

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра технічного сервісу та інженерного менеджменту  
імені М.П. Момотенка**

**УДК 629.017:631.362.3**

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри технічного сервісу  
та інженерного менеджменту  
імені М.П.Момотенка

\_\_\_\_\_ **Роговський І.Л.**

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

## **МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ  
ПОВІТРЯНО-РЕШІТНИХ СИСТЕМ ЗЕРНООЧИСНИХ  
МАШИН»**

Спеціальність – 208 «Агроінженерія»  
Освітня програма – «Агроінженерія»  
Орієнтація освітньої програми – освітньо-наукова

**Гарант освітньої програми:**

Доктор технічних наук, проф. \_\_\_\_\_  
«підпис»

**Голуб Г.А.**

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

к.т.н., професор \_\_\_\_\_  
«підпис»

**Михайлович Я.М.**

**Виконав**

\_\_\_\_\_

«підпис»

**Плахотник М.О.**

**Київ – 2025**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
Кафедра технічного сервісу та інженерного менеджменту  
імені М.П.Момотенка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри технічного сервісу та  
інженерного менеджменту  
імені М. П. Момотенка,

\_\_\_\_\_ **І. Л. Роговський**  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Плахотнику Миколі Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність – 208 «Агроінженерія»  
Освітня програма – «Агроінженерія»  
Орієнтація освітньої програми – освітньо-наукова

**Тема магістерської кваліфікаційної роботи:** «Дослідження експлуатаційних показників повітряно-решітних систем зерноочисних машин».

затвержені наказом ректора НУБіП України від «07» грудня 2023 року №2223 «С»

**Термін подання завершеної роботи на кафедру:** 25.05.2025 р.

**Вихідні дані до роботи:**

1. Завдання та проблеми АПК по забезпеченню України технікою та удосконалення виробничих процесів вирощування і збирання зернових культур
2. Прогресивні технологічні процеси та технічні засоби для виконання очищення зерна та розподілу зернового вороху

**Перелік питань, що підлягають дослідженню:**

1. Стан та рівень досліджень і перспективи удосконалення післязбиральної обробки зерна зернових культур
2. Теоретичні дослідження процесу очищення зерна та розподілу зернового вороху
3. Методика і програма експериментальних досліджень очистки зернового вороху в лабораторних умовах
4. Результати експериментальних досліджень очистки зернового вороху та показників роботи машини для очистки
5. Економічна ефективність запропонованих рішень по розподілу зернового вороху

Дата видачі завдання 18.09.2023 р.

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи** \_\_\_\_\_ **Я. М. Михайлович**  
(підпис) (прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання** \_\_\_\_\_ **М. О. Плахотник**  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
1. СТАН ПРОБЛЕМ ВИРОБНИЦТВА ЗЕРНОВИХ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	7
1.1. Аналіз систем очищення зернозбиральних комбайнів .....	7
1.2. Аналіз конструктивних рішень системи очистки вороху .....	9
2. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ НА РЕШЕТІ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ .....	24
2.1. Основні припущення та обмеження.....	24
2.2. Рух зернового вороху по жалюзійному решітці .....	27
3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ. СЕПАРАЦІЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ В СИСТЕМІ ОЧИЩЕННЯ .....	31
3.1. Розподіл зернового вороху на системі очищення.....	31
3.2. Методика визначення коефіцієнта варіації товщини шару зернового вороху .....	35
3.3. Реалізація математичної моделі сепарації зернового вороху на ПК .....	39
3.4. Аналіз роботи системи очищення з використанням моделі сепарації зернового вороху .....	41
4. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ І ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ КОМБАЙНУ .....	46
4.1. Основні вимоги до системи очищення зернозбирального комбайна .....	46
4.2. Попередня сепарація зернового вороха у решітно-гвинтовому сепараторі.....	48
4.3. Стабілізація розподілу зернового вороху на верхньому решеті .....	55
4.4. Вирівнювання товщини шару зернового вороху додатковими коливаннями решета в поперечному напрямку .....	59
4.5. Вирівнювання товщини шару зернового вороху шляхом зміни напрямку коливань решета в горизонтальній площині .....	62
4.6. Автоматичне регулювання напрямку та амплітуди коливань решета в поперечному напрямку .....	65
5 . ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ РЕЗУЛЬТАТИ.....	67
5.1. Програма експериментальних досліджень .....	67

5.2. Опис лабораторних установок, методики проведення експериментів та обробки отриманих результатів.....	67
5.3. Конкурентоспроможність пропонованих систем очищення .....	76
5.4. Порівняльні лабораторно-польові випробування системи очищення з решітно-гвинтовим сепаратором.....	80
5.5. Порівняльні лабораторно-польові випробування системи очищення.....	82
6. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА .....	84
ВИСНОВОК .....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	86

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Україна є одним з найбільших виробником зерна. Відповідно до Державної програми розвитку сільського господарства та регулювання ринків сільськогосподарської продукції, сировини та продовольства, валовий збір зернових та зернобобових у господарствах усіх категорій у 2024 році склав 49,938 мільйонів тон, з середньою врожайністю 4,8 тони з гектара. Загалом було зібрано зернові та зернобобові з 10,643 мільйонів гектарів, що становить 96% від запланованої площі. Виробництво сільськогосподарських культур, у тому числі озимої пшениці базується на таких технологічних лініях: приготування і внесення добрив; основного обробітку ґрунту; передпосівного обробітку ґрунту і сівби; догляду за посівами; збирання і післязбиральної обробки врожаю.

Вирощування озимої пшениці за інтенсивною технологією вимагає внесення підвищених норм органічних і мінеральних добрив. Органічні добрива в Степу (20-25 т/га), Лісостепу (25-30 т/га) і на Поліссі (30-35 т/га) вносять потоковим чи потоково-перевалочним способом під основний обробіток ґрунту або під попередню культуру. Перспектива за органічним землеробством.

В останні роки при переході на ринкові відносини в агропромисловому комплексі спостерігається тенденція значного падіння випуску вітчизняної техніки, купівельної спроможності товаровиробників і матеріально-технічного забезпечення механізованих технологій у рослинництві. Темпи оновлення машинно-тракторного парку скоротились у 10-30 разів. Він морально і фізично застарів. Більше половини сільськогосподарської техніки вичерпали амортизаційний ресурс. Як результат, за роки незалежності України затрати праці на центнер зерна озимих культур зросли у 1,7 рази, кукурудзи – 1,1, цукрових буряків - 1,5, картоплі – 1,2 рази.

Основним способом збирання зернових культур є комбайновий, у якому головна роль належить зернозбиральному комбайну. При збиранні зернових культур на полях з ухилом більше 5° продуктивність зернозбирального комбайна знижується, причому лімітуючим робочим органом, що обмежує продуктивність комбайна, є система очищення, на яку припадає понад 60% від усіх втрат зерна.

Не беручи до уваги закордонну збиральну техніку, збирання зернових культур на схилах виконують комбайнами, призначеними для роботи на полях.

Вітчизняні та закордонні вчені зробили великий внесок у теорію та практику створення зернозбирального комбайна. Однак питання функціонування системи очищення під час збирання зернових культур вивчені недостатньо повно. Зокрема, вимагає подальшого вивчення поведінка зернового вороху на верхньому решеті системи очищення, сепарація зернового вороху за умов роботи комбайна.

**Метою роботи** є підвищення ефективності роботи зернозбиральних комбайнів шляхом обґрунтування технологічних та конструктивних рішень системи очищення, спрямованих на зниження втрат зерна.

**Об'єкт дослідження** – сепарація зернового вороху у системі очищення зернозбирального комбайна.

**Предмет дослідження** – закономірності технологічних процесів, технологічні схеми, конструктивні рішення, параметри системи очищення зернозбирального комбайна.

