стає слабкішою, частки відокремлюються від поверхні барабану та відводяться у відповідний приймач.

Електростатичні сепаратори [12] мають пристрої надання часткам електричного заряду, який може бути відмінним для часток, що мають різні властивості. З застосуванням електростатичного заряду можливе розділення сумішей за кольором. В цьому випадку частки освітлюються джерелом світла, відображеного рефлектором і отримують різний заряд в залежності від властивостей, що відображають поверхні часток. Потрапляючи під дію поля заряджених пластин, частки випадають в різні приймачі.

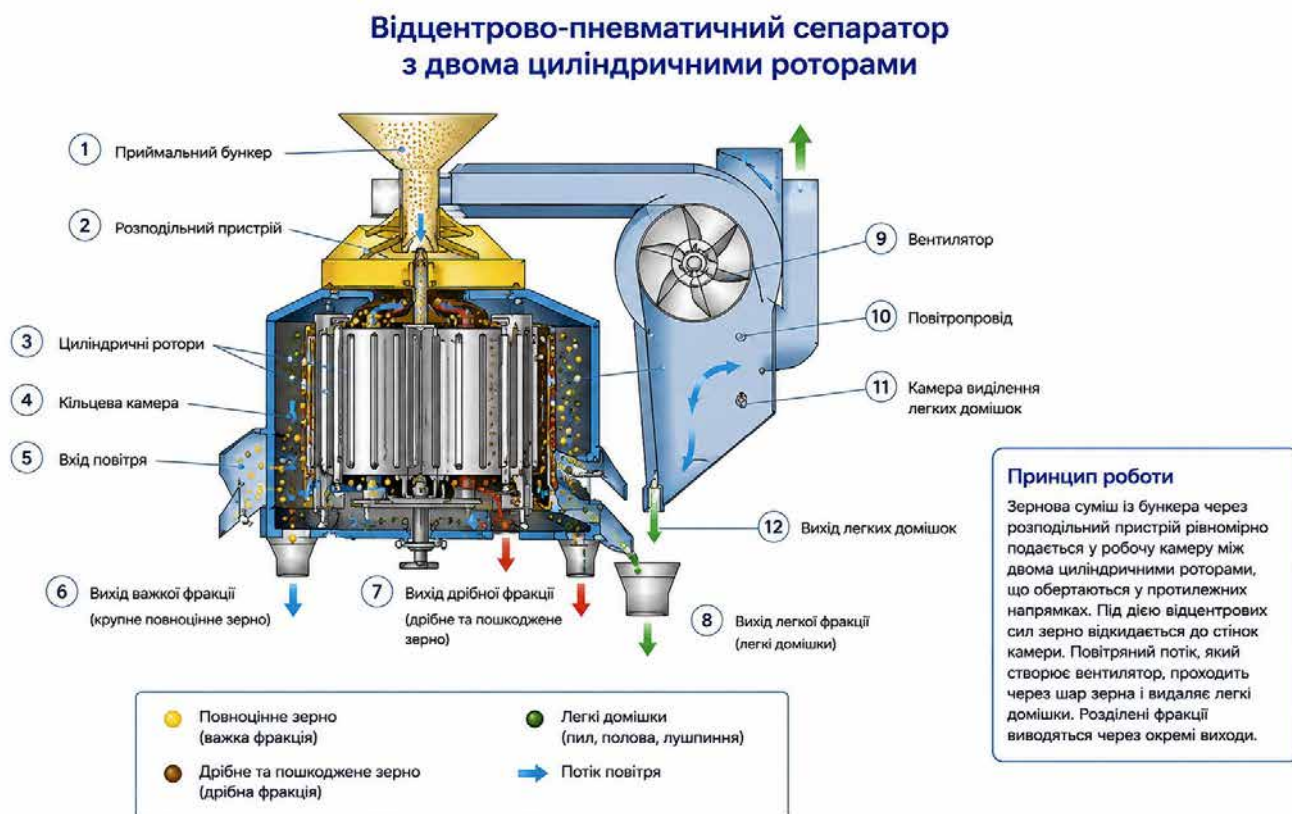


Рис. 1.5. Відцентрово-пневматичний сепаратор з двома циліндричними роторами: 1 – завантажувальний бункер; 2 – конічний розкидач; 3 – дисковий розкидач; 4 – корпус; 5 – внутрішній ротор; 6 – зовнішній ротор; 7 – кільцевий віброкоток; 8 – кріплення решет; 9 – вібратор; 10 – щітки; 11 – вентилятор

Дія магнітного поля використовується в електромагнітному сепараторі (рис. 1.6.). Тут суміш попередньо змішана з магнітним порошком, подається на поверхню обертового барабану з немагнітного матеріалу. Дією поля електромагніту насінини, що мають шорстку поверхню, на якій утримується магнітний порошок, зтягуються в нижню частину барабану. Насінини з гладкою поверхнею, на якій магнітний

порошок не утримається, не реагують на наявність магнітного поля і скачуються з поверхні барабану в інші приймачі.

Своє місце серед пристроїв, в яких має місце рух частки за різними траєкторіями, займає площина, що вібрує. Найбільші аналоги - гірки, відбивний стіл та “змійка”. Перевагою вібруючої площини перед гірками та “змійкою” є суттєва активізація взаємодії часток суміші з робочою поверхнею.

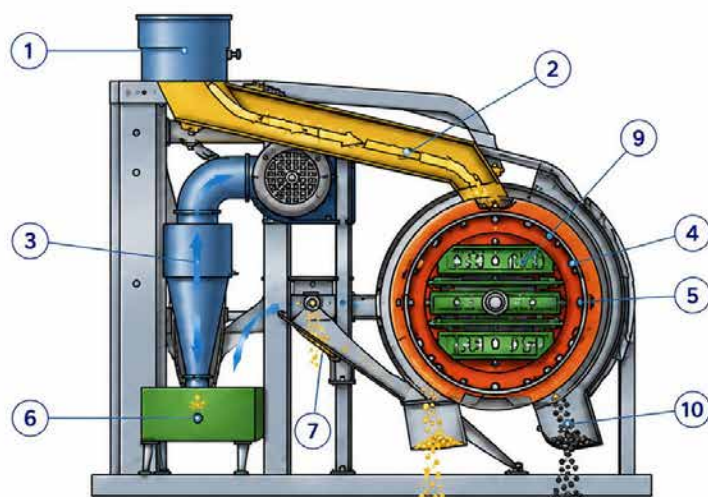


Рис. 1.6. Електромагнітний сепаратор:

1 – приймальний пристрій; 2 – віброкоток; 3 – привід; 4 – барабан; 5 – електромагніти; 6 – очисник; 7 – поворотний клапан; 8 – двигун; 9 – вал; 10 - рама

Перевагою вібруючої площини перед відбивним столом (рис. 1.7.) є можливість покращення якості процесу за рахунок руху компонентів, які різняться за траєкторіями.

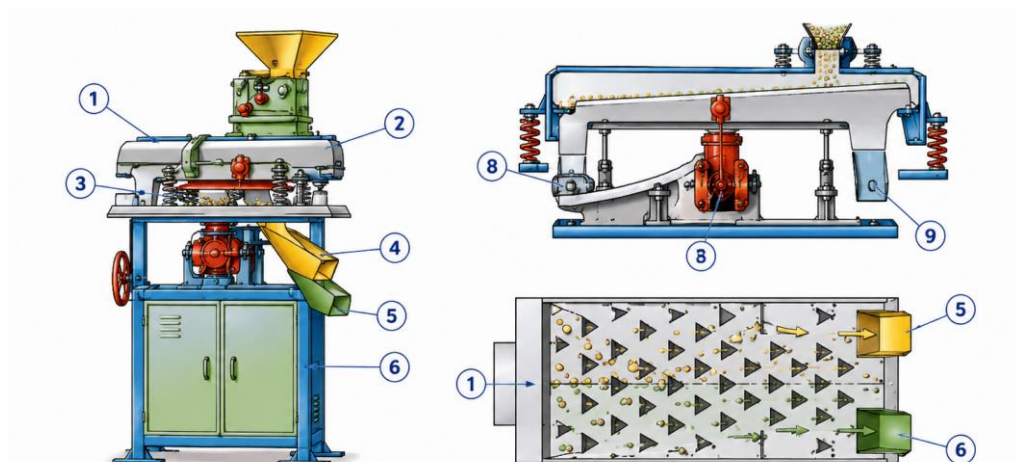


Рис. 1.7. Відбивний сортувальний стіл:

- 1 – днище каналу; 2 – направляючі стінки каналу; 3 – матеріал; 4 – бункер;
5 – верхній вихід; 6 – нижній вихід; 7 – шатун; 8 – маховик; 9 – опори

Відомий також повітряно-решітний сепаратор для очищення невеликих партій насіння [10] рис. 1.12.

Призначений для очищення партій насіння від легких, дрібних, великих домішок у селекції, первинному насінництві, невеликих господарствах, а також для сепарації різних сипучих матеріалів.



Рис. 1.12. Повітряно-решітний сепаратор

Сепаратор (рис. 1.12.) включає: приймальний бункер, двох'ярусний решітний стан, механізм кулькового очищення решіт, вібропривід, повітряне очищення з відцентровим вентилятором, приймачі розділених фракцій.

Коротка інформація подана в додаток А таблиці 2.

Основні переваги даного типу сепаратора:

- висока якість очищення по різниці розмірів часток та їхньої щільності;

- невелика вага і малі габарити;
- легко і повністю очищається від матеріалу попередньої культури.
- практично відсутність витрат на обслуговування і ремонт.

1.4 Аналіз конструкцій вібровідцентрових машин

Серед сучасних засобів післязбиральної обробки зерна особливе місце займають вібровідцентрові машини, принцип роботи яких ґрунтується на одночасній дії вібраційних та відцентрових сил на зернову суміш. Поєднання цих факторів дозволяє суттєво інтенсифікувати процес сепарації, підвищити продуктивність обладнання та покращити якість очищення зернового матеріалу.

У традиційних плоскорешітних машинах переміщення зернової суміші відбувається переважно під дією коливань решітного стану. При збільшенні подачі матеріалу ефективність просіювання знижується через зростання товщини зернового шару та погіршення умов контакту частинок із решітною поверхнею. У вібровідцентрових машинах ця проблема вирішується шляхом створення додаткового поля відцентрових сил, яке сприяє інтенсивному переміщенню частинок та їх розшаруванню.

Принцип роботи вібровідцентрових машин полягає у тому, що зернова суміш надходить на робочу поверхню, яка одночасно здійснює обертальний і коливальний рухи. Під дією відцентрових сил зерно притискається до сепарувальної поверхні, а вібрація забезпечує його переміщення вздовж робочого органу та створює умови для проходження дрібних частинок через отвори решета. У результаті досягається інтенсивне розділення компонентів суміші за розмірами, густиною та іншими фізико-механічними властивостями.

За конструктивним виконанням вібровідцентрові машини можна поділити на кілька основних груп:

- машини з циліндричними решетами;
- машини з конічними решетами;
- машини з багатоярусними решітними поверхнями;
- віброцентрифуги;

- комбіновані вібровідцентрові сепаратори.



Рис. 1.13. Циліндричний вібровідцентровий сепаратор.

Одними з найпоширеніших є машини з циліндричними решетами. Робочий орган таких машин виконаний у вигляді перфорованого циліндра, який обертається навколо своєї осі та одночасно здійснює коливальний рух. Основною перевагою циліндричних решіт є значна площа сепарувальної поверхні при відносно невеликих габаритах машини. Крім того, відцентрові сили забезпечують рівномірний розподіл зернової маси по всій поверхні решета.

Конічні вібровідцентрові решета характеризуються змінним радіусом робочої поверхні. Така конструкція дозволяє регулювати швидкість переміщення матеріалу вздовж сепаратора та створює сприятливі умови для багатоступеневого очищення зерна. Конічні поверхні забезпечують більш рівномірне навантаження на решето та підвищують ефективність використання робочої площі.

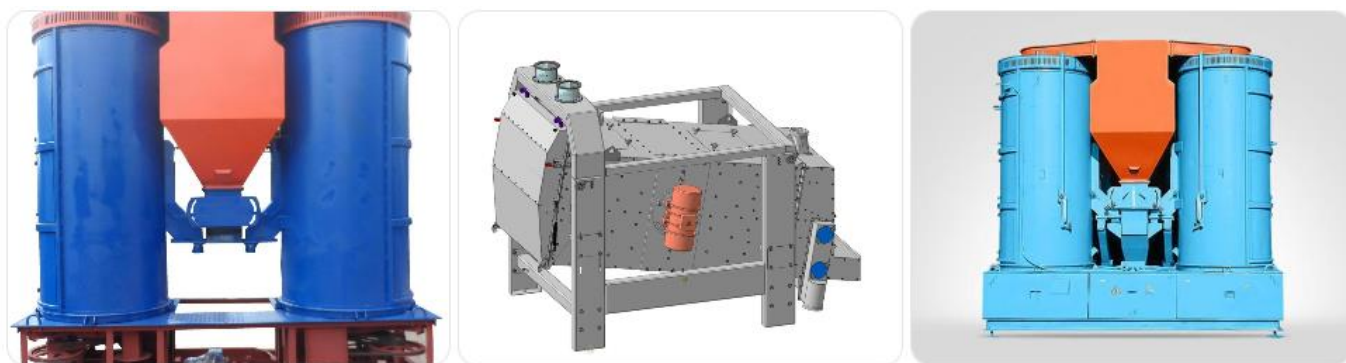


Рис. 1.14. Конічний вібровідцентровий сепаратор.

Для підвищення якості сепарації використовують багатоярусні конструкції, в яких матеріал послідовно проходить через декілька решітних поверхонь із різними

розмірами отворів. Це дозволяє одночасно виділяти великі, дрібні та легкі домішки, а також сортувати зерно на окремі фракції.



Рис. 1.15. Віброцентрифуга для поділу зернової суміші за густиною.

Окрему групу становлять віброцентрифуги, у яких основним робочим органом є вертикальний або похилий ротор. У таких машинах зернова суміш піддається дії значних відцентрових сил, що забезпечує ефективне розділення частинок за густиною. Найчастіше віброцентрифуги використовуються для очищення насіннєвого матеріалу та сортування зерна підвищеної якості.

Проведені дослідження показують, що застосування вібровідцентрових робочих органів дозволяє підвищити питому продуктивність сепараторів у 2–3 рази порівняно з традиційними плоскорешітними машинами. При цьому забезпечується висока якість очищення зерна та зменшуються питомі енергетичні витрати на виконання технологічного процесу.



