

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

06.08 – МР. 149"С" 2024.11.07. 029 ПЗ

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

РОМАНЕНКА ВЛАДИСЛАВА ВОЛОДИМИРОВИЧА

2025

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

06.08 – МР. 149"С" 2024.11.07. 029

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

РОМАНЕНКА ВЛАДИСЛАВА ВОЛОДИМИРОВИЧА

2025

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

**ВІДОКРЕМЛЕНИЙ ПІДРОЗДІЛ НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ВП НУБіП України "НАТІ" "НІЖИНСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ" ВП НУБіП України "НАТІ"

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра агроінженерії та транспортних технологій

"До захисту допущено"

ВП НУБіП України "НАТІ"

В.о. завідувача кафедри агроінженерії та
транспортних технологій

Микола ІКАЛЬЧИК

"__" ____ 2025 р.

ВП НУБіП України "НАТІ" **МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА** ВП НУБіП України "НАТІ"

на здобуття освітнього ступеня магістра

зі спеціальності **208 "Агроінженерія"** освітньої програми **"Агроінженерія"**

на тему: **"Дослідження режимів сепарації зерна з оптимізацією**

ВП НУБіП України "НАТІ" **конструктивних параметрів горизонтального циліндричного сепаратора"** ВП НУБіП України "НАТІ"

Здобувача групи **МА-231 Владислава РОМАНЕНКА**

Магістерська кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

ВП НУБіП України "НАТІ"

— ВП НУБіП України "НАТІ" **Владислав РОМАНЕНКО**

Керівник: к.п.н., доцент

_____ Тетяна ФЕДОРИНА

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

**ВІДОКРЕМЛЕНИЙ ПІДРОЗДІЛ НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

«НІЖИНСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра агроінженерії та транспортних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

**В.о. завідувача кафедри агроінженерії
та транспортних технологій**

к.т.н., доцент Микола ІКАЛЬЧИК

«___» _____ 2024 року

З А В Д А Н Н Я

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ**

Романенку Владиславу Володимировичу

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: **«Дослідження режимів сепарації зерна з
оптимізацією конструктивних параметрів горизонтального циліндричного
сепаратора»**

затверджена наказом директора ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний
інститут» від «7» листопада 2024 р. № 149 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 27 січня 2025 р.

Вихідні дані до магістерської роботи: технологічні процеси сепарації зерна,
конструктивні параметри горизонтального циліндричного сепаратора.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз особливостей об'єкту проектування.
2. Обґрунтування основних параметрів об'єкту розробки.
3. Дослідження параметрів об'єкту розробки.
4. Охорона праці.
5. Обґрунтування економічної ефективності.

Дата видачі завдання «8» листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Завдання прийняв до виконання

Тетяна ФЕДОРИНА

Владислав РОМАНЕНКО

РЕФЕРАТ

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, переліку літературних джерел (30 найменувань). Загальний обсяг текстової частини: 80 сторінок пояснювальної записки 5 таблиць, 23 рисунків.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Об'єкт дослідження. Процес сепарації зерна в горизонтальному циліндричному сепараторі з використанням авторезонансного порційного режиму руху.

Предмет дослідження. Закономірності процесу сепарації зерна у горизонтальному циліндричному сепараторі при авторезонансному порційному режимі руху.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Методи дослідження. Теоретико-емпіричний, економіко-статистичний, порівняльний, математичного моделювання.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

В магістерській роботі визначено закономірності процесу роботи горизонтального циліндричного сепаратора, який разом з оброблюваним зерном утворює складну нелінійну самоорганізовану систему з автоколиваннями силового поля за гармонійним законом і зміною режиму руху зерна в залежності від кількості енергії, отриманої від сепаратора та додаткових поверхонь тертя.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Доведено, що інтенсивність та якість процесу сепарації зерна при авторезонансному режимі вища, ніж при існуючих режимах і становлять: повноту виділення дрібних домішок $B=0,9$, коефіцієнт сепарації $K=1,4$, коефіцієнт використання поверхні сепаратора збільшується вчетверо, частота обертання сепаратора у 2 рази з 30 до 65 хв^{-1} . Питома продуктивність сепаратора підвищується вдвічі й становить 1,3 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Ключові слова: очищення зерна, авторезонансний режим руху, синергетика, циліндричний горизонтальний сепаратор.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1. Аналіз робіт, пов'язаних з дослідженням циліндричних решіт	9
1.2. Обґрунтування та аналіз резонансних та авторезонансних явищ у горизонтальних циліндричних сепараторах	15
1.3. Новий підхід у методології теоретичних досліджень робочих органів зерноочисних машин	17
1.4. Загальні висновки з першого розділу. Завдання дослідження	23
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ПОРЦІЙНОГО АВТОРЕЗОНАНСНОГО РЕЖИМУ РУХУ ЗЕРНА У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ СЕПАРАТОРІ З ПОЗИЦІЇ СИНЕРГЕТИКИ	25
2.1. Побудова структури системи «циліндричний сепаратор-зерно, що обробляється» та її характеристика	25
2.2. Баланс та трансформування енергії в системі «циліндричний сепаратор – оброблене зерно»	27
2.3. Закономірності утворення вільної енергії зерна в горизонтальному циліндричному сепараторі	31
2.4. Теоретичне обґрунтування конструктивного рішення, що здійснює авторезонансний порційний режим руху зерна в циліндричному сепараторі	35
2.5. Висновки з другого розділу	43
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	45
3.1. Методика теоретичного дослідження	45
3.2. Програма експериментального дослідження	48
3.2.1. Обґрунтування лабораторної установки	48
3.2.2. Методика оцінки інтенсивності процесу сепарації	53
3.3. Організація та програма експериментальних досліджень	55

3.3.1 Аналіз режимів руху пшениці в горизонтальному циліндричному сепараторі	57
3.4 Закономірності процесу сепарації зерна у горизонтальному циліндричному сепараторі при авторезонансному порційному режимі його руху	59
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	65
4.1 Шкідливі і небезпечні фактори, які виникають в процесі експлуатації	65
4.2 Запобіжні заходи із забезпечення безпечної експлуатації вібраційного сепаратора	66
4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях	67
4.4 Вимоги безпеки праці при сепаруванні сипких харчових продуктів	69
РОЗДІЛ 5 ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	71
5.1 Вихідні дані для розрахунку	71
5.2 Визначення сумарних питомих експлуатаційних витрати	73
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Вступ

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Актуальність роботи. Збільшення виробництва зерна в Україні є головним завданням, що забезпечує продовольчу безпеку країни. Зерно є базою підвищення виробництва м'яса, молока та інших важливих продуктів сільськогосподарського виробництва.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Найважливішою проблемою у виробництві зерна є його післязбиральна обробка та зберігання. Вологість і засміченість зерна, що надходить від комбайнів, є головними факторами, що знижують продуктивність робочих органів існуючих зерноочисних машин і сушарок. Так, відповідно до ГОСТ 5888-63, на кожен відсоток збільшення сміттєвих домішок у зерні вище 10% продуктивність

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

повітряно-решітних машин при очищенні знижується на 2%, а на кожен відсоток збільшення вологості зерна понад 16% продуктивність їх зменшується на 5%.

Вибір технології для первинної обробки такого зерна та робочих органів сушильних та очисних машин повинен забезпечувати більш високу продуктивність обробки вологого зерна. Для зерноочисних машин необхідні нові

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

робочі органи, які більш активно впливають на вологе та засмічене зерно, в яких використовуються нові досягнення в техніці: складні силові поля, що виникають від поєднання відцентрових, інерційних, гравітаційних сил, явища авторезонансу [6]. Застосування авторезонансних систем дає можливість багаторазово знизити витрати потужності, металомісткість машин, підвищити їхню продуктивність і

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

ККД. Тому пошук нових рішень інтенсифікації процесу сепарації зерна із застосуванням автрорезонансу є актуальним завданням.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Наукова гіпотеза. Передбачається, що авторезонансний порційний режим роботи циліндричного сепаратора дозволить інтенсифікувати процес сепарації за рахунок збільшення кінематичного режиму та площі поверхні сепаратора, що безпосередньо бере участь у виділенні фракцій, знизити витрати енергії на очищення зерна.

Мета дослідження. Підвищення ефективності процесу роботи горизонтального циліндричного сепаратора при очищенні зернового вороху за

рахунок використання авторезонансного порційного режиму руху.

Завдання дослідження:

1. Виявити закономірності процесу сепарації зерна горизонтальним циліндричним сепаратором із позиції синергетики.
2. Обґрунтувати параметри та режими утворення авторезонансного порційного режиму руху зерна у горизонтальному циліндричному сепараторі.
3. Визначити закономірності процесу сепарації зерна в циліндричному сепараторі при авторезонансному режимі руху.

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

1.1 Аналіз робіт, пов'язаних з дослідженням циліндричних решіт

Перш ніж вибрати робочий орган для первинної обробки зернового вороху підвищеної вологості, відзначимо переваги та недоліки робочих органів існуючих зерноочисних машин.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Плоскі решета сепаратора здійснюють поворотно-поступальні прямолінійні або кругові коливання. Переведення зернового вороху в псевдозріджений стан здійснюється за рахунок дії сил інерції у полі сили тяжіння. Регулювання процесу сепарації в них полягає у зміні частоти обертання кривошипу (змінюється сила інерції), амплітуди коливань та кута нахилу поверхні сепаратора.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

1. Недоліки плоскорешітних робочих органів:

1. Поворотно-поступальний рух великих мас (решітних станів, шатунів, зерна на сепараторі) створює інерційні навантаження на привід, частини машини, що рухаються, раму, вібрація призводить до зсувів частин рами, з'являються блукають коливання, які накладаються на задані технологічні, і.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

2. Ю.А. Полєвода [48] зазначає: «...експлуатація даних машин показала, що дійсні характеристики руху решітних станів не відповідають оптимальним (паспортним) параметрам. Розбіжність їх становить 10-36%.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Вібраційні переміщення рам машин первинного очищення зерна в 2-8 разів перевищують допустимі значення.

3. Вібрація знижує продуктивність машин, їх надійність, призводить до руйнувань рами та робочих органів, витрачається значна енергія на подолання шкідливих коливань, що передаються на інші машини, порушують їхній технологічний процес.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

4. Усі плоскорешітні машини працюють у полі сили тяжіння. Режими їх роботи повністю залежать від прискорення сили тяжіння, яка є постійною величиною (передача енергії в вологе зерно, що обробляється, обмежується

величиною сили тертя зерна по сепараторі).

5. Плоскорешетні машини мають складний привід решітного та механізму очищення сепаратора.

Переваги циліндричних робочих органів

Головною відмінною особливістю горизонтальних робочих органів, що обертаються, є простий привід, відсутність інерційних зворотно-поступальних навантажень, наявність відцентрового прискорення, яке спільно з прискоренням сили тяжіння дозволяє отримувати складні силові поля всередині циліндра, передавати велику кількість потенційної енергії в оброблене вологе зерно, що забезпечує їх високу питому продуктивність.

У збагачувальній, хімічній, сільськогосподарській і переробній галузях економіки існують свої наукові школи, свій підхід до дослідження робочих органів машин, що горизонтально обертаються, відрізняються їх призначенням і видом оброблюваного сипучого матеріалу.

Майже всі наукові роботи з циліндричних машин виконані з урахуванням детерміністського підходу, у якому закономірності руху матеріальної точки, отримані як аналітичних висловів, переносяться механічно протягом усього зернове середовище, що є грубим припущенням, що не відповідає реальному руху сипучого середовища. Результати теоретичних досліджень, зазвичай, не використовувалися розробки нових машин.

Для збільшення кінематичного режиму сепаратора і, отже, підвищення його продуктивності виходячи з теоретичних висновків багато дослідники пропонують установку всередині циліндричного сепаратора нерухомих пристроїв, змінюють вид руху зерна в циліндрі. Варіанти конструкцій внутрішніх пристроїв у циліндричних решітках наведено на рис. 2-4.

Головним недоліком звичайних циліндричних решіт, що працюють при кінематичних режимах $K < 0,8 - 0,9$, є їх мала питома продуктивність, обумовлена:

а) наявністю нерухомого ядра в центрі сипучого тіла, де накопичується

проходова фракція, яка не доходить до поверхні сепаратора;

б) малою поверхнею, що просіває, сепаратора, яка становить менше 20% від всієї поверхні циліндра;

в) низьким кінематичним режимом, збільшення якого веде до циліндричного режиму руху зерна в циліндрі і припинення сепарації.

Кінематичний режим циліндричного сепаратора визначається відношенням відцентрового прискорення $\omega^2 R$ до прискорення сили тяжіння g .

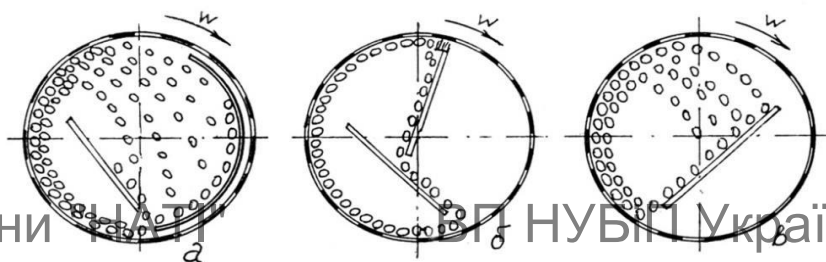


Рис 1.2. Види внутрішніх пристроїв, що забезпечують збільшення кінематичного режиму роботи циліндричних решіт

На рис. 1.2 показані конструкції решіт з внутрішніми нерухомими скатними дошками та щитками, які давали незначне підвищення кінематичного режиму та збільшення продуктивності.

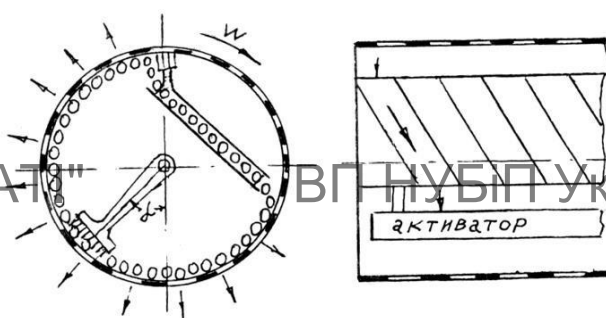


Рис. 1.3 Циліндричний сепаратор:

$D = 0,4 \text{ м}; n = 263 - 272 \text{ об/хв}; K = 7 - 14$

Зміна кута подачі зерна на поверхню цих решіт та застосування активатора дозволило значно збільшити частоту обертання сепаратора – до 300 об/хв, що відповідає режиму $K = 15$.

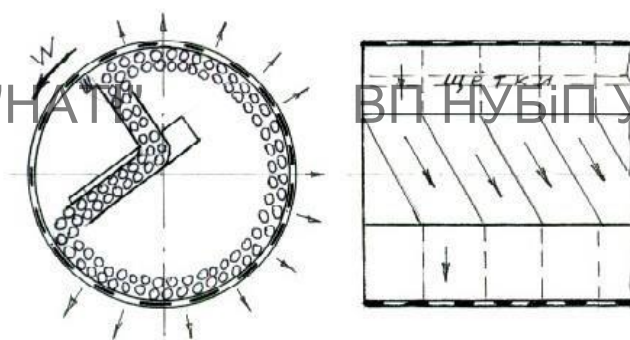


Рис. 1.4. Циліндричний сепаратор:
 $D = 0,4 \text{ м}$; $n = 160 - 300 \text{ об/хв}$; $q_{уд} = 2,0 \text{ кг/м}^2\text{с}$; $D_0 = 7 - 15$

У дослідженнях вище згаданих авторів зазначається, що зі збільшенням величини навантаження при всіх кінематичних режимах сепаратора повнота виділення дрібних фракцій знижується. Дослідження показали, що з $K=4$ витрати енергії на переміщення зерна становлять $0,452 - 0,271 \text{ кВт кг/с}$ за відповідних подач $0,56 - 1,3 \text{ кг/дм}^2$.

Дослідженням процесу роботи швидкохідних циліндричних решіт з осьовими коливаннями з горизонтальною та похилою віссю обертання займалися Ольшанський В.П. та Сліпченко М.В. [48]. Подальше поширення дані органи не набули з наступних причин:

- а) нестійкість режимів руху зерна в циліндрі з осьовими коливаннями - і необхідність точного підбору оборотів і частоти коливання сепаратора;
- б) складність конструкцій приводу обертання та вібрації сепаратора і підвищені енергетичні витрати на обробку зерна.

Відомо, що вібрація, що передається від поверхні сепаратора в зерновий шар, припиняється на глибині 5-6 елементарних шарів сипучого середовища через демпфування пористого матеріалу, тому розміри робочих органів обмежуються товщиною шару зерна, на яку вібрація поширюється.

Головними недоліками вище наведених конструкцій решіт є:

- 1) відсутність спрямованого до поверхні сепаратора процесу перерозподілу частинок. У процесі пересипання зерна по лотках зі зміною напрямку руху відбувається перемішування зернового шару. Проходові фракції, що наблизилися до решету під дією перемішування, можуть знову опинитися

на поверхні зернової суміші. При цьому сукупність ймовірностей проходження зерен через отвори сепаратора зменшується. Порушується четверта умова, необхідна поділу сипких середовищ (див. рис. 1.1);

2) необхідність точного підбору обертів та частоти коливання сепаратора;
3) конструкція зерноочисної машини ускладнюється через передачу двох рухів решету: обертання та осьової вібрації;

4) підвищуються витрати енергії на обробку зерна;

5) вібрація, що передається від поверхні сепаратора в зерновий шар, припиняється на глибині 5-6 елементарних шарів сипучого середовища через демпфування пористого матеріалу, що ускладнює створення машин для виробництва.

Недоліком циліндричних решіт є невиправдано великі кінематичні режими (до $K = 15$), що веде до значних витрат енергії та травмування зерна, погіршення умов для проходження зерна через отвори.

І.В. Твердохліб [36] досліджував процес роботи горизонтального циліндричного сепаратора з вбудованим усередині циліндра, що обертається в протилежний бік по відношенню до грат, шнеком. Мета вдосконалення сепаратора І.В. Твердохлібом полягала у можливості регулювання осьового переміщення оброблюваного зерна та підвищення площі використання решітної поверхні за рахунок повнішого розподілу зерна шнеком по колу сепаратора.

І.В. Твердохліб визначив закономірності взаємодії циліндричного сепаратора та вбудованого в циліндр шнека, оптимальні конструктивні та кінематичні режими роботи сепаратора. Конструкція циліндричного сепаратора, запропонована в його роботі, не може виконати четверту необхідну умову процесу сепарації, так як шнек усередині циліндра призводить до хаотичного перемішування зерна, що обробляється. Узгоджений рух частинок не буде. Методика теоретичного дослідження руху сипучого середовища у цій роботі побудована на вивченні руху матеріальної точки, а закономірності руху переносяться на все сипуче тіло, що є грубим припущенням і не відповідає реальному руху зерна в циліндрі.