Для досягнення мети роботи визначено **такі завдання**:

1. Виявити та дослідити закономірності поведінки зернового вороху на верхньому решеті системи очищення в умовах роботи комбайна.
2. Розробити математичну модель сепарації зернового вороху та методику оцінки нерівномірності його розподілу на верхньому решеті при роботі комбайна.
3. Обґрунтувати технологічні та конструктивні рішення та параметри системи очищення зернозбирального комбайна.
4. Експериментально визначити якісні показники функціонування розроблених систем очищення зернозбирального комбайна, підтвердити одержані теоретичні залежності.
5. Визначити техніко-економічну ефективність розроблених конструктивно-технологічних рішень системи очищення.

# 1. СТАН ПРОБЛЕМ ВИРОБНИЦТВА ЗЕРНОВИХ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1. Аналіз систем очищення зернозбиральних комбайнів

Система очищення – робочий орган зернозбирального комбайна, призначений для виділення зерна із зернового вороху, очищення від домішок та подачі очищеного зерна до бункеру, а недомолочених колосків – на домолочуючий пристрій.

Ознаки, які можуть бути покладені в основу класифікації систем очищення зернозбиральних комбайнів:

- способи поділу зернового вороху;
- способи підготовки зернового вороху до поділу;
- сфера застосування зернозбирального комбайна.

За способами поділу зернового вороху можна виділити такі групи:

- повітряно-решітні очищення (ПРО), в яких поділ зернового вороху відбувається за рахунок одночасного впливу транспортуючого робочого органу, що коливається, і повітряного потоку;

- відцентрові системи очищення, в яких розподіл зернового вороху відбувається в основному за рахунок дії відцентрових сил;

- пневмоінерційні системи очищення, в яких розподіл зернового вороху відбувається за рахунок відмінності в аеродинамічних властивостях його компонентів;

- Комбіновані, що поєднують різні способи поділу.

За способами підготовки зернового вороху до поділу:

- Повітряно-решітні очищення, в яких як транспортуючий робочий орган виступає струшувальна дошка, що робить коливання, за рахунок яких відбувається сегрегація зернового вороху;

- системи очищення з попереднім поділом зернового вороху, у яких із зернового вороху виділяється частина зерна до його надходження на основне очищення;

- шнекові системи очищення, в яких як транспортуючий робочий орган застосовуються гвинтові транспортери;
  - комбіновані очищення, що поєднують різні способи підготовки.
- Розглянемо тенденції вдосконалення систем очищення зернозбиральних комбайнів по галузі застосування.

## 1.2. Аналіз конструктивних рішень системи очистки вороху

У сучасних зернозбиральних комбайнах домінує повітряно-решітне очищення (ПРО), наведено рис. 1.1. Очищення застосовано в зернозбиральних комбайнах, що випускаються Херсонський машинобудівний завод - «СКІФ-230» «СКІФ-250».

Система очищення містить струшувальну дошку 1, верхній решітний стан 5, подовжувач верхнього решета 6 і нижній решітний стан 7, які з'єднані шатунами 12 з приводом ексцентриковим механізмом 11 і встановлені за допомогою підвісок 14, 15, 16 в корпусі молотарки.

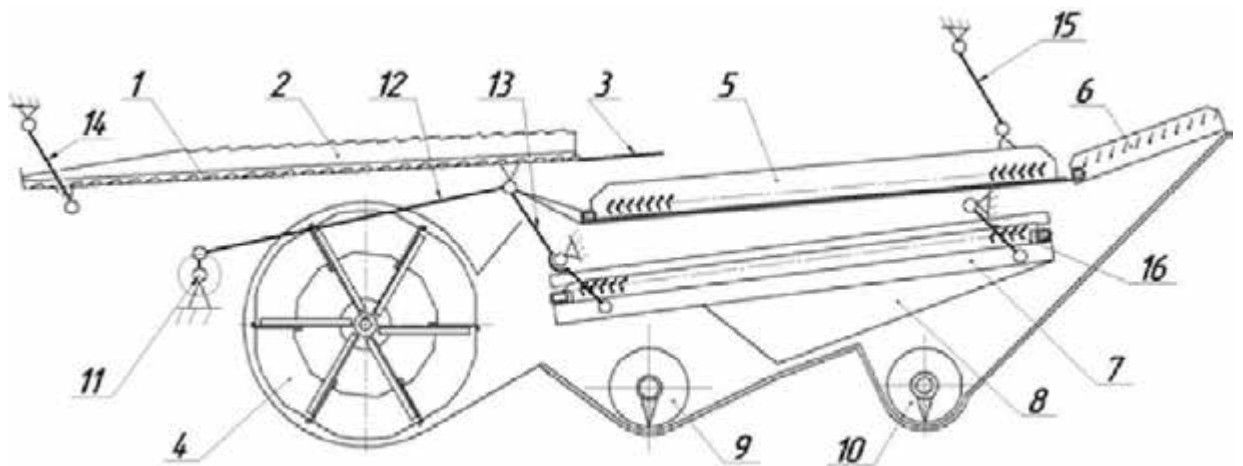


Рис. 1.1 - Схема повітряно-решітного очищення: 1 - струшувальна дошка; 2 - подовжня гребінка; 3 - пальцеві ґрати; 4 – вентилятор; 5 - верхній решітний стан; 6 - подовжувач верхнього ґрату; 7 - нижній решітний стан; 8 - скатна дошка; 9 – зерновий шнек; 10 - колосовий шнек; 11 - приводний механізм; 12 – шатун; 13 - двоплечий важіль; 14, 15, 16 - підвіски

На струшувальній дошці встановлені подовжні гребінки (подовжні

перегородки) 2, а в задній частині - пальцеві грати 3. Верхній 5 і нижній 7 решітні стани, а також подовжувач 6 забезпечені жалюзійними решітками та пристроями для регулювання положення жалюзі. Струшувальна дошка 1, верхній решітний стан 5 і подовжувач верхнього решета 6 утворюють гуркіт. Система очищення також містить вентилятор 4, зерновий 9 і 10 колосової шнеки.

Технологічний процес протікає в такий спосіб. Зерновий ворох надходить в систему очищення двома потоками: перший потік, що складається в здебільшого з зерновий фракції  $q'_{zo}$ , а невеликої кількості соломистих домішок  $q'_{co}$ , надходить з молотильно-сепаруючого пристрої (МСП) на початок струшувальної дошки; а другий потік, містить зернову фракцію  $q''_{zo}$  і соломисті домішки  $q''_{co}$  приблизно в рівному співвідношенні, надходить з сепаратора грубого вороха (СГВ) на кінець струшувальної дошки. Зерновий ворох при переміщенні по струшувальній дошці 1, що здійснює коливальний рух, частково розділяється - зернова фракція (більш щільна) опускається до поверхні струшувальної дошки, а соломиста фракція - піднімається у верхню частину шару. Попереднє розшарування зернового вороху підвищує ефективність очищення. Так, у науковій роботі зазначено, що зменшення струшувальної дошки на 960 мм призводить до різкого зростання втрат зерна за системою очищення. На пальцевій решітці 3 відбувається виділення зернової фракції, що надходить початку верхнього жалюзійного грати, а решта зернового вороху йде сходом з пальцевої решітки. Верхнє жалюзійне решето також здійснює коливальний рух, за рахунок якого, а також за рахунок повітряного потоку, що подається відцентровим вентилятором 4, соломиста фракція йде сходом з подовжувача верхнього решета і виводиться з молотарки, а зерно з колосками, в яких має відбуватися остаточна сепарація зерна. Зерно надходить у зерновий шнек 9, а колоски, що надходять з нижнього решета і подовжувача верхнього решета (прохід), надходять у колосовий шнек і далі в домолочуючий пристрій (автономного типу або поєднаного з молотильно-сепаруючим пристроєм). Втрати зерна за очищенням складає вільне зерно, що зійшло з подовжувача верхнього решета.