Рис. 1.16. Відцентрово-пневматичний сепаратор.

До основних переваг вібровідцентрових машин належать:

- висока продуктивність;
- інтенсивне розшарування зернового матеріалу;
- ефективне використання робочої поверхні;
- можливість багатоступеневого очищення;
- покращення якості сепарації;
- зменшення габаритів обладнання при однаковій продуктивності.

Разом із тим такі машини мають і певні недоліки:

- складніша конструкція порівняно з традиційними сепараторами;
- підвищені вимоги до балансування ротора;
- більша вартість виготовлення;
- необхідність точного налаштування режимів роботи.

Аналіз існуючих конструкцій показує, що найбільш перспективним напрямом удосконалення машин для післязбиральної обробки зерна є використання комбінованих вібровідцентрових робочих органів із розвиненою сепарувальною поверхнею. Такі конструкції забезпечують підвищення продуктивності, покращення якості очищення зернової маси та зниження питомих витрат енергії, що відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження та ефективності аграрного виробництва.

1.5 Схема вібропневморешітного сепаратора зерна

Проведений аналіз існуючих способів сепарації зернових сумішей та конструкцій зерноочисних машин показав, що перспективним напрямом підвищення ефективності післязбиральної обробки зерна є поєднання механічного просіювання та пневматичного розділення матеріалу. Такий підхід дозволяє одночасно здійснювати очищення зернової маси від великих, дрібних та легких домішок при високій продуктивності обладнання.

З цією метою запропоновано конструкцію вібропневморешітного сепаратора зерна, схема якого наведена на рис. 1.16.

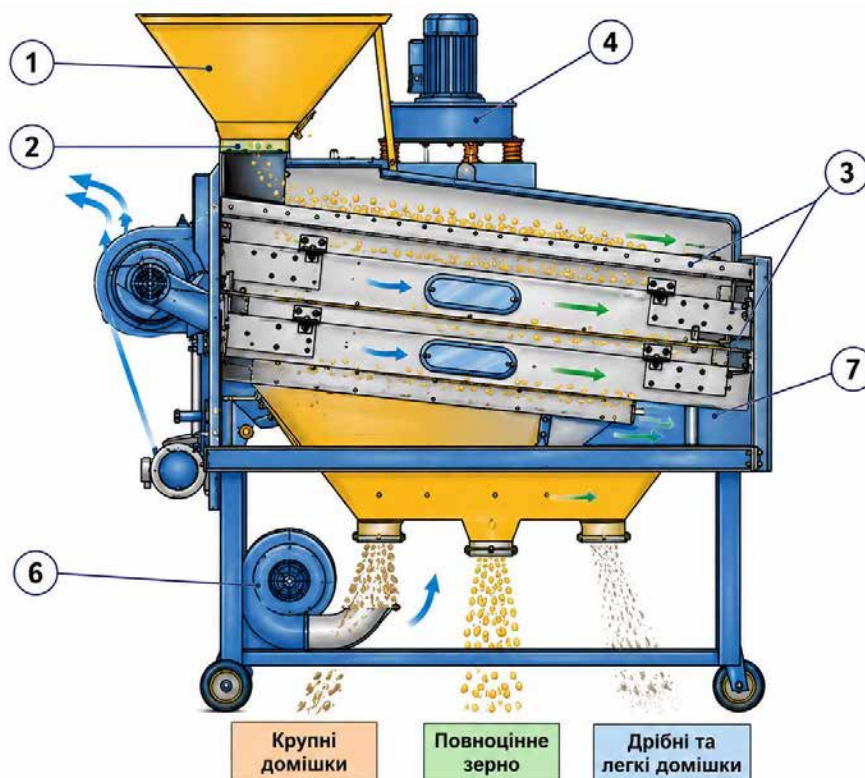


Рис. 1.16 – Схема вібропневморешітного сепаратора:

1 – бункер; 2 – регулююча пластина; 3 – віброрешета; 4 – вібропривід;
5 – відсмоктуючий вентилятор; 6 – нагнітальний вентилятор; 7 – наглядове вікно.

Рис. 1.17 – Схема вібропневморешітного сепаратора:

Запропонований вібропневморешітний сепаратор складається з приймального бункера, системи подачі зернового матеріалу, комплекту вібраційних решіт, приводу коливального руху та пневматичної системи очищення. До складу пневматичної системи входять нагнітальний і відсмоктуючий вентилятори, які створюють спрямований повітряний потік у зоні сепарації.

Принцип роботи сепаратора полягає в наступному. Зернова суміш завантажується до бункера 1, звідки через регулюючу пластину 2 рівномірно подається на верхнє віброрешето 3. Під дією коливань, які створюються віброприводом 4, зернова маса переміщується по робочій поверхні решета та одночасно розшаровується.

У процесі руху зернового шару відбувається його інтенсивне розпушування, що сприяє підвищенню ефективності просіювання. Великі домішки, розміри яких перевищують отвори решета, переміщуються сходом та видаляються через окремий

канал. Дрібні домішки проходять крізь отвори решіт і також відводяться окремо від основного зернового потоку.

Одночасно з механічним розділенням на матеріал діє повітряний потік, сформований нагнітальним вентилятором 6 та відсмоктуючим вентилятором 5. Під дією аеродинамічних сил із зернової суміші видаляються легкі домішки: пил, полова, оболонки, щупле зерно та інші легкі частинки. Виділені домішки транспортуються повітряним потоком до відповідних приймальних пристроїв.

Після завершення процесу сепарації очищене повноцінне зерно надходить до окремого приймача, тоді як великі, дрібні та легкі домішки збираються у відповідних каналах відведення.

Запропонована конструкція дозволяє поєднати переваги решітної та пневматичної сепарації, забезпечуючи високу якість очищення зернового матеріалу, підвищення продуктивності процесу та зниження питомих енергетичних витрат у порівнянні з традиційними зерноочисними машинами.

РОЗДІЛ 2

ПЕРЕДУМОВИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ І ЕФЕКТИВНОСТІ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА ВІБРОПНЕВМОРЕШІТНИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ

2.1. Аналіз факторів, які впливають на ефективність і продуктивність вібропневморешітної сепарації

Спочатку розглянемо критерії ефективності процесу сепарації. При очистці необхідно розділити суміш на три фракції – очищене зерно (повноцінне), дрібні домішки та легкі і важкі домішки. Під очищеною фракцією – приймають суміш, яка містить не більше заданої відносної кількості домішок.

Суміш містить частки двох видів. Критерії якості поділу суміші в завданнях очищення насінних сумішей аналогічні застосовуваним у гірничорудній і переробній промисловості [24] і висвітлені в стандартах [25]. Основою визначення критеріїв якості в стандартах є відношення мас фракцій з різних приймачів до маси початкової суміші. Такий спосіб визначення є прийнятним для виробництва, однак не дає більш докладної інформації, необхідної при проведенні науково-дослідних робіт з підвищення ефективності процесів сепарації. Підвищення точності оцінок якості процесів сепарації пов'язане з використанням кривих розподілу ймовірностей значень характеристик компонентів суміші. Удосконалення способів оцінки на цій основі почалося із середини 60-х років у багатьох галузях промисловості. Стосовно до завдань очищення насіння на вібруючій площині такий підхід був використаний у роботах [26]. У цих роботах запропонований спосіб побудови номограм для визначення поздовжнього кута нахилу робочої поверхні з використанням кривих розподілу ймовірностей значень граничних кутів підйому насіння по вібруючій поверхні [23]. Такий спосіб визначення кута нахилу робочої площини є наближеним, тому що в недостатній мірі враховує характеристики траєкторії компонентів суміші на робочій площині, яка розташована довільно щодо напрямків вібрацій.

Іншим недоліком розглянутих методик є відсутність математичного забезпечення при визначенні оцінок, тому що визначення характеристик запропонованими способами надзвичайно трудомістко. У зв'язку із цим було

поставлена задача вдосконалення критеріїв якості очищення за рахунок усунення зазначених недоліків.

Якість очищення залежить від взаємного положення кривих розподілу компонентів суміші. Тому наближене уявлення про якість очищення дає математичне очікування координат точок сходу насіння основної культури та домішок.

Причому, при певному положенні математичного очікування координат точок сходу насіння, основної культури і домішок якість очищення буде збільшено при зменшенні розсіювання координат.

Інше положення при сортуванні. У цьому випадку потрібно розділити суміш, що складається з насіння одного виду, і тут бажане збільшення розсіювання координат точок сходу, тому що це свідчить про високий ступінь реагування положення насіння на змінення фізико-механічних властивостей.

Вибір критеріїв якості сортування не настільки очевидний, як вибір критерію якості очищення. Справа в тому, що прямими критеріями якості сортування є критерії, пов'язані з агротехнічними показниками насіння - схожість, енергія проростання. Визначення цих характеристик дуже трудомісткі, тому бажано знайти непрямі критерії, які б визначалися досить легко. Бажано встановити також зв'язок між такими критеріями і агротехнічними показниками насіння, тому відповідні дослідження також були включені в число задач роботи.

Як при сортуванні, так і при очищенні істотне значення має швидкість транспортування часток по вібруючій поверхні, тому що вона визначає допустиму подачу, тобто продуктивність машини. Природно, що мова йде про швидкості транспортування насіння основної культури, тому що вона становить переважну більшість суміші, що подається на робочу площину. У зв'язку із цим швидкість транспортування, також є критерієм ефективності процесу сепарації.

Таким чином, ефективність технологічного процесу сепарації визначається двома критеріями - критерієм якості розділення і критерієм швидкості переміщення. У зв'язку із цим при визначенні оптимальних параметрів можливі різні варіанти постановки задач. Доцільним представляється добиватися збільшення значення

критерію якості процесу розділення при обмеженні мінімально припустимої швидкості переміщення.

Розглянемо параметри, які впливають на технологічний процес сепарації. До них відносяться: A - амплітуда коливань решета; ω_B - частота вібрацій; ε - кут між напрямком збудливої сили і площиною (кут спрямованості вібрацій); α - кут між горизонтом і лінією перетинання робочої площини з вертикальною площиною, у якій розташовується збудлива сила (поздовжній кут); β - кут між горизонтом і лінією перетинання робочої площини з вертикальною площиною, перпендикулярною площиною, у якій розташовується збудлива сила (поперечний кут); Q - подача суміші; ε - засміченість суміші; δ - матеріал поверхні робочої площини; L, B - довжина і ширина робочої площини і їхнє співвідношення; $y_{мз}$ - координата місця завантаження; V_n - швидкість повітря; l_i^*, b_i^* - геометричні параметри розпушувача шару зернового матеріалу.

Доцільно розділити зазначені параметри на 4 групи:

- регульовані параметри вібропневморешітної машини - $\omega_B, \alpha, \beta, V_n, l^*, b^*$;
- розміри сторін робочої площини, (а також їхнє співвідношення) і координати місця завантаження, L, B ;
- матеріал робочої поверхні δ ;
- характеристики подаваної суміші - Q, ε ;

Матеріал робочої поверхні разом з матеріалами поверхонь часток і компонентів суміші описуються групою коефіцієнтів взаємодії тіла з віброуючою площиною. Це коефіцієнти тертя руху f , спокою f_n , коефіцієнт відновлення нормальної складової швидкості при ударі e , коефіцієнт λ зменшення дотичної швидкості при ударі.

Значення перерахованих коефіцієнтів повинні бути обрані так, щоб характеристики процесу сепарації, визначені за допомогою математичних моделей відповідали експериментальним даним. Слід зазначити, що в процесі проведення досліджень було встановлено, що перерахований набір коефіцієнтів при рішенні

задачі руху насіння не дає можливості домогтися ідентичності розрахункових і експериментальних даних.

Для досягнення цієї мети був уведений спеціальний коефіцієнт θ , що враховує занурення тіла усередину робочої поверхні. Необхідність введення цього коефіцієнта пов'язане з малими розмірами часток компонентів суміші, що складається з насіння основної культури і домішок.

Характеристикою шару насіння є також щільність матеріалу тіла (питома маса) ρ . В процесі проведення досліджень варто встановити ступінь впливу також і цього параметра.

До числа факторів, що впливають на процес сепарації, відносяться розміри і форма насінин. Повністю описати форму насіння, як природного об'єкта, практично неможливо, тому в якості геометричних характеристик можна використати розміри довжини l , ширини b і товщини c частки.

Для характеристики форми частки можна користуватися коефіцієнтом форми у вигляді співвідношень характеристик розмірів, наприклад, у вигляді l/b , l/c , b/c або співвідношень іншого виду. Характеристики траєкторії тіла - частки залежать від початкових умов руху зернового матеріалу. До їхнього числа відносяться лінійні координати та швидкості центра мас часточки, а також кутові координати і швидкість часточки. До числа початкових умов відносяться також фазовий кут початку руху тіла на площині φ .

Параметри, що впливають на процес можна розділити на керовані і некеровані. До керованих, тобто таких, які можливо змінювати з метою ефективного здійснення процесу сепарації, відносяться: $A, \omega_B, \alpha, V_{II}, Q, L, B, B/L, y_{zn}$.

До некерованих, тобто таких, які є умовами процесу можна віднести наступні: характеристики тіла, які поряд з характеристиками матеріалу робочої поверхні визначають значення коефіцієнтів взаємодії $f, f_n, e, \lambda, \delta$, щільність матеріалу ρ , розміри l, b, c і коефіцієнт форми c/l ; фазовий кут початку руху φ ; початкові значення руху координат і швидкостей часток.

Число керованих параметрів у нашому випадку, навіть якщо вважати матеріал робочої поверхні одним параметром становить, як видно, 10. Якщо виключити із

числа початкових умов рух координати місця завантаження $y_{мз}$, що є керованим параметром, то число некерованих параметрів для одного компонента суміші становить 19; для очищення, коли в процесі розділення беруть участь компоненти двох найменувань, зазначене число збільшується вдвічі. Розв'язання задачі, підвищення ефективності процесу розділення суміші на вібруючій площині, як видно, є досить складним і вимагає проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень.

2.2. Аналіз системи «решето - зернова суміш»

Для інтенсифікації розрихлення шару зерна на поверхні площинних решіт, збільшення його просіювання при одночасному “гальмуванні” руху, запропоновано використовувати механічні “побудники” гребінчастоштифтового типу. Механічний побудник закріплений на площинній поверхні, з можливістю відхилення в певному напрямку (вертикально), штифти (циліндричної форми діаметром 2,5-10 мм), які утворюють систему гребінок, розташованих в шаховому порядку. Щільність штифтів становить 2-20 шт/дм².