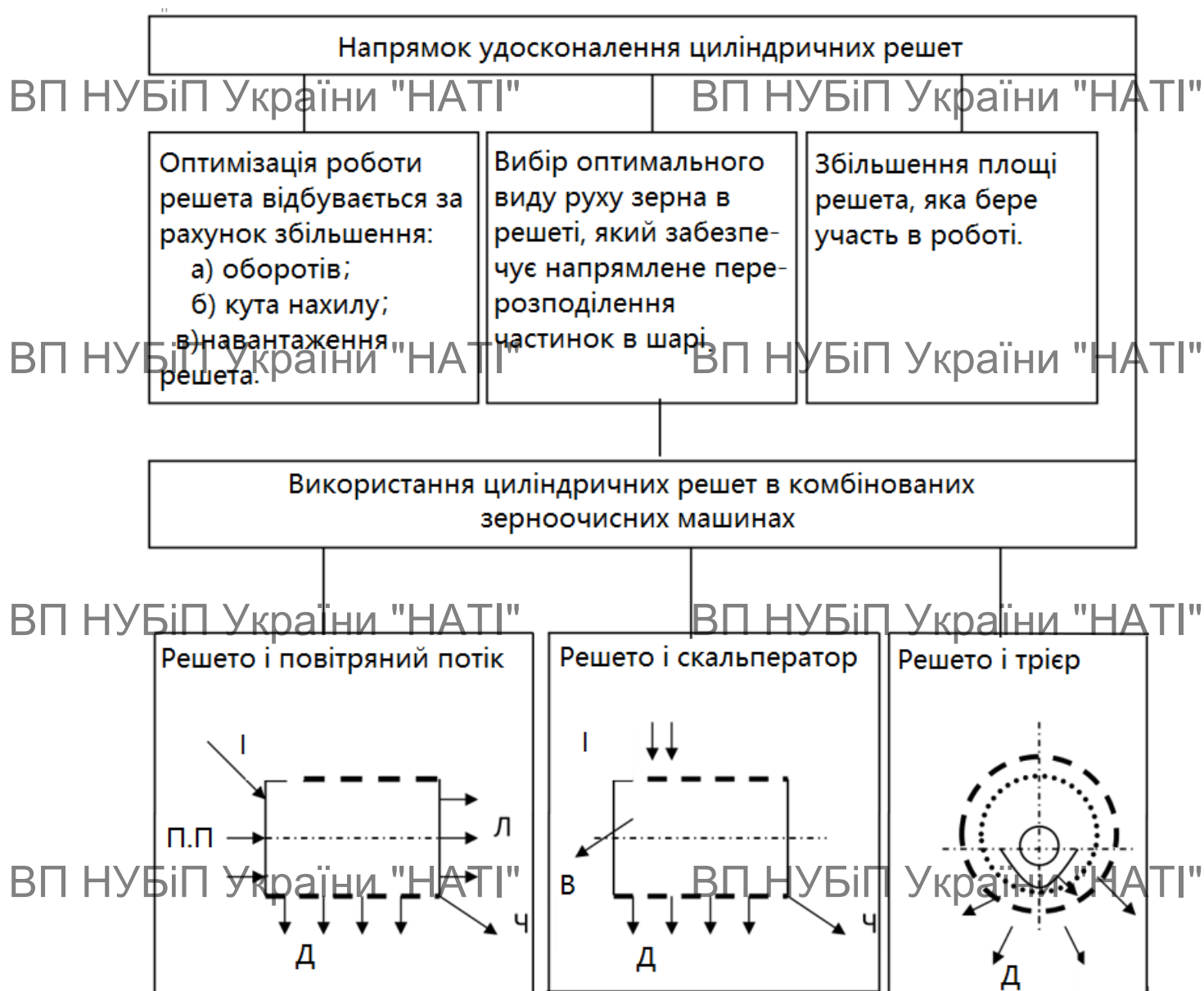


Рис.1.5. Варіанти створення комбінованих зерноочисних машин, що використовують Горизонтальний циліндричний сепаратор І – вихідний матеріал; В – великі домішки; Д – дрібні домішки; Л – легкі домішки; Ч – чисте зерно; П.П. - повітряний потік

Досліджено процес роботи швидкохідного циліндричного сепаратора $K > 1$ з нерухомо встановленими всередині циліндра лопатками. Система обрушувальних лопаток (5-6 штук) встановлена по всій довжині циліндричного сепаратора на різній відстані, що зменшується, від поверхні сепаратора. Система лопаток обрушує потік оброблюваного зерна, що набігає на них, ділить його на окремі падаючі потоки і кожен струмінь потоку направляє в

певну точку на внутрішню поверхню циліндричного сепаратора. Призначення лопаток полягає у забезпеченні сталої роботи сепаратора (водопадного режиму руху зерна при кінематичних режимах $K = 1,5-1,8$) без переходу в кільцевий рух. Така конструкція сепаратора забезпечує узгоджений упорядкований рух вороху за режимів $K > 1,5$.

1.2 Обґрунтування та аналіз резонансних та авторезонансних явищ у горизонтальних циліндричних сепараторах

У цій роботі науковою гіпотезою є використання авторезонансного режиму руху оброблюваного зерна в горизонтальному сепараторі з метою підвищення його питомої продуктивності та зниження витрат енергії.

Розглянемо, що таке авторезонанс і за яких умов він може виникнути в коливальних системах, чи відповідає цим умовам Горизонтальний циліндричний сепаратор?

Практично всі вібраційні машини: транспортери, будівельно-дорожні гуртки, машини, що просівають, мають вимушені коливання робочих органів, але вони працюють у далеких від резонансу режимах у до-резонансних або зарезонансних режимах.

Горизонтальний циліндричний сепаратор і зерно, що обробляється є складною нелінійною системою, де сепаратор - провідна ланка, що управляє, а силкове середовище (зерно) - провідна керована ланка системи, між цими двома ланками існує прямий і зворотний гнучкий зв'язок через сили тертя між елементарними шарами зерна і . Збудлива частота коливань встановлюється частотою обертання циліндра як показали наші теоретичні дослідження, наведені в другому розділі роботи циліндричний горизонтальне сепаратор, що рівномірно обертається, має власні вимушені автоколивання силового поля. Силоче поле змінюється за гармонічним законом в результаті складання в нижній частині кола та віднімання у верхньому півкола сепаратора векторних величин відцентрової сили тяжіння.

Таким чином, сепаратор, що горизонтально обертається, є гармонічним осцилятором або, іншими словами, джерелом вимушених автоколивань, які можуть бути передані оброблюваній масі зерна через сили тертя. Але при малій частоті обертання основна маса в циліндричному сепараторі розташована ексцентрично в першому квадранті кола і в абсолютних координатах є нерухомою, займає форму сегмента, в якому має місце циркуляція зерна, частина його піднімається до горизонтального діаметру, потім обсідається. Такий режим роботи сепаратора називається перекачним. Система сепаратор-зерно врівноважена. Автоколивання силового поля не переходять у масу зерна через слабкі зв'язки (сил тертя) між зерном і сепаратором.

Авторезонанс у системі «сепаратор-зерно» може виникнути, якщо власні автоколивання силового поля сепаратора передати масі зерна, зрушити з першого квадранта, змусити її обертатися всередині циліндра. Але для цього масі зерна необхідно передати додаткову енергію від поверхні сепаратора, збільшити його частоту обертання та встановити всередині сепаратора додаткові поверхні тертя, що дозволяють підняти зерно у другий та третій квадранти кола сепаратора.

Складання власних автоколивань силового горизонтального сепаратора, що обертається, з коливаннями ексцентрично обертової маси зерна в циліндрі приведуть до авторезонансного порційного режиму руху системи «сепаратор-зерно».

Авторезонансні системи дозволяють суттєво підвищити ефективність машин, багаторазово знизити споживану потужність та металомісткість машин при підвищенні їхньої продуктивності та багаторазовому збільшенні ККД. В даний час створюються високоефективні ультразвукові технологічні пристрої з резонансними явищами. Розширюється поле використання авторезонансу для порушення коливань у спеціальних машинах, верстатах, приладах та інструментах. Доведено можливість здійснення резонансних режимів роботи поршневіх машин.

1.3 Новий підхід у методології теоретичних досліджень робочих органів зерноочисних машин

В.А. Патрін у своїй роботі «Розробка теорії взаємодії оброблюваного зерна з робочими органами зерноочисних машин з позиції синергетики» [15] вказує на проблеми наукових досліджень у галузі сепарації зерна, які полягають у наступному:

- основні робочі органи зерноочисних та сортувальних машин разом з оброблюваним на них зерном є складними відкритими дисипативними динамічними системами, що належать до «детермінованого хаосу», описати які аналітичними методами за допомогою класичної механіки без грубих припущень

неможливо;

- у існуючих наукових працях розглядаються лише кінцеві операції: процес перерозподілу частинок у зерновому тілі та проходження дрібних частинок через отвори сепаратора, але не вивчені закономірності переходу енергії від робочого органу до зерно. Енергія є першоосновою, що визначає поведінку навколишнього середовища на робочих органах машин і впливає на інтенсивність процесу сепарації;

- у наявних наукових працях з сепарації зерна відсутні системний підхід, загальна теорія сортувальних машин, незважаючи на те, що у всіх робочих органів мають місце однакові за призначенням та послідовністю виконання операції процесу сортування, одні й самі закономірності передачі вільної енергії в зернове середовище;

- практика показала, що закономірності, отримані для однієї точки або зернівки, не відповідають закономірностям поведінки всього сипучого середовища на робочих органах сортувальних машин і не можуть описати її самоорганізацію та авторегулювання;

- силовое поле будь-якого робочого органу визначає фазовий стан оброблюваного зерна і вид його руху в машині, але дослідження силових полів робочих органів сортувальних машин відсутні, немає критерію для оцінки ступеня

дії силового поля на зерно, що обробляється. Не вивчено закономірності зміни зв'язків між поверхнею робочого органу та зерном.

- Для вивчення процесу роботи зерноочисних машин розроблена нова методика, що ґрунтується на міждисциплінарному синергетичному підході, з використанням нових наукових напрямів, таких як нелінійна механіка, теорія стійкості нелінійних систем, нерівноважна термодинаміка, теорія біфуркацій та катастроф.

- Синергетика має два смислові переклади з грецької мови: перший - наука, що займається вивченням самоорганізованих систем і другий - метод вивчення складних систем із застосуванням кількох наукових дисциплін. Синергетика набула розвитку на початку минулого століття, але як самостійний науковий напрямок оформилося 30-40 років тому.

- Динаміка сипких середовищ у зерноочисних машинах, турбулентний рух рідини, плазма, атмосферні явища відносяться до детермінованого хаосу. У будь-якій хаотичній динамічній системі можна знайти стійкі закономірності руху, які піддаються аналітичному опису. Зерно, що обробляється та робочі органи зерноочисних машин відносяться до відкритих дисипативних, нелінійних динамічних систем [2].

- У відкритих систем змінюється маса та енергія у динаміці її розвитку. Система стає дисипативною, якщо в ній йде виробництво ентропії (втрата теплової енергії на тертя чи деформацію). Система буде нелінійною у тому випадку, якщо на певних етапах її розвитку вона втрачає стійкість, виникають точки загострення у системі (біфуркації та катастрофи). Системи, що належать до «детермінованого хаосу», мають на локальних ділянках стійкий стан, що підкоряється певним закономірностям. На детермінованих ділянках система має властивість авторегулювання чи підтримки стійкого стану, у якому беруть участь закони і відхилення у системі.

- Будь-яке відхилення в системі несе дві прямо протилежні функції: одна є сигналом до дії для повернення системи в заданий рівноважний стан, а інша - до мінливості стану системи, до появи «мутантів», за рахунок яких система

буде більш пристосована до виживання нових умов.

Основними фізичними законами, що виконують роль авторегулювання та самоорганізації дисипативних систем у неживій природі, є флуктуації та сила інерції. Якщо відхилення є загальною закономірністю природи, то флуктуації, у нашому прикладі, ведуть до різноманітності форм руху частинок у сипучому зерновому матеріалі, а в синергетиці поняття флуктуації більш узагальнено, і розглядається як випадкова причина, що «стягує» систему з нестійкого стану в новий, більше стійкий рівноважний стан.

- Флуктуації, як і відхилення, мають протилежні функції. При малих значеннях вони дають сигнал у вигляді «зворотного зв'язку» до саморегулювання системи, до повернення її у стійкий стан, а при великих значеннях сприяють переходу системи в точках біфуркації в новий більш стійкий стан.

- Другим після флуктуації авторегулюючої властивістю має інерція, яка є частковим проявом закону збереження кількості руху. Принцип найменшої дії, флуктуації та інерція відіграють у системі виконавчу роль авторегулювання та самоорганізації системи.

Інерція має дві протилежні властивості. Активне значення (сила дії) забезпечує у всіх зерноочисних машинах пошарове зсувне протягом зерна, у тому числі зсув щодо сепаратора. Активна сила інерції змінюється за гармонійним законом. Пасивна інерція (сила опору дії) у тіл, що покоїться, забезпечує утворення потенційної енергії у зерна за допомогою робочого органу. Сила інерції у пасивній формі забезпечує збереження системи у стійкому рівноважному стані, а в активній переводить систему у новий рівноважний стан.

Третім найбільш важливим важелем авторегулювання систем є закон найменшої дії, відкритий Мопертьюї, який говорить: «... якщо в природі станеться якась зміна, то кількість дії, необхідна для цієї зміни, є найменшою, наскільки це можливо» [15].

$$mVS \rightarrow \min \quad (1.3)$$

де m – маса тіла;

V – швидкість;

S – відрізок шляху, пройдений тілом.

Цей закон пов'язаний із законом збереження енергії, з якого випливає, що будь-яка система прагне стану з мінімумом потенційної енергії. Принцип найменшої дії наказує системі залишатися в даному рівноважному стані, де йде мінімум виробництва потенційної енергії та ентропії, або переміщатися в новий стан, витрачаючи мінімум енергії.

Ми припускаємо, що закон найменшої дії визначає і когерентну (узгоджену) поведінку безлічі частинок на мікрорівні системи. Кожна замкнута траєкторія, якою рухаються частки має певне місце у робочому органі, залежить від «статвеса» енергії частинок. При зміні значень керуючих параметрів (кількості енергії, що передається зерну) «статвес» енергії частинок і положення траєкторій в силуному тілі змінюються одночасно [15].

Авторегулювання та самоорганізація присутні лише в системах і виникли в елементарній формі у неорганічному середовищі задовго до утворення живої природи.

У системах «робочий орган зерноочисної машини – оброблене зерно» мають місце відхилення, флуктуації, сили інерції, вільна та потенційна енергія, ентропія, отже, у них можливе авторегулювання та самоорганізація. Дані системи є відкритими та дисипативними..

Вивченням закономірностей підсистем, утворення нових структур у системах живої та неживої природи займається синергетика.

Якщо у класичній фізиці енергію системи визначають як здатність виконувати роботу, то в синергетиці енергію розуміють як здатність системи створювати організовані структури, а ентропію – як форму енергії у вигляді теплоти, не перетвореної на роботу, яка буде розсіяна.

Історію розвитку методології вивчення процесу сепарації у зерноочисних машинах, доповнили новими матеріалами та представили у цій роботі (рис-6).

Класичні роботи у сфері сепарації зерна були виконані на основі детермінізму. Склалися диференціальні рівняння руху матеріальної точки поверхнями робочих органів зерноочисних машин. Отримані рівняння, як

правило, через свою складність не вирішувалися, а закономірності руху точки далеко не відповідали реальному руху сипучого середовища в машині. А, головне, отримані рівняння для матеріальної точки не можуть визначити динаміку розвитку всієї системи «робочий орган – зерно, що обробляється», передбачити стійкі її стани.

Імовірнісна стохастична модель, побудована на рівнянні Колмогорова-Фокера-Планка, має свої недоліки і в даний час при дослідженні процесів сепарації не використовується. Регресійний аналіз та повнофакторний експеримент пов'язані зі статистичною обробкою великої кількості експериментального матеріалу та більш реально визначають поведінку зернового вороху на робочому органі, але й вони не позбавлені недоліків.

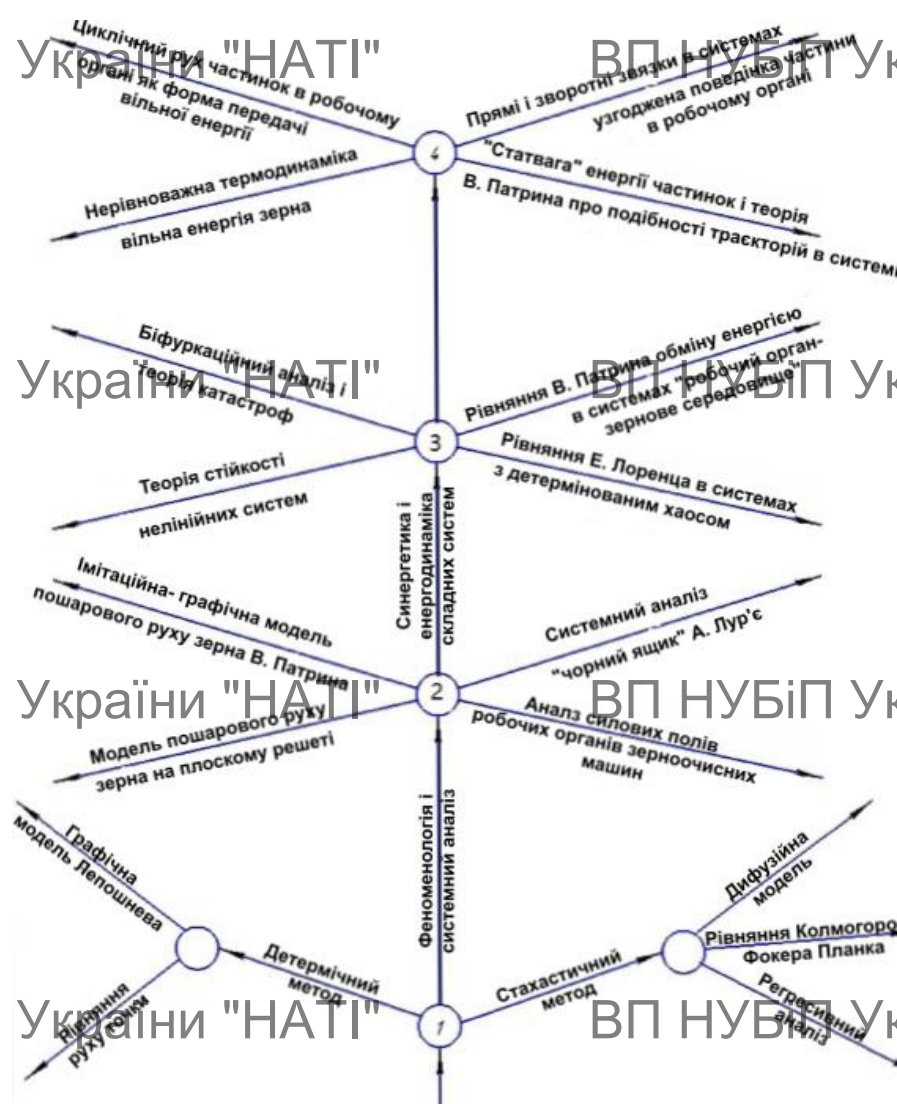


Рис. 1.6. Дерево розвитку методики дослідження процесу сортування сипких матеріалів

Наступним етапом розвитку методики досліджень стала феноменологічна модель, суть якої полягала в логічному побудові (імітації) поведінки складної системи на основі відомих аксіом або попереднього досвіду, наприклад, за величиною відбитка штампу визначаються основні властивості матеріалу.