Зазначимо основні причини підвищеного рівня втрат зерна за системою очищення під час роботи на схилах комбайна рівнинної (базової) конструкції:

1) при русі комбайна з поперечним нахилом відбувається зміщення зернового вороху в бік ухилу (поперечне зміщення), погіршується розподіл зернового вороху на решітці - в однієї бічної сторони решета товщина вороху збільшується і, як наслідок, опір проходження повітряного потоку збільшується; з іншого боку решета товщина вороха зменшується, що призводить до непродуктивної витрати повітряного потоку;

2) при русі комбайна вгору по схилу швидкість зернового вороху по решітці збільшується, а час перебування вороху на решітці зменшується, зерно не встигає пройти крізь усю товщину вороху;

3) при русі комбайна вниз по схилу швидкість зернового вороху зменшується, товщина шару вороху збільшується, ступінь розпушення вороху зменшується, що призводить до зниження інтенсивності сепарації зерна;

4) при русі комбайна вгору схилом з одночасним нахилом в поперечному напрямку - одночасна дія факторів;

5) при русі комбайна вниз схилом з одночасним нахилом у поперечному напрямку - одночасна дія факторів.

Безсумнівно, найбільші втрати зерна відбуваються під час руху комбайна вгору чи вниз схилом з одночасним креном у поперечному напрямі.

Погіршення якості роботи системи очищення при роботі зернозбирального комбайна з поперечним або поздовжнім нахилом молотарки, збільшення нерівномірності зернового вороху на решітках, погіршення сепарації зернового вороху при нерівномірній подачі хлібної маси відзначається багатьма дослідниками.

Внаслідок проведених досліджень виявлено, що за комбайном «Скіф-230» при зміні кута поперечного нахилу від 0 до 8° втрати зерна збільшилися з 0,15 до 1,90 %. При цьому помітних змін у втратах зерна за соломотрясом та молотильним барабаном не спостерігалося, а дроблення зерна підвищується в 1,8 рази. При зміні кута поздовжнього нахилу комбайна (рух вгору схилом) в межах

від 0 до 8°, спостерігалось наростання втрат зерна за очищенням і соломотрясом в 2,4 і 1,5 рази, а величини дроблення зерна - до 4,9% (проти 2,5% при горизонтальному положенні).

Дослідженнями встановлено збільшення втрат зерна з 0,7 до 12,7% (у 18 разів) зі збільшенням бічного нахилу очищення від 0 до 10°.

Також дослідженнями, встановлено, що при збільшенні кута поперечного нахилу молотарки зерновий ворох зміщується у бік ухилу, зростає нерівномірність зернового вороху на решітці. Це призводить до погіршення якісних показників роботи системи очищення. При поперечному нахилі молотарки зернозбирального комбайна в найбільш несприятливих умовах виявляються крайні ділянки решета (рис. 1.2).

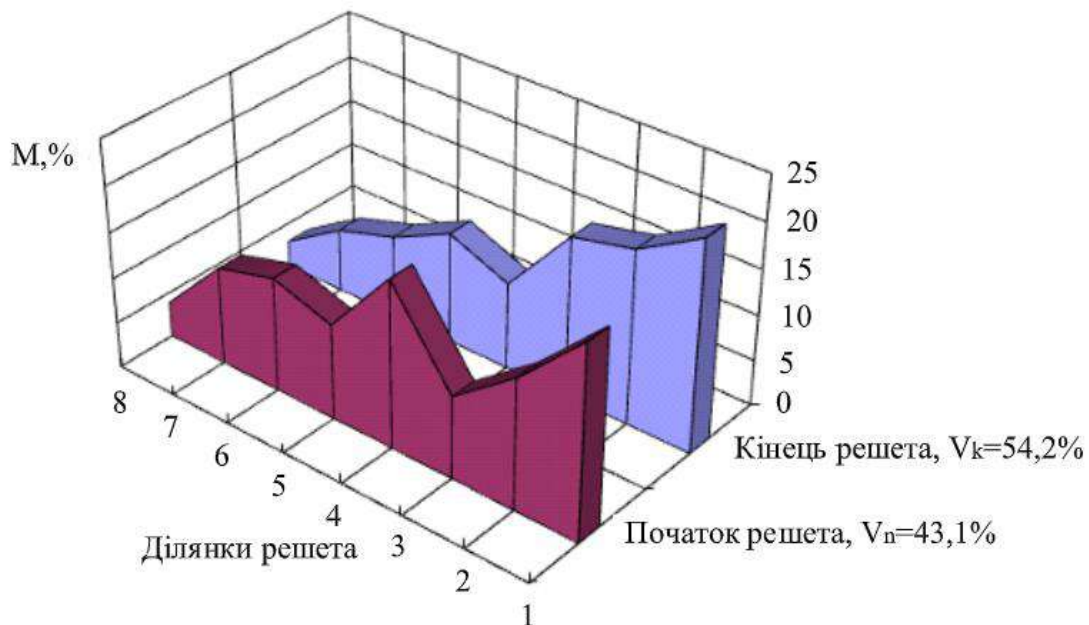


Рис. 1.2 - Розподіл зернового вороху на верхньому решеті при поперечному нахилі комбайна на кут 8° та подачі вороху 2,9 кг/с

При поперечному нахилі молотарки 8° на першу ділянку решета надходить 21,0 % вороха, а кінцю решета збільшується до 23,0 %, на восьмому ділянці - від 3,9 до 2,9 % відповідно. Збільшення нерівномірності вороху на решеті негативно позначається на якісних показниках роботи системи очищення комбайна - втрати зерна, сходження зерна в колосовий шнек і засміченість бункерного зерна збільшуються.

Удосконаленням класичної системи очищення, збільшенням пропускної спроможності та поліпшенням якісних показників її роботи займалися багато вчених.

Попереднє розподіл зернового вороху також реалізовано в системі очищення з решітно-гвинтовим сепаратором (РГС). Застосування РГС дозволило забезпечити підвищення пропускної спроможності системи очищення як у рівнині, і при поперечному нахилі молотарки.

Для інтенсифікації роботи системи очищення вчені пропонують секційне верхнє решето, в якому передня частина має оригінальні жалюзі та механізм індивідуального відкриття, що дозволило збагатити зернову купу, що надходить на початок верхнього решета і знизити втрати зерна з 0,49 до 0,37 %.

Однією із тенденцій удосконалення системи очищення є підвищення рівномірності подачі зернового вороху на верхнє решето. Це може бути досягнуто рахунок заміни стрясної дошки гвинтовими транспортерами, проте, як показали дослідження, відсутність збагачення нижніх шарів зернового вороху знижує ефективність роботи очищення. Дослідження, також показали погіршення роботи системи очищення при встановленні замість струшувальної дошки шнекових транспортерів. Збільшення кількості шнеків з 5 до 6 у молотарці шириною 1500 мм, призвело до збільшення нерівномірності розподілу зернового вороху по ширині очищення та збільшення втрат зерна. Збільшення нерівномірності завантаження вирішує вчені пояснюють погіршенням розподілу зернового вороху між шнеками, більшою завантаженістю двох крайніх шнеків.

Зауважимо, що застосування в системі очищення решітно-гвинтового сепаратора, в якому поєднані функції транспортування зернового вороху з функцією сепарації зерна, дозволило підвищити ефективність роботи системи очищення. Також є позитивний іноземний досвід застосування РГС у системі очищення зернозбирального комбайна, причому авторами відзначено низьку ушкоджувальність зерна.

Поєднання функції транспортування з сепарацією зерна також застосовано в конвеєрному очищенні.

Також у наукових роботах зазначено, що крутосхильні комбайни, що випускаються фірмою New Holland (США), мають недоліки, а саме - при русі комбайна з поперечним нахилом клавішній соломотряс не займає горизонтального положення, а при поздовжньому нахилі комбайна положення молотарки взагалі не коригується. Це знижує продуктивність комбайна. У крутосхильному комбайні моделі TL 58 і встановлена гідравлічна система автоматичного вирівнювання. Гідроциліндри вирівнювання з'єднують ходову частину комбайна з корпусом. У роботі зазначено, що застосована система вирівнювання корпусу збиральної машини забезпечує задовільну роботу комбайнів при русі вздовж схилу крутістю до 20%, а при русі вгору або вниз по схилу крутістю до 8%, що дозволяє зменшити втрати зерна в 6 разів, а робочу швидкість збільшити

У крутосхильних комбайнах MF38 і MF40RS встановлена система самовирівнювання, що включає маятникові датчики нахилу, сигнал від яких управляє двома гідроциліндрами, що обертають ексцентрикову кінцеву передачу, що вирівнює кістяк комбайна.