Для визначення ефективності застосування запропонованих технічних рішень доцільно порівняти швидкості переміщення та занурення частки в шарі, відомих робочих органів і нових, так як саме цей фактор і визначає продуктивність решета.

Для їх визначення необхідно встановити закономірності руху частки у сипкому середовищі.

На основі аналізу дії сил на частку, яка переміщується у сипкому середовищі, що знаходиться на поверхні нахилоного решета, яке здійснює гармонічні коливання у площині під кутом α , сформульована математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь другого порядку :

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = m \cdot (\Delta - 1) \cdot g \cdot \sin \alpha \pm m \cdot (\Delta - 1) \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos \beta - R_X(\varepsilon) \cdot \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \\ m \cdot \ddot{y} = m \cdot (\Delta - 1) \cdot g \cdot \cos \alpha \pm m \cdot (\Delta - 1) \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin \beta - R_Y(\varepsilon) \cdot \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} + \\ + f(Re) \cdot F_m \cdot \rho_n \cdot \frac{(\dot{y} \pm V_B)^2}{2} + \\ + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot \rho_C(\varepsilon) \cdot g \cdot \frac{\sum n_i \cdot S_{IIIi}}{F_P} \cdot (H_{III} - y - r_c) \cdot \left[1 + 2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \right] \cdot \sin \alpha; \end{cases} \quad (2.1)$$

При складанні рівнянь зроблені такі припущення:

- частка, що рухається у сипкому середовищі однакова за розміром з частками середовища і має більшу від них масу;
- коливання решета у вертикальному напрямку здійснюється за гармонічним законом;

Математична модель процесу взаємодії системи «решето - зернова суміш» розглянута авторами [29].

Представлена математична модель (2.1), є системою нелінійних диференціальних рівнянь, рішення яких проводиться з використанням чисельних методів на ЕОМ. Для рішення даної математичної моделі використовується пакет MatLab, призначений для автоматизації наукових і інженерних розрахунків в області аналізу та синтезу широкого класу динамічних систем [27].

MatLab орієнтується на блочно-структурну форму, подання математичних моделей. Модель в MatLab - це сукупність типових блоків і зв'язків між ними. Характерною рисою MatLab є реалізований у них графічними засобами ПЕВМ об'єктно-орієнтований діалог: на екрані ПЕВМ структура моделі відтворюється у формі, звичайно використовуваний при зображенні на аркуші паперу, а всі необхідні для обробки моделі вказівки, користувач задає MatLab в основному за допомогою функціональної клавіатури. Така форма діалогу рятує користувача від необхідності вивчення вхідної мови і концентрує його увагу на істотні для розв'язуваної задачі питання.

Для введення в MatLab систему рівнянь (2.1), скористаємося методикою, представленої в [28]. Сутність методу полягає в складанні структурної схеми з використанням відомих передатних функцій, якщо відомо диференціальне рівняння, що описує динаміку, наприклад, рух частки в вібропневмозрідженому стані, що має вигляд :

$$R_n = 6,5 \cdot \frac{F_m \cdot \rho_n \cdot (V \pm V_\phi)^2}{\sqrt{4,8 \cdot \varepsilon^{2,6} \cdot \frac{V_B}{v} \cdot d}} \quad (2.2)$$

Для проведення аналізу руху частки за системою (2.1) створено імітаційну модель (пакет Simulink середовища MatLab) у вигляді функціонального блоку (рис. 2.1).

Графічне подання рівняння (2.1) є його структурною інтерпретацією, що наведена на рис. 2.1.

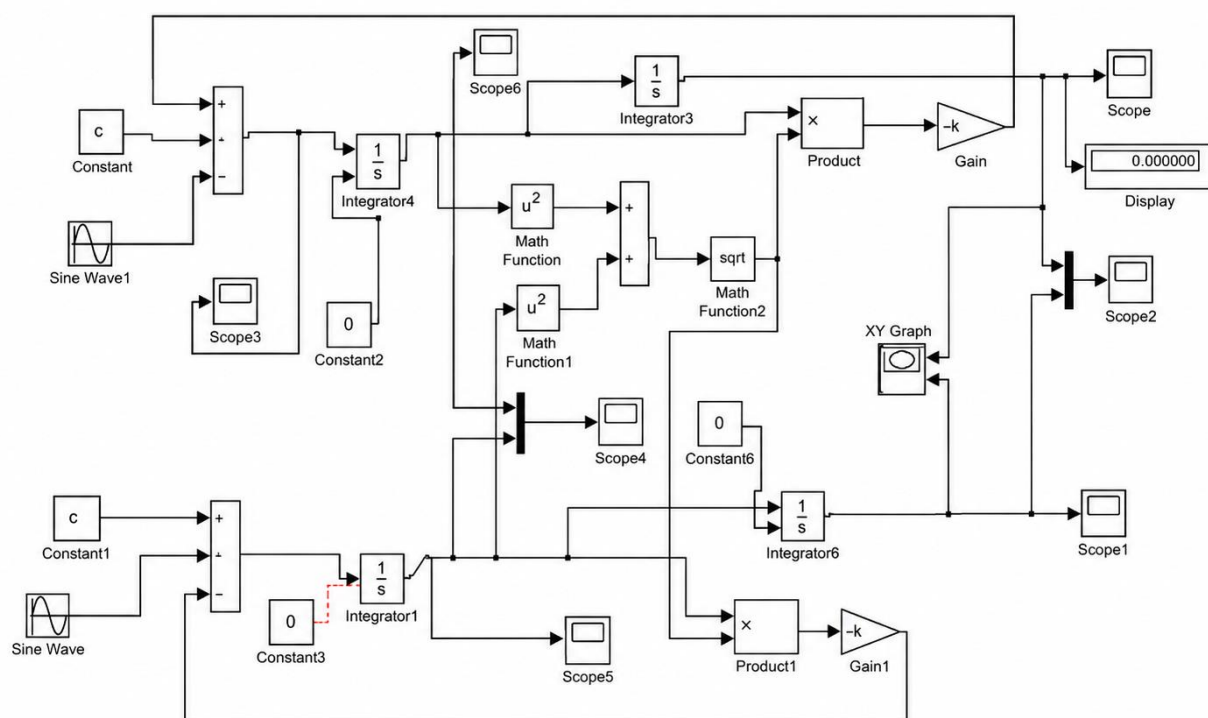
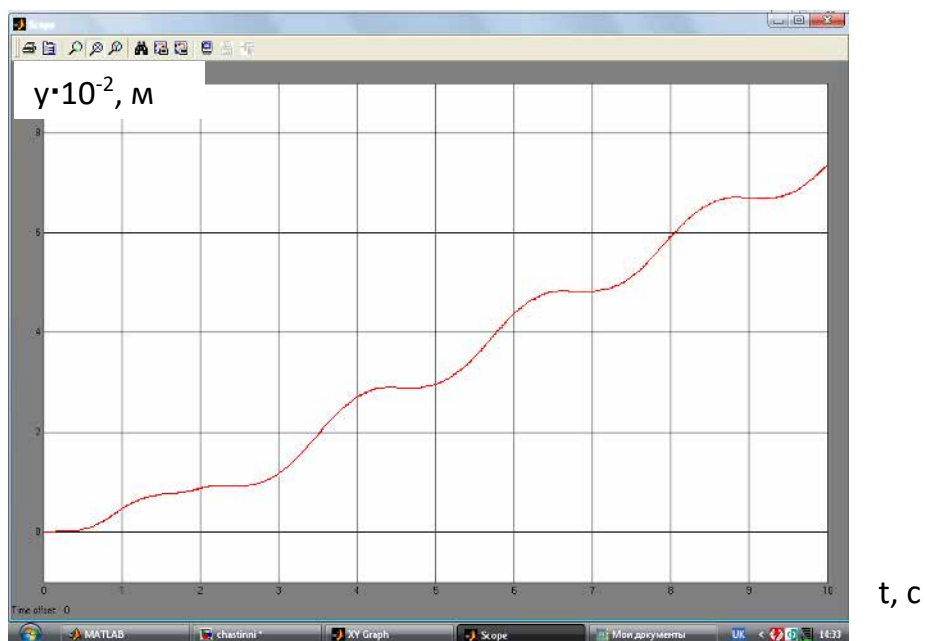
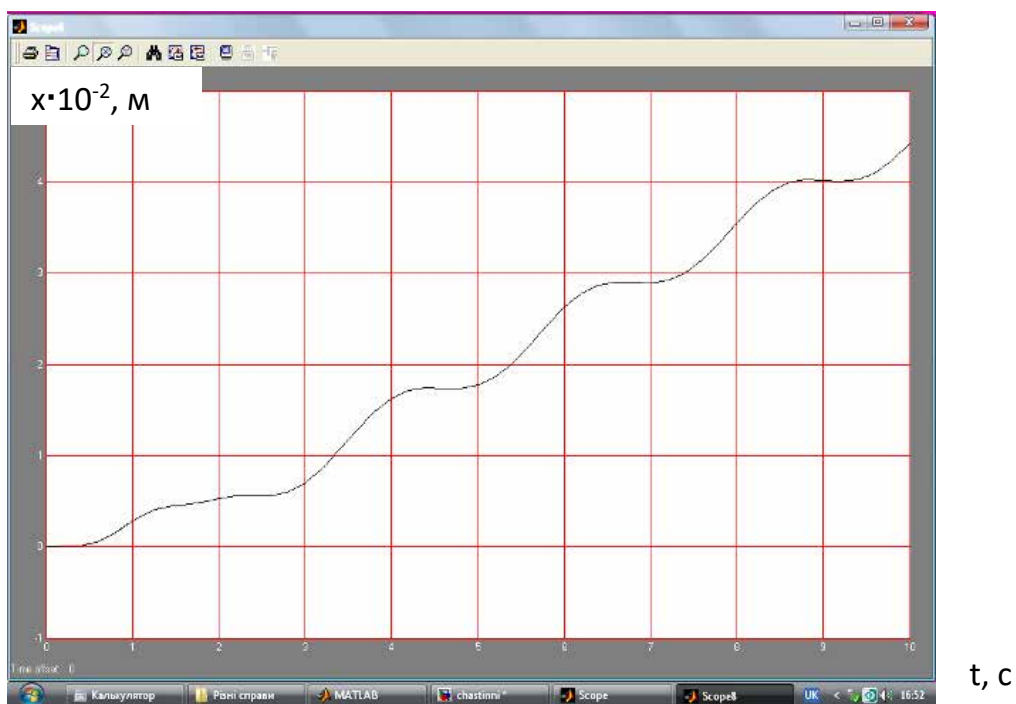


Рис. 2.1. Імітаційна модель руху частки у вібропневмозрідженому шарі зерна.

Запропонована методика [29] дає можливість визначити параметри віброзбуджувача, частотні характеристики системи та провести оптимізацію системи. Розв'язок системи (2.1) за допомогою отриманої моделі дозволяє визначити координати руху частки і відповідно будови траєкторії руху (рис. 2.2).



а)



б)

Рис. 2.2 а), б) Графічна інтерпретація руху частки у вібропневмозрідженому шарі зерна відносно вісі y та x .

Проведений на імітаційній моделі аналіз руху частки дозволив встановити, що при русі частки, що має більшу густину ніж «середні» частки швидкість руху у вертикальному напрямку не перевищує 0,06 м/с, тому, використовуючи гіпотезу про характер руху частки за законом Стокса, систему диференціальних рівнянь (2.1), можна спростити заміною сили опору R_c на силу в'язкого тертя.

2.3. Визначення характеристик віброзрідженого шару

Як показано вище, швидкість переміщення частки у вібропневмозрідженому шарі зерна залежить від сили опору, яка характеризується в'язкістю, що залежить від кінематичних режимів та геометрії розпушувачів. Для визначення залежності вібров'язкості шару від робочих параметрів.

Розглянемо сталий режим руху частки (при $\frac{dV}{dt} = 0$).

За умов сталого руху частки (для повного періоду коливань решета) вертикальна швидкість визначається розв'язком рівняння:

$$\bar{V}_y = -\frac{R_Y(\varepsilon)}{2 \cdot m} \cdot e^{-\frac{R_Y(\varepsilon)}{2 \cdot m} \cdot t} \cdot [C_1 \cdot \cos(D \cdot t) + C_2 \cdot \sin(D \cdot t)] + e^{-\frac{R_Y(\varepsilon)}{2 \cdot m} \cdot t} \cdot [-C_1 \cdot D \cdot \sin(D \cdot t) + C_2 \cdot D \cdot \cos(D \cdot t)] - \frac{C_1 \cdot R_Y(\varepsilon) \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) - C_1 \cdot (m \cdot \omega^2 - Q_1) \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)}{(R_Y(\varepsilon) \cdot \omega)^2 - (m \cdot \omega^2 - Q_1)^2} \quad (2.3)$$

за умови $t \rightarrow \infty$.

Таким чином швидкість занурення частки у віброзрідженому шарі зерна визначається виразом:

$$V_{y|t \rightarrow \infty} = \frac{C_1 \cdot (m \cdot \omega^2 - Q_1) \cdot \omega}{(R_Y(\varepsilon) \cdot \omega)^2 - (m \cdot \omega^2 - Q_1)^2} \quad (2.4)$$

Співставляючи вираз (2.4) з відомою формулою швидкості вільного падіння кулеподібної частки у в'язкій рідині при незначних числах Рейнольда [23]:

$$V_z^* = \frac{m_c \cdot (\Delta - 1) \cdot g}{3 \cdot \pi \cdot \mu^* \cdot d} \quad (2.5)$$

Отримаємо залежність ефективного коефіцієнта в'язкості зернового шару μ_{III} та, відповідно, коефіцієнту опору $R_Y(\varepsilon)$, від параметрів робочих органів та режиму сепарації зерна:

$$R_Y(\varepsilon) = 3 \cdot \pi \cdot \mu_{III} \cdot d_q; \quad (2.6)$$

$$\mu_{III}^* = \frac{(m \cdot \omega^2 - Q_1) \cdot (A \cdot \omega^2 + \sqrt{A^2 \cdot \omega^4 + 4 \cdot g^2})}{6 \cdot \pi \cdot \omega \cdot g \cdot d_q} \quad (2.7)$$

Отже визначено критерій оцінки інтенсивності розпушування віброзрідженого шару зерна – ефективна в'язкість та отримано залежність для його визначення і

кількісної оцінки. Вираз (2.7) дозволяє встановити залежність сили опору від конструктивних параметрів розпушувачів та конструктивно-кінематичних параметрів сепаратора.