Сучасна методика дослідження складних систем із «детермінованим хаосом» заснована на застосуванні синергетики, нерівноважної термодинаміки, теорії біфуркацій.

Методика вивчення системи з «детермінованим хаосом» за допомогою теорії біфуркацій полягає в наступному:

1. Будується структура системи, в якій визначається її організація та зв'язки.
2. Встановлюється за попередніми дослідями чи літературними джерелами число стійких рівноважних станів системи чи порядків.
3. Виявляється кількість загострень системи у точках переходу (точках біфуркацій) у новий стійкий стан.
4. Визначаються значення параметрів кожного порядку, у яких система перейшла цей порядок у новий рівноважний стан.
5. Визначаються силове поле, що відповідає даному порядку, та значення керуючих параметрів системи.

Для вивчення складних динамічних дисипативних систем в даний час широко застосовується система рівнянь Е. Лоренца, запропонована ним для вивчення атмосферних явищ [1, 2, 4]:

$$X = -\sigma X + \sigma Y; \quad Y = -XZ + rX - Y; \quad Z = XY - bZ, \quad (1.4)$$

де r - число Релея;

σ - число Прандля;

b – геометричний параметр;

X - швидкість циркуляції потоку;

Y - різниця температур в висхідних та низхідних потоках;

Z – параметр, пропорційний відхилення профілю температури від рівноважного значення.

При дослідженні системи рівнянь Е. Лоренца з чисельними значеннями параметрів $24,74$, $14 = 10$, $3 = 3$ доведено, що ця система рівнянь добре описує перебіг в'язкої рідини в осередках Бенара.

Рівняння Е. Лоренца описують потоки теплової енергії або закономірності зміни балансу та перерозподілу енергії в системі щодо якоїсь величини, але дані рівняння не вирішуються у явному вигляді. Величина коефіцієнтів, структура рівняння показують баланс енергії, напрямок розвитку системи та її стан.

1.4 Загальні висновки з першого розділу. Завдання дослідження

1. Для обробки зернового вороху підвищеної вологості та засміченості, що надходить від комбайнів, необхідні робочі органи зі складними силовими полями з використанням відцентрових сил, з активним впливом на зерно, що обробляється. Такими робочими органами є горизонтальні циліндричні грати.

2. Головним недоліком існуючих горизонтальних циліндричних решіт є їх низька продуктивність, так як в процесі безпосереднього виділення дрібних фракцій бере участь 10-20% поверхні сепаратора, а подальше збільшення частоти обертання сепаратора призводить до утворення зернового кільця на сепараторі під дією відцентрових сил і припинення.

3. Усі раніше зроблені спроби конструкторів, дослідників щодо збільшення кінематичних режимів горизонтальних циліндричних решіт зводилися до встановлення всередині циліндричного сепаратора нерухомих щітків, щіток, лопаток, спіралей, що руйнують зернове кільце. Однак дані пристрої лише порушують природну організацію процесу руху та сепарації зерна, перемішують його, але продуктивність незначно підвищують.

4. Збільшення коефіцієнта використання внутрішньої поверхні сепаратора за рахунок внутрішніх пристроїв, наприклад, шнека, малоефективно через порушення природного узгодженого руху зерна, що обробляється, в циліндричному сепараторі, що призводить до його перемішування.

5. Усі раніше виконані теоретичні дослідження процесу роботи циліндричних решіт побудовані на класичній ньютонівській механіці. Отримані диференціальні рівняння руху матеріальної точки не вирішуються у явному вигляді, а закономірності руху точки неадекватні закономірностям руху всього зернового середовища.

6. Методика дослідження процесу роботи зерноочисних машин, є загальною теоретичною розробкою всіх робочих органів. Для кожного робочого органу, у тому числі і для горизонтального циліндричного сепаратора, потрібна розробка приватної методики дослідження, теоретичне та експериментальне визначення оптимальних кінематичних та конструктивних параметрів.

7. Дослідження енергодинаміки процесу роботи горизонтального циліндричного сепаратора проводилося раніше на одній культурі і при певній вологості та довжині сепаратора 0,3 м. Потрібні подальші дослідження реального потоку зерна в циліндричному сепараторі по всій його довжині на різних культурах з різною їх вологістю.

8. Необхідне подальше теоретичне та експериментальне дослідження сепарації зернового вороху в горизонтальному циліндричному сепараторі при авторезонансному порційному режимі руху зерна, що обробляється..

Завдання дослідження :

1. Виявити закономірності процесу сепарації зерна горизонтальним циліндричним сепаратором із позиції синергетики.

2. Обґрунтувати параметри та режими утворення авторезонансного порційного режиму руху зерна у горизонтальному циліндричному сепараторі.

3. Визначити закономірності процесу сепарації зерна в циліндричному сепараторі при авторезонансному режимі руху.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПОРЦІЙНОГО АВТОРЕЗОНАНСНОГО РЕЖИМУ РУХУ ЗЕРНА У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ СЕПАРАТОРІ З ПОЗИЦІЇ СИНЕРГЕТИКИ

2.1 Побудова структури системи «циліндричний сепаратор-зерно, що обробляється» та її характеристика

Відповідно до існуючого порядку вирішення складних динамічних систем, викладеним у першому розділі, розглянемо структуру та організацію роботи системи «циліндричний сепаратор - зерно, що обробляється».

Структура — це статичне відображення системи будь-якої миті часу. Організація системи пов'язана зі структурою, способами зв'язку, упорядкованістю та підпорядкуванням елементів системи, ймовірністю існування (стійкістю), керуванням, зворотними зв'язками та інформацією.

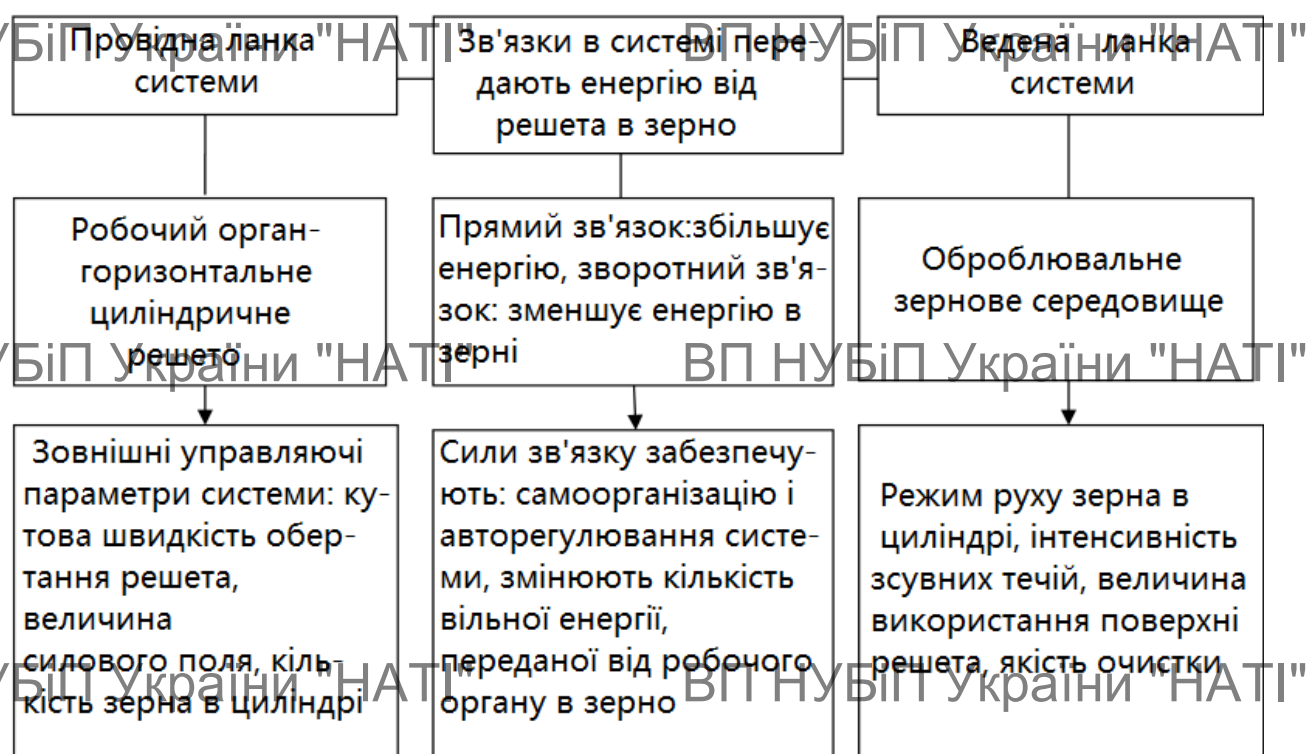


Рис.2.1. Структура та організація системи «циліндричний сепаратор – зерно, що обробляється»

Розроблено структуру та організацію системи для горизонтального циліндричного сепаратора та оброблюваного зернового вороху (рис. 2.1).

Система «циліндричний сепаратор – оброблене зерно» є складною динамічною, нелінійною, дисипативною, самоорганізованою системою, яка складається з двох підсистем: робочий орган – горизонтальний сепаратор (провідне, керуюча ланка системи) та зерно, що обробляється – провідна ланка системи.

Робочий орган включає електродвигун, сепаратор, систему передачі енергії деталям приводу та обертального руху решету. При зміні частоти обертання та радіусу сепаратора збільшується або зменшується кінематичний режим і, отже, більше або менше кінематичної енергії входить до системи.

Зерно, що обробляється (відоме ланка системи) складається з частинок (зерен), порового простору (проміжків між зернами) та контактів. Зерно відноситься до ідеальних сипучих середовищ, що є проміжним станом між в'язкими рідинами і твердими тілами.

Складна взаємодія оброблюваного зерна з циліндричним сепаратором у системі здійснюється за допомогою сил зв'язку, якими можуть виступати сили нормального тиску, та їх похідні – сили тертя $F=f \cdot N$, сили адгезивного та молекулярного зчеплення, конструктивні елементи тощо. [15]. Між провідним і веденим ланкою системи існують прямий і зворотний зв'язок.

Прямий зв'язок. Змінюючи керуючі параметри провідної системи: кутову швидкість обертання сепаратора, навантаження, ми тим самим збільшуємо або зменшуємо кількість енергії, що передається в зернове тіло. Передача енергії в зерно йде за рахунок сил тертя між поверхнею сепаратора та зерновим тілом і далі всередину зернового середовища за рахунок внутрішніх сил тертя між елементарними шарами зернового середовища.

У логістичному рівнянні (1.6), що представляє модель надходження енергії в зернове середовище, прямі зв'язки передають кількість (а K_n) умовної енергії.

Зворотній зв'язок. Зі збільшенням кількості внутрішньої енергії в

зерновому середовищі змінюються її стан, структура, фізико-механічні властивості: пористість, коефіцієнт тертя. Система зменшує кількість енергії, що передається в зерно, зворотний зв'язок здійснює другий член логістичного рівняння ($B\omega^2 K_n$).

У процесі роботи поверхня циліндричного сепаратора шліфується, стає гладкою, а при обробці сухого насіння, наприклад вівса, з малим коефіцієнтом тертя поверхні, збільшення кутової швидкості сепаратора не підвищує кількість енергії, що надходить у зерно і, отже, не може перевести систему в новий режим руху. Виникає тупикове положення системи на гілці біфуркації.

Щоб забезпечити перерозподіл частинок зерна за розміром, необхідно дати зернам переміщатися щодо один одного і по поверхні сепаратора, а для цього треба зруйнувати або послабити зв'язки між зернами. Але з іншого боку, зменшуючи сили тертя, зв'язку, ми зменшуємо кількість енергії, що надходить у зерно, а тим самим продуктивність машини. Виникає суперечність у призначенні та використанні сил зв'язку в циліндричному сепараторі.

Канал зв'язку забезпечує стійкість виду руху зерна у циліндричному сепараторі. При зміні умов зв'язку між провідною та веденою підсистемами відбувається процес авторегуляції. Зернове середовище змінює режим руху та переходить у точках біфуркації на новий режим.

2.2 Баланс та трансформування енергії в системі «циліндричний сепаратор – оброблене зерно»

Проведемо аналіз першого рівняння (1.5) системи, на основі термодинамічного потенціалу Гельмгольца, стосовно процесу роботи горизонтального циліндричного сепаратора:

$$E_{\text{зовн}} \rightarrow \Pi \rightarrow E_{\text{вн}} = F + S \cdot T, \quad (2.1)$$

де $E_{\text{зовн}}$ - зовнішня енергія сепаратора, Дж;

Π - Потенційна енергія, отримана зерном від сепаратора, Дж; F – вільна кінетична енергія руху зерна, Дж;

$S \cdot T$ – ентропія та відповідна їй абсолютна температура T (теплові втрати), Дж/К;

$E_{\text{вн}}$ – повна внутрішня енергія системи, Дж.

Дане рівняння дає можливість зрозуміти процес роботи горизонтального циліндричного сепаратора з точки зору обміну енергією між робочим органом і зерном, що обробляється.

У лівій частині рівняння стрілками показано напрям і вид трансформації енергії у системі, а права частина рівняння є термодинамічний потенціал Гельмгольца [19].

З рівняння видно, що кінетична енергія від робочого органу перетворюється на потенційну енергію зерна. Внутрішня поверхня циліндричного сепаратора за наявності сил зв'язку (тертя) піднімає масу зерна на деяку висоту h . Під час циклу підйому зерно знаходиться у фазі спокою щодо поверхні циліндричного сепаратора. Фаза спокою зерна має місце у всіх робочих органах зерноочисних машин [3].

Головною операцією у роботі будь-якої зерноочисної машини є псевдозрідження зернового вороху та переміщення його щодо сепаратора. Для виконання цих операцій необхідна вільна кінетична енергія зерна, яка створюється в кожному циклі руху зерна щодо поверхні сепаратора з потенційної енергії.

Аналізуючи формулу балансу енергії, бачимо, що джерелом вільної енергії в системі є запасена робочим органом потенційна енергія зерна, яка переходить потім у вільну кінетичну. При цьому частина енергії $S \cdot T$ витрачається на тертя та теплові втрати. Відповідно до рівняння (2.1) у горизонтальному циліндричному сепараторі йде безперервний обмін та трансформація енергії між поверхнею сепаратора та оброблюваним зерном.

Енергію необхідно розглядати як добуток двох факторів, один з них – фактор екстенсивності (потенційна енергія, ентропія, інерція), інший – фактор інтенсивності (розсіювання енергії руху, теплота, світло, електрика). Усі процеси у природі характеризуються тим, що ці дві форми енергії

взаємопов'язані і переходять одна до одної – екстенсивність енергії зростає, інтенсивність її безперервно зменшується. Розсіювання енергії відбувається саме собою в основному за рахунок тертя, а накопичення йде вимушено і має бути оплачене за рахунок розсіювання іншого зовнішнього джерела енергії.

Таким чином, обмін енергією між елементами системи у зерноочисній машині є загальним законом природи.

У горизонтальних циліндричних решітках циклічність руху зерна забезпечується всіх режимах його роботи, крім трубчастого і маятникового, де сипуча середовище всередині циліндра переміщається як тверде тіло. Необхідно відповісти на питання, як забезпечується стійкий динамічний рівноважний стан системи «робочий орган - зерно, що обробляється», якщо ця система є відкритою і дисипативною.

У систему безперервно надходить зовнішня енергія і маса зерна, що обробляється, крім того, всередині системи йде виробництво ентропії (накопичується теплова енергія).

Приймемо два припущення: перше - маса зерна в машині при встановлених режимах роботи залишається постійною, так як кількість зерна, що надходить на обробку, дорівнює масі зерна, що виходить з машини, з урахуванням усіх фракцій. Друге – кількість внутрішньої теплової енергії, утвореної внаслідок тертя зерна, залишає систему разом із обробленим зерном та домішками.

Прийняті припущення відповідають «теорії відкритих систем» Берталанфі [13], де незалежно від часу роботи у системі має місце «рухлива рівновага». Для цього необхідна точна узгодженість швидкостей протікають в них процесів, припливу та відтоку речовини та енергії.

Послідовне перетворення енергії у системі «робочий орган – Горизонтальний циліндричний сепаратор» можна як діаграми, аналогічної діаграмі Сенка (рис. 2.2.).

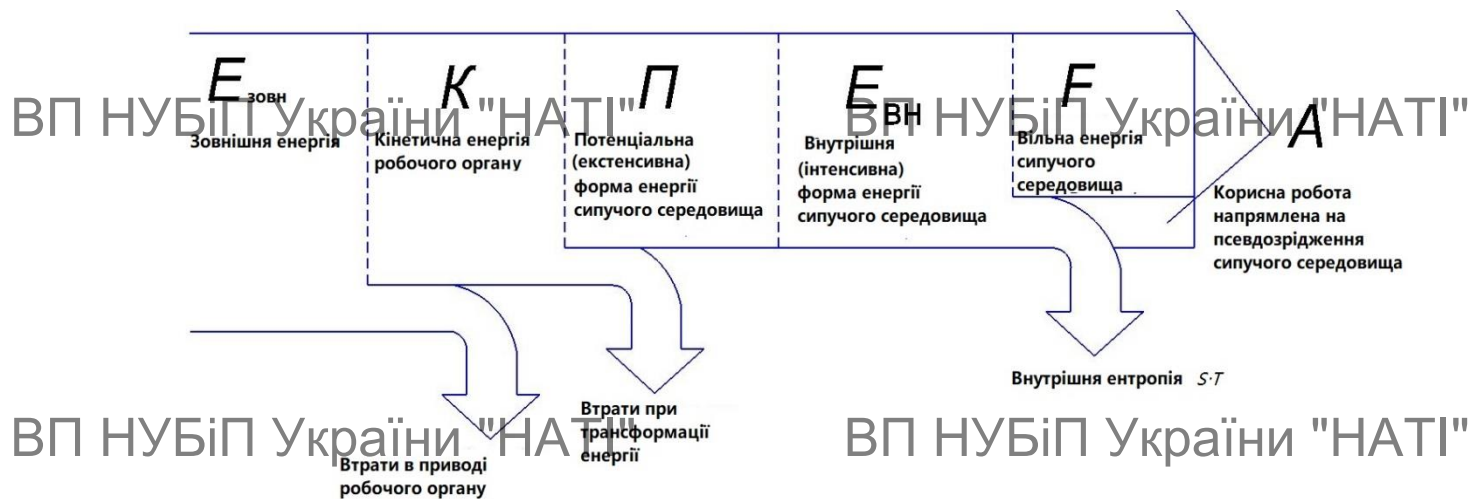


Рис. 2.2. Перетворення енергії в системі «робочий орган – горизонтальний циліндричний сепаратор»

Розглянемо утворення потенційної внутрішньої енергії у циліндричних робочих органах у переكاتному вигляді руху. Маса елементарного об'єму зерна, що піднімається поверхнею циліндра радіусом R і довжиною L при повороті на кут da , складе:

$$dG = 1000(R - r) \left(\frac{R+r}{2} \right) \cdot da \cdot L \cdot \gamma, \quad (2.2)$$

де $(R - r)$ - товщина шару, що піднімається, м; γ - насипна щільність сипучого середовища, т/м³.