Крутосхильні комбайни Fiatagri AL 519 Collina та NewHolland AL 59 Hillside оснащені системою Laverda, зчленованою з електронним керуванням. Дана система забезпечує вирівнювання молотильно-сепаруючої системи комбайна, що дозволяє йому працювати на поперечних схилах до 38% і поздовжніх схилах до 30 і 10%.

Відомий виробник зернозбиральної техніки фірма NewHolland у зернозбиральному комбайні серії CSX для пологих і похилих схилів застосовує систему Smart-Sieve, яка надає верхньому решіту коливання в поперечному напрямках, а для збирання зернових на сильно пересіченій місцевості - систему з бічним вирівнюванням 9 молотарки.

Таким чином, крутосхильні модифікації комбайнів мають складнішу конструкцію, що забезпечує можливість їх роботи на схилах до 25° (42%).

Грунтуючись на відомих технічних даних зернозбиральному комбайну, виконаємо аналіз рентабельності крутосхильної модифікації зернозбирального

комбайна. Відповідно до ДСТУ 4748:2007 «Машини сільськогосподарські. Методи оцінювання пристосованості до технічного обслуговування», визначимо інтегральний показник конкурентоспроможності машини

$$k_M = k_1\gamma_1 + k_2\gamma_2 + k_3\gamma_3 + k_4\gamma_4 + k_5\gamma_5, \quad (1.1)$$

де  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  - факторні коефіцієнти відповідно ціни, прямих витрат коштів, продуктивності праці, безпеки праці, величини збитку від зниження продуктивності та пошкодження сільськогосподарського продукту конкуруючої машини;  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$  - значення частки факторних коефіцієнтів.

Факторний коефіцієнт  $k_1$  залежить від ціни базової  $B_б$  і ціни  $B_оо$  конкуруючої машини. Прийнемо ціну машин прямо пропорційно їх масі

$$k_1 = \frac{B_б}{B_к} = \frac{M_б}{M_к} = \frac{7320}{8860}, \quad (1.2)$$

де  $M_б$  - маса базової машини (зернозбирального комбайна «СКІФ-230»);

$M_к$  - маса конкуруючої машини (зернозбирального комбайна «СКІФ-К-230»).

Факторний коефіцієнт  $k_3$  залежить від продуктивності праці конкуруючої  $Z_к$  і базової  $Z_б$  машин

$$k_3 = \frac{Z_к}{Z_б}. \quad (1.3)$$

Так як при куті нахилу комбайна до  $4^\circ$  втрати зерна і, отже, продуктивність зернозбирального комбайна не змінюються, а при кутах нахилу  $10$  і  $17^\circ$  продуктивність крутосхильного (конкуруючого) комбайна зростає відповідно на  $53$  і  $226\%$  на  $k_{3,4} = 1$ ;  $k_{3,10} = 1,53$ ;  $k_{3,17} = 3,26$ .

З урахуванням вищесказаного, інтегральний показник конкурентоспроможності крутосхильного комбайна обчислимо за формулою (1.4), при цьому врахуємо лише два коефіцієнти -  $k_1$  і  $k_3$  зі значенням питомої ваги  $\gamma_x = 0,5$  та  $\gamma_2 = 0,5$ . Інші факторні коефіцієнти, що вимагають розрахунку додаткові дані, з урахуванням рекомендацій прийняті рівними нулю. Результати розрахунку представлені на рис. 1.3.

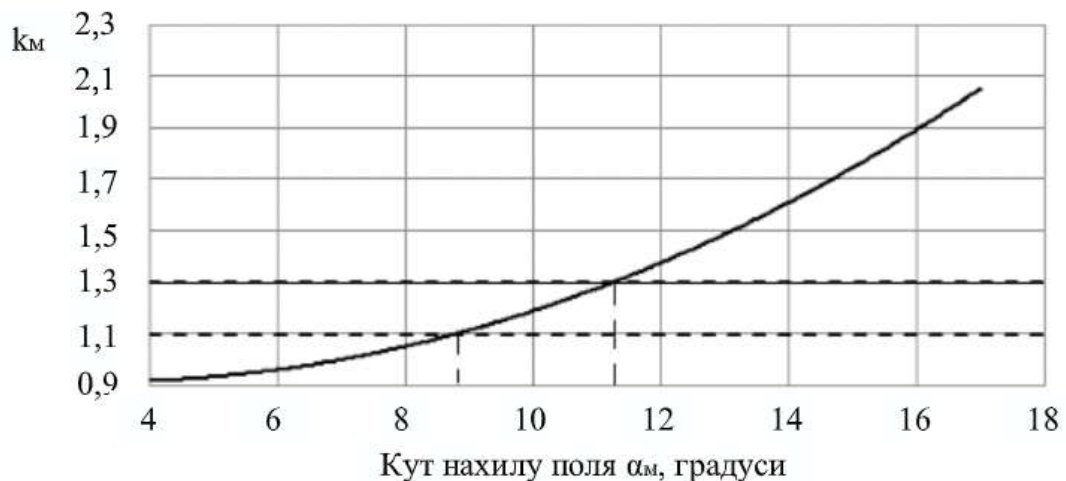


Рис. 1.3 – Графік залежності інтегрального показника конкурентоспроможності машини

За ДСТУ значення показника 1,0 до 1,1 свідчить про низький рівень конкурентоспроможності, від 1,1 до 1,3 - про середній рівень, більше 1,3 - про високий.

Інші дослідники також отримали схожі результати. Також, зазначено, що ціна комбайнів збільшується проти їх базовими моделями на 20-50 %, причому на невеликих схилах достатньо вирівнювання лише очищення комбайна.

Таким чином, на пологих та похилих схилах до 10° доцільно використовувати косогірну модифікацію зернозбирального комбайна, що відрізняється від базової наявністю пристроїв, що сприяють підвищенню ефективності роботи системи очищення.

Можна виділити такі напрями підвищення ефективності роботи системи очищення під час роботи зернозбирального комбайна на схилах:

- Підвищення рівномірності подачі зернового вороху, що надходить на верхнє решето системи очищення;
- вирівнювання системи очищення та решіт щодо горизонту;
- вирівнювання товщини зернового вороху на верхньому решеті за рахунок введення додаткових коливань решета в поперечному напрямку;
- Зміна розподілу повітряного потоку в залежності від нахилу молотарки.

Ці напрями реалізовані в конструкціях очищення зарубіжних косогірних

зернозбиральних комбайнів, розробок вітчизняних учених.

Зерновий ворох надходить на верхнє решето в основному зі струшувальної дошки. Рівномірний розподіл зернового вороху поверхнею струшувальної дошки, особливо у її кінці, забезпечує рівномірність надходження вороха на верхнє решето. Зазначимо такі основні групи пристроїв, застосування яких підвищує рівномірність подачі зернового вороху на решето: пасивні пристрої; автономні пристрої із активними робочими органами; пристрої, призначені для вирішення та інших завдань, наприклад сепарації зернового вороху.

Для запобігання усунення зернового вороху у бік ухилу на струшувальній дошці встановлюють поздовжні гребінки. Причому в моделях зернозбиральних комбайнів крок і висота гребінок збільшуються: в зернозбиральному комбайні «Скіф-230» кількість поздовжніх гребінок  $m_{\Pi} = 2$ , висота  $h_{\Pi T} = 0,05$  м; у комбайні «Скіф-250» -  $m_{\Pi} = 4$ ,  $h_{\Pi T} = 0,08$ .

Як було зазначено, поздовжні гребінки запобігають переміщенню зернового вороху у бічному напрямку, а саме зберігають розподіл вороху, що надходить на дошку, але не покращують його. Крок поздовжніх гребінок та їх висота повинні визначатися виходячи з пропускної спроможності зернозбирального комбайна, типу молотильно-сепаруючого пристрою, ширини струшувальної дошки.