Результати досліджень ефективної вібров'язкості від конструктивно-кінематичних параметрів представлено на рис. 2. 3 та рис. 2.6.

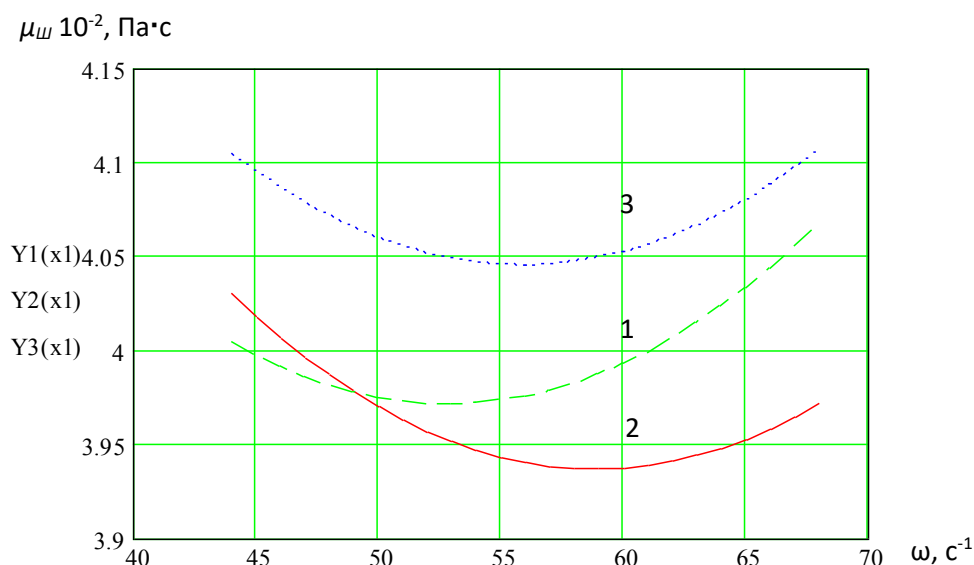


Рис. 2. 3. Залежність коефіцієнту ефективної в'язкості $\mu_{ш}^{x1}$ від частоти коливань решета ω при різних значеннях швидкості повітряного потоку:

1 - $V_B = 0,5$ м/с; 2 - $V_B = 1$ м/с; 3 - $V_B = 1,5$ м/с.

($A = 5$ мм; $\alpha = 6^\circ$; $d_{ш} = 10$ мм; $n_{ш} = 10$ шт/дм²; $q_F = 60$ кг/(дм²·год)).

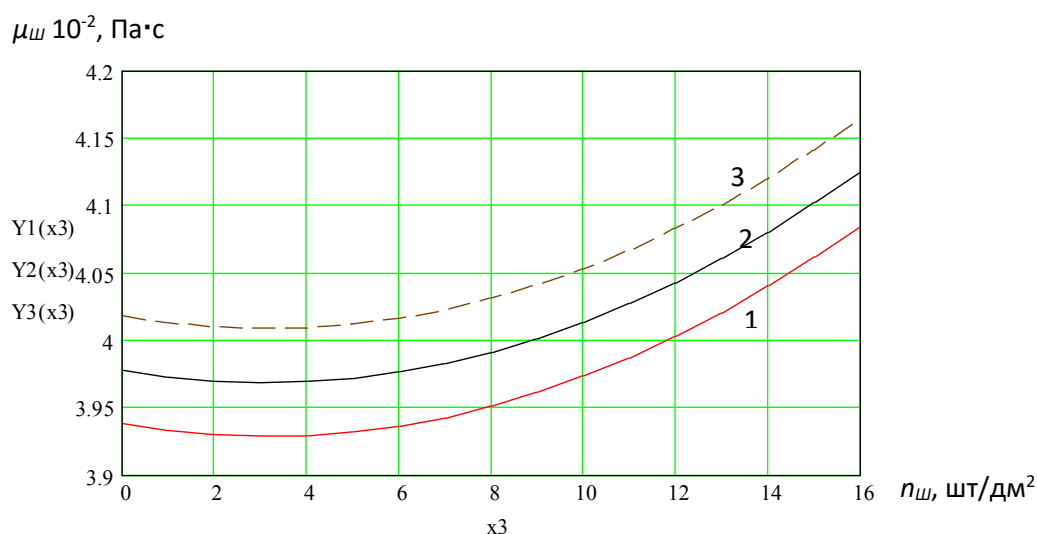


Рис. 2.4. Залежність коефіцієнту ефективної в'язкості $\mu_{ш}^{x3}$ від щільності розміщення штифтів $n_{ш}$ при різних значеннях питомого навантаження на решето q_F :

1 - 40 кг/(дм²•год); 2 - 50 кг/(дм²•год); 3 - 60 кг/(дм²•год).

($A = 5$ мм; $V_B = 1$ м/с; $\alpha = 6^\circ$; $\omega = 60$ с⁻¹; $d_{III} = 10$ мм).

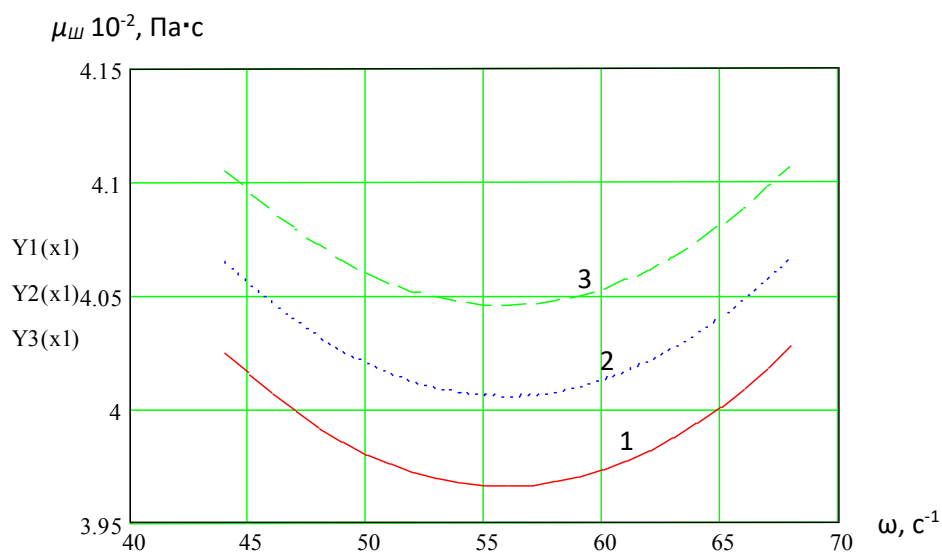


Рис. 2.5. Залежність коефіцієнту ефективної в'язкості μ_{III} від частоти коливань решета ω при різних значеннях питомого навантаження на решето q_F :

1 - 40 кг/(дм²•год); 2 - 50 кг/(дм²•год); 3 - 60 кг/(дм²•год).

($A = 5$ мм; $V_B = 1$ м/с; $d_{III} = 10$ мм)

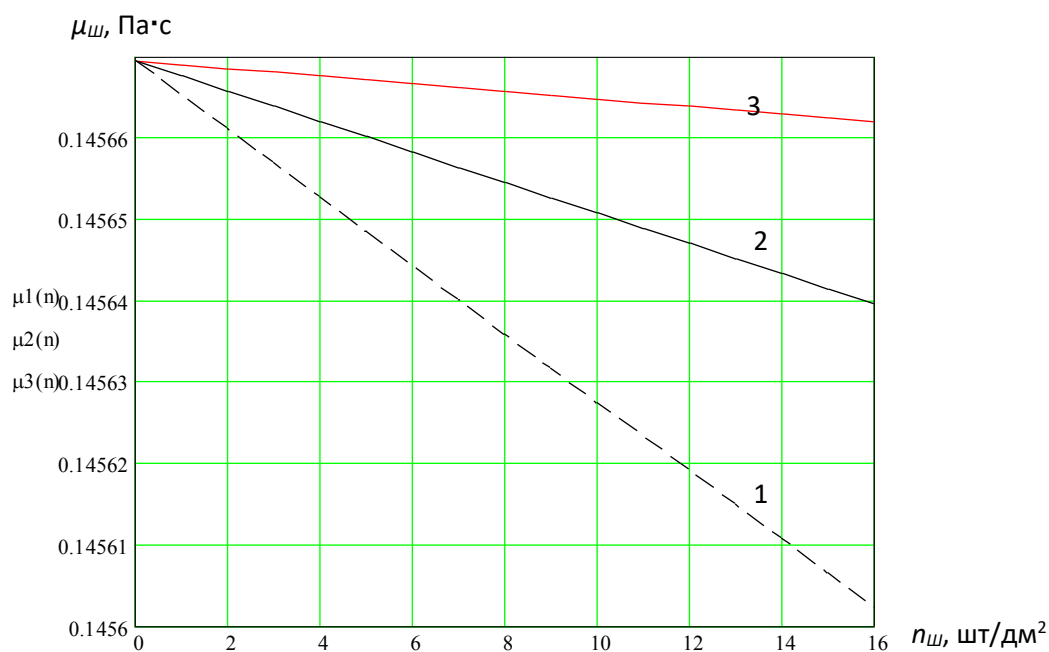


Рис. 2.6. Залежність коефіцієнту ефективної в'язкості μ_{III} від щільності розміщення штифтів n_{III} при різних значеннях конструктивних параметрів розпушувачів:

1 - $d_{III} = 0$ мм; 2 - $d_{III} = 5$ мм; 3 - $d_{III} = 10$ мм.

$$(A = 5 \text{ мм}; V_B = 1 \text{ м/с}; d_{III} = 10 \text{ мм}; q_F = 60 \text{ кг/(дм}^2 \cdot \text{год)}).$$

2.4. Розрахунок параметрів механічних розпушувачів на переміщення зерна на решеті

Розглянемо гальмуючі елементи – розпушувачі, форма яких відрізняється від циліндричної.

Потік сипучого матеріалу, який омиває ці елементи, натискає на них. По величині цього тиску ведуть розрахунки конструктивних елементів.

На практиці зустрічаються конструктивні елементи, які можна об'єднати у дві основні групи: підвіски й одиночні або групові конструктивні елементи (рис. 2.7).

Підвіски представляють, як правило, конструктивні елементи постійного перетину по довжині, що виходять над вільною поверхнею сипучого матеріалу. Підвіску кріплять у верхній точці. Розрахунок її зводиться до визначення зусиль, що діють із боку потоку сипучого матеріалу. Зусилля це - інтегральна сила тертя. Величину його визначають по формулі [29]:

$$T_{II} = A \cdot L \cdot H \cdot p_{cp} \cdot f_0, \quad (2.8)$$

де A – дослідний коефіцієнт, що враховує характер дії навантаження на підвіску;

L - периметр підвіски, м;

H – довжина підвіски, омивана потоком, м.

p_{cp} - середній тиск на довжині підвіски в Н/м²;

f_0 - коефіцієнт зовнішнього тертя.

При омиванні сипучим матеріалом окремі конструктивні елементи викликають зміну структури потоку в місцях його набігання на конструктивний елемент і тертя потоку об бічні поверхні елемента. Дослідження показали, що процес досить близький до обтікання тіла потоком рідини.

Це дозволяє, за аналогією з гідродинамікою, загальний опір конструктивного елемента представити у вигляді опору форми, або лобового опору T_L й опору

тертя, або бічного опору T_6 . Тоді загальний опір обтікаючого конструктивного елемента буде дорівнює:

$$T = T_l + T_6. \quad (2.9)$$

Природа лобового опору визначається перебудовою структури потоку сипучого матеріалу, набігаючого на конструктивний елемент.

Величина лобового опору визначиться зусиллям, затрачуваним на перебудову структури сипучого матеріалу, і величиною вертикального тиску на конструктивний елемент.

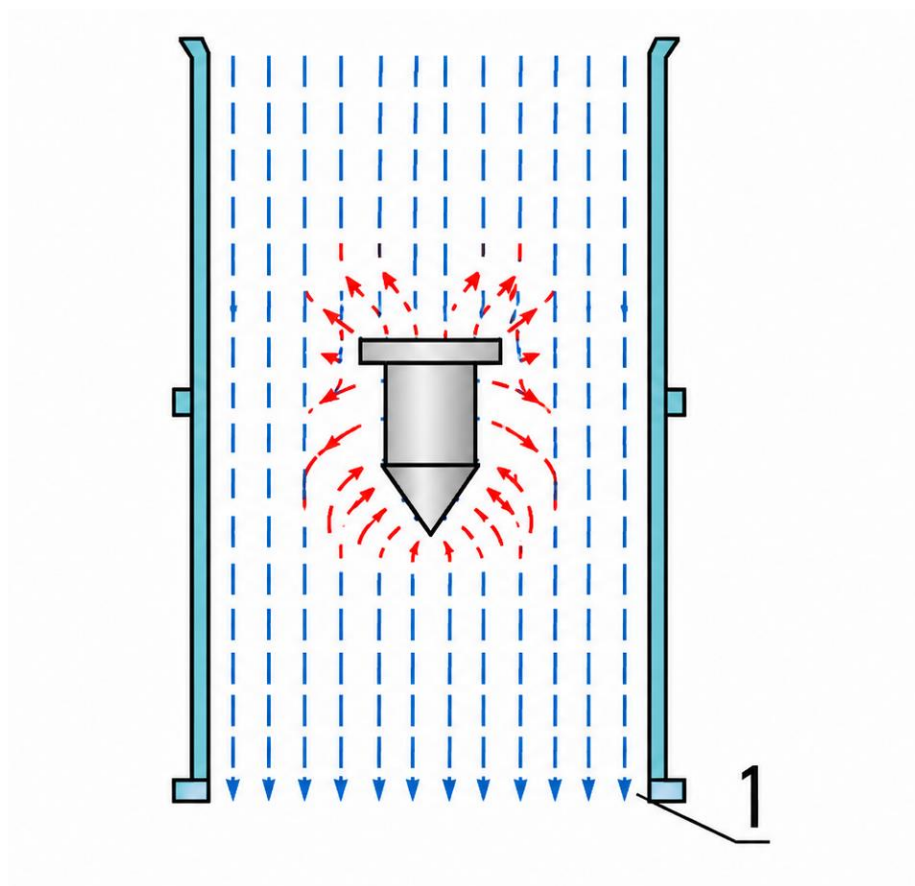


Рис. 2.7. Схема розташування конструктивного елемента в зерновому потоці

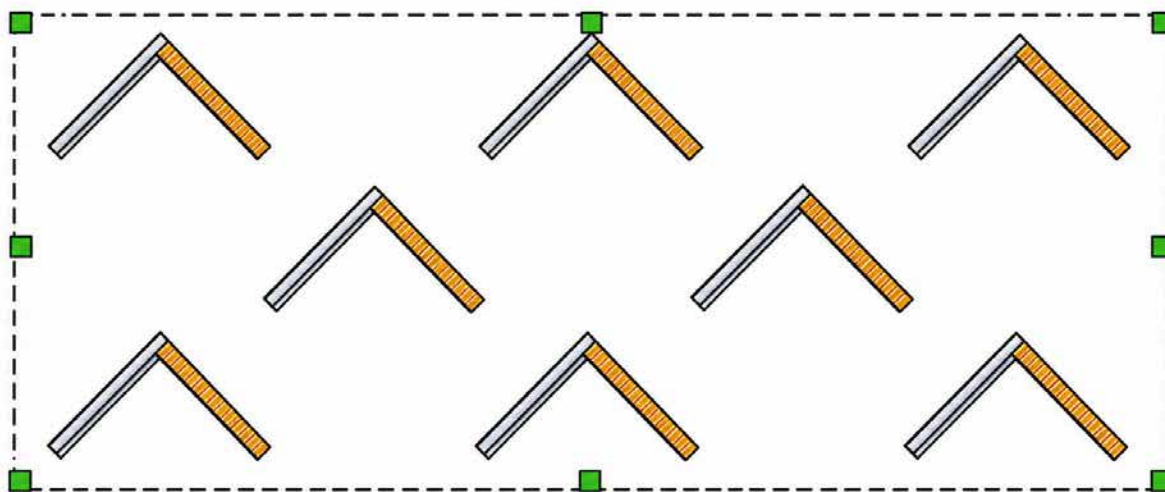


Рис. 2.8. Схема розташування пасивних розпушувачів над віброрешетом.