При теоретичному визначенні потужності, необхідної для приводу циліндра, багато авторів приймають переріз сипучого середовища у вигляді сегмента, у той час як реальний переріз при режимах роботи реєни має форму сім'ядолі з внутрішнім радіусом, близьким до кола (рис. 2.3).

Робота, що витрачається зовнішніми силами на утворення внутрішньої потенційної енергії сипучого середовища за один оберт циліндра, дорівнює

$$A = \Pi = 1000(R - r)^2 \cdot L \cdot \gamma \cdot g \cdot R \cdot 2\pi, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.3)$$

де Π - потенційна енергія зернового вороху при $h = R$; h - висота підйому зерна, м.

Потужність, необхідна для підйому зерна в циліндрі на висоту, що дорівнює радіусу сепаратора (без урахування сил тертя на привід циліндра),

становить:

$$N = 0,5(R-r)^2 \cdot L \cdot \gamma \cdot g \cdot R \cdot \omega, \text{ кВт} \quad (2.4)$$

де ω - кутова швидкість циліндра – , рад/с.

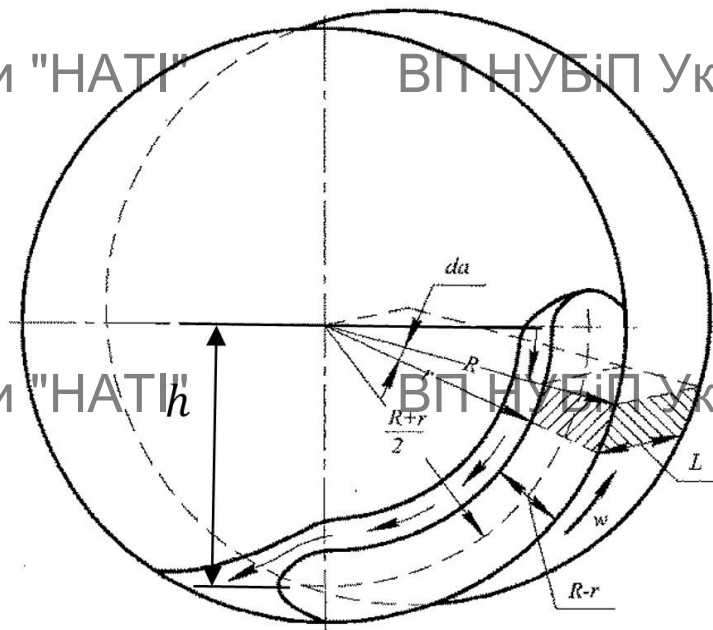


Рис. 2.3. Перетворення енергії циліндричного сепаратора в потенційну енергію зерна в коловому режимі

2.3. Закономірності утворення вільної енергії зерна в горизонтальному циліндричному сепараторі

Друге рівняння системи В.А. Патрина описує закономірності переходу кінетичної енергії від поверхні робочого органу спочатку у потенційну, а потім у вільну енергію зерна при незалежному його русі щодо сепаратора (вільне падіння, пошаровий рух усередині зернового середовища).

Внутрішня енергія системи є термодинамічним потенціал Гельмгольца $E_{вн} = F + S \cdot T$ і складається з вільної енергії F і теплових втрат $S \cdot T$ (ентропії). В.А. Патрін довів, що накопичення внутрішньої енергії зерном відбувається за

логістичним рівнянням параболи (рис. 2.4):

$$E_{\text{вн}} = (\alpha\omega - \beta\omega^2)K_n \quad (2.5)$$

де $E_{\text{вн}}$ – внутрішня енергія зерна у системі «робочий орган–зерно», Дж; ω

– кутова швидкість обертання сепаратора, рад/с;

K_n - коефіцієнт навантаження зерна на сепараторі;

$\alpha = \text{tg}$ - коефіцієнт, що визначає інтенсивність надходження енергії в зерно на висхідній гілці параболи;

β - Коефіцієнт, що визначає фактори, що знижують інтенсивність переходу енергії в зерно.

Відношення α/β визначає точку перетину вихідної гілки параболи з віссю абсцис.

Стан системи, стійкість, вид руху зерна в циліндрі, продуктивність сепаратора визначаються кількістю енергії, що перейшла від поверхні сепаратора в зерно.

Рівняння (2.5) є загальним всім робочих органів зерноочисних машин. Завдання цього дослідження полягає в аналізі та вирішенні даного логістичного рівняння, безпосередньо для конкретного циліндричного сепаратора, у визначенні значень коефіцієнтів α , β , K_n при зміні керуючих параметрів: частоти обертання сепаратора та величини його завантаження зерном.

Визначені умови переходу сипучого середовища в переكاتний, змішаний, водоспадний і трубчастий режими руху в горизонтальних циліндрах, що обертаються. Нашими дослідженнями встановлено новий порційний вид руху сипучого середовища. При рівномірному обертанні циліндра система «циліндр-зерно» перетворюється на авторезонансний стан, у якому зерно відривається порціями від поверхні циліндра у першому квадранті і вільно летить, як тіло, кинуте під кутом до горизонту, на протилежну частину поверхні циліндра.

Даний режим руху сипучого середовища в циліндрі відрізняється тим, що кожна частка або зернівка, маючи різні умови в момент відриву: швидкість і місце відриву, початковий кут польоту - рухається в загальній порції зерна за своєю траєкторією і має свою точку зустрічі з поверхнею сепаратора в третьому

і четвертому квадранті кола. Кожна частка в момент зустрічі з поверхнею сепаратора має різний напрямок та величину швидкості падіння.

Частота відриву порцій зерна в циліндричному решітці близька до частоти обертання сепаратора.

Побудуємо за рівнянням (2.5) теоретичний графік передачі енергії в зернове середовище в залежності від кінетичного режиму циліндра (див. рис. 2.4) і дамо характеристику режимів руху зерна в залежності від кінетичного режиму сепаратора.

Човниковий (маятниковий) вид руху виникає на гладкій поверхні циліндра при невеликих навантаженнях. Даний вид руху мало залежить від кутової швидкості циліндра і не застосовується у технологічних процесах.

Зі збільшенням кутової швидкості циліндра перекатний вид руху поступово переходить у змішаний, в якому є елементи водоспадного та перекатного виду руху.

У перекатного режиму можна виділити три стани зернового середовища: одна частина зернового тіла бере участь у зсувній течії при скочуванні зерна вниз, має псевдозріджену структуру, а інша знаходиться в нерухомому стані щодо поверхні сепаратора і піднімається вгору разом з сепаратором, накопичуючи потенційну енергію, третина - "брунька", або центр зернового тіла, знаходиться в абсолютному нерухомому стані, щодо її верхній шар зерна обсипається, нижній піднімається вгору.

Нашими дослідженнями встановлено, що величина «бруньки» залежить від неоднорідності зернового середовища за ступенем засміченості та вологості. У чистому сухому зерні при середніх та малих навантаженнях «бруньки» може не бути.

Перекатний вид руху в чистому вигляді через малі кінематичні режими, слабкий енергетичний вплив на зернове середовище і низьке використання робочої поверхні циліндра рідко застосовується в технологічних процесах.

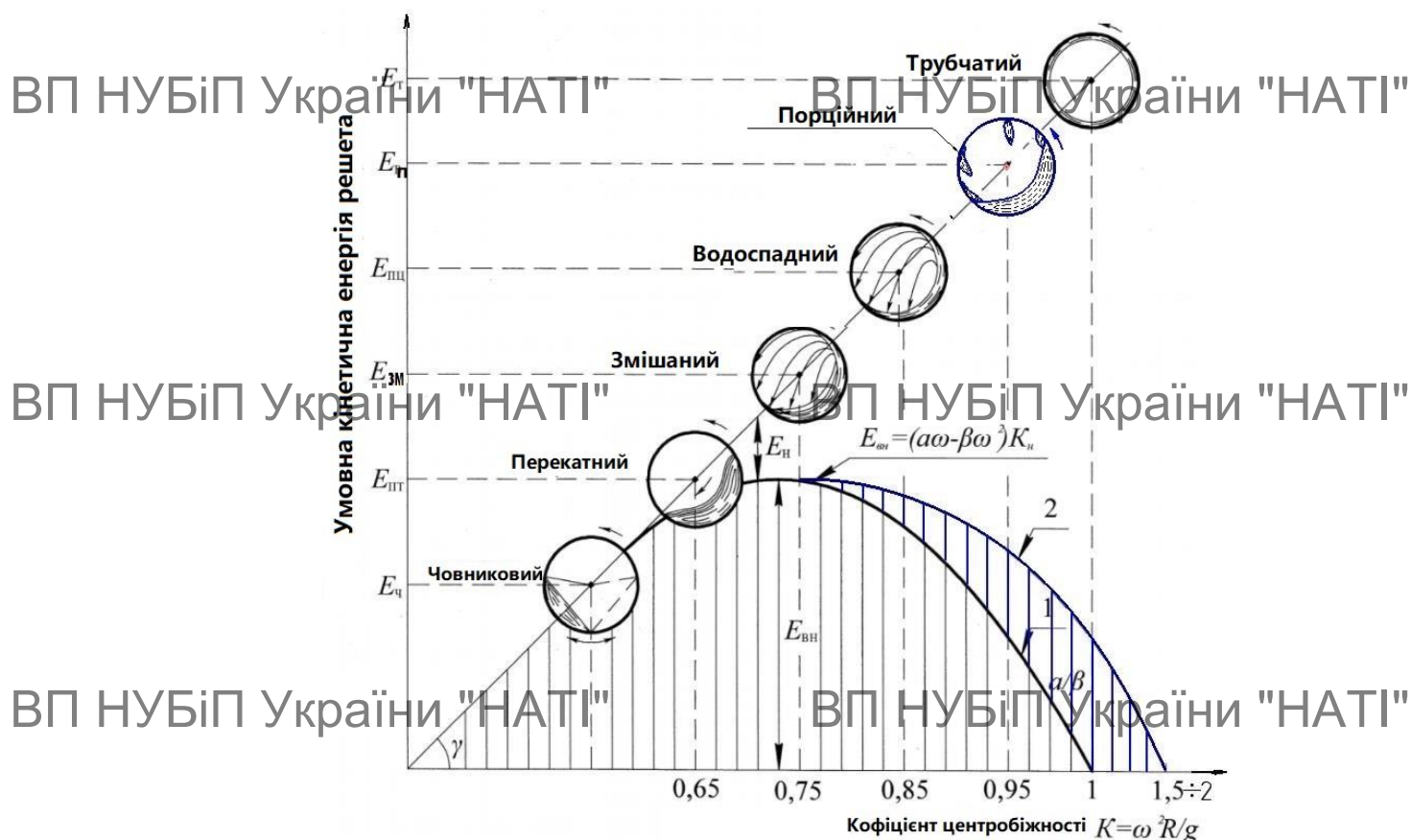


Рис. 2.4. Енергодинаміка і режими руху зерна в горизонтальному обертовому циліндричному сепараторі відповідно до рівняння (2.5): E_n — енергія, недоотримана зерновим середовищем від сепаратора, 1 — теоретична та 2 — експериментальна гілки параболи.

В інтервалі кінематичних режимів $K = 0,3 - 0,7$ йде зростання внутрішньої відносної енергії зерна $E_{вн}$, підвищується інтенсивність зсувної течії, йде дисипація енергії та збільшення ентропії, зростає продуктивність робочих органів машин. При збільшенні частоти обертання циліндра відбувається зміщення центру тяжкості зернового тіла праву частину циліндра, при цьому збільшується його момент опору обертанню. При подальшому збільшенні частоти обертання $K > 0,7$ момент опору обертання сепаратора починає зменшуватися, оскільки частина зернового середовища при падінні переміщається в протилежний бік, допомагаючи обертатися циліндру, так як падаюче зерно має швидкість більше, ніж окружна швидкість сепаратора. Інтерес для виробництва представляє чисто водоспадний режим руху

зерна в циліндрі з двох причин: по-перше, він дає досить велику продуктивність сепаратора за рахунок інтенсифікації процесу проходження дрібних частинок через отвори та збільшення робочої поверхні сепаратора, що бере участь у роботі, а по-друге, що падає шар зерна, рівномірно розподілений по всьому поперечному перерізу горизонтального циліндра, дозволяє використовувати для видалення легких домішок повітряний потік, спрямований з торця циліндричного сепаратора. Якщо ж використовувати підігріте повітря, то досягається поєднання двох операцій (очищення та сушіння зерна) в одному робочому органі.

Недоліком водоспадного режиму є його нестійкість, він існує у вузькому діапазоні кінематичних режимів і його важко застосувати у виробничих умовах без додаткових пристроїв.

Подальше збільшення частоти обертання призводить до трубчастого виду руху, у якому внутрішня кінетична енергія зернового середовища зникає, а система «робочий орган – зерно» руйнується.

Постійні коефіцієнти логістичного рівняння α , β , K_n визначаються дослідним шляхом. Загальноприйнято, що низхідна гілка параболи ділиться на теоретичну – 1 і дійсну (експериментальну) – 2. Для кожного конкретного значення (коефіцієнта тертя про внутрішню поверхню, властивостей сипучого матеріалу та величини навантаження) вона буде своя в межах $K = 1 \div 2$.

2.4 Теоретичне обґрунтування конструктивного рішення, що здійснює авторезонансний порційний режим руху зерна в циліндричному сепараторі

У виробничих умовах на існуючих конструкціях горизонтальних циліндричних решет отримати авторезонансний порційний режим руху зерна важко, так як сили зв'язку (тертя) між поверхнею сепаратора і оброблюваним зерном малі і не забезпечують передачу достатньої енергії від сепаратора до зерна в необхідній кількості для цього виду руху.

У процесі роботи поверхня сепаратора шліфується при взаємодії із

зерном, зменшуючи коефіцієнт тертя. Виробничі циліндричні сепаратора мають довжину майже вдвічі більшу, ніж їх діаметри. Маса зерна розподіляється на великій площі сепаратора тонким шаром, що також зменшує питому силу тиску зерна на поверхню сепаратора і тертя.

Зерно ковзає по поверхні сепаратора і не може піднятися на достатню висоту, щоб закласти необхідну кількість потенційної та вільної енергії для авторезонансного порційного режиму руху відповідно до рівнянь (2.1) та (2.5) (див. рис. 2.4). На графіку біфуркації (див. рис. 2.5) в даному випадку виникають тупикові гілки таких режимів, як човниковий, переكاتний, переكاتно-човниковий, на які подальше збільшення обертів сепаратора не впливає. Система залишається у рівноважному стані. Для того щоб вивести систему з рівноваги, перевести її в нову точку біфуркації на новий стійкий режим руху необхідно знайти новий спосіб передачі додаткової енергії в зерно.

Проведемо аналіз третього рівняння (1.7) із системи В.А. Патріна для плоского сепаратора $F_{дв} = F_{ин} - F_c$; перетворимо його для циліндричного, замінивши сили на моменти дії, отримаємо:

$$M_{дв} = M_{тр} - M_G, \quad (2.6)$$

де $F_{дв}$ - фактична сила, що переміщує елементарний зерновий шар, Н;

$F_{ин}$ - сила інерції (активна), що діє на зерновий шар, Н;

F_c - сила опору зсуву зернового шару, сила зв'язку (тертя), Н;

$M_{дв}$ – фактичний момент сили тертя, що відхиляє зернове тіло у бік обертання, Н·м;

$M_{тр}$ - максимальний момент сили тертя зернового тіла по поверхні сепаратора, Н · м;

M_G – момент від сили тяжкості зернового тіла, що перешкоджає відхиленню зерна поверхнею сепаратора (подібність маятника), Н·м.

Аксіома 2.1. Так як зерно, що обробляється в горизонтальному циліндричному сепараторі займає від 10 до 20% поперечного перерізу (ступінь заповнення зерном координату центру тяжкості зернового тіла перенесемо на поверхню циліндра до точки М (рис. 2.5).

також відсутнє.

Момент руху, що утворює потенційну енергію, без урахування бічного тиску в системі дорівнює (див. рис. 2.11):

$$dM_{\text{дв}} = m \cdot a \cdot \cos d\varphi \cdot f \cdot R - m \cdot g \cdot h_G, \quad (2.8)$$

де m – маса зерна, кг; a – результуюче прискорення (див. рис. 2.7.), м/с^2 ;

$d\varphi$ – елементарний кут відхилення центру сили тяжіння змінюється від 00

до 900; f – коефіцієнт тертя зерна поверхню сепаратора; R – радіус сепаратора, м; g – прискорення сили тяжіння, м/с^2 ; h_G – плече дії сили тяжіння м.

Момент руху, що «кидає» порцію зерна у вільний політ, має максимальне значення наприкінці четвертого та на початку першого квадранта кола. Так як маса зерна розташована по поперечному перерізу сепаратора ексцентрично, то сила тертя і момент руху, що передає енергію зерну, мають імпульсний характер і діють за час перебування зерна в першому квадранті.

Імпульс дії з урахуванням елементарних сил тертя зернового тіла про внутрішню поверхню сепаратора дорівнює:

$$F \cdot t = \sum_{\varphi=0}^{\varphi=\pi/2} d m a \cos d\varphi \cdot f \cdot (\pi 2 \omega), \quad (2.9)$$

де $t = (\pi / 2 \omega)$ – час дії сили тертя на зернове тіло при переміщенні його в першому квадранті.

Момент сили тяжіння, що перешкоджає підйому порції зерна, дорівнює mgh_G .

Імпульс дії моменту руху, що утворює потенційну енергію в зерні, при переході через перший квадрант дорівнює:

$$M_{\text{дв}} \cdot t = \sum_{\varphi=0}^{\varphi=\pi/2} (d m a \cos d\varphi \cdot f \cdot R - d m g \cdot h_G) \cdot \pi 2 \omega. \quad (2.10)$$

В результаті проведеного теоретичного аналізу можна записати наступну аксіому.

Аксіома 2.2 Момент руху, що передає потенційну енергію від поверхні горизонтального циліндричного сепаратора оброблюваному зерну, носить імпульсивний характер, розташований у першому квадранті кола і залежить за величиною від маси зерна, внутрішнього та зовнішнього коефіцієнтів тертя зерна,

кута переміщення зернового тіла по колу і мало залежить від кутової сепаратора.

З аксіоми 2.2 видно, що для переходу на новий режим руху зерна в горизонтальному циліндричному сепараторі необхідно збільшити кількість потенційної енергії, що передається зерну, підняти його вище за рахунок збільшення імпульсу моменту руху або моменту сили тертя (2.14).

Важливою умовою збільшення кількості енергії, що передається від сепаратора в зерно, є збереження природних закономірностей руху силучого середовища у поперечному перерізі циліндра: циклічності та узгодженості руху частинок, наявності фаз спокою та вільного руху тощо. Це дозволяє цій складній системі перейти у стійкий авторезонансний порційний рух самостійно. Ця умова є основним критерієм при створенні внутрішніх пристроїв циліндричних решіт.

Крім того, горизонтальні циліндричні сепаратора чутливі до зміни кута нахилу сепаратора. Осьова швидкість руху зерна різко зростає навіть при незначній зміні кута нахилу сепаратора, що збільшує втрати зерна у відходах. Цей недолік обмежував застосування циліндричних решіт у пересувних зерноочисних машинах.