Невідповідність розподілу по ширині очищення повітряного потоку розподілу зернового вороху, що спостерігається під час роботи комбайна, також призводить до підвищених втрат зерна. Було виконано дослідження щодо визначення впливу розподілу повітряного потоку на роботу системи очищення при поперечному нахилі комбайна. Дослідження виконані на лабораторній установці, розробленій на основі молотарки зернозбирального комбайна третього класу. Нерівномірність розподілу зернового вороху та повітряного потоку оцінювали за допомогою коефіцієнта варіації. При горизонтальному положенні молотарки втрати зерна за системою очищення склали 0,13 %, при цьому спостерігалася нерівномірність як повітряного потоку (24,3%), так і зернового вороху (9,1%) (рис. 1.4).

При поперечному нахилі молотарки зерновий ворох зміщується у бік ухилу. Для направлення повітряного потоку у бік ухилу в патрубку вентилятора встановлено три напрямники повітря (рис. 1.5).

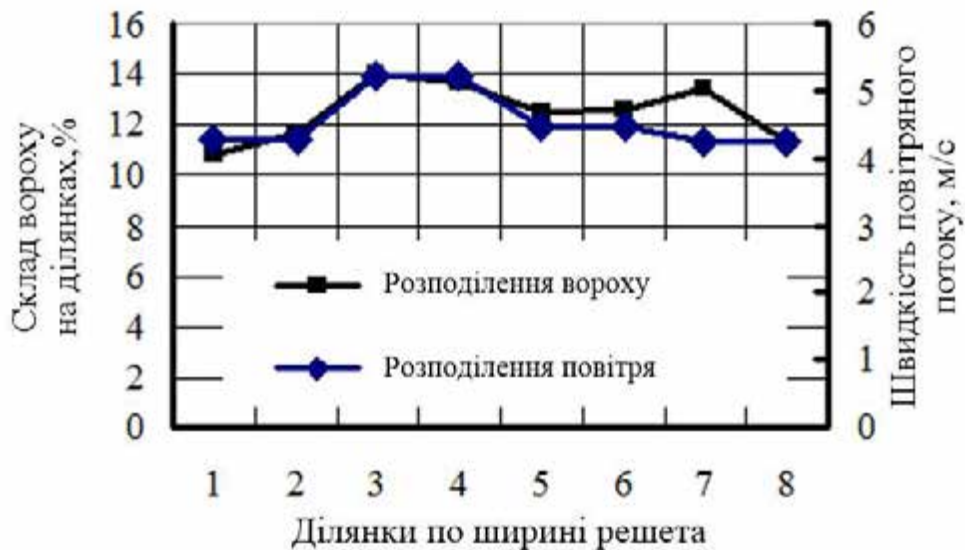


Рис. 1.4 - Розподіл зернового вороху та повітряного потоку на верхньому решеті при горизонтальному положенні молотарки

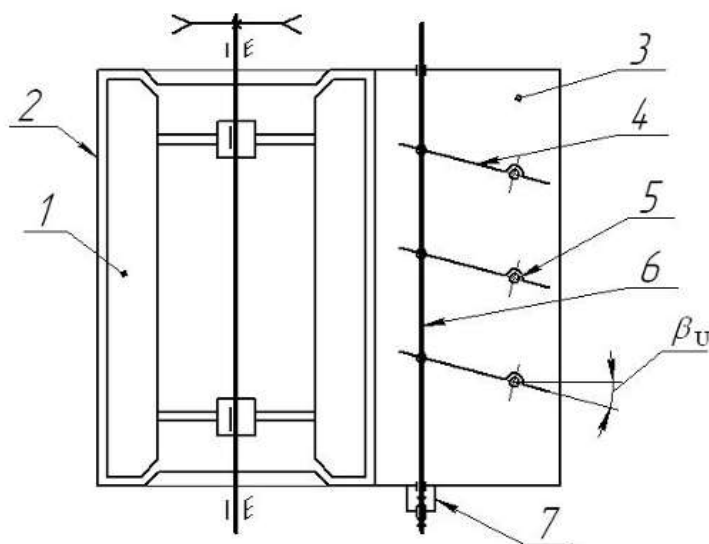


Рис. 1.5 - Схема вентилятора із пристроєм для перерозподілу повітря залежно від поперечного нахилу молотарки :

1 - крилач; 2 – кожух; 3 – вихідний патрубок; 4 – напрямник; 5 - вісь напрямника; 6 – тяга; 7 - регульовальний пристрій

Положення напрямників 4 щодо поздовжньої осі комбайна (кут  $\beta_U$ ) змінювали за допомогою тяги 6 і регулювального пристрою 7, встановленого на кожусі 2 вентилятора. При зміні кута установки направляючих від 0 до 25° середня швидкість повітряного потоку на верхньому решітці знизилася з 4,5 до 4,0 м/с, тобто. е. на 11,1%, при цьому повітряний потік прямував до однієї зі стінок, що призвело до збільшення коефіцієнта варіації швидкості повітря  $V_U$  з 24,3 до 50,9% (рис. 1.6).

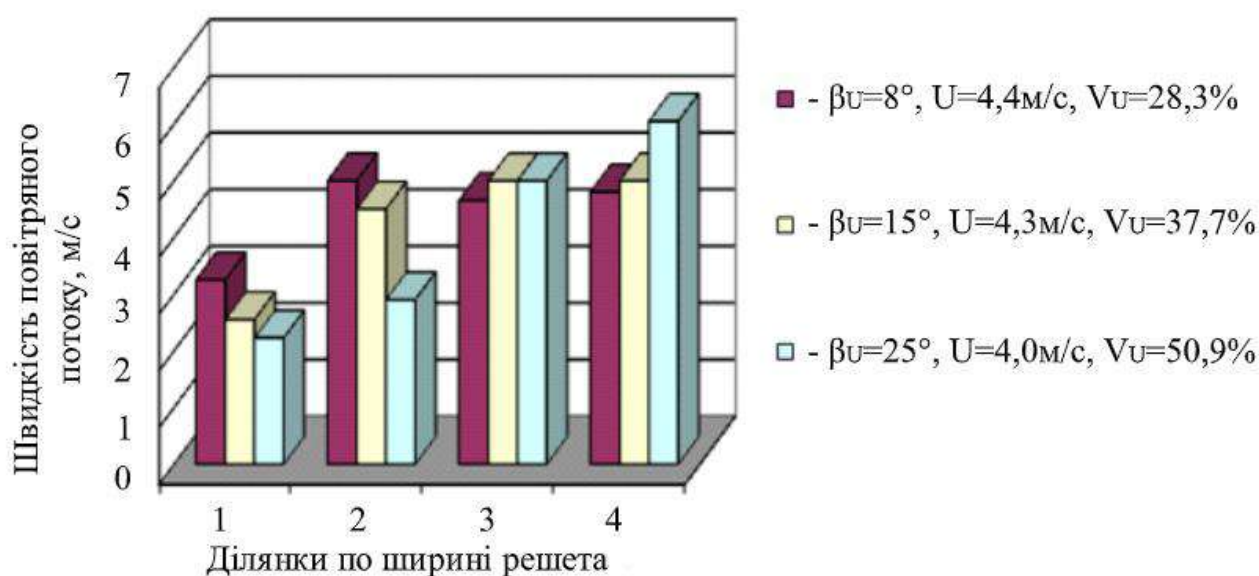
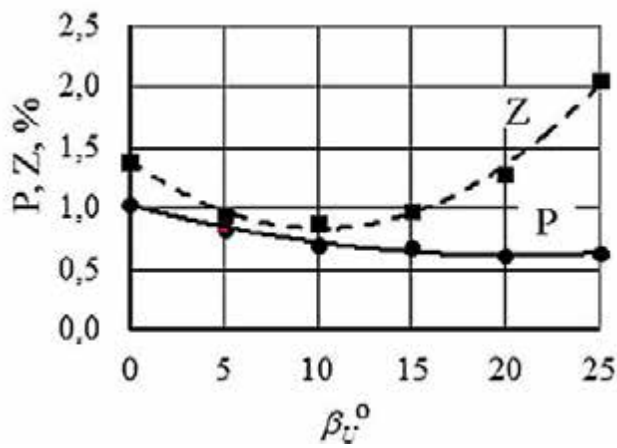
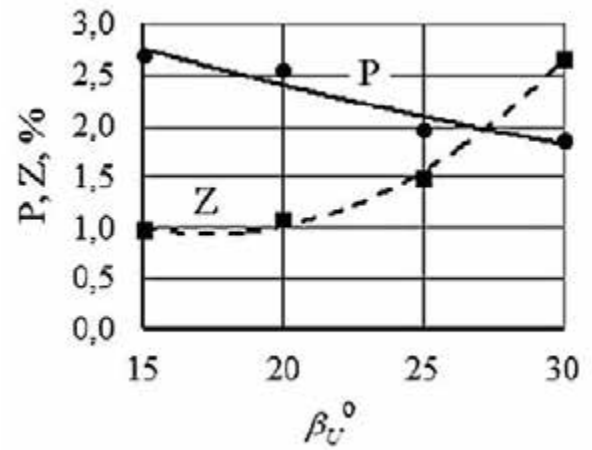