Якщо прийняти, що перебудова структури потоку відбувається на деякій його висоті h_{yc} , то величина опору, викликувана перебудовою потоку, буде дорівнює:

$$P_{оп} = L \cdot h_{yc} \cdot p \cdot f \quad (2.10)$$

де L - периметр міделевого перетину обтікаємого елемента в м;

p - горизонтальний тиск на глибині розташування елемента в потоці, Н/м²;

f - коефіцієнт внутрішнього тертя.

Величина вертикального тиску на елемент дорівнює:

$$P_T = q \cdot F_M, \quad (2.11)$$

де q - вертикальний тиск на глибині розташування елемента, Н/м²;

F_M - площа міделевого перетину елемента, м².

Лобовий опір тонкої пластини, розташованої перпендикулярно осі потоку, прийняте за одиницю, дорівнює [28]:

$$T'_L = L \cdot h_{yc} \cdot p \cdot f + q \cdot F_M = \left(\frac{h_{yc}}{R_\Gamma} \cdot f \cdot p + q \right) \cdot F_M. \quad (2.12)$$

Величина h_{yc} , як показали досліди [29], функція гідравлічного радіуса R_Γ міделевого перетину елемента і може бути в першому наближенні визначена рівнянням:

$$h_{yc} = c \cdot R_\Gamma, \quad (2.13)$$

де c - постійна (для пшениці $c = 4,3$; для проса $c = 4,7$).

Коефіцієнт опору тіл потоку сипкого матеріалу приведено в [28].

Для елементів довільної форми необхідно у формулу ввести коефіцієнт опору ξ , що залежить від форми обтікаємого елемента [28]. У загальному виді величина лобового опору дорівнює:

$$T_L = \xi \cdot T'_L = \xi \cdot (c \cdot f \cdot p + q) \cdot F_M \quad (2.14)$$

Бічний опір по своїй природі більше складний. Він залежить від висоти омиваючого елемента та різний на початку і кінці елемента. У головній частині потік набігає на омиваний елемент й, перетерпівши зміну структури тобто рекомбінацію зернівок по висоті шару, чинить підвищений тиск. При подальшому русі відбувається вирівнювання структури потоку й бічний опір здобуває природу, аналогічну опору підвісок.

Якщо позначити через τ_{cp} середній питомий тиск потоку на шляху h_i (рис. 2.7), де відбувається зміна його первісних властивостей, і через F_{61} бічну поверхню цієї частини обтічного елемента, то опір на цій ділянці буде дорівнює $T_{61} = \tau_{cp} \cdot F_{61}$, а опір в хвостовій частині (кінці) елемента $T_{62} = p \cdot f_0 \cdot F_{62}$, де F_{62} - бічна поверхня хвостової частини елемента в m^2 .

Величину τ_{cp} , обумовлену дослідним шляхом, можна обчислити по наступній формулі:

$$\tau_{cp} = \left[(a^n - m) \cdot p - l \right] \cdot b \cdot f_0 \cdot a^{-1}, \quad (2.15)$$

де b, n, m, l - постійні (для ячменю $b = 8,5$; $n = 0,45$; $m = 0,4$; $l = 0,9$; для проса $b = 8,1$; $n = 0,45$; $m = 0,45$; $l = 1$).

$$a = \frac{h}{D}, \quad (2.16)$$

h - висота конструктивного елемента, м;

D - характерний розмір конструктивного елемента, м.

Сумарний бічний опір для конструктивного елемента висотою h дорівнює:

$$T_B = T'_B + T''_B = \left[(a^n - m) \cdot p - l \right] \cdot b \cdot f_0 \cdot a^{-1} \cdot F'_B + f_0 \cdot p \cdot F''_B, \quad (2.17)$$

де F'_B - визначають у м^2 для висоти елемента $h_1 = 0,5 \cdot D$, м;

F''_B - визначають у м^2 для висоти елемента $h_2 = h - h_1$, м.

Якщо висота обтічного елемента $h < h_1$ у формулі (2.9) другий член відкидають.

У ряді апаратів шлях потоку сипучого матеріалу перетинають рівномірно розподілені по поперечному перерізі конструктивні елементи, що утворюють решітку з живим перетином:

$$\varepsilon^* = \frac{\sum F_p}{F}, \quad (2.18)$$

де $\sum F_p$ - сумарна площа міделевих перетинів штифтів решітки, м^2 ;

F - площа потоку ЗВ, м^2 .

Зусилля, що діють із боку потоку на одноярусну решітку визначають по формулі:

$$T_r = \left(1 - e^{-n_1 \cdot \varepsilon^*}\right) \cdot q \quad (2.19)$$

де n_1 - постійна (для пшениці $n_1 = 6$).

У випадку багатоярусних розпушувачів зусилля, що діє на кожну нищележачий розпушувач, дорівнює:

$$T'_r = \left(1 - e^{-m_1 \cdot t}\right) \quad (2.20)$$

де m_1 - постійна (для пшениці $m_1 = 1,25$);

t - відстань між штифтами по вертикалі в м;

T_r - тиск на вищележачий штифт, визначається з рівняння (2.10), Н.

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКЦІЯ І МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ МАШИНИ ДЛЯ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА

3.1. Конструкція дослідного зразка

Проведені експериментальні дослідження процесу сепарації зернових матеріалів на вібропневматичних решетах із застосуванням штучного гальмування шару зернового матеріалу підтвердили доцільність розроблення вдосконаленої конструкції вібропневматичного сепаратора для післязбиральної обробки зерна та насіння. Основною особливістю запропонованої машини є використання пасивних гальмуючих елементів, розташованих над поверхнею вібруючого решета, що забезпечують додаткове перемішування зернового шару, підвищення інтенсивності сегрегації компонентів та покращення умов проходження повітряного потоку через шар матеріалу.

Для проведення досліджень було розроблено та виготовлено дослідний зразок вібропневмосепаратора ВПС-5 продуктивністю до 5 т/год. Конструкція машини складається з рами, завантажувального бункера, системи подачі зернового матеріалу, вібраційного решета, пневматичної системи аерації, приводу коливань, пасивних гальмуючих елементів, розвантажувальних пристроїв та системи регулювання режимів роботи.

Завантаження зернового матеріалу в приймальний бункер здійснюється за допомогою пневматичного навантажувача ПТЗ-100. Далі матеріал рівномірним шаром подається на поверхню вібруючого решета. Під дією коливань решета та висхідного повітряного потоку зернова маса переходить у псевдозріджений стан, що сприяє інтенсивному розшаруванню частинок за густиною, аеродинамічними властивостями та геометричними розмірами.

Особливу роль у роботі сепаратора відіграють пасивні гальмуючі елементи, встановлені над робочою поверхнею решета. Під час руху зернового потоку вони створюють локальні зони гальмування та турбулізації, внаслідок чого збільшується тривалість перебування частинок у зоні сепарації та покращуються умови їхнього

взаємного перерозподілу. Завдяки цьому підвищується ефективність виділення повноцінного зерна та зменшуються втрати якісного матеріалу у відходи.

Вібраційний привід забезпечує гармонічні коливання решета із заданими амплітудою та частотою. Повітряний потік створюється вентилятором і подається через повітророзподільну камеру під решето. Інтенсивність подачі повітря може регулюватися залежно від виду культури та ступеня засміченості зернової маси.

Загальний вигляд експериментального зразка вібропневмосепаратора ВПС-5 під час завантаження зерна за допомогою пневматичного навантажувача ПТЗ-100 наведено на рисунку 3.1.

До складу дослідного зразка ВПС-5 входять:

1. Завантажувальний бункер.
2. Регулювальний пристрій подачі матеріалу.
3. Вібраційне решето.
4. Вібропривід.
5. Повітророзподільна камера.
6. Вентилятор.
7. Пасивні гальмуючі елементи.
8. Рама машини.
9. Механізм регулювання кута нахилу решета.
10. Відвід легких домішок.
11. Вихід очищеного зерна.
12. Відвід крупних домішок.
13. Електропривід.
14. Пневматичний навантажувач ПТЗ-100.

У результаті застосування пасивних гальмуючих елементів та оптимізації параметрів вібропневматичного процесу забезпечується підвищення якості очищення зернових матеріалів, збільшення продуктивності машини та зниження питомих енергетичних витрат на виконання технологічного процесу. Це створює передумови для подальшого вдосконалення конструкції та впровадження сепаратора ВПС-5 у технологічні лінії післязбиральної обробки зерна.



Рис. 3.1. Завантаження дослідного зразка вібропневматичного сепаратора ВПС-5 пневматичним навантажувачем зерна ПТЗ-100

Загальний вигляд машини та основних дослідних робочих частин представлено на (рис. 3.2, рис. 3.3, рис. 3.4, рис. 3.5, рис. 3.6, рис. 3.7).



Рис. 3.2. Загальний вигляд дослідного зразка вібропневматичного сепаратора для зерна і насіння ВПС-5 [33]



Рис. 3.3. Загальний вигляд розташування пасивних розпушувачів над поверхнею віброрешета



Рис. 3.4. Пасивні розпушувачі розташовані у шаховому порядку у найбільш завантаженій частині віброрешета



Рис. 3.5. Загальний вигляд вібратора для приводу решітних станів вібропневматичного сепаратора ВПС-5

На (рис. 3.5) показано загальний вигляд вібратора для приводу решітних станів сепаратора. За допомогою електродвигуна вібратор приводиться в дію і забезпечував постійну амплітуду коливань решітних станів $A=5$ мм при оптимальній частоті обертання $\omega = 48 - 52 \text{ с}^{-1}$.

При проведенні експериментальних досліджень змінення частоти обертання регулювали варіатором у межах від 100-2000 об/хв., як показано на (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Регулювання частоти обертання решітних станів за допомогою зміни положення ручки варіатора



Рис. 3.7. Загальний вигляд всмоктуючого вентилятора з аспіраційною камерою та пультом керування

3.2. Методика розрахунку параметрів установки

Робота решета полягає в розділенні насінного матеріалу на дві частини (фракції), що відрізняються один від одного розмірами часток. Для здійснення цього процесу решета приводять у коливальний або обертовий рух.

Плоскі решета вставляють у так названі решітні стани, які підвішуються до рами машини на пружних або шарнірних підвісках і приводяться в коливальний рух від ексцентрика, кривошипа або колінчатого вала шатуном.

Ефективність роботи решета визначається його продуктивністю, тобто кількістю зернового матеріалу, що надходить на решето в одиницю часу при заданій повноті розділення та оптимальному кінематичному режиму роботи решета.

Під повнотою розділення решета розуміється процентне відношення кількості виділених решетом дрібних зерен до всієї кількості їх у зерновому матеріалі, що надійшов на решето. Вона визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{100 \cdot \Phi}{u}, \quad (3.1)$$

де ε - повнота розділення в %;

u - процентний вміст дрібних зерен у вихідному матеріалі;

Φ - процентне відношення ваги проходу через решето до ваги зернового матеріалу, що надійшло на решето.

Досвід показує, що повноту розділення, рівну 80-90%, можна вважати гарної. При попередньому очищенні зернового матеріалу можна допустити повноту розділення $\varepsilon = 60\%$.

Оптимальний кінематичний режим плоского решета визначається величиною максимального прискорення коливального руху решета.

На рис. 3.8 показана кінематична схема плоского решета. На ній літерою α позначено кут нахилу решета до горизонту, літерою β - кут напрямку коливань решета.

Кут $\gamma = \alpha + \beta$ являє собою кут між напрямком коливань і площиною решета.

При зворотно-поступальних коливаннях решето рухається нерівномірно, з деяким прискоренням, що змінює величину та напрямок.

Це прискорення, як відомо з механіки, виражається формулою [34]:

$$j = \omega^2 \cdot A \cdot \cos(\varphi), \quad (3.2)$$

де ω - кутова швидкість обертання ексцентрикового вала або кривошипа;

A - амплітуда коливань решіт у м;

φ - кут повороту ексцентрика або кривошипа від напрямку коливань.