Для переведення горизонтального циліндричного сепаратора в порційний авторезонансний режим роботи та стабілізації осьової швидкості зерна всередині циліндра перпендикулярно його осі обертання встановлюються на деякій відстані один від одного додаткові поверхні тертя, виконані у вигляді плоских кілець. Кільця на внутрішній поверхні сепаратора закріплені на стійках із зазором, що забезпечує осьове переміщення зерна по поверхні сепаратора (рис. 2.6).

Додаткові поверхні тертя представляють систему плоских регульованих по ширині кілець, що сприймають бічне тиск зерна як в'язкої рідини. Частина нормального тиску зерна передається на бічні стінки (поверхні кілець), що обмежують сипуче середовище. Бічна сила тертя для пшениці становить 38% нормальної при коефіцієнті рухливості $m = 0,38$.

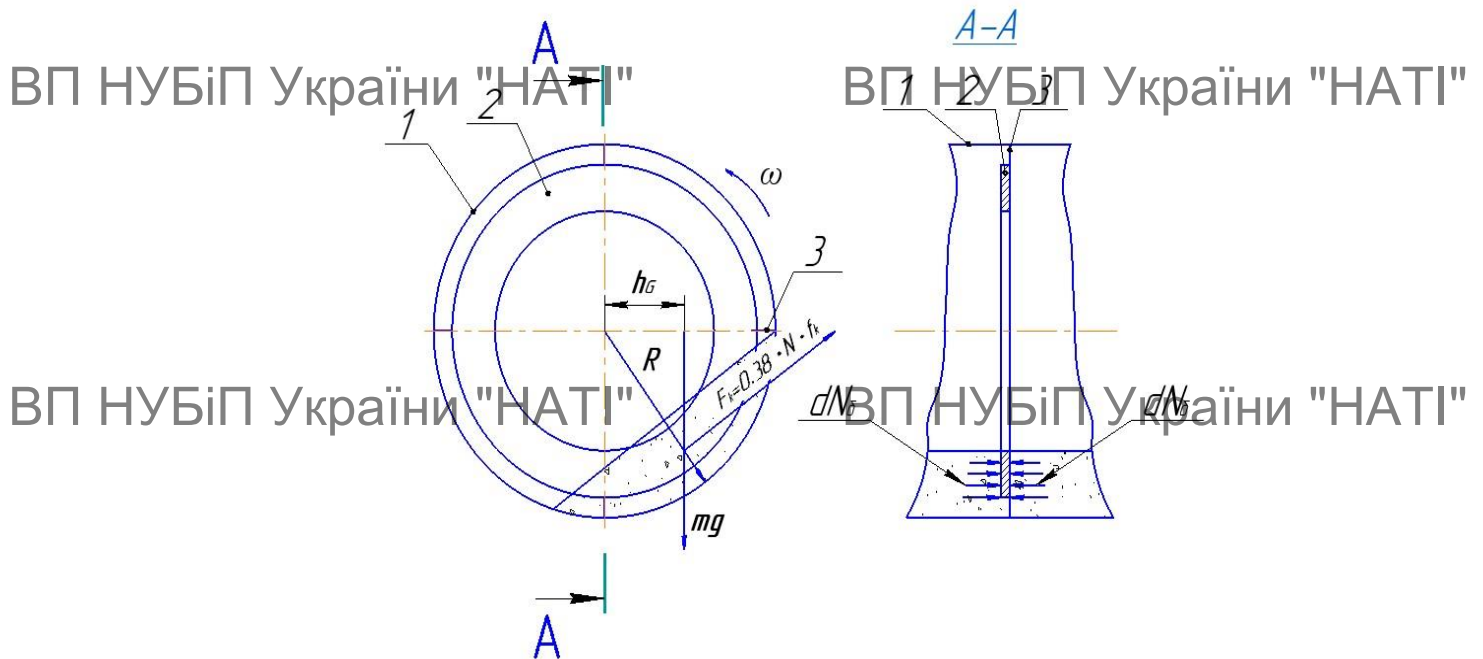


Рис. 2.6. Визначення бічної сили тертя зернового тіла поверхню кільця, нерухомо встановленого всередині сепаратора: 1 – сепаратор; 2 – кільце; 3- кріплення кільця до сепаратора

Тоді елементарна додаткова сила тертя зерна на обидві бічні поверхні одного встановленого плоского кільця складе:

$$dF_k = 0,38n N f_k, \quad (2.11)$$

де $n = 2$ - число поверхонь тертя одного кільця;

N - нормальний тиск зерна на поверхню сепаратора, Н/м²;

f_k - коефіцієнт тертя пшениці з бокової поверхні кільця.

Кожне кільце складається з трьох деталей: одного плоского суцільного кільця і двох напівкілець, закріплених шарнірно на суцільному кільці одним кінцем. Другі кінці напівкілець можуть переміщатися щодо суцільного кільця, змінюючи його діаметр та ширину. Після регулювання положення напівкілець фіксують гвинтами.

Визначимо імпульс сил тертя зернового тіла дві бічні поверхні одного кільця, що обертається разом з циліндричним сепаратором з урахуванням рівняння (2.17) і (рис. 2.11 і 2.11):

$$dF_k \cdot t = 0,38 \cdot 2ma \cos d\varphi \cdot f_k \cdot \frac{\pi}{2}\omega, \quad (2.12)$$

де f_k – коефіцієнт тертя зерна об бічну поверхню кільця,

a – результуюче прискорення відповідно до рівняння (2.9).

Прийmemo такі припущення:

1. Ширина кільця приймається рівною від 5 до 7% довжини діаметра сепаратора, тому тиск по ширині кільця вважатимемо однаковим.
2. Для бічної сили тертя відбувається лише у першому квадранті.
3. Коефіцієнти тертя зерна про поверхню сепаратора та поверхню кільця однакові.

Імпульс елементарних сил тертя по поверхні сепаратора та поверхні кільця, що піднімають зерно на кут $d\varphi$, з урахуванням рівняння (2.15) визначиться:

$$dF \cdot t = 1,76 dmaf \frac{\pi}{2\omega} \cos d\varphi, \quad (2.13)$$

де a – результуюче прискорення від сили тяжкості та відцентрового прискорення і – кут повороту сепаратора – змінні величини; $t = \pi$ – час повороту сепаратора на один квадрант (900).

При додаванні двох моментів від сили тертя по поверхні сепаратора і бічних поверхонь кільця і моменту сили тяжіння, спрямованого в протилежний бік, отримаємо фактичний імпульс моменту, що діє на зерно з урахуванням рівняння (2.16):

$$M_{дв} \cdot t = \sum_{\varphi=0}^{\varphi=\pi/2} (dma \cos d\varphi \cdot R \cdot f - dm g \cdot h_G) \cdot \frac{\pi}{2}\omega,$$

перетворивши яке, отримаємо:

$$\varphi=\pi$$

$$M_{дв} \cdot t = \sum_{\varphi=0}^{\varphi=\pi} dm \frac{\pi}{2}\omega (1,76aRf \cos d\varphi - g \cdot h_G). \quad (2.14)$$

На рис. 2.7 показаний один повний цикл взаємодії зерна, що обробляється, з поверхнею горизонтального циліндричного сепаратора при авторезонансному порційному режимі руху.



Рис.2.7. Взаємодія зерна, що обробляється, з поверхнею горизонтального циліндричного сепаратора при авторезонансному порційному режимі руху

По осі абсцис відзначені квадранти кола сепаратора, що послідовно вступають у роботу, час повороту сепаратора за кожні 90° , виражене в радіанах.

По осі ординат відкладена на гармонійній кривій величина результуючого прискорення від векторної суми відцентрового прискорення і прискорення сили тяжіння при кінематичному режимі обертання, що порівнює $K=2$. Результуюче прискорення дано у безрозмірній величині у відносних одиницях щодо прискорення сили тяжіння.

Перша частина циклу. Утворення зернового тіла та його спокій щодо поверхні сепаратора. Місце – I квадрант (при ступені заповнення сепаратора зерном $\varepsilon > 0,2$ захоплює кінець (-20°) четвертого квадранта). Цикл спокою необхідний передачі енергії від поверхні сепаратора в зернове тіло. Кінетична енергія обертового сепаратора трансформується в потенційну енергію маси зерна, що піднімається, у II квадранті. Для якісного виконання цієї операції необхідний хороший зв'язок зернового тіла з сепаратором силами тертя.

Друга частина циклу. Відрив зернового тіла від поверхні сепаратора, вільний політ кожної частки. Місце – II квадрант. Зернове тіло розпадається на траєкторії окремих зерен, які заповнюють весь поперечний переріз циліндричного сепаратора.

Третя частина циклу. Падіння зерна з просковзуванням щодо поверхні сепаратора. Місце – III та IV квадранти. Особливість авторезонансного порційного режиму полягає в тому, що зерно завжди падає на поверхню сепаратора, вільну від зерна, що лежить на ньому, що збільшує ймовірність проходження зерен через отвори сепаратора. Швидкість падіння частинок вища, ніж окружна швидкість сепаратора, що зменшує витрати енергії на привід сепаратора. Головна перевага даного режиму руху у тому, що у процесі поділу беруть участь III і IV квадранти, тобто. 50% поверхні сепаратора, тоді як у існуючих конструкціях циліндричних решіт та режимах руху – всього 20% поверхні сепаратора.

Заштрихована область на рис. 2.13 показує місце у повному циклі порційного руху, де зерновому тілу передається сепаратором імпульс моменту від сили тертя, який кидає порцію зерна у III та IV квадранти.

2.5 Висновки з другого розділу

1. Система «Горизонтальний циліндричний сепаратор – зерно, що обробляється» має складну структуру та організацію взаємодії елементів, відноситься до систем з «детермінованим хаосом». Між провідним ланкою системи – сепаратором і веденим – зерном існує прямий і зворотний зв'язок, що забезпечує самоорганізацію системи. Як зв'язки виступають сили тертя, що передають енергію від сепаратора в зерно.

2. На всіх режимах руху зерна в горизонтальному циліндричному сепараторі має місце циклічність: відносний спокій зерна та вільний (незалежний від сепаратора) рух. Отримано вираз, що дозволяє визначити роботу та потужність, що витрачається зовнішніми силами на утворення внутрішньої потенційної енергії зерна.

5. Розроблено синергетичну модель поведінки складної системи «Горизонтальний циліндричний сепаратор – зерно, що обробляється», що самоорганізується, наведено на основі літературного аналізу раніше виконаних

робіт біфуркаційна діаграма динаміки розвитку системи.

6. Дано аналіз та наведено закономірності зміни силового поля горизонтального циліндричного сепаратора. Отримано рівняння силових ліній та еквіпотенційних поверхонь поля. Векторна сума відцентрового прискорення та прискорення сили тяжіння змінюється за гармонічним законом і залежить від величини від кінематичного режиму роботи сепаратора.

7. Теоретичний аналіз та практика показали, що авторезонансний порційний режим руху оброблюваного зерна в горизонтальному циліндричному сепараторі у виробничих умовах отримати неможливо через низький коефіцієнт передачі енергії від сепаратора в зерно, збільшити який можна за рахунок використання бічного тиску сипучого середовища. Отримано патент на пристрій для здійснення порційного режиму авторезонансного руху зерна в циліндричному сепараторі.

9. Теоретично доведено, що в масі зерна, що знаходиться на поверхні решера і що рухається разом з сепаратором, мають місце пульсуючі овали, що коливаються, нормальних напруг з частотою рівною частоті обертання сепаратора.

10. Маса падаючого зерна в III і IV квадрантах кола сепаратора має швидкість більше, ніж окружна швидкість сепаратора, що створює момент, що збігається з напрямком обертання сепаратора, що зменшує витрати енергії на його привід.

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Методика теоретичного дослідження

Нестача загальноприйнятого детерміністичного методу теоретичного дослідження цієї проблеми полягає в тому, що закономірності, отримані при вирішенні диференціальних рівнянь руху окремої матеріальної точки, переносяться на все сипуче тіло, що не відповідає реальному стану і є абсурдним. Кожна точка, частка знаходиться в сипучому тілі в різних умовах: якщо на поверхні сепаратора, на неї тисне весь шар зерна, в середині шару - половина, а у верхньому шарі тиску немає. При складанні диференціальних рівнянь ці факти не звертають уваги, тому отримані рішення відповідають истине.

«Детерміністські закони фізики, що колись були єдиними прийнятними законами, нині постають перед нами як надмірні спрощення, майже як карикатура на еволюцію» [2].

Недоліком існуючих методик теоретичних досліджень є те, що зерноочисна машина і зернове середовище, що обробляється, не розглядаються у взаємодії, як система, що знижує якість дослідження та його повноту, не дозволяє передбачати поведінку зернового тіла в часі.

Предметом і методом нашого дослідження є енергодинаміка процесу взаємодії зерна з горизонтальним циліндричним сепаратором.

Аксіома 3.1. Енергодинаміка визначає весь процес сепарації. Кількість зовнішньої енергії, що перейшла від робочого органу в зерно, що обробляється, визначає його фазовий стан, вид руху, інтенсивність перерозподілу частинок у зерновому тілі, отже, і продуктивність машини. Закономірності переходу енергії від робочого органу до зерна є первинними стосовно закономірностей процесу сепарації [15].

Основним методичним завданням була розробка системи

«Горизонтальний циліндричний сепаратор – зерно, що обробляється».

Визначено структуру, організацію та зв'язки в системі, знайдено керуючі параметри, напрям передачі енергії, зворотні зв'язки.

Об'єктом нашого дослідження є складна дисипативна нелінійна система, що відноситься до «детермінованого хаосу», вирішення якої можливе лише за допомогою міждисциплінарного підходу, методами синергетики, нелінійної механіки, термодинаміки із застосуванням теорії стійкості систем та біфуркацій.

У ньютонівській механіці при складанні диференціальних рівнянь визначаються сили, що діють на досліджуване тіло.

У нелінійній механіці, синергетиці рішення дослідницьких завдань пов'язані з такими поняттями, як «керівне силове поле» і «поле сил», що діють систему, у цій роботі ставилося завдання докладного дослідження силового поля горизонтального циліндричного сепаратора. Визначено його динамічну характеристику, напрямки силових ліній, еквіпотенційних поверхонь. Виявилось, що при рівномірному обертанні сепаратора силове поле, що діє на сипуче середовище, здійснює гармонічні коливання, подібні до плоского решету, а сипуче середовище схильна до пульсацій нормальних напруг.

Розвиток методики теоретичних та експериментальних досліджень можна уявити як розвиток складної системи, яка безперервно вдосконалюється, як і сама наука разом із її науково-технічними досягненнями. На рис. 1.6 нами була показана у вигляді «дерева розвитку» біфуркаційна діаграма, що дозволяє візуально подати все різноманіття існуючих та нових методик, сучасних моделей дослідження, що дозволяють вивчати складні системи, що раніше було неможливим.

Тут слід зазначити, що нелінійні дисипативні системи, до яких належить і система «машина-зерно», на локальних тимчасових ділянках свого розвитку є стійкими і описуються детермінованими феноменологічними рівняннями. При зовнішніх обуреннях такі системи потрапляють у точки катастроф (їх ще називають точками біфуркації), у яких система характеризується нестійкістю та

хаотичним станом, звідки система сама, роблячи вибір, може перейти в новий стійкий стан з новим порядком, у нашому випадку, з новою поведінкою та режимом руху сипучого середовища. Таку поведінку нелінійних систем називають «детермінованим хаосом».

Вперше для опису атмосферних явищ Е. Лоренц запропонував систему трьох синергетичних рівнянь, яка виявилася придатною для опису конвективного перебігу рідини [20], перебігу сипучого середовища [6]. Особливість даних рівнянь у тому, що де вони вирішуються у вигляді, а визначають лише закономірності зміни енергії, напрям руху системи.

Для вивчення складних нелінійних систем «робочий орган зерноочисної машини – зерно, що обробляється» запропоновано систему синергетичних рівнянь, що визначають баланс та напрямок трансформувannya енергії, закономірності переходу енергії від робочого органу в зерно, закономірності зміни сил активних та сил опору. Дана система рівнянь наведена в першому і другому розділах магістерської роботи і перероблена стосовно горизонтального циліндричного решету.

У теоретичних дослідженнях ми використали метод нестандартного аналізу:

- а) при побудові моделі авторезонансного порційного режиму руху зерна у горизонтальному циліндричному сепараторі;
- б) щодо закономірності переходу енергії від поверхні решета у зерно;
- в) при побудові моделі утворення потенційної та вільної енергії зерна в циліндричній сепараторі.

В основу теоретичного дослідження покладено біфуркційний метод розвитку складних систем та феноменологічний підхід при побудові моделі авторезонансного порційного режиму руху зерна, що означає, що початкові дані прийнятих закономірностей отримані з пошукового експерименту, попередніх дослідів, літературного аналізу роботи з даної теми.

3.2 Програма експериментального дослідження

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

- До програми експериментального дослідження входило:
- Оцінка відповідності отриманих теоретичних закономірностей руху оброблюваного зерна в циліндричному сепараторі реальному процесу роботи сортувальної машини;

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

- Встановлення числа можливих стійких режимів руху зерна в горизонтальному циліндричному сепараторі, точок біфуркації та параметрів, від яких вони залежать;

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

- Визначення закономірностей утворення авторезонансного порційного режиму руху в горизонтальному циліндричному сепараторі на різних культурах залежно від зміни керуючих параметрів кінематичного режиму роботи сепаратора та навантаження;

- дослідження процесу сепарації в горизонтальному циліндричному сепараторі на авторезонансному порційному режимі руху зерна.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

3.2.1 Обґрунтування лабораторної установки

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах

Лабораторна установка (рис. 3.1) складається з циліндричного сепаратора з пробивними довгастими прямокутними отворами розміром 2 x 20 мм.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Полотно решета за допомогою заклепок приєднано до двох кльців. Торці сепаратора з боку, з якої проводилася відеозйомка, закриті склом, оскільки на оргсклі від тертя зерна наводиться статична електрика, накопичується пил, з'являється матовість. З іншого боку торець сепаратора закритий оргсклом, що дозволило вирізати вікно з клапаном для завантаження в сепаратор дрібних фракцій насіння під час режиму роботи сепаратора.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

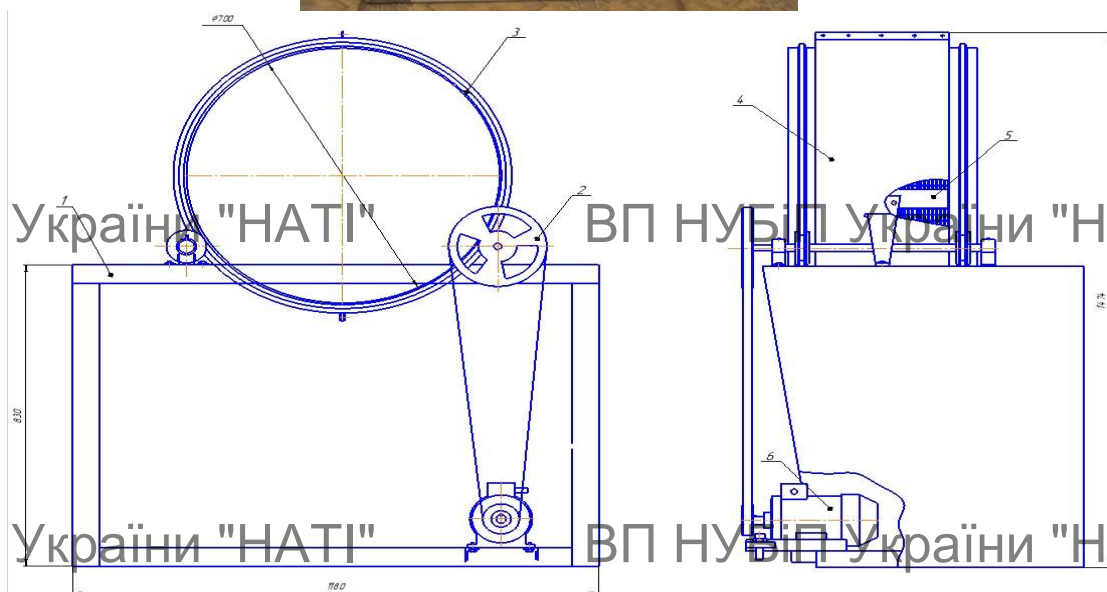


Рис.3.1. Лабораторна установка із горизонтальним циліндричним сепаратором: 1 – рама установки, 2 – контрпривід сепаратора, 3 – циліндричний сепаратор, 4 – кожух сепаратора, 5 – щітка, 6 – електродвигун приводу сепаратора діаметром 700 мм, довжиною 300 мм, встановленого на чотирьох роliках, два з яких провідні, електроприводи з електромотором потужністю 3 кВт та частотою обертання 950 хв^{-1} .