Рис. 1.6 – Розподіл повітряного потоку залежно від положення напрямників повітря

При поперечному нахилі молотарки на кут 8° втрати зерна зменшилися і практично залишалися на одному рівні при куті установки напрямників від 15° (рис. 1.7), але при цьому спостерігалось зростання засміченості зерна соломистими домішками. При поперечному нахилі молотарки на кут 12° істотне зниження втрат зерна спостерігалось при  $\beta_U$  від 25 до 30°. Таким чином, зміна напрямку повітряного потоку при поперечному нахилі молотарки покращує роботу системи очищення.



а)



б)

Рис. 1.7 - Втрати зерна P та засміченість бункерного зерна Z залежно від кута  $\beta_U$  ( $q_B=2,9$  кг/с,  $C=30$  %): а - кут поперечного нахилу молотарки  $8^\circ$ ; б - кут поперечного нахилу молотарки  $12^\circ$

Зміна розподілу повітряного потоку в залежності від поперечного нахилу комбайна вправо або вліво досягається у пристрої двосекційного верхнього решета за рахунок різного зазору між сегментами секцій решета. У секції решета, яка знаходиться внизу (у бік ухилу) і на яку зміщується зернова купа, зазор між сегментами збільшується, а в іншій секції решета, яка менш завантажена купою, зазор між сегментами зменшується, що призводить до перерозподілу повітряного потоку.

Для зміни розподілу повітряного потоку в системі очищення з осьовими вентиляторами розроблений вентилятор, у вихідному вікні якого, в зоні розміщення крильчаток, розташовані криволінійні екрани, з кривизною, що дорівнює кривизні кожуха. Екрани мають перфоровані та неперфоровані ділянки, виконані з можливістю переміщення щодо вихідного вікна та закріплені дзеркально між собою. При збиранні зернових на схилах екрани повертаються, причому вихідне вікно в його нижній стороні відкривається повністю, а на протилежному боці перекривається неперфорованим ділянкою екрану. В результаті забезпечується відповідність розподілу повітряного потоку та зернового вороху.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності роботи зернозбирального комбайна є застосування пристроїв з інерційним вирівнюванням зернового вороху на верхньому решітці очищення. Цей напрямок реалізовано у конструкціях зарубіжних комбайнів, насамперед фірми CLAAS – система 3D-очищення, а також у розробках вітчизняних вчених – співробітників Херсонського машинобудівного заводу. Зернозбиральні комбайни TUCANO, оснащені 3D-очищенням, забезпечують стабільну роботу при бічних кренах до 20 %. У 2010 р. запатентований спосіб динамічного вирівнювання шару вороху, що полягає в повідомленні решітного стану бічних коливань, і пристрій для його здійснення у вигляді гідровібраторів правого та лівого крену. Запропоновано кулачковий пристрій для створення решету коливань у поперечному напрямку.

#### **1.4. Чинники, що впливають зерновий ворох**

У процесі роботи зернозбирального комбайна в систему очищення надходить зерновий купа, що складається з зерен основної культури, соломистої фракції, насіння інших культурних та бур'янів, мінеральних домішок. Соломиста фракція представлена перебитою соломою різної довжини з вузликами і без них, половиною (колоскові та квіткові лусочки), незмолоченими колоссями та їх частинами, вимолоченими колоссями.

Зазначимо фактори, що впливають на поведінку зернового вороху в системі очищення зернозбирального комбайна (рух по поверхні решета та жалюзі, зміщення у бік ухилу, підкидання та політ над решетом, сегрегацію, сепарацію зернового вороху):

1. фізико-механічні властивості компонентів вороха: розмірні характеристики  $\Omega(l)$ ; аеродинамічні (швидкість вітання  $\Omega(U_S)$  і коефіцієнт вітрильності  $\Omega(k_{II})$ ); вологість  $\Omega(W)$ ; фрикційні (коефіцієнт тертя зерна по соломі  $f_{ZC}$ , коефіцієнт тертя компонентів вороху по поверхні жалюзі  $\Omega(f)$ , наведений коефіцієнт тертя вороха по решету  $f_{IIIP}$ ); щільність  $\Omega(\rho_B)$  і об'ємна

маса  $\Omega$  ( $\gamma_B$ );

2) технологічні: подача зернового вороху  $q_B$ ; вміст соломистої фракції в зерновій купі  $C$ ; кут нахилу молотарки комбайна в поздовжній  $\delta_K$  і поперечної  $a_K$  площинах;

3) конструктивні параметри системи очищення: площа решета (довжина  $L_P$ , ширина решета  $B_P$ ); тип та розміри отворів решета (живий перетин решета  $\varphi_P$ ); кількість ( $m_{ПТ}$ ) та висота ( $h_{ПТ}$ ) поздовжніх гребінок (або перегородок);

4) кінематичні параметри системи очищення: радіус кривошипа приводного валу  $r$ , циклічна частота коливань про напрямок коливань решета щодо горизонту  $P$ ;

5) аеродинамічні параметри системи очищення: швидкість повітряного потоку  $U$  і кут нахилу повітряного потоку  $u$ ; коефіцієнт варіації повітряного потоку по ширині решета  $V_{UB}$ ; коефіцієнт варіації повітряного потоку за довжиною решета  $V_{UL}$ ;

б) параметри, що описують стан зернового вороху: розподіл зерна по висоті шару вороху; розподіл вороху по ширині очищення (оцінюється коефіцієнтом варіації товщини вороха  $V_h$ ); швидкість зернового вороху у поздовжньому напрямку  $V_{BX}$ ; швидкість зернового вороху в поперечному напрямку  $V_{BY}$ ; швидкість просіювання зерна у шарі вороху  $V_C$ ; розпушеність зернового вороху  $\eta$ .

Внаслідок різноманіття частинок кожного компонента зернового вороху значення властивостей є випадковими величинами, які оцінюють статистичними характеристиками: середнім значенням  $X$ ; математичним очікуванням  $M_X$ ; дисперсією  $\sigma_X^2$ ; середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_X$ ; коефіцієнтом варіації випадковий величини

$$V_X = \frac{\sigma_X}{\bar{X}} 100\%. \quad (1.4)$$

Автором роботи досліджувався склад зернового вороху пшениці сорту «Богдана» та «Мудрість одеська» після обмолоту хлібної маси однобарабанным зернозбиральним комбайном «Скіф-230». Фракційний склад соломистої частини

вороха представлено таблиці 1.2.

Аеродинамічні властивості компонентів зернового вороху пшениці сорту «Богдана», що характеризуються швидкістю витання та коефіцієнтом парусності, наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.2 - Фракційний склад соломистої фракції зернового вороху

Сорт пшениці	Компоненти	Зміст, %
Богдана	Колоскові та квіткові лусочки (довжина частинок менше 20 мм)	70,9
	Збоїна та колоски	28,5
	Цілі колосся та частини колосу	0,6
Мудрість одеська	Колоскові та квіткові лусочки (довжина частинок менше 15 мм)	80,7
	Збоїна та колоски	19,3

Таблиця 1.3 – Аеродинамічні властивості компонентів зернового вороху

Компоненти вороху	Швидкість витання, м/с		Коефіцієнт парусності $\bar{k}_\Pi$
	$\bar{U}_s$	$\sigma_{US}$	
Цілі зерна	8,5	0,49	0,14
Полова	2,4	0,36	1,70
Збоїна	5,0	1,86	0,39
Колоски	5,1	1,72	0,38

При переміщенні зернового вороху по решітці замість коефіцієнта тертя застосовують наведений коефіцієнт тертя  $f_{\Pi P}$ , в якому враховано зчеплення соломистої фракції з решетом.