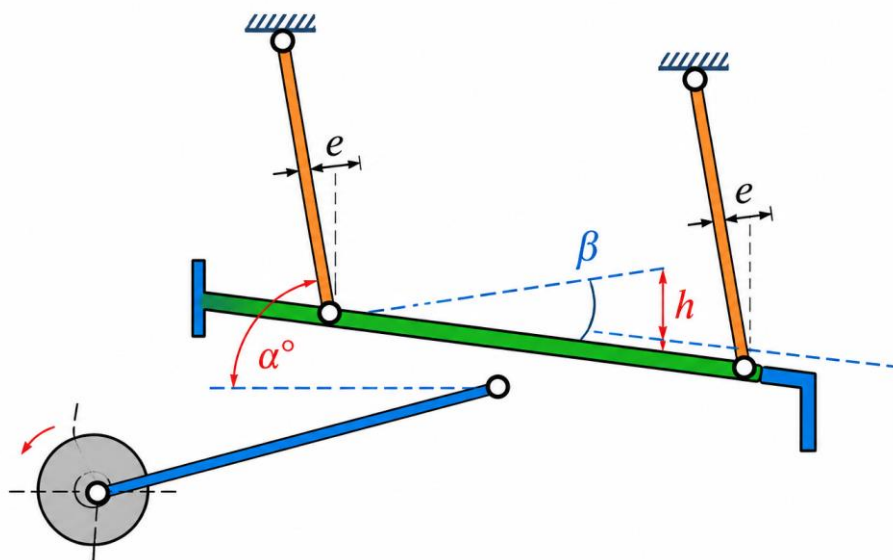


Рис. 3.8. Кінематична схема решета

Як видно з формули (3.2), прискорення міняється залежно від кута φ . Максимальне прискорення буде при $\varphi = 0$. Тоді:

$$j_{\max} = \omega^2 \cdot A = \frac{\pi^2 \cdot n^2}{900} \cdot A, \quad (3.3)$$

де n - частота коливань решета у хвилину.

Досліди показують, що для одержання максимальної повноти розділення решета при даному його завантаженні необхідно здійснювати роботу при певному $j_{\max}$, незалежно від величин A і n . Значення $j_{\max}$, при якому утворюється максимальна повнота розділення, називається оптимальним.

Оптимальне значення $j_{\max}$, що позначимо через j_0 , залежить від завантаження одиниці ширини решета, кута його нахилу до горизонту і кута напрямку коливань.

Продуктивність решета прямо пропорційна його площі та виражається формулою:

$$Q = q_F \cdot F, \text{ кг/год.}, \quad (3.4)$$

де q_F - продуктивність одиниці площі решета в кг/(год·дм²);

F - площа решета в дм².

При користуванні цією формулою необхідно мати на увазі наступне. Як показали дослідження, прямолінійна залежність між Q і F спостерігається, коли завантаження одиниці ширини решета більше деякої величини K кг/(год·дм). Якщо завантаження одиниці ширини решета знижувати, зробивши її меншою K , понизиться і ефективність решета (продуктивність одиниці площі решета q_F). Величину K можна назвати мінімальним завантаженням одиниці ширини решета. Вона неоднакова для різних культур; для пшениці. $K = 200$ кг/(год·дм).

При розрахунку решета необхідно приймати завантаження одиниці ширини решета $q_B \geq 200$ кг/(год·дм). Тоді по заданій продуктивності Q решета може бути визначена його ширина:

$$B = \frac{Q}{q_B}. \quad (3.5)$$

Шириною решета можна задатися, тоді обчислюється завантаження q_B , що не повинна бути менше K .

Площа решета визначається з формули:

$$F = \frac{Q}{q_F}. \quad (3.6)$$

По знайденим площі та ширині решета знаходиться довжина решета:

$$l = \frac{F}{B}. \quad (3.7)$$

Основні параметри підсівного (підсівним називається решето для відділення дрібних домішок) або сортувальне решето з довгастими отворами для зерна пшениці вологістю 15% можна визначити по номограмі [34]. На номограмі дані залежності між наступними параметрами решета: повнотою розділення ε %; кутом напрямку коливань β° ; кутом нахилу решета до горизонту α° ; кутом γ° , рівним сумі кутів α і β ; оптимальним прискоренням j_0 м/сек²; завантаженням одиниці ширини решета q_B в кг/(год·дм); довжиною решета l в мм і продуктивністю одиниці площі решета q_F в кг/(год·дм²).

Продуктивність решета залежить також від вологості зерна. При вологості 26% продуктивність решета (q_F) зменшується майже вдвічі в порівнянні із продуктивністю при вологості 15%.

З метою визначення оптимальної товщини шару в зоні транспортування та розділення насінних матеріалів на робочих органах вібропневмосепаратора (ВПС) досліджували вплив основних структурних і гідродинамічних властивостей псевдозрідженого шару на ефективність розділення, а отже, і ефективність сепарації.

Під псевдозрідженням розуміється такий стан двофазної системи (тверді частки - газ або рідина), коли матеріал під дією повітряного потоку і коливань опорної поверхні приймає властивості рідини.

До аеродинамічних характеристик псевдоожиженого шару відносять критичну швидкість псевдозрідження і аеродинамічний опір шару. Критична швидкість псевдозрідження - це умовна швидкість фільтрації повітряного потоку при певних

значеннях параметрів вібрації опорної поверхні, що обумовлює перехід шару в псевдоожижений стан і відповідному максимальному аеродинамічному опору шару. Під структурними характеристиками розуміють пористість і ступінь розширення шару [35].

Для теоретичного визначення критичної швидкості фільтрації повітряного потоку більшість авторів [36] застосовують критерій Рейнольдса:

$$v_{\phi} = \frac{\nu \cdot R_e}{d_e \cdot \kappa}, \quad (3.8)$$

де $\nu = 0,0000156 \text{ м}^2/\text{с}$ - кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря;

R_e - критерій Рейнольдса;

$$d_e = \frac{2 \cdot \varepsilon_c \cdot d}{3 \cdot (1 - \varepsilon_c)}, \quad (3.9)$$

ε_c - пористість шару;

d_e - еквівалентний діаметр зерен, м;

κ - фактор форми зернівок.

Середній еквівалентний діаметр зерен знаходили по формулі:

$$d = \sqrt{4 \cdot \sqrt{\frac{(a \cdot b \cdot c)^2}{\pi}}}, \quad (3.10)$$

де a , b , c - середні значення довжини, ширини і товщини насінин із вибірок обсягом по 300 шт.

Залежність опору шару повітряному потоку на різних стадіях псевдозрідження неоднакова. В інтервалі швидкостей фільтрації від 0 до V_o вона близька до прямолінійного. У період сталого псевдозрідження величина гідродинамічного опору шару не залежить від швидкості фільтрації і залишається майже постійною у всьому діапазоні спокійного псевдозрідження.

Теоретично опір псевдоожиженого шару виражається залежністю у вигляді [37]:

$$\Delta P = (\rho_3 - \rho_B) \cdot (1 - \varepsilon_c) \cdot h \cdot g, \quad (3.11)$$

де ΔP - гідродинамічний опір псевдоожиженого шару, Н/м²;

ρ_3, ρ_B - щільність шару зернового матеріалу і повітря, кг/м³;

h - висота псевдоожиженого шару, м.

Однак проведені експерименти показали, що для насіння основних зернових культур при впливі на них за допомогою повітряного потоку та вібрації формула (3.11) дає похибку 15-20 %.

Опір шару повітряному потоку можна розрахувати по формулі:

$$\Delta P' = \psi \cdot \rho_0 \cdot h, \quad (3.12)$$

де ψ - коефіцієнт нерівномірності псевдозрідження;

ρ_0 - статична щільність шару.

У більшості випадків експериментальні значення $\Delta P'$ менше, ніж теоретичні ΔP . Це пояснюється тим, що параметри псевдозрідження, а також повітророзподільні пристрої не забезпечують рівномірного розподілу швидкості фільтрації повітряного потоку по площі робочого органа - решета. При цьому псевдозрідження відбувається нерівномірно.

На підставі формули опору шару повітряному потоку Дарсі-Вейсбаха [38] з урахуванням формули (3.8) можна визначити критичне значення швидкості псевдозрідження:

$$V_{kp} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \rho_0 \cdot d_e \cdot (1 - k_p)^3}{3 \cdot \lambda_c \cdot \psi \cdot k_p - \rho_B}}, \quad (3.13)$$

де $k_p = \frac{\rho_3}{\rho_B}$ - коефіцієнт щільності укладання насінин у шарі.

λ_c - коефіцієнт аеродинамічного опору шару;

Коефіцієнт аеродинамічного опору шару можна розрахувати по формулі [39]:

$$\lambda_c = \frac{9}{R_e} + \frac{1}{R_e^{0,15}}. \quad (3.14)$$

Практичне застосування залежностей (3.8 - 3.14) зустрічається з рядом труднощів, оскільки багато із цих вхідних величин комплексно залежать як від числа псевдозрідження шару $\nu_c = \frac{\nu_\phi}{\nu_{кр}}$, так і від кінематичних параметрів.

Практичне визначення часткових функціональних залежностей між аеродинамічними і структурними параметрами псевдоожиженого шару насіння зернових та конструктивних параметрів ВПС доцільно проводити в загальні дослідним шляхом.

Дослідження процесів розділення псевдоожижених шарів насіння пшениці і ячменя проводили на описаній установці (див. рис. 3.1) у тонких шарах 15-35 мм.

При різних прискореннях опорної поверхні швидкість фільтрації повітряного потоку поступово збільшували і одночасно фіксували перепад тиску в шарі. Опір шару встановлювали прямим методом [40]. Для цього визначали за допомогою мікроманометрів ММН-240 тиск під шаром і над шаром та по їхній різниці знаходили перепад тиску в псевдозрідженому шарі. У такий спосіб знаходили аеродинамічний опір псевдозрідженого шару та критичні швидкості псевдозрідження.

Ступінь розширення шару визначали коефіцієнтом розширення K_p експериментально, виміром висот щільного h_0 і псевдозрідженого h_{II} шарів:

$$K_p = \frac{h_{II}}{h_0}. \quad (3.15)$$

Пористість статичного (щільного) шару розраховували по формулі:

$$\varepsilon_0 = \frac{\left(V_n - \frac{M_n}{\rho_3} \right)}{V_n}, \quad (3.16)$$

де V_n - об'єм вибірки, м³;

M_n - маса вибірки, кг ;

ρ_3 - щільність зернового матеріалу, кг/м³.

Пористість як міру вільного об'єму шару визначали по формулі [41]:

$$\varepsilon = \frac{1 - (1 - \varepsilon_0)}{K_p}. \quad (3.17)$$

Швидкість V_0 , з якою протікає повітряний потік у порових каналах шару, визначали виразом:

$$V_0 = \frac{V_\phi}{\varepsilon}, \quad (3.18)$$

де V_ϕ - швидкість фільтрації повітряного потоку.

Критерій Рейнольдса - основна характеристика гідродинамічного стану псевдозрідженого шару, що є мірою співвідношення сил інерції і внутрішнього тертя в шарі. Експериментальні значення критерію Рейнольдса визначали з виразу (3.8).

Одна з найбільш важливих якісних характеристик процесу псевдозрідження - однорідність, мірою якої може слугувати критерій Фруда, що характеризує відношення сил інерції та ваги насіння у шарі:

$$F_r = \frac{V_0^2}{g \cdot d_e}. \quad (3.19)$$

Ступінь псевдозрідження шару характеризується кривою псевдозрідження, що являє собою залежність швидкості повітряного потоку від аеродинамічного опору шару матеріалу (на пористій поверхні воно залишається незмінним) при різних прискореннях опорної поверхні.

Криві псевдозрідження [36], без накладення вібрації (прискорення вібрації опорної поверхні $I = 0$) показують, що критична швидкість як для насіння пшениці, так і для насіння ячменя перебувають у межах $V_B = 1 - 1,3$ м/с.

На решеті товщина зернового шару зменшується в напрямку від завантажувального кінця до розвантажувального. Тому повітророзподільний пристрій повинен забезпечувати диференційоване підведення повітряного потоку до різних ділянок решета. Дослідження прямоточного решета показали, що насіння очищаються краще, якщо відношення середньої швидкості в зоні подачі (протягом 22-31 см від місця подачі) до середньої швидкості в зоні транспортування становить 1,2-1,5.

Витрата повітря по площі решета:

$$q_v = V_{cp} \cdot S, \quad (3.20)$$

де V_{cp} - середня швидкість повітряного потоку по площі решета, м/с;

S - площа решета, м².

Для конструкцій решіт вітчизняних і закордонних ВПС витрата повітря становить 5000-12000 м³/ч.

Загальна потужність, необхідна для здійснення сепарації на ВПС [42]:

$$N = N_B + N_{II}, \quad (3.21)$$

де N_B - потужність вібропривода решета;

N_{II} - потужність, необхідна для псевдозрідження зернового матеріалу, що перебуває на решеті.

Потужність, необхідна для псевдозрідження матеріалу без урахування ККД вентилятора і втрат тиску у повітрепровідних каналах:

$$N_{II} = \frac{q_v \cdot \Delta P}{102}. \quad (3.22)$$

Повний опір решета ВПС повітряному потоку визначимо з виразу:

$$\Delta P = \Delta P_{cl} + \Delta P_p, \quad (3.23)$$

де ΔP_{cl} , ΔP_p - опір оброблюваного шару матеріалу та опір решета разом з повітророзподільним пристроєм.

Опір повітророзподільного пристрою, виходячи з умови однорідності псевдозрідження, можна визначити з виразу:

$$\Delta P_p \cong (1,1 - 1,6) \cdot \Delta P_{cl}. \quad (3.24)$$

Необхідна потужність для псевдозрідження зернового матеріалу, що перебуває на решеті ВПС при оптимальному опорі ΔP_p , з урахуванням залежностей (3.3 – 3.24), може бути визначена за формулою:

$$N_{II} = 0,05 \cdot S \cdot V_\phi \cdot \left(75,2^{\frac{h}{43,1}} \right), \quad (3.25)$$

де h - висота шару зернового матеріалу, мм;

Потужність для приводу решітного стану з достатньою точністю визначається з виразу:

$$N_B \leq 0,1 \cdot N_{II}. \quad (3.26)$$

Продуктивність та якість сепарації насіння на ВПС з решетом прямокутної форми обмежені в основному ефективністю розпушувачів встановлених безпосередньо у псевдозрідженому шарі.

Розроблено та досліджено три типи розпушувачів (рис. 3.9).