Привід на вал з провідними роliками діаметром 90 мм здійснюється за допомогою клинопасової передачі від валу електродвигуна.

Головною особливістю лабораторної установки та її гідністю є можливість плавної зміни частоти обертання сепаратора від 0 до 100 хв^{-1} як у бік підвищення, так і у бік зниження за допомогою трифазного перетворювача

частоти струму E2-8300-005 Н. Потужність, що витрачається на привід сепаратора, визначалася за допомогою лічильника електроенергії «Меркурій-230», Арт.-01 PQR- SIN, ГОСТ Р 52322 (рис. 3.2.).



Рис. 3.2. Прилади вимірювання та регулювання параметрів роботи лабораторної установки

Витрати електроенергії на початку досвіду визначалися без навантаження на неодруженій роботі сепаратора. Визначалася потужність, що витрачається на опір у приводному пристрої та повітря. Потім у сепаратор завантажувалося зерно із заданим ступенем заповнення, встановлювався запланований кінематичний режим роботи сепаратора і фіксувалася потужність, що витрачається на привід сепаратора.

Частота обертання сепаратора визначалася за допомогою тахометра Актакомат-6002.

Відмінною особливістю приводу лабораторної установки від прийнятого на практиці приводу горизонтальних циліндричних робочих органів є те, що момент, що крутить, на сепаратор передається там за рахунок жорсткого зачеплення на вісь сепаратора. У нас передача крутного моменту на сепаратор здійснюється силами тертя провідних роликів, на яких є прорізи під профіль клинопасової передачі. Самі ремені у перевернутому положенні кріпляться на кільця гвинтами.

Такий привід сепаратора має ряд переваг:

- зменшується шум при роботі сепаратора, у зачепленні беруть участь прогумований ремінь та сталевий ролик;
- передається досить великий крутний момент (у роботі беруть участь два ролики, два кільця – дві клинопасові передачі);
- при раптовій зупинці сепаратора весь пристрій страхується від поломки. Провідні ролики починають прослизати щодо кілець сепаратора, виконуючи функцію запобіжного пристрою.

Головна ж перевага вільного положення циліндричного сепаратора на роликах щодо інших частин приводу полягає, по-перше, в тому, що його можна швидко зняти і замінити на сепаратор з іншими отворами, як це виконується в плоскорешітних машинах, а по-друге, воно дозволяє системі самоналаштуватись на авторезонансний порційний режим руху зерна.

Для зменшення торцевого биття та вильоту сепаратора з роликів у вертикальному напрямку у верхній частині сепаратора на нерухомому корпусі встановлено обмежувальний ролик.

Для завантаження і розвантаження сепаратора зерном на його поверхні встановлений клапан, що відкидається. При завантаженні сепаратор повертається так, щоб клапан опинився у верхньому положенні, при розвантаженні – у нижньому.

Подача дрібних домішок проводилася під час частоти обертання сепаратора, що встановилася, лотком через торцевий центральний отвір в оргсклі.

Час проходження домішок через отвори сепаратора визначався секундоміром.

Ступінь заповнення сепаратора зерном (навантаження) визначалася величиною відношення площі поперечного перерізу, зайнятої зерном, до площі поперечного перерізу циліндричного сепаратора F_p .

$$\varepsilon = \frac{F_z}{F_p}.$$

Частота обертання сепаратора змінювалася плавно від 5 до 115 хв-1

шляхом зменшення чи збільшення частоти струму. Кутова швидкість при цьому змінювалася в межах $\omega = 0,8 \div 12$ рад/с, коефіцієнт відцентровості $K = 0,02 \div 3$. Ступінь заповнення сепаратора змінювали в межах $\varepsilon = 0,04 \div 0,34$.

1. Порядок підготовки та проведення дослідів щодо визначення режиму руху зерна, точок біфуркації, кількості енергії, що йде на привід сепаратора, полягав у наступному:

2. На холостому ході сепаратора на різних кінематичних режимах знімалися показання лічильника витрат електроенергії.

3. У циліндрове сепаратор засипали зерно заданої вологості. Досліди проводились на пшениці, ячмені, вівсі з вологістю від 13 до 25%. Вимірювали центральний кут φ , який зерно займає в циліндрі, та визначали ступінь заповнення за формулою

$$\varepsilon = \varphi / 360 - \sin \frac{\varphi}{2\pi}.$$

4. Обертаючи вручну сепаратор із зерном, визначали кут природного укусу α і кут підйому центру тяжкості зернового сегменту $\alpha_{\text{п}}$.

5. Вмикали електродвигун, встановлювали за допомогою приладу задану частоту обертання сепаратора, фіксували витрати енергії на привід сепаратора по ватметру на кожній фазі електромотора, на різних кінематичних режимах вимірювали товщину шару зерна, що піднімається і зсипається.

6. За допомогою фотоапарата та відеокамери фіксували:

- вид, режим руху зерна, початок та кінець його стійкого, рівноважного стану;

- Поява точок переходу системи з одного виду руху на інший. Одночасно визначали частоту обертання сепаратора та витрата потужності на привід.

7. Перевіряли систему на стійкість режимів руху зерна, на збіг крапок біфуркації, на гістерезис. Для цього частоту обертання сепаратора збільшували до критичних, коли зерно припиняло рухатися щодо сепаратора і притискалося до поверхні у формі кільця (трубчастий режим). Потім частоту обертання повільно зменшували до початкових, перевіряючи систему на стійкість

рівноважних станів.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

3.2.2 Методика оцінки інтенсивності процесу сепарації

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Для оцінки якості роботи та визначення продуктивності горизонтального циліндричного сепаратора на авторезонансному порційному режимі руху зерна ми встановлювали повноту виділення домішок – E_p , яка визначає якість роботи сепаратора та коефіцієнт інтенсивності процесу сепарації – K , а також динаміку (швидкість) виділення дрібної фракції.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

На відміну від існуючих методик, нами розроблено новий підхід до оцінки якості процесу сортування, який полягає в тому, що протягом одного досвіду проби відбираються через задані проміжки часу з 12 рівних площі ділянок сепаратора, не порушуючи при цьому процес роботи сепаратора. Весь досвід сканується на певні проміжки часу та просторові ділянки.

Відомо, що продуктивність решітних машин прямо пропорційна площі сепаратора, що бере участь у процесі сепарації, тому ми ввели для оцінки продуктивності сепаратора коефіцієнти використання поверхні сепаратора:

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

$$K_p = S_p / S_n$$

де S_p – площа поверхні, що бере участь у процесі сепарації;

S_n – повна площа поверхні сепаратора.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Повнота виділення домішок визначається із співвідношення кількості дрібних домішок (B), що пройшли через сепаратор, до загальної маси дрібних домішок у вихідному зерновому насипі до обробки (Π_3):

$$E_p = B / \Pi_3.$$

Коефіцієнт інтенсивності процесу сепарації визначається виразом

$$E_p = 1 - e^{-kt},$$

де t – час сепарації;

e – число, рівне 2,178.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Вирішуємо дане рівняння щодо k :

$$k = \frac{\ln(1 - E_p)^{-1}}{t}.$$

На рис. 3.3 наведена схема відбору дрібних домішок, що просіялися з 12

рівних за площею ділянок поверхні нижнього півкола сепаратора, яка розділена на 12 частин так, що кожна частина охоплює центральний кут, рівний 150° , а площа поверхні кожної ділянки сепаратора дорівнює $0,048 \text{ м}^2$. Під сепаратором встановлені 12 вертикальних пробовідбірників, що відводять від кожної ділянки поверхні сепаратора просіяні дрібні домішки в комірку горизонтального пересувного пробовідбірника, що має 60 осередків з літерним маркуванням. Горизонтальний пробовідбірник переміщається напрямними через задані проміжки часу з фіксацією на секундомірі: О, А5, В10, В20, Г40, Д80.

Час сепарації на кожному відрізку відбору проби становив секунди:

А-5 с; Б-5; В-10 с; Р-20 с; Д-40 с.

Для зручності зважування прохідної фракції з кожної ділянки і виключення помилки кожен осередок на горизонтальному рухомому пробовідбірнику виконана знімною, склеєна з щільного паперу і має буквене, що вказує час відбору проби, і цифрове маркування, що позначає місце відбору проби, наприклад, В3. Тут літера позначає момент часу після початку сепарації - 20 с, тривалість сепарації - 10 с. Цифра 3 вказує на те, що проба отримана з третьої ділянки сепаратора.

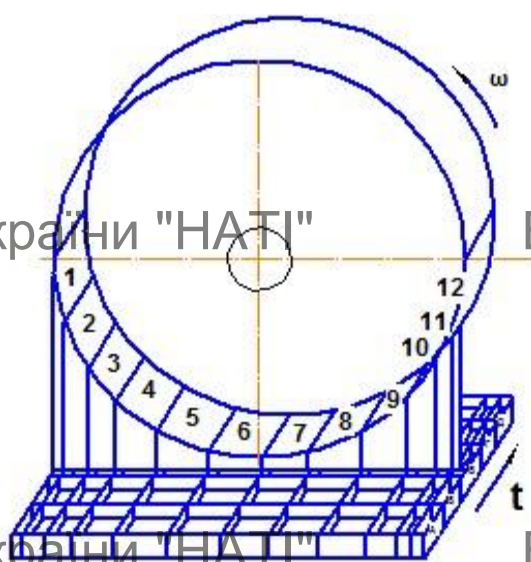


Рис. 3.3. Загальний вигляд пробовідбірників лабораторної установки та схема відбору проб при визначенні повноти виділення Е та коефіцієнта сепарації К

Результати зважування прохідної фракції записувалися в таблицю з коефіцієнтами, де цифри від 1 до 12 позначали зону просіювання, а літери від А до Д - час сепарації в секундах.

Порядок проведення дослідів був таким:

1. Сепаратор повертали так, щоб завантажувальний отвір виявився вгорі. Засипали основну культуру у кількості, що забезпечує заданий ступінь заповнення сепаратора.

2. За допомогою частотного перетворювача встановлювали необхідну частоту обертання сепаратора.

3. Горизонтальний пробовідбірник встановлювали у вихідне положення А.

Перший ряд приймальних осередків підводили під вертикальні лотки.

4. Через центральний отвір у задній торцевій стінці циліндричного сепаратора висипали навішування дрібних домішок у сепаратор, що обертається, засікали початок сепарації на секундомірі. Тривалість часу сепарації визначали переміщенням горизонтального пробовідбірника. Досліди проводили у триразовій повторності. Під час проведення обчислень прийнято припущення, що у кожному ділянці поверхні сепаратора прохідна фракція повністю виділяється під час дослідів, рівне 80 з.

3.3 Організація та програма експериментальних досліджень

1. На лабораторній установці, що представляє циліндричний сепаратор діаметром 700 мм, довжиною 300 мм, закриті з торцевих сторін склом, що дозволяло спостерігати та знімати на відеокамеру режими руху зерна у поперечному перерізі сепаратора з урахуванням бічного тиску сипучого середовища на торцеві поверхні решіт.

2. На лабораторній зерноочисній машині, що дозволяє досліджувати процес очищення зерна у поєднанні з повітряним потоком на різних режимах руху зернового вороху з різною вологістю та засміченістю вихідної фракції зерна, що обробляється. Детальний опис лабораторної установки та методики

проведення дослідів представлено у третій главі даної роботи.

Назви режимів руху сипучого середовища в горизонтальному циліндрі вперше були дані Е. Девісом, які з часом змінювалися, трансформувалися, доповнювалися іншими авторами.

В даний час у науковій літературі застосовується більш точна сучасна термінологія режимів руху сипучого середовища в циліндрі, дана

Авторами [1], визначено три основні режими руху: човниковий, перекатний та водоспадний. Трубчастий режим руху, або подібність маховика, коли сипуче середовище притискається відцентровими силами до горизонтальної поверхні циліндра, не використовується в робочих органах машин.

Перераховані режими руху сипучого середовища в чистому вигляді на практиці використовуються рідко, як вони нестійкі і швидко переходять у змішані режими, що залежать від оборотів циліндра, властивостей сипучого середовища, величини завантаження та стану поверхні циліндра.

До трьох основних режимів руху сипучого середовища необхідно додати човниково-перекатний, перекатно-водоспадний та новий, відкритий нами, авторезонансний порційний режим руху.

У другому розділі цієї роботи дано теоретичне обґрунтування авторезонансного порційного режиму руху сипучого середовища горизонтальному циліндричному сепараторі.

Як показали попередні досліді, авторезонансний порційний режим руху зерна в горизонтальному сепараторі з пробивними отворами неможливий через недостатню кількість енергії, що передається від поверхні сепаратора зерну. Низький коефіцієнт тертя, отже, невелика сила тертя, не забезпечують необхідний запас зерна потенційної енергії для порційного режиму руху зерна (рівняння (2-16)).

Щоб підвищити кількість енергії, що передається від сепаратора зерну, дати більший імпульс моменту руху зерна, коли воно знаходиться в нижній частині сепаратора, де відцентрова сила і сила тяжіння підсумовуються, ми

пропонуємо використовувати не тільки силу тертя від нормального тиску на поверхню сепаратора, але й силу тертя від бічного тиску зерна на кільця, встановлені всередині сепаратора.

Як відомо, вплив бічного тиску на режим руху зерна в горизонтальному циліндрі, що обертається, досі не вивчався..

У лабораторній установці як кільце ми використовували бічні торцеві поверхні циліндричного сепаратора, які встановили на відстані 0,3 м – максимальне, коли ще є порційний режим руху зерна.

В експериментальній частині дослідження було поставлено такі завдання:

1. Визначити, у якому діапазоні кінематичних режимів та яких культурах стійко проявляється авторезонансний режим руху зерна.

2. Як впливає стійкість даного режиму руху навантаження чи ступінь заповнення циліндра (сепаратора) зерном.

3. Визначити експериментально закономірності переходу енергії від поверхні до зернового середовища на різних режимах руху.

4. Провести експериментальні дослідження процесу сепарації на авторезонансному порційному режимі руху зерна проти іншими режимами.

5. Провести польові випробування дослідної зерноочисної машини з авторезонансним порційним режимом роботи циліндричного сепаратора та дати економічну оцінку її роботи.

3.3.1 Аналіз режимів руху пшениці в горизонтальному циліндричному сепараторі

Діаметр сепаратора – 0,7 м, отвори у сепараторі пробивні, прямокутні.

Характеристика культури – пшениці:

- Об'ємна маса – 0,65-0,83 т/м³;
- Коефіцієнт внутрішнього тертя - 0,50-0,58;
- Коефіцієнт тертя по сталі - 0,3 - 0,4.

Результати випробувань наведено у таблицях 3.1-3.3.

Таблиця 3.1 - Зміна режимів руху пшениці в сепараторі під час навантаження $\varepsilon = 0,08$

Показники	Режим руху зерна							
	п	п	п	пв	ап	ап	т	т
Частота обертання сепаратора, хв^{-1}	10	20	30	40	50	60	70	80
Кінематичний режим, K	0,6	0,16	0,3	0,6	1,3	1,4	1,8	2,6
Затрати потужності на привід, Вт	190	270	376	505	590	650	620	560

Примітка. п - перекаатний; пв – перекаатно-водоспадний; ап - авторезонансний порційний; т-трубчастий.

Таблиця 3.2 - Зміна режимів руху пшениці в сепараторі під час навантаження $\varepsilon = 0,19$

Показники	Режим руху зерна							
	п	п	п	пв	в	ап	ап	т
Частота обертання сепаратора, хв^{-1}	10	20	30	40	50	60	70	80
Кінематичний режим, K	0,6	0,16	0,3	0,6	1,3	1,4	1,8	2,6
Затрати потужності на привід, Вт	275	420	490	560	600	630	600	550

Примітка. п - перекаатний; пв – перекаатно-водоспадний; в – водоспадний; ап - авторезонансний порційний; т – трубчастий.

Таблиця 3.3 - Зміна режимів руху пшениці у сепараторі при навантаженні $\varepsilon = 0,27$

Показники	Режим руху зерна							
	п	п	п	пв	в	ап	т	т
Частота обертання сепаратора, хв^{-1}	10	20	30	40	50	60	70	80
Кінематичний режим, K	0,6	0,16	0,3	0,6	1,3	1,4	1,8	2,6
Затрати потужності на привід, Вт	380	460	550	610	670	660	620	540

Примітка. п - перекаатний; пв – перекаатно-водоспадний; в – водоспадний; ап - авторезонансний порційний; т – трубчастий.

3.4 Закономірності процесу сепарації зерна у горизонтальному циліндричному сепараторі при авторезонансному порційному режимі його руху

Визначення закономірностей процесу сепарації проводилося відповідно до методики, представленої в розділі 3 цієї роботи, на лабораторних циліндричних решітках діаметром 0,7 м і довжиною 0,3 і 1 м.

Як відомо, кількісні та якісні параметри робочих органів зерноочисних машин оцінюються такими показниками:

Коефіцієнтом повноти виділення домішок:

$$E_{\pi} = B / \Pi_3,$$

де B – кількість виділених домішок,

Π_3 – вміст домішок в оброблюваному зерні.

- показником втрат зерна у відходах,
- коефіцієнтом інтенсивності процесу сепарації:

$$K = \ln(1 - E_{\pi})^{-1} / t,$$

де t – час сепарації.

У цьому розділі магістерської роботи ставилося завдання експериментального дослідження процесу очищення зерна в горизонтальному циліндричному решітці при авторезонансному порційному режимі його руху.

Необхідно було за допомогою експерименту перевірити теоретичні передумови та допущення про перевагу порційного режиму руху зерна в циліндричному сепараторі у процесі сепарації порівняно з іншими режимами, що застосовуються на практиці.