Дослідниками, за допомогою приладу визначено наведені коефіцієнти тертя соломистої фракції зернового вороху з жалюзійним решетом та перфорованим решетом. Досліджувалась соломиста фракція зернового вороху пшениці «Богдана», отримана після обмолоту хлібної маси однобарабанным зернозбиральним комбайном. Наведений кут тертя визначали за відхиленням

центру пучка соломистих частинок від нормалі до лінійки при її русі вздовж напрямної. У пучку соломисті частки були хаотично орієнтовані. За величиною наведеного кута тертя  $\varphi_{DP}$  визначали наведений коефіцієнт тертя.

В результаті проведених експериментів із застосуванням методу планування експерименту отримані такі параметри:

- коефіцієнт тертя соломистих частинок сталевій поверхні

$$f = 0,556 - 0,765 / W, \quad (1.5)$$

- наведений коефіцієнт тертя соломистої фракції зернового вороху з вологістю від 6,4 до 30,2% по поверхні перфорованого решета з отворами діаметром від 7 до 15 мм, що дорівнює 0,81;

- наведений коефіцієнт тертя соломистої фракції зернового вороху по решітці в поперечному напрямку, що дорівнює 0,88;

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ НА РЕШЕТІ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ

### 2.1. Основні припущення та обмеження

Розглянемо рух зернового вороху поверхнею жалюзійного решета під час роботи зернозбирального комбайна на схилах. При розгляді виділимо: 1) компонент зернового вороху знаходиться на поверхні пелюстки жалюзі; 2) зерновий ворох знаходиться на поверхні решета. У першому випадку рух компонента зернового вороху розглядаємо як рух частинки (зернівки чи збоїни), а силу опору руху – як силу тертя. У другому випадку рух вороха розглядаємо як рух елемента, наділеного комплексом фізико-механічних властивостей зернового вороху, причому сила опору руху елемента залежить від його зчеплення з поверхнею решета.

При описі руху частинки (або елемента) приймаємо:

- плоскопаралельний рух решета, що описується гармонічним законом

$$\xi = r \cos \omega t, \quad \dot{\xi} = -\omega r \sin \omega t, \quad \ddot{\xi} = -\omega^2 r \cos \omega t; \quad (2.1)$$

- частку (або елемент) зернового вороху розглядаємо у вигляді матеріальної точки, яка має відомий набір фізико-механічних властивостей.

Решето, що робить коливання, рухається в повітряному потоці, швидкість якого стала. Тому швидкість повітряного потоку, обдуваючого решето, залежатиме від швидкості руху решета і, отже, сила впливу повітряного потоку частинку також залежить від коливань решета.

Зробимо розрахунок швидкості решета  $\dot{\xi}$  в залежності від кута повороту кривошипа ( $\omega = 28$  рад / с,  $r = 0,03$  м). Швидкість решета змінюється в інтервалі від «мінус» 0,84 до +0,84 м/с, тому на частинку, що знаходиться в стані спокою на поверхні решета, впливає повітряний потік з непостійною швидкістю. Наприклад, при швидкості повітряного потоку 4,0 м/с швидкість обдування решета, що коливається (і частинки) змінюється від 3,16 до 4,84 м/с (рис. 2.1).

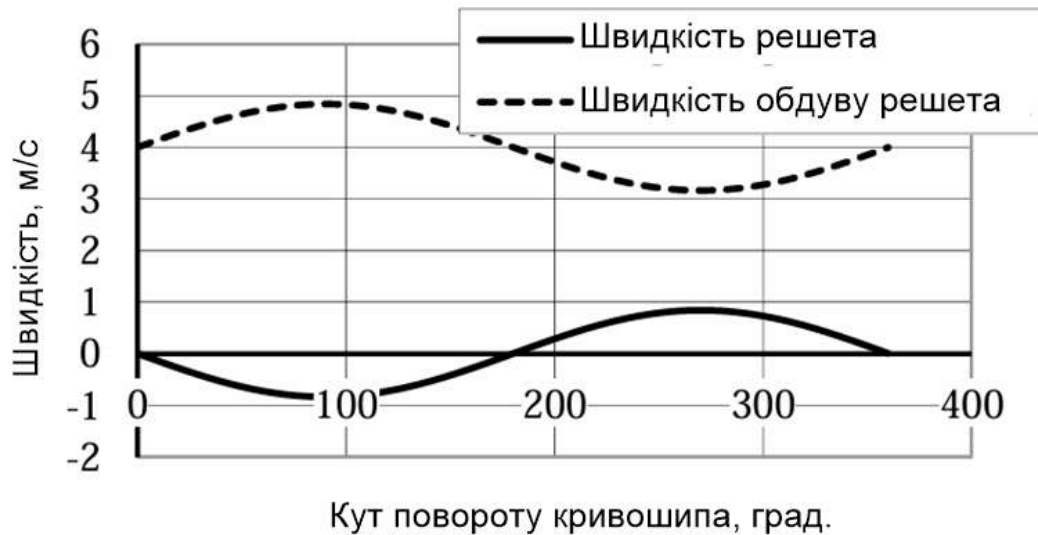


Рис. 2.1 - Швидкості решета та обдування решета повітрям залежно від кута повороту кривошипу

При зміні швидкості повітряного потоку від 2 до 7 м/с коефіцієнт варіації змінюється від 120 до 34%, тому при дослідженні руху зернового вороху по решітці слід враховувати відносну швидкість решіт в повітряному потоці.

Повітря обдуває верхнє решето з неоднаковою швидкістю по довжині решета: на початку решета швидкість має більше значення, наприкінці - менше. Зміна швидкості повітряного потоку за довжиною решета зазначено в роботах науковців, з яких випливає, що якщо решето завантажено зерновим купою, то відношення швидкості повітряного потоку в перерізі до максимальної швидкості повітряного потоку приблизно однаково по всій довжині верхнього решета. Тому припускаємо, що повітряний потік рівномірно розподілений поверхнею решета (за шириною і довжиною).

Введемо рухливу систему координат OXYZ, пов'язану з поверхнею: вісь X спрямована вздовж поверхні; вісь Y – у поперечному напрямку, протилежному ухилу; вісь Z – перпендикулярно поверхні; площина XOY - розглядається поверхня (рис. 2.2). На частинку, що знаходиться на площині XOY, діють сили:  $G = m \cdot g$  – сила тяжіння (тут  $m$  – маса частки;  $g$  – прискорення вільного падіння);  $R_B = m \cdot k_{\Pi} \cdot U_0^2$  - Сила впливу повітряного потоку (тут  $k_{\Pi}$  - коефіцієнт вітрильності частки;  $U_0$  - відносна швидкість частинки в повітряному потоці);

$R_{BF}$  – сила опору повітряного потоку під час руху частинки в поперечному напрямку;  $N$  - нормальна реакція поверхні;  $F$  – сила тертя (опір) при русі частинки по аналізованій поверхні;  $P_{IH} = m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega \cdot t)$  - сила інерції частки від поздовжніх коливань решета (тут  $r$  - радіус кривошипа;  $\omega$  - циклічна частота коливань;  $t$  - час). Вектори сил  $R_{IH}$  та  $P_{IH}$  знаходяться в площині XOZ. частинки  $\bar{V}_B$  від поздовжнього напрямку (осі X) визначається кутом  $\varepsilon = \arctg(y'/x')$  (тут  $y'$ ,  $x'$  – проекції швидкості частки осі Y і X відповідно).

При нахилі в поперечному напрямку решета разом з молотаркою комбайна на кут з'являється складова від сили тяжіння.