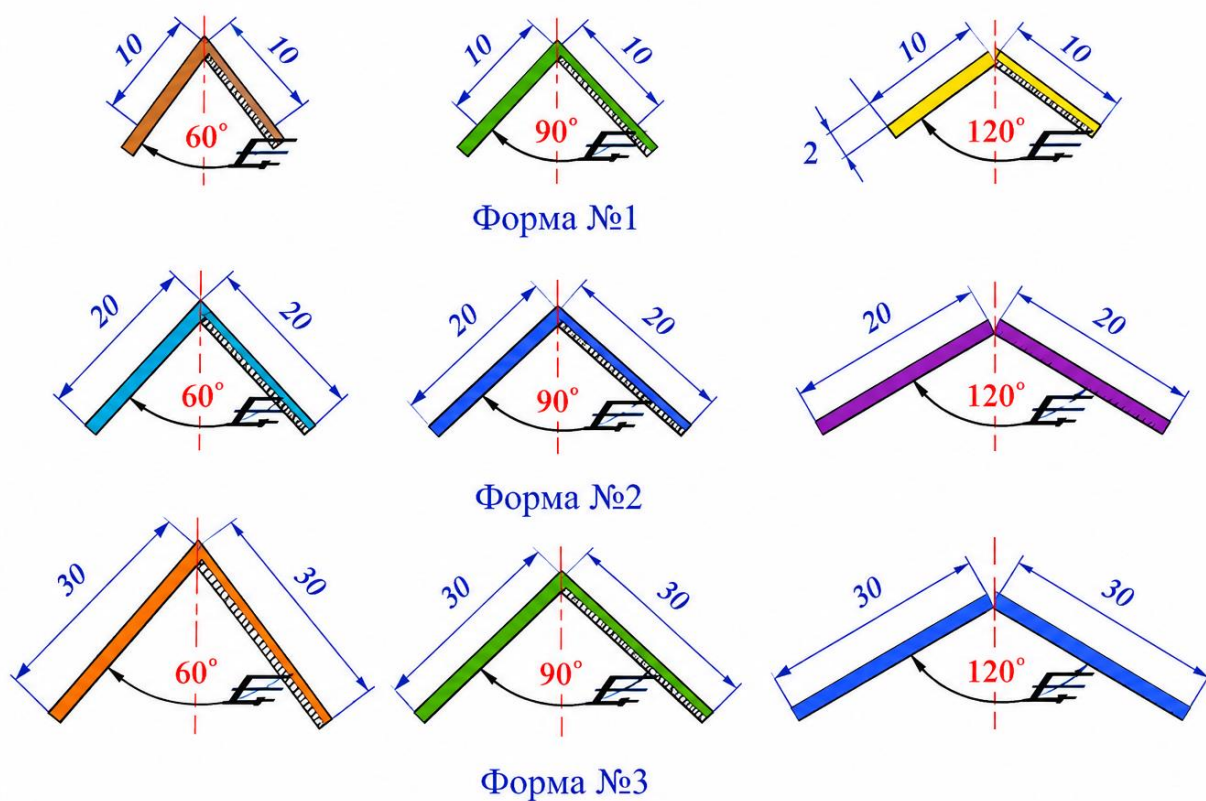


Рис. 3.9 Схема конструкційних форм параметрів пасивного розпушувача

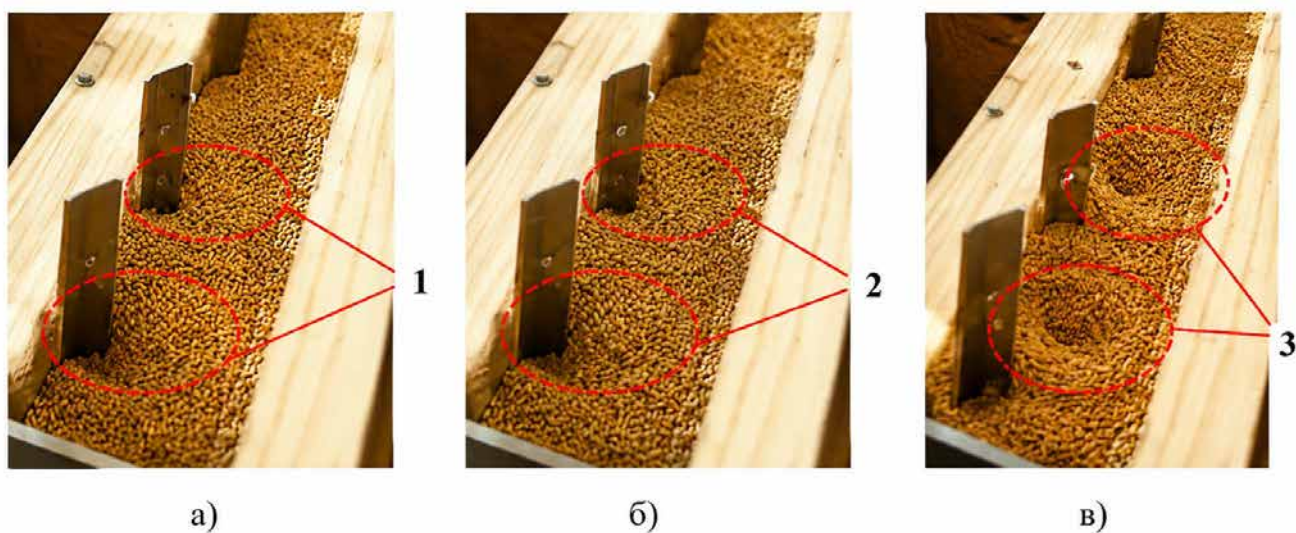


Рис. 3.10: а), б), в). Утворення каналу при зануренні в зерновий шар штифтового, або пасивного розпушувача [44]:

1 – час сепарації $t = 10$ с; 2 – час сепарації $t = 15$ с; 3 – час сепарації $t = 20$ с

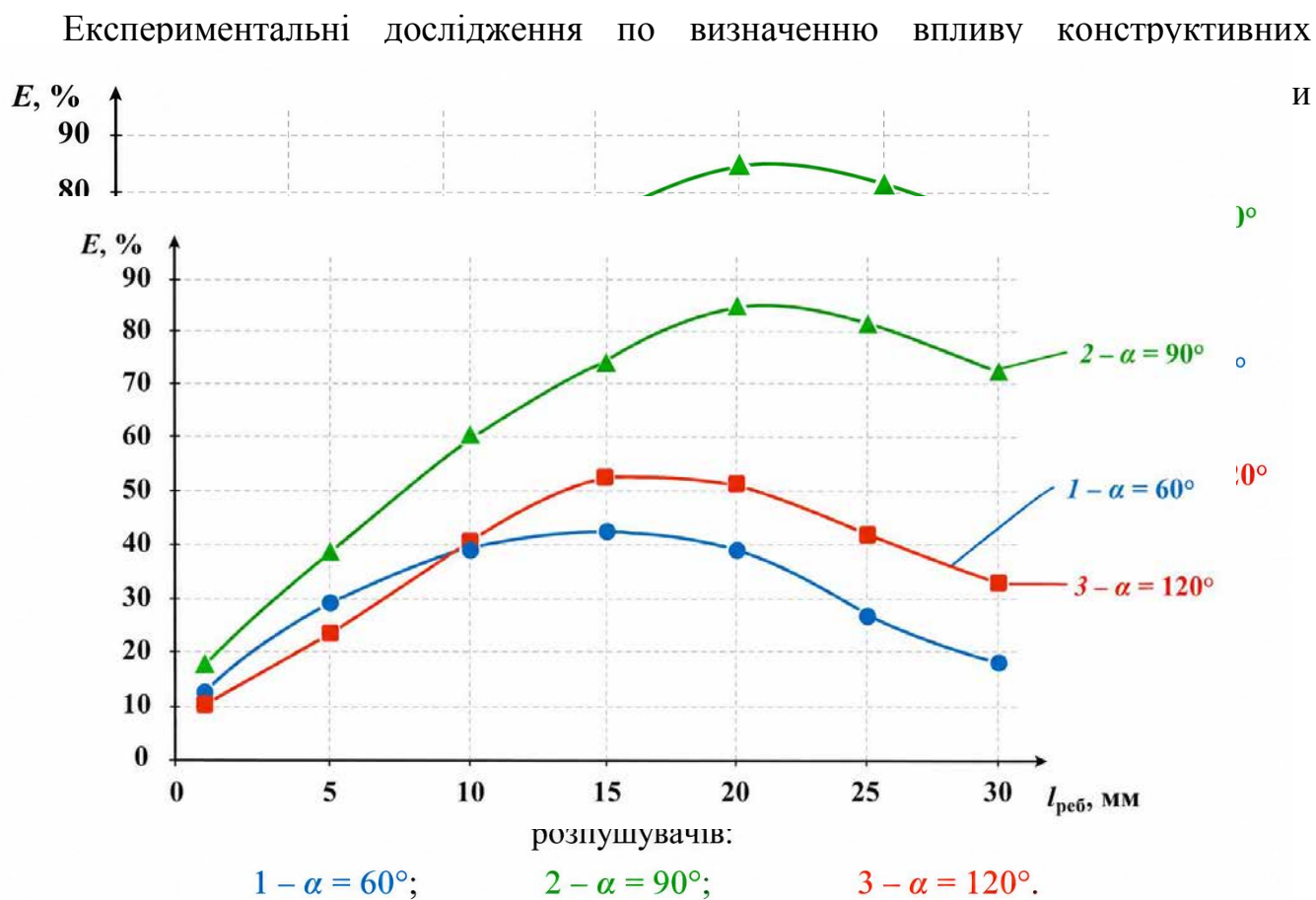


Рис. 3.11 Залежність ефективності сепарації E від конструктивних параметрів розпушувачів: 1 - $\alpha=60^\circ$; 2 - $\alpha=90^\circ$; 3 - $\alpha=120^\circ$.

Результати експериментальних досліджень (рис. 3.11) показали, що найоптимальнішими конструктивними параметрами виявилися: ширина полки $l_{\text{реб}}=15-25\text{мм}$ та кут розхилу полки розпушувача $\alpha=90^\circ$. Це пояснюється наступним чином: при зменшенні, як ширини полки так і кута розхилу пасивних розпушувачів, дії на зерновий матеріал не відбувається, іншими словами зерновий шар ігнорує вміст в ньому пасивного розпушувача.

При збільшенні ширини полки пасивного розпушувача і кута розхилу між ними відбувається істотне гальмування зернового матеріалу, що характеризується зменшенням швидкості переміщення часток по решету та швидкістю занурення часток до отворів решета. Це і є головним фактором зменшення ефективності сепарації зернового матеріалу.

РОЗДІЛ 4

ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час експлуатації вібропневматичного сепаратора ВПС-5 на дільницях післязбиральної обробки зерна на працівників можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори механічного, фізичного, електричного та санітарно-гігієнічного характеру. Аналіз зазначених факторів є необхідною умовою для розроблення ефективних заходів із забезпечення безпечних умов праці.

Вібропневматичний сепаратор складається з вібруючого решета, вентилятора, електроприводу, повітророзподільної системи та пасивних розпушувачів зернового шару. Робота зазначених вузлів супроводжується виникненням небезпечних факторів, що можуть стати причиною травмування персоналу або погіршення його здоров'я.

До основних небезпечних виробничих факторів належать:

- рухомі та обертові частини приводу;
- ремінні передачі;
- ексцентрикові механізми віброприводу;
- робочі органи вентилятора;
- можливість викиду сторонніх предметів із зернового потоку;
- небезпека ураження електричним струмом;
- підвищена пожежна небезпека зернового пилу.

Особливу небезпеку становлять обертові елементи приводу. У разі відсутності захисних кожухів можливе захоплення одягу або частин тіла працівника, що може призвести до травм різного ступеня тяжкості.

До шкідливих виробничих факторів належать:

- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму;
- вібрація обладнання;
- несприятливі параметри мікроклімату;

- нервово-психологічне навантаження оператора.

Під час очищення зерна утворюється значна кількість органічного пилу, який містить частинки зерна, полови та мікроорганізмів. Потрапляння пилу до органів дихання може спричиняти алергічні реакції, захворювання дихальної системи та зниження працездатності персоналу.

Джерелами шуму є вентилятор, електродвигуни та вібропривід. Тривалий вплив шуму негативно впливає на нервову систему людини, викликає втому, зниження концентрації уваги та погіршення слуху.

Вібрації, що виникають під час роботи віброрешета, передаються через конструкцію машини на раму та підлогу виробничого приміщення. Тривала дія вібрації може призводити до професійних захворювань опорно-рухового апарату та нервової системи.

Підвищена пожежна небезпека пояснюється наявністю зернового пилу, який при певній концентрації в повітрі утворює вибухонебезпечні суміші. Джерелами займання можуть бути несправні електроприлади, перегріті підшипники або іскроутворення в електричних колах.

Для оцінки умов праці проведемо класифікацію небезпечних та шкідливих факторів відповідно до вимог охорони праці (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при експлуатації вібропневмосепаратора ВПС-5

<i>Виробничий фактор</i>	<i>Джерело виникнення</i>	<i>Можливі наслідки</i>
<i>Рухомі частини машин</i>	Привід, ремінні передачі, ексцентрики	Механічні травми
<i>Електричний струм</i>	Електродвигуни, електромережа	Ураження електричним струмом
<i>Виробничий шум</i>	Вентилятор, вібропривід	Погіршення слуху, втома
<i>Вібрація</i>	Віброрешето, привід	Професійні захворювання
<i>Запиленість повітря</i>	Зерновий матеріал	Захворювання органів дихання
<i>Пожежонебезпечний пил</i>	Органічний зерновий пил	Пожежа або вибух
<i>Недостатнє освітлення</i>	Робоча зона	Зниження продуктивності праці

Психофізіологічне навантаження	Контроль технологічного процесу	Перевтома оператора
---------------------------------------	--	----------------------------

Таким чином, під час роботи вібропневматичного сепаратора ВПС-5 найбільш небезпечними факторами є рухомі частини механізмів, електричний струм, шум, вібрація та запиленість повітря робочої зони. Для забезпечення безпечних умов праці необхідно передбачити комплекс організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, які будуть розглянуті в наступних підрозділах.

4.2 Вимоги безпеки під час експлуатації вібропневмосепаратора

До роботи з обладнанням допускаються особи, які пройшли інструктаж з охорони праці та ознайомлені з правилами експлуатації машини.

Перед початком роботи необхідно:

- перевірити справність електрообладнання;
- оглянути стан захисних кожухів;
- переконатися у надійності кріплення решета та пасивних розпушувачів;
- перевірити заземлення електродвигунів;
- очистити робочу зону від сторонніх предметів.

Під час роботи забороняється:

- відкривати захисні кожухи;
- проводити регулювання механізмів при увімкненому приводі;
- очищати решета та повітропроводи без зупинки машини;
- допускати перевантаження сепаратора понад номінальну

продуктивність.

Після завершення роботи необхідно:

- відключити машину від електромережі;
- очистити робочі органи від залишків зерна;
- провести огляд технічного стану обладнання;
- усунути виявлені несправності.

4.3 Вимоги електробезпеки

Живлення вібропневмосепаратора здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В.