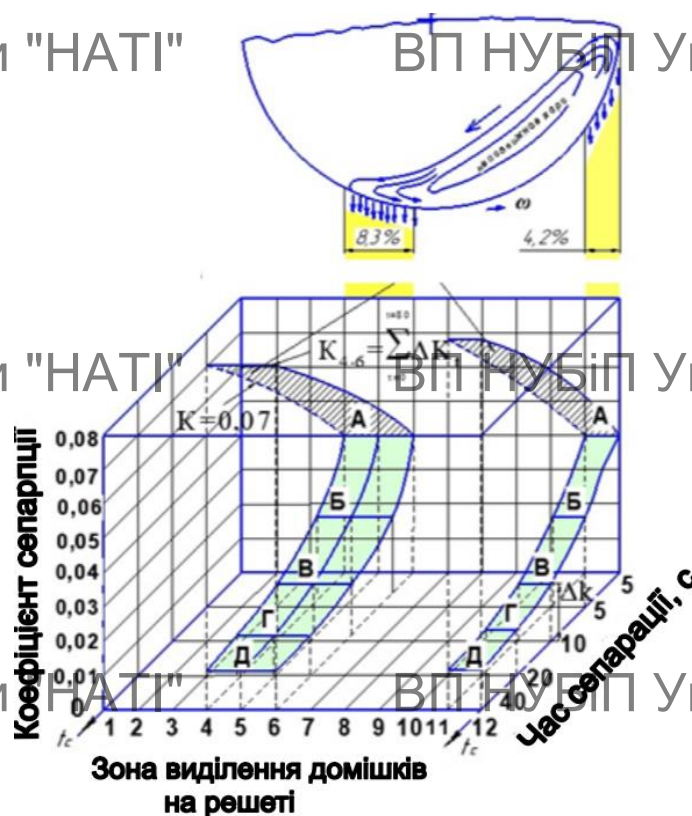
Передбачалося, що за допомогою порційного виду руху можна усунути головний недолік циліндричних решіт - їх малу продуктивність через низький коефіцієнт використання в сепарації поверхні сепаратора (20%) і збільшити частоту обертання сепаратора вище критичних, при яких маса зерна обертається разом з поверхнею сепаратора як одне ціле.

Відповідно до поставлених завдань досліди проводили на трьох режимах

руху оброблюваного зерна в циліндричному сепараторі: перекатно-новниковому, перекатному, і авторезонансному поріжньому.

Відмінність методики проведення дослідів від існуючих методик полягала у диференційованому відборі проб прохідної фракції у 12 частинах поверхні сепаратора у 5 тимчасових відрізках без порушення процесу сепарації.

Для цього в нижній частині півкола сепаратора були нерухомо встановлені 12 вертикальних пробовідбірників, в які з сепаратора висипалася прохідна фракція і далі надходила в комірки (знімні для зручності зважування). Приймальні осередки (60 шт.) були встановлені на рухомій платформі, яка переміщалася горизонтально через задані проміжки часу під сепаратором по напрямних.



А, Б, В, Г, Д - значення коефіцієнта сепарації на даному відрізку часу

Рис. 3.4. Залежність коефіцієнта сепарації від часу і місця виділення (області виділення) дрібної фракції в горизонтальному циліндричному сепараторі при перекатному режимі руху пшениці засміченістю $C=10\%$ при частоті обертання сепаратора 27 хв^{-1} ($K_d=0,3$), ступеня заповнення сепаратора зерном $\epsilon=0,29$, коефіцієнт використання поверхні сепаратора $K_p=0,125$

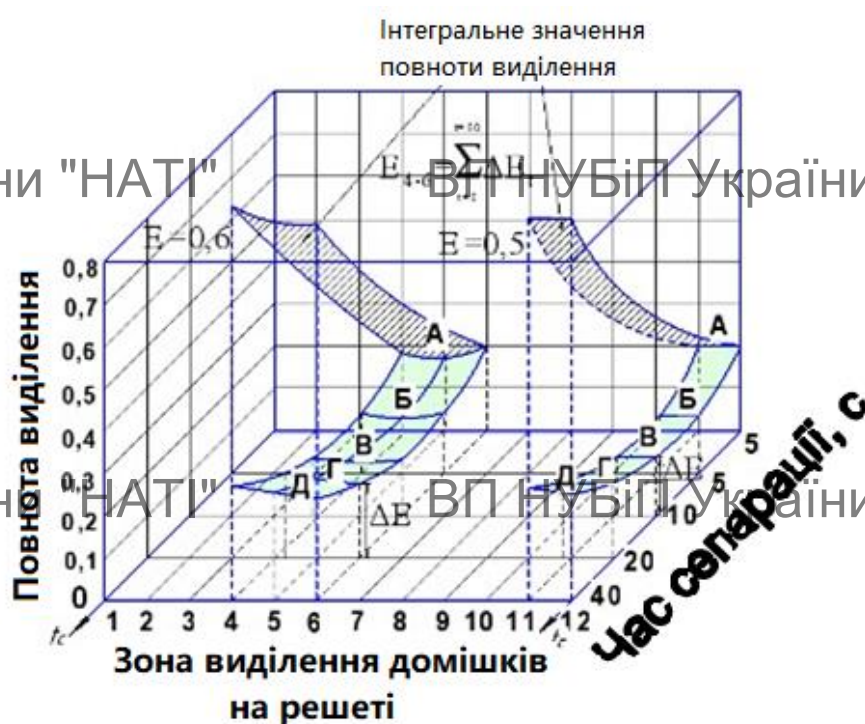
Відрізки часу відбору домішок, що пройшли через отвори сепаратора,

становили: $\Delta T_{1-5} = 5-5-10-20-40\text{с}$.

Повний час дослідів складав:

$$T_{\text{он}} = \sum \Delta t_{1-5} = 5 + 5 + 10 + 20 + 40 = 80\text{с} = 1\text{хв}20\text{с}$$

Результати дослідів щодо визначення коефіцієнтів сепарації та повноти виділення домішок при перекатному режимі руху пшениці в горизонтальному циліндричному сепараторі наведено на рис. 3.4, 3.5 при перекатно-човниковому режимі – на рис. 3.6, 3.7 та авторезонансному порційному – на рис. 3.8, 3.9.



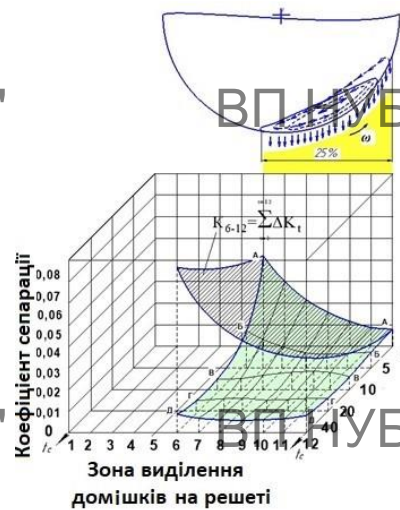
А, Б, В, Г, Д - значення коефіцієнта сепарації на даному відрізьку часу

Рис. 3.5. Залежність повноти виділення дрібних домішок E від часу та місця сепарації в горизонтальному циліндричному решітці при перекатному режимі руху пшениці засміченістю $C=10\%$ при частоті обертання сепаратора 27 хв-1, ступеня заповнення сепаратора зерном $\epsilon=0,29$, коефіцієнт використання поверхні сепаратора $K_p=0,125$

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"



ВП НУБіП України "НАТІ"

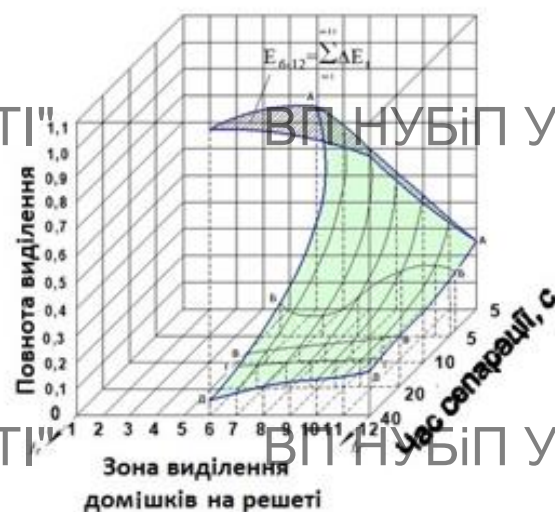
А, Б, В, Г, Д - значення коефіцієнта сепарації на даному відрізку часу

Рис.3.6. Залежність коефіцієнта K сепарації від часу і місця виділення (області виділення) дрібної фракції в горизонтальному циліндричному сепараторі при перекатному режимі руху пшениці засміченістю $C=10\%$ при частоті обертання сепаратора 27 хв^{-1} ($K_{ц}=0,3$), ступеня заповнення сепаратора зерном $\epsilon=0,1$, коефіцієнт використання поверхні сепаратора $K_p=0,25$,

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"



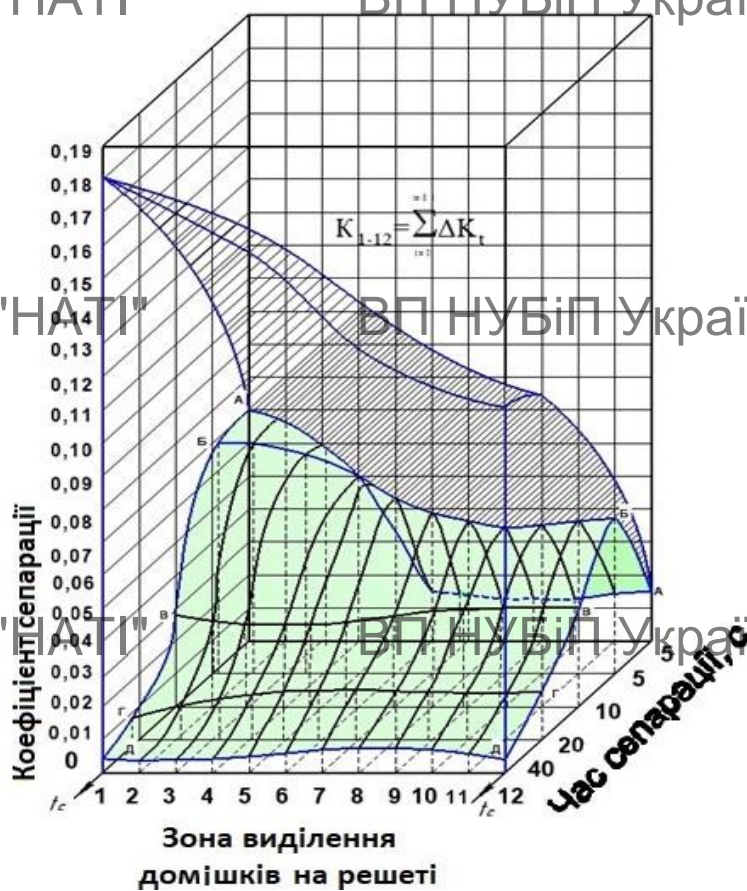
ВП НУБіП України "НАТІ"

А, Б, В, Г, Д - значення повноти виділення на даному відрізку часу

Рис. 3.7. Залежність повноти виділення дрібної фракції E від часу та місця сепарації в горизонтальному циліндричному сепараторі при перекатно-повниковому режимі руху вівса засміченістю $C=10\%$ при частоті обертання сепаратора 28 хв^{-1} ($K_{ц}=0,3$), ступеня заповнення сепаратора зерном $\epsilon=0,1$, коефіцієнт використання поверхні сепаратора $K_p=0,25$.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"



А, Б, В, Г, Д - значення коефіцієнта сепарації на даному відрізку часу

Рис. 3.8 Залежність коефіцієнта сепарації До часу і місця виділення дрібної фракції в горизонтально циліндричному сепараторі при авторезонансному порційному режимі руху вівса засміченістю $C=10\%$ при частоті обертання сепаратора 64 хв^{-1} ($K_{ц}=1,6$), ступеня заповнення сепаратора зерном $\epsilon=0,2$, коефіцієнт використання поверхні сепаратора $K_p=0,5$

ВП НУБіП України "НАТІ"

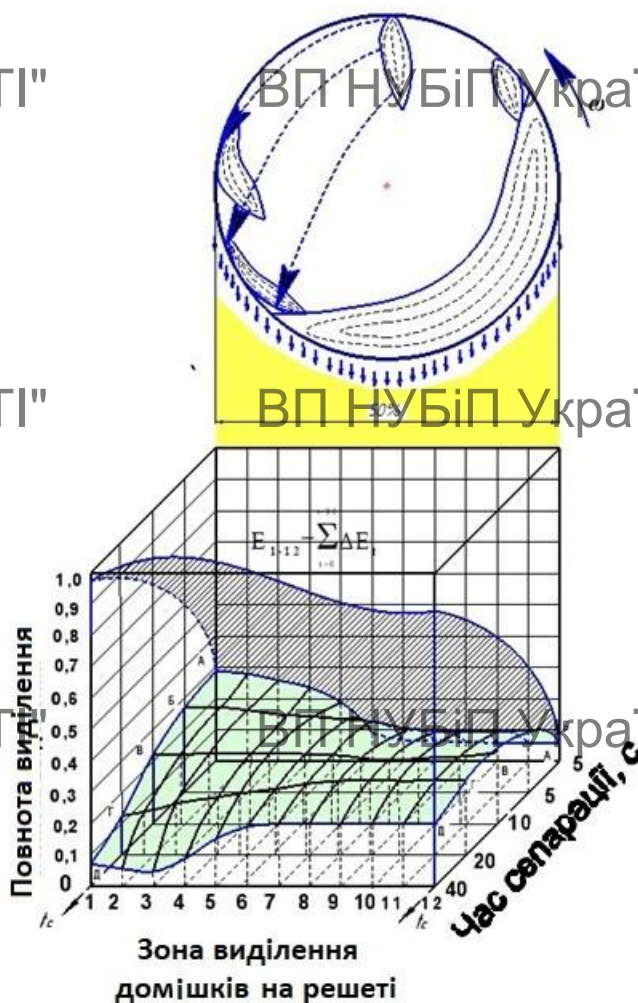
ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"



ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

А, Б, В, Г, Д, - значення повноти виділення на даному відрітку часу

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Рис. 3.9 Залежність повноти виділення дрібної фракції Е від часу та місця сепарації в горизонтальному циліндричному сепараторі при авторезонансному порційному режимі руху вівса засміченістю $C=10\%$ при частоті обертання сепаратора 64 хв^{-1} ($K_{\text{ц}}=1,6$), ступеня заповнення сепаратора зерном $\varepsilon=0,2$, коефіцієнт використання поверхні сепаратора $K_p=0,5$

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

4.1 Шкідливі і небезпечні фактори, які виникають в процесі експлуатації

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

Шкідливі та небезпечні фактори, які виникають при недотриманні техніки безпеки та експлуатації сепаратора в подальшому впливають на здоров'я працівників та їх працездатність. До таких факторів можна віднести:

- ураження працівника електричним струмом;
- вплив шуму та вібрації;
- травмування працівника у разі контакту з рухомими частинами

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

машини;

- надмірна кількість пилу до органів зору та дихання. Ураження електричним струмом можливе при наступних умовах:

- безпосередній дотик до струмопровідних частин електроустановок, які діють під напругою;

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

– дотик інструментом і предметами, що мають малий опір до ізоляції, до струмопровідних частин;

- дотик до металевих конструктивних частин електроустановок, в яких може з'явитися напруга в результаті електричного пробоя чи природного старіння ізоляції електроустановок, а також при замиканні оголених

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

проводів;

Ступінь небезпеки електричного струму залежить від:

- роду і частоти електричного струму;
- сили електричного струму, що протікає через людину;
- тривалості впливу струму на людину;

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

– індивідуальних особливостей людини.

Наслідки ураження електричним струмом можуть бути наступними: електричний опік, електричний удар, параліч серцевої діяльності, металізація шкіри, параліч дихання. У результаті тривалого впливу шуму порушується

нормальна діяльність серцево-судинної і нервової системи, травних і кровотворних органів, розвивається професійна глухуватість, прогресування якої може привести до повної втрати слуху.

Заходи боротьби із шумом та вібрацією:

- поліпшення якості виготовлення і монтажу обладнання;
- застосування індивідуальних захисних засобів;
- заміна гучних процесів безшумними або менш гучними;
- укриття джерел шуму.

На виробництві, як правило, найпоширеніша складна вібрація - поєднання загальної і локальної, яка характеризується сумою коливань різних частот, амплітуди і початкових фаз. Найбільш небезпечні для здоров'я людини вібрації з частотами 16...250 Гц [22].

Методи захисту від вібрацій:

- побудова від резонансних частот;
- віброізоляція;
- за можливості зниження віброактивності машин;
- підвищення жорсткості системи.

Нормативні показники деяких факторів не повинні перевищувати:

- вібрація до 92 дБ;
- запиленість;
- для кварцового пилу до 2 мг/м³ при вмісті кварцу більше 10%; до 6 мг/м³ при вмісті кварцу 10% і менше; – шум – 80 – 85 дБА (робоча зона).

4.2 Запобіжні заходи із забезпечення безпечної експлуатації вібраційного сепаратора

Доцільно забезпечити наступні запобіжні заходи:

- передбачити захисний кожух;
- наявність автоматичних вимикачів та заземлення;

– передбачити гумові підстилки, а також обов'язкове встановлення машини на пружини; повинні бути в наявності таблички: «Не вмикати працюють люди» та «Не вмикати»;

– пуск вібраційного сепаратора після аварійної зупинки проводити тільки з дозволу та в присутності майстра або механіка.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Так як підприємство знаходиться в зоні, в якій немає ні сейсмічної активності ні природних умов до виникнення таких явищ як урагани та буревії, єдиним наслідком природного походження може стати займання і пожежа від ураження блискавкою будівель підприємства, особливо, це стосується складських приміщень. Результатом пожежі на підприємстві може стати значна втрата складських приміщень, в яких зберігається пакувальні матеріали для продукції, а для горіння це найкращі матеріали так як більшість з них виготовлені із пластику поліетилену та паперу, тому при не своєчасному реагуванні на ситуацію втрати будуть значними.

При витіканні холодоагенту (сильнодіючої ядучої речовини) наслідки можуть бути значними, оскільки дані речовини впливають не тільки на навколишнє середовище, а і на людей. Так як підприємство розміщене у населеному пункті то в зону ураження сильнодіючими ядухими речовинами можуть потрапити не тільки працівники підприємства, а і мешканці навколишніх територій. В такому випадку така аварія може призвести до надзвичайно важких наслідків з масштабами катастрофи.

При витіканні СДЯР роботи спрямовані на припинення витікання небезпечної речовини та знижені впливу ядучої речовини на людей, тварин, рослин і лісові насадження. При розробці цих заходів слід враховувати: токсичність сильнодіючих ядухих речовин; що може проявлятися на великому віддаленні від місця аварії або витікання, напрямом вітру, за яким рухається газова хмара та його швидкість. Евакуація населення може бути

утруднена токсичністю газів, їх високою концентрацією, атмосферними та іншими умовами.

При потраплянні СДЯР в атмосферу або на місцевість негайно оповіщають про небезпеку робітників, службовців і населення, яке проживає у навколишній зоні. Для захисту працюючих на об'єкті і населення рекомендується використовувати загерметизовані приміщення і, насамперед, приміщення верхніх поверхів; де концентрація газів буде менша, ніж на нижніх поверхах будівлі. Робітники і службовці об'єкта, на якому виникла аварія, повинні негайно одягнути протигази. До підходу хмари сильнодіючих ядучих речовин потрібно евакуювати населення із небезпечної зони.

При ліквідації аварії з розливом СДЯР і при знезаражуванні отруйних і агресивних рідин до місця аварії необхідно підходити тільки з підвітряного боку в ізолюючих протигазах і захисному одязі.

Небезпечна зона має бути оточена спеціальними групами із робітників і службовців об'єкту, які закривають доступ у район аварії всім, хто не безпосередньої участі в ліквідації її наслідків. Обов'язково позначають місця і межі ділянок зараження.

Перед початком рятувальних і невідкладних робіт потрібно провести інструктаж за вимогами безпеки з урахуванням конкретної СДЯР і обстановки, яка склалася під час аварії.

Під час проведення робіт в осередку ураження всім учасникам слід суворо дотримуватися вимог безпеки, застосовувати індивідуальні засоби захисту, протихімічні пакети та індивідуальні аптечки. Щоб обмежити надходження ядучих речовин у атмосферу, розтікання по землі, потрапляння у воду і припинити їх викиди чи витікання, відключають пошкоджену ділянку, перекривають крани та інші запірні пристрої, на розриви у трубопроводах і місткостях накладають пластирі, муфти, забивають пробки, перекачують речовини з пошкоджених місткостей справні. У деяких випадках, щоб не допустити дальшого поширення СДЯР, викопують котлован або влаштовують земляний вал. Для прогнозування обстановки і

визначення напрямку поширення зараженого повітря і найбільш безпечних напрямків виходу із зони зараження потрібно організувати метеорологічне спостереження. Виходити із зони аварії потрібно найкоротшими маршрутами, перпендикулярно напрямку вітру, бажано на підвищене і добре провітрюване місце. Після локалізації осередку ураження потрібно провести дегазацію зараженої місцевості, споруд, обладнання, техніки. Після закінчення робіт у районі збору потрібно організувати спеціальну обробку людей і техніки.

4.4 Вимоги безпеки праці при сепаруванні сипких харчових продуктів

До роботи допускаються особи віком не молодше 18 років, які мають посвідчення на право виконання робіт, пройшли медичний огляд, вступний інструктаж з охорони праці, інструктаж на робочому місці та інструктаж з питань пожежної безпеки.

Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які діють на слюсаря:

- рухомі машини, механізми, незахищені рухомі частини виробничого устаткування;
- захащеність робочих місць інструментом, пристосуванням, матеріалами, деталями;
- відсутність спеціальних пристроїв, інструменту та обладнання для виконання робіт відповідно прийнятої технології;
- незахищені струмоведучі частини електрообладнання (електроустановок);
- недостатня освітленість робочої зони;
- шкідливі компоненти в складі застосовуваних матеріалів, які діють на працюючого через шкірний покрив, дихальні шляхи, шлункову систему та слизові оболонки органів зору та нюху;

- падіння вивішених частин обладнання;
- несправність інструмента, обладнання, пристосувань;
- падіння деталей, вузлів, агрегатів, інструменту;
- падіння з висоти;
- осколки металу, що відлітають при рубці металу;
- наявність у повітрі робочої зони шкідливих речовин;
- знижена температура повітря у холодний період року.

Вимоги безпеки перед початком роботи. Одягнути спецодяг, застібнути рукави, волосся прибрати під щільно облягаючий головний убір. Працювати в легкому взутті (тапочках, сандалях, босоніжках) забороняється.

Підготувати робоче місце для безпечної роботи. Прибрати сторонні предмети, звільнити проходи, інструмент, пристрої та деталі розмістити в зручному для користування порядку. Перевірити наявність та справність інструменту, пристроїв та засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Для роботи використовувати тільки справні інструменти та пристрої. Перевірити справність приставних і розсувних драбин. Для перенесення робочого інструменту до місця роботи підготувати спеціальну сумку або ящик з декількома відділеннями.

Переконавшись, що робоче місце добре освітлене. При необхідності використання переносної лампи перевірити наявність на лампі захисної сітки, справність шнура та ізоляційної трубки. Напруга місцевого освітлення має бути не більше 42 В, переносних електроламп – не більше 12 В.

При роботі з телями перевірити їх справність, справність стропів і гальм, піднявши вантаж на висоту 200 – 300 мм. Місце для підвішування талів має вказати керівник робіт. Закріплювати талі тільки після дозволу керівника робіт, особливу увагу звернути на міцність кріплення талів.

Якщо поруч виконуються електрозварювальні роботи, вимагати від адміністрації встановити щит (ширму) для захисту очей і обличчя від ультрафіолетових променів або одягнути спеціальні окуляри.

РОЗДІЛ 5 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

5.1 Вихідні дані для розрахунку

Метою перевірки є визначення показників продуктивності, якості, енергоємності та загальних витрат на переробку одиниці продукції та порівняння їх з показниками аналогічного серійного пристрою, а також облік та доробка тих характеристик, за якими дослідний зразок поступатиметься базовому. У результаті доцільність застосування експериментальної машини залежатиме від питомої економії, яку можна отримати, поставивши на озброєння цю машину.

Порівняння показників було проведено у господарстві. За базовий варіант було прийнято зерно-очисну машину УЗМ 30/15С.

Виробнича перевірка проводилася на обробці пшениці, що пройшла попереднє очищення - пшениці натурою 740 г/л, вологістю 14,7 % з вмістом бур'янів і зернових домішок 4,5%. Первинне очищення є основною операцією з доведення зерна до товарної кондиції та підробітку насіннєвого матеріалу, тому на ній і буде розрахунок економічного ефекту від впровадження винаходу.

Перед виробничими випробуваннями зерноочисної машини було здійснено всі необхідні підготовчі процедури та налаштування. Періодично знімалися показники споживаної електроенергії, якості очищеного зерна та його втрат, а також було визначено фактичну продуктивність машини на оптимальному режимі роботи з максимальною якістю виходу зерна.

В результаті виробничих випробувань було встановлено, що зразок зерноочисної машини з горизонтальним циліндричним решетом, оснащеним внутрішніми пристроями, що дозволяють працювати на авторезонансному порційному режимі, повністю виділяла із зернової маси бур'яни, пилові частинки, пошкоджене при обмолоті та некондиційне зерно. рівні 15 т/год. Акт виробничої перевірки подано у додатку Е.



Рис. 5.1. Експериментальний зразок сепаратора з горизонтальної циліндричної решітки та додатковими поверхнями тертя: а) загальний вигляд, б) додаткові поверхні тертя

За підсумками виробничих випробувань та технічними характеристиками порівнюваних зразків зерноочисних машин, наведеними в таблиці 5.1, можна попередньо укласти, що впроваджується зразок при рівній продуктивності суттєво виграє за такими параметрами, як споживання електроенергії, металомісткість, габаритні розміри та вартість.

Таблиця 5.1 - Основні технічні показники порівнюваних машин

№ п/п	Показники	Одини ця вимі ру	Базовий варіант (УЗМ 30/15С)	Новий варіант
1	Продуктивність (первинне очищення)	т/год	15	15
2	Конструкційна маса	кг	1680	1000
3	Сумарна встановлена потужність	кВт	13,1	4,47
4	Повна вартість машини	тис. грн.	350	204
5	Габаритні розміри	мм		
	довжина		5750	5600
	ширина		3600	1960
	висота		3420	2350
6	Обслуговуючий персонал	чол	1	1
7	Питома потужність	кВт.год/ т	1,1	0,5
8	Питома металомісткість	кг/т	140	100
9	Площа вирішує	м ²	5,95	2,16

5.2 Визначення сумарних питомих експлуатаційних витрати

Щоб визначити переваги дослідного зразка в грошах, здійснимо розрахунок економічної ефективності від впровадження. Техніка сільськогосподарська. Методи економічної оцінки.

Для розрахунку нам потрібні такі дані та формули розрахунків.

Прямі експлуатаційні витрати коштів на одиницю напруження обчислюють за формулою

$$И=З+Г+Р+А+Ф, \quad (5.1)$$

де $З$ – витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу, грн./т;

Γ – витрати на електроенергію, грн./т;

P – Витрати на ремонт і технічне обслуговування, грн. / Т;

A – витрати на амортизацію, грн./т;

Φ – інші прямі витрати на допоміжні матеріали, грн./т.

Витрати коштів на оплату праці обслуговуючого персоналу визначаються за формулою

$$З = \frac{Л \cdot t \cdot K_3}{W_{cm}}, \quad (5.2)$$

де $Л$ – чисельність обслуговуючого персоналу, чол.;

W_{cm} – продуктивність змінного часу, т/год;

t – оплата праці обслуговуючого персоналу (годинна ставка, районний коефіцієнт, натуроплата), руб./чол. -ч;

K_3 – коефіцієнт нарахувань на зарплатню (позабюджетні фонди).

Продуктивність змінного часу розраховують за формулою

$$W_{cm} = W_{эк} \cdot K_{cm}, \quad (5.3)$$

де $W_{эк}$ – продуктивність за 1 годину експлуатаційного часу, т/год;

K_{cm} – коефіцієнт використання змінного часу (у наших розрахунках $K_{cm} = 0,89$).

Витрати коштів на амортизацію техніки обчислюються за формулою

$$A = \frac{B \cdot a}{W_{ек} \cdot T_3}, \quad (5.4)$$

де a – коефіцієнт відрхувань на амортизацію техніки;

B – балансова вартість машини, грн;

T_z – річне зональне фактичне завантаження техніки, год (для зерноочисних машин в умовах Західного Сибіру $T_z = 400$ год).

Уточнене значення коефіцієнта відрахувань на амортизацію обчислюється за формулою

$$a = \frac{1}{T_{\text{фс}}}, \quad (5.5)$$

де $T_{\text{фс}}$ – фактичний термін служби техніки (згідно з класифікацією основних засобів, включених до амортизаційних груп, для зерноочисних машин він становить 7 років).

Витрати коштів на ремонт та технічне обслуговування нової техніки за нормами відрахувань від ціни машини визначають за формулою

$$P = \frac{B \cdot r}{W_{\text{ек}} T_z}, \quad (5.6)$$

де r – коефіцієнт відрахувань на ремонт та технічне обслуговування (0,06);

T_z – річне зональне завантаження техніки, год.

Таблиця 5.2 - Результати розрахунку економічної ефективності

№ п/п	Показники	Од. виміру	Базовий варіант (УЗМ 30/15С)	Новий варіант
1	Продуктивність за годину експлуатаційного часу, $W_{\text{ек}}$	т/год.	15	15
2	Зональне річне вироблення, B_z	т	4628	4628
2	Продуктивність змінного часу, $W_{\text{см}}$	т/год.	13,35	13,35
3	Витрати на оплату праці, $З$	грн./т.	11,9	11,9
4	Витрати на ремонт та технічне обслуговування, P	грн./т.	12,12	7,85
5	Витрати на амортизацію, A	грн./т.	53,57	34,69
6	Витрати на електроенергію, Γ	грн./т.	2,75	1,25
7	Прямі експлуатаційні витрати, I	грн./т.	80,34	55,69
8	Питома економія	грн./т.		24,65
9	Річний економічний ефект	Тис. грн.		114,1
10	Строк окупності капіталовкладень	років		6

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

1. Виявлено закономірності процесу роботи горизонтального циліндричного сепаратора, яке разом з оброблюваним зерном утворює складну нелінійну самоорганізовану систему з автоколиваннями силового поля за гармонійним законом і зміною режиму руху зерна в залежності від кількості енергії, отриманої від сепаратора та додаткових поверхонь тертя.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

2. Отримано модель переходу системи «Горизонтальний циліндричний сепаратор-зерно, що обробляється» у стійкий авторезонансний порційний режим руху зерна за умови передачі додаткової енергії силами тертя зерна до поверхні кілець, встановлених нерухомо всередині сепаратора. Отримано рівняння імпульсу моменту сили тертя між зерном і поверхнею сепаратора і кілець, що діє в I квадранті кола сепаратора і подає порцію зерна у вільний політ при кінематичних режимах сепаратора 1,3-1,8 та ступеню заповнення сепаратора зерном більше $0,1 > 0,0$.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

3. Доведено, що перехід енергії від поверхні сепаратора та кілець у зерно відповідає логістичному рівнянню (3). Кількість енергії визначає фазовий стан зерна, вид його руху та інтенсивність проходження дрібних частинок через отвори сепаратора. Коефіцієнт використання поверхні циліндричного сепаратора, що працює на авторезонансному порційному режимі руху в два рази вище в порівнянні з існуючими режимами і становить $K_p=0,5$, що пояснюється пульсуючим характером руху зерна та поверненням частини енергії від потоку зерна, що падає, по дотичній поверхні сепаратора.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

4. Визначено, що інтенсивність та якість процесу сепарації зерна при авторезонансному режимі вища, ніж при існуючих режимах і становлять: повноту виділення дрібних домішок $E=0,9$, коефіцієнт сепарації $K=1,4$, коефіцієнт використання поверхні сепаратора збільшується вчетверо, частота обертання сепаратора у 2 рази з 30 до 65 хв^{-1} . Питома продуктивність сепаратора підвищується вдвічі й становить $1,3 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

1. Прикладна механіка / [Булгаков В.М, Адамчук В.В., Черниш О.М., Березовий М.Г., Калетнік Г.М., Яременко В.В. – К.: Центр учбової літератури, 2020.– 906 с.

2. Сивак Р.І., Деревенько І.А. Короткий курс теоретичної механіки.

ВП НУБіП України "НАТІ"

Вінниця: ТОВ «Вінницька міська друкарня», 2016. – 200 с.

ВП НУБіП України "НАТІ"

3. Солон О. В. Керований вібраційний млин для помолу сипкого середовища. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №4 (99). С. 11–20.

4. Солон О. В., Купчук І.М. Теорія механізмів і машин. Курсове проектування. Навчальний посібник. 2-ге вид., допов. і перероб. Вінниця:

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВНАУ, 2019. 249 с.

ВП НУБіП України "НАТІ"

5. Солон О.В. Статика взаємодії абсолютно твердих тіл із сипучим середовищем. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2018. №3 (90). С. 105-116.

6. Солон О.В., Ковбаса В.П. Статика та динаміка взаємодії абсолютно твердих конкrecцій із сипучим середовищем. *Вібрації в техніці та технологіях*.

ВП НУБіП України "НАТІ"

2019. №1 (92). С. 12+22.

ВП НУБіП України "НАТІ"

7. Солон О.В., Ковбаса В.П.. Обґрунтування параметрів робочих органів для укладання внутрішньогрунтових зрошувачів: Монографія. Вінниця, 2020 – 155 с.

8. Солон О.В., Купчук І.М. Практикум з теорії механізмів і машин: навч. посіб. Вінниця: ВНАУ, ТОВ «Друк», 2020. 252 с.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

9. Спірін А.В., Твердохліб І.В., Замрій М.А. Визначення режиму функціонування відцентрово-гравітаційного сепаратора теркового пристрою. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 3(102). С.55-62.

10. Цуркан О. В., Павленко В. С., Полевода Ю. А. Розрахунки передач привода. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з навчальної дисципліни «Деталі машин». Вінниця: РВВ ВНАУ, 2011. 87 с.

ВП НУБіП України "НАТІ"

ВП НУБіП України "НАТІ"

11. Ярошенко Л.В., Замрій М.А., Купчук І.М. Розробка конструкції та дослідження технологічних параметрів машин для вібраційної

відцентровопланетарної обробки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №2 (97). С. 41- 50.

12. Твердохліб І.В. Дослідження процесу витирання насіннєвого вороху люцерни. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. №4. С. 77-83.

13. Спірін А.В., Твердохліб І.В., Купчук І.М., Побережець Ю.М. Обґрунтування енергоефективних режимів процесу досушування продуктів фракційної переробки люцерни. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. №2 (113). С. 142-151.

14. Котов Б.І., Спірін А.В., Зозуляк О.В. Моделювання та ідентифікація процесу сепарації дрібного вороху вібраційно-повітряними очистками зернозбирального комбайну. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. №1. С.

26-29.

15. Патрин В.А. Разработка теории взаимодействия обрабатываемого зерна с рабочими органами зерноочистительных машин с позиции синергетики: дис. д-ра. техн. наук. [Текст] / В.А. Патрин. – Новосибирск, 2015.

16. ДСТУ 46.012-2000. Техніка сільськогосподарська. Методи економічної оцінки техніки. [Чинний від 2001.02.01]. К.: Мінагрополітики України, 2000. – III, 18 с. – (Галузевий стандарт України).

17. Гунько І.В., Браніцький Ю.Ю., Токарчук О.А. Засоби механізації процесу збирання та подрібнення біоенергетичних культур. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. №2. С. 129-134.

18. Горячкин В. П. Собрание сочинений в 3 т. Москва: Колос, 1965. 1 т. 720 с.

19. Омелянов О.М., Замрій М.А. Напрямки підвищення роботи вібраційних машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 4(99). С. 49-58.

20. Паламарчук В. Д., Поліщук І. С., Венедіктов О. М. Системи сучасних інтенсивних технологій у рослинництві: Навч. посібник. Вінниця: ФОП Данилюк, 2011. 432 с.

21. Каленська С.М., Єрмакова Л.М., Паламарчук В.Д., Поліщук І.С., Поліщук М.П. Системи сучасних інтенсивних технологій у рослинництві:

Підручник. Вінниця: ФОП Рогальська І.О. 2015. 448 с.

22. Калетнік Г.М., Кулик М.Ф., Глушко Я.Т. Енергоощадні технології кормів – основа конкурентоздатності тваринництва: монографія. Вінниця : Теза, 2006. 340 с.

23. Калетнік Г.М., Цуркан О.В. Статичні умови сипкого середовища. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2019. № 4(95). С. 5-15.

24. Калетнік Г.М., Чаусов М.Г., Швайко В.М., Прищяк В.М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Підручник. Київ: «Хай-Тек-Прес», 2013. 528 с.

25. Калетнік Г.М., Черниш О.М., Березовий М.Г. Використання сучасних методів механіки для сільського господарства. *Збірник наукових праць ВНАУ*: Вінниця, 2011. Т1 (65). С.8-18.

26. Калетнік Г. М., Янович В. П. Обґрунтування режимних та конструктивних параметрів гіраційного млина для виробництва високоактивних преміксів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. №1 (84). С.15–21.

27. Ковбаса В.П., Солоня О.В., Спірін А.В., Цуркан О.В. Про спрощення критерію вигляду напружено-деформованого стану суцільного середовища. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. №1(100) Том 1, С. 44-49.

28. Котов Б. І., Спірін А. В., Солоня О. В., Калініченко Р. А. Стан і перспективи теплової і механічної переробки зернової сировини на корм. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. №3 (95), С. 139–142.

29. Кунчук І.М. Експериментальні дослідження процесу подрібнення фуражного зерна вібраційною дисковою дробаркою. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2019. №3 (94). С. 68–75.

30. Твердохліб І.В. Обґрунтування технології та конструктивно – режимних параметрів терково-сепаруючого блоку для обробки вороху трав: дис.

кандидата техн. наук 05.05.11 / Твердохліб Ігор Вікторович. Вінниця: ВНАУ, 2016. – 170 с.