Для забезпечення електробезпеки передбачаються:

- захисне заземлення всіх металевих частин обладнання;
- автоматичні вимикачі захисту;
- пристрої захисного відключення;
- ізольовані кабельні лінії;
- аварійна кнопка зупинки.

Опір контуру заземлення не повинен перевищувати значень, встановлених чинними нормативними документами.

Обслуговування електрообладнання дозволяється лише електротехнічному персоналу.

4.4 Заходи щодо зниження шуму та вібрації

Робота вентилятора та віброприводу супроводжується виникненням шуму та вібрацій.

Для їх зменшення застосовуються:

- гумові віброізолюючі опори;
- балансування рухомих деталей;
- еластичні муфти;
- шумопоглинальні кожухи;
- регулярне технічне обслуговування підшипникових вузлів.

Рівень шуму на робочому місці не повинен перевищувати допустимих санітарних норм.

4.5 Пожежна безпека

Зерновий пил належить до пожежонебезпечних речовин і за певної концентрації може утворювати вибухонебезпечні суміші.

Для запобігання пожежам необхідно:

- підтримувати чистоту обладнання;
- регулярно видаляти пил із поверхонь;
- не допускати перегрівання електродвигунів;
- застосовувати справну електроапаратуру;
- забезпечити приміщення первинними засобами пожежогасіння.

На ділянці повинні бути встановлені порошкові вогнегасники типу ВП-5 або ВП-9.

4.6 Охорона навколишнього середовища

Експлуатація вібропневмосепаратора не супроводжується утворенням токсичних відходів або шкідливих викидів у навколишнє середовище.

Для зменшення негативного впливу на довкілля необхідно:

- використовувати системи пиловловлювання;
- здійснювати своєчасне очищення повітропроводів;
- запобігати потраплянню відходів зерна у ґрунт та водойми;
- забезпечувати раціональне використання електроенергії;
- передавати відпрацьовані мастила та технічні рідини на спеціалізовані

підприємства для утилізації.

Використання вібропневмосепаратора ВПС-5 сприяє підвищенню якості очищення зерна без застосування хімічних реагентів, що позитивно впливає на екологічну безпеку технологічного процесу.

Висновки до розділу 4

У результаті аналізу умов експлуатації вібропневмосепаратора ВПС-5 встановлено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, розроблено комплекс організаційних і технічних заходів щодо забезпечення безпечної роботи персоналу. Передбачені рішення з електробезпеки, пожежної безпеки, зниження рівня шуму та вібрацій, а також заходи з охорони навколишнього середовища забезпечують відповідність конструкції вимогам охорони праці та екологічної безпеки.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВИКОРИСТАННЯ МАШИНИ ДЛЯ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА

5.1 Загальні положення економічної оцінки

Економічна ефективність розробленої машини для післязбиральної обробки зерна визначається шляхом порівняння техніко-економічних показників базової технології очищення зерна та технології із застосуванням удосконаленого вібропневматичного сепаратора ВПС-5 з пасивними розпушувачами зернового шару.

Основними показниками ефективності є:

- підвищення продуктивності машини;
- зростання якості очищення зерна;
- зменшення втрат повноцінного зерна;
- зниження питомих енергетичних витрат;
- зменшення експлуатаційних витрат;
- отримання додаткового прибутку від підвищення якості продукції.

Використання пасивних розпушувачів дозволяє інтенсифікувати процес сепарації та підвищити ефективність очищення зерна на 10–15 % порівняно з традиційними вібропневматичними сепараторами.

5.2 Вихідні дані для економічних розрахунків

Для оцінки економічної ефективності приймаємо такі вихідні дані.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані

Показник	Значення
Продуктивність машини, т/год	5
Річний фонд роботи, год	1200
Річний обсяг очищення зерна, т	6000
Ефективність очищення базової машини, %	75
Ефективність очищення ВПС-5, %	85
Вартість зерна, грн/т	10000
Потужність електродвигунів, кВт	4,5
Тариф на електроенергію, грн/(кВт·год)	6,5
Капітальні вкладення, грн	180000
Термін служби, років	10

5.3 Розрахунок річного економічного ефекту

Річний обсяг очищення зерна:

$$Q = W \cdot T$$

де:

W – продуктивність машини, т/год;

T – річний фонд часу роботи, год.

$$Q = 5 \cdot 1200 = 6000 \text{ т}$$

Підвищення якості очищення забезпечує додаткове збереження зерна:

$$\Delta Q = Q \cdot \frac{\Delta E}{100}$$

де:

$$(\Delta E = 85 - 75 = 10\%).$$

$$\Delta Q = 6000 \cdot 0,10 = 600 \text{ т}$$

Вартість додатково збереженого зерна:

$$E_z = \Delta Q \cdot C$$

де C = 10000) грн/т.

$$E_z = 600 \cdot 10000 = 6,000,000 \text{ грн}$$

5.4 Витрати на електроенергію

Річне споживання електроенергії:

$$W_e = N \cdot T$$

де:

N = 4,5 кВт.

$$W_e = 4,5 \cdot 1200 = 5400 \text{ кВт·год}$$

Витрати на електроенергію:

$$C_e = W_e \cdot C_e$$

$$C_e = 5400 \cdot 6,5 = 35100 \text{ грн}$$

5.5 Розрахунок експлуатаційних витрат

До складу експлуатаційних витрат входять:

- заробітна плата оператора;
- відрахування на соціальні заходи;
- витрати на електроенергію;
- амортизаційні відрахування;
- витрати на ремонт та технічне обслуговування.

Таблиця 5.2 – Річні експлуатаційні витрати

Стаття витрат	Сума, грн
Заробітна плата	120000
Соціальні відрахування	26400
Електроенергія	35100
Амортизація	18000
Ремонт і ТО	15000
Разом	214500

Таблиця 5.3 – Основні техніко-економічні показники вібропневматичного сепаратора ВПС-5

№	Показник	Одиниця вимірювання	Значення
1	Продуктивність	т/год	5,0
2	Річний фонд роботи	год	1200
3	Річний обсяг очищення зерна	т	6000
4	Ефективність сепарації базової машини	%	75
5	Ефективність сепарації ВПС-5	%	85
6	Приріст ефективності сепарації	%	10
7	Потужність електроприводу	кВт	4,5
8	Річне споживання електроенергії	кВт·год	5400
9	Витрати на електроенергію	грн/рік	35100
10	Річні експлуатаційні витрати	грн/рік	214500
11	Капітальні вкладення	грн	180000
12	Додатково збережене зерно	т/рік	600
13	Вартість додатково збереженого зерна	грн/рік	6000000
14	Річний економічний ефект	грн/рік	5785500
15	Коефіцієнт економічної ефективності	–	32,14
16	Термін окупності	років	0,031
17	Термін окупності	діб	11

5.6 Розрахунок прибутку

Річний прибуток визначається як різниця між отриманим економічним ефектом та експлуатаційними витратами:

$$\Pi = E_z - C_{\text{експ}}$$

$$\Pi = 6000000 - 214500$$

$$\Pi = 5,785,500 \text{ грн}$$

5.7 Термін окупності капітальних вкладень

Термін окупності визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Pi}$$

де:

K – капітальні вкладення.

$$T_{\text{ок}} = \frac{180000}{5785500}$$

$$T_{\text{ок}} = 0,031 \text{ року}$$

або

$$T_{\text{ок}} = 11 \text{ діб}$$

5.8 Розрахунок коефіцієнта економічної ефективності

$$E = \frac{\Pi}{K}$$

$$E = \frac{5785500}{180000}$$

$$E=32,14$$

Таблиця 5.4 – Порівняння техніко-економічних показників базової та удосконаленої машини

Показник	Базова машина	ВПС-5	Відхилення
Продуктивність, т/год	4,5	5,0	+11,1 %
Ефективність сепарації, %	75	85	+13,3 %
Втрати повноцінного зерна, %	4,5	2,0	-55,6 %
Питомі витрати електроенергії, кВт·год/т	1,05	0,90	-14,3 %
Якість очищення зерна, %	92	97	+5,4 %
Річний обсяг очищення, т	5400	6000	+11,1 %
Річний економічний ефект, грн	—	5785500	—
Термін окупності, років	—	0,031	—

Отримане значення значно перевищує нормативний коефіцієнт економічної ефективності ($E=0,15$), що підтверджує доцільність використання розробленої машини.

Висновки до розділу 5

Виконані техніко-економічні розрахунки показали високу ефективність використання вібропневматичного сепаратора ВПС-5 для післязбиральної обробки зерна. Завдяки застосуванню пасивних розпушувачів забезпечується підвищення ефективності сепарації до 85 %, зменшуються втрати повноцінного зерна та покращується якість готової продукції. Річний економічний ефект становить близько 5,79 млн грн, а термін окупності капітальних вкладень не перевищує 0,03 року, що свідчить про високу економічну доцільність впровадження розробленої конструкції у виробництво.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз сучасних машин для післязбиральної обробки зерна показав, що традиційні віброрешітні сепаратори практично вичерпали можливості підвищення продуктивності шляхом удосконалення класичних схем сепарації. Збільшення продуктивності таких машин переважно досягається за рахунок збільшення площі решіт, що призводить до зростання металомісткості, енергоспоживання та вартості обладнання. Перспективним напрямом розвитку зерноочисної техніки є інтенсифікація процесів розпушування та псевдозрідження зернового шару із застосуванням пасивних гальмуючих елементів, що дозволяє підвищити продуктивність сепараторів без істотного збільшення їх габаритів.

2. Теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що застосування пасивних розпушувачів зернового шару у поєднанні з вібраційним впливом та аерацією забезпечує більш рівномірне перемішування зернової маси, покращує умови сегрегації частинок та підвищує інтенсивність проходження дрібних домішок крізь отвори решета. Це дозволяє збільшити допустиме питоме навантаження на решітну поверхню до 50–70 кг/(дм²·год) без погіршення якості очищення зерна.

3. На основі математичного моделювання та аналізу руху зернового шару визначено вплив основних конструктивно-технологічних параметрів на процес сепарації. Встановлено, що найбільш ефективно розпушування зернового шару досягається за частоти коливань решета 50–60 с⁻¹, амплітуди коливань 4–6 мм, швидкості повітряного потоку 1,0–1,5 м/с та щільності розміщення пасивних розпушувачів 9–12 шт./дм². За таких режимів забезпечується стабільний псевдозріджений стан зернової маси та максимальна інтенсивність сепарації.

4. У результаті проведених досліджень визначено раціональні параметри вібропневматичного сепаратора впс-5: частота коливань решета – 55 с⁻¹, амплітуда коливань – 5 мм, швидкість повітряного потоку – 1,0–1,2 м/с, кут нахилу решета – 5–7°, щільність розміщення пасивних розпушувачів – 10–11 шт./дм². Використання зазначених параметрів забезпечує ефективність сепарації до 94–96 %, зниження

втрат повноцінного зерна та підвищення продуктивності машини до 5 т/год при збереженні нормативних показників якості очищення.

5. Розроблена конструкція вібропневматичного сепаратора впс-5 відповідає сучасним вимогам енергоефективності, надійності та екологічної безпеки. Впровадження машини у виробництво дозволяє підвищити якість очищення зерна, скоротити експлуатаційні витрати та забезпечити значний економічний ефект за рахунок зменшення втрат товарного зерна та підвищення продуктивності післязбиральної обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гевко Б.М., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л. Сільськогосподарські машини. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2020. – 432 с.
2. Бойко І.Г., Кравчук В.І., Мельник В.І. Механізація та автоматизація технологічних процесів у рослинництві. – Київ: НУБіП України, 2019. – 356 с.
3. Дубровін В.О., Бендера І.М., Тіщенко Л.М. Сільськогосподарські машини та обладнання. – Кам'янець-Подільський: Медобори-2006, 2021. – 528 с.
4. Погорілий В.В., Лебедев А.Т. Післязбиральна обробка та зберігання зерна. – Харків: Факт, 2018. – 312 с.
5. Сало В.М., Гончаров В.М. Механіко-технологічні основи сепарації зернових матеріалів. – Кропивницький: ЦНТУ, 2022. – 274 с.
6. Василенко П.М., Василенко В.П. Теорія руху частинок зернових матеріалів у робочих органах машин. – Київ: Аграрна наука, 2019. – 286 с.
7. Кравчук В.І., Адамчук В.В., Булгаков В.М. Машини для післязбиральної обробки зерна та насіння. – Київ: Аграрна наука, 2021. – 418 с.
8. Ловейкін В.С., Дяченко Л.Г. Теоретичні основи вібраційних технологічних процесів. – Київ: НУБіП України, 2018. – 248 с.
9. Adamchuk V., Bulgakov V., Nadykto V., Kyurchev V. Modern Agricultural Machinery and Technologies. – Cham: Springer, 2022. – 410 p.
10. Miu P.I. Handbook of Modern Grain Milling. – 3rd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2021. – 742 p.
11. Posner E.S., Hibbs A.N. Wheat Flour Milling. – 3rd ed. – St. Paul: AACC International, 2020. – 528 p.
12. Singh C.B., Jayas D.S. Grain cleaning and separation technologies: Recent advances and future trends // Biosystems Engineering. – 2022. – Vol. 219. – P. 120–137.
13. Wang L., Zhang Y., Liu X. Experimental investigation of vibratory separation processes for granular agricultural materials // Powder Technology. – 2021. – Vol. 389. – P. 96–108.

14. Zhao Y., Chen H., Xu J. Numerical simulation of granular flow in vibrating screens using DEM approach // *Advanced Powder Technology*. – 2023. – Vol. 34(5). – P. 103–117.
15. Golik V., Miroshnichenko S. Energy-efficient technologies of grain post-harvest processing // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. – 2022. – Vol. 24(3). – P. 45–56.
16. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінювання ризику та зниження ризику. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 52 с.
17. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 148 с.
18. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. – 32 с.
19. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – Київ: Мінрегіон України, 2018. – 137 с.
20. НПАОП 01.0-1.01-12. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві. – Київ: Міністерство соціальної політики України, 2019. – 284 с.
21. FAO. Post-Harvest Management and Grain Processing Technologies. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023. – 186 p.
22. OECD-FAO Agricultural Outlook 2024–2033. – Paris: OECD Publishing, 2024. – 337 p.
23. Syngenta. Grain Quality and Cleaning Technologies: Technical Guide. – Basel, Switzerland, 2023. – 94 p.
24. John Deere. Grain Handling and Processing Solutions. Product Catalogue. – Moline, USA, 2024. – 112 p.
25. Bühler Group. Innovations in Grain Cleaning and Sorting Technologies. – Uzwil, Switzerland, 2024. – 98 p.