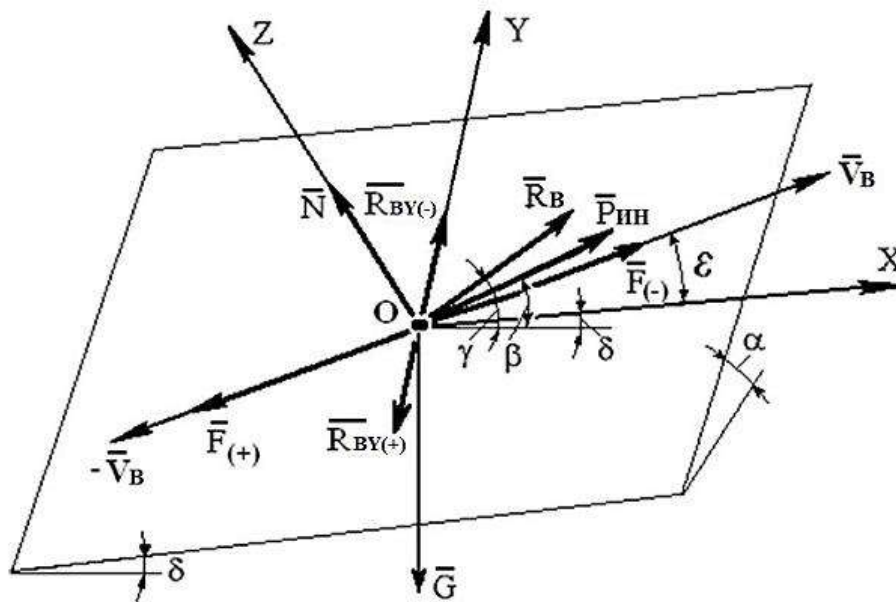


Рис. 2.2 – Схема сил, що діють на частку

Диференціальні рівняння руху частинки мають такий вигляд (верхні знаки - при русі частинки у позитивному напрямку осей):

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P_{IHX} + R_{BX} \pm F_X - G_X \\ m\ddot{y} = \pm F_Y \pm R_{BY} - G_Y \\ m\ddot{z} = N + P_{IHZ} + R_{BZ} \pm F_Z - G_Z \end{cases}, \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P_{IH} \cos(\beta - \delta) + R_B \cos(\gamma - \delta) \pm F \cos \varepsilon - G_X \cos \alpha \sin \delta \\ m\ddot{y} = \pm F \sin \varepsilon \pm R_{BY} - G \sin \alpha \cos \delta \\ m\ddot{z} = N + P_{IH} \sin(\beta - \delta) + R_B \sin(\gamma - \delta) - G \cos \alpha \cos \delta \end{cases} \quad (2.3)$$

За допомогою системи рівнянь (2.3) можна дослідити рух частинки пелюстки жалюзі та елемента зернового вороху по поверхні жалюзійного решета.

## 2.2. Рух зернового вороху по жалюзійному решітці

У цьому випадку кут  $\delta$  визначає нахил решета щодо горизонту – при русі комбайна вниз по схилу  $\delta = \delta_r + \delta_K$ , при русі вгору -  $\delta = \delta_r - \delta_K$ . Значення кута  $\delta_r$  для верхнього решета знаходиться в інтервалі від 0 до 7°. Рух зернового вороху розглядаємо як рух виділеного елемента, наділеного комплексом фізико-механічних властивостей.

При русі зернового вороху по решітці відбувається сепарація зерна, виділення полови, зіткнення зерен із соломистими домішками, що впливають на опір зернового вороху повітряному потоку. Тому при моделюванні застосовано наведений коефіцієнт парусності елемента, значення якого визначено як середньозважене математичне очікування коефіцієнта парусності зернового вороху.

$$k_{\Pi} = \sum_i^{n_B} (m_{k_{\Pi}i} \cdot \delta_i), \quad (2.4)$$

де  $m_{k_{\Pi}i}$  – математичне очікування коефіцієнта парусності  $i$ -го компонента зернового вороху;  $\delta_i$  - відносний зміст  $i$ -го компонента;  $n_B$  – кількість компонентів зернового вороху.

Наведений коефіцієнт парусності елемента зернового вороху пшениці, що знаходиться на верхньому решеті, знаходиться в інтервалі від 0,2 (на початку решета; зерновий ворох складається з зерна, збоїни, полови і колосків) до 0,4 (в кінці грати; Швидкість повітряного потоку в інтервалі від 3,5 до 4,5 м/с.

Коефіцієнт опору руху елемента у прямому напрямку (у позитивному напрямку осі X) прийmemo рівним наведеному коефіцієнту тертя  $f_{\Pi r}$  соломистій фракції зернового вороху по жалюзійному решітці, що залежить від зазору  $S$  між пелюстками (формула 1.9); у зворотному напрямку (негативному напрямку осі

X) -  $f_{\text{ПР2}} = 1,19$ ; у поперечному напрямку -  $f_{\text{ПР3}} = 0,88$ . При дослідженні руху зернового вороху в поперечному напрямку по плоским жалюзі, наприклад, округленим ламельним жалюзі, коефіцієнт тертя можна прийняти рівним коефіцієнту тертя соломистої фракції сталеві поверхні.

Відносна швидкість елемента повітряному потоці дорівнює

$$U_o = U + \omega r \sin(\omega t) \cos(\gamma - \beta) - \dot{x} \cos(\gamma - \delta), \quad (2.5)$$

Система рівнянь (2.3) для даного випадку має вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 r \cos \omega t \cos(\beta - \delta) + k_{\text{П}} U_o^2 \cos(\gamma - \delta) \pm \\ f_{\text{ПР1, ПР2}} \frac{N}{m} \cos\left(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}\right) - g \cos \alpha \sin \delta \\ \ddot{y} = \pm f_{\text{ПР3}} \frac{N}{m} \sin\left(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}\right) - g \sin \alpha \cos \delta \\ \frac{N}{m} = -\omega^2 r \cos \omega t \sin(\beta - \delta) - k_{\text{П}} U_o^2 \sin(\gamma - \delta) + g \cos \alpha \cos \delta \end{cases} \quad (2.6)$$

Відрив елемента від поверхні решета можливий при  $z > 0$   $N = 0$ ; з третього рівняння системи рівнянь (2.6) отримаємо

$$\omega^2 r \cos \omega t \sin(\beta - \delta) + k_{\text{П}} U_o^2 \sin(\gamma - \delta) - g \cos \alpha \cos \delta \geq 0 \quad (2.7)$$

Перетворенням нерівності (2.7) отримаємо кут повороту  $\varphi_0$  при якому відбувається відрив елемента від поверхні решета

$$\varphi_0 \geq \arccos \left[ \frac{\cos \alpha \cos \delta - k_{\text{П}} U_o^2 \sin(\gamma - \delta)}{k_r \sin(\beta - \delta)} \right] \quad (2.8)$$

де  $k_r$  - показник кінематичного режиму.

$$k_r = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (2.9)$$

Відрив елемента від поверхні решета можливий, коли

$$k_0 \geq \frac{\cos \alpha \cos \delta - k_{\text{П}} U_o^2 \sin(\gamma - \delta)}{\sin(\beta - \delta)} \quad (2.10)$$

Граничне значення кінематичного режиму  $k_0$ , при якому елемент

відірветься від поверхні решета, визначимо при припущенні, що під час відриву відносна швидкість його незначна, звідси

$$k_0 = \frac{\cos \alpha \cos \delta - k_{II} (U + \omega r \sin(\omega t) \cos(\gamma - \beta))^2 \sin(\gamma - \delta)}{\sin(\beta - \delta)} \quad (2.11)$$

На рисунку наведені результати розрахунку ( $\beta=26^\circ$ ,  $\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha = 0$  робочий кінематичний режим  $k_r = 2,4$ ), виконані в програмі Mathcad.

Значення коефіцієнта  $k_0$  практично не залежить від кута  $\alpha$ . Поздовжній нахил решета має велике значення на відрив елемента від поверхні решета. Причому при нахилі решета більше  $5^\circ$  і прийнятих при розрахунку параметрах зерновий ворох не відривається від решета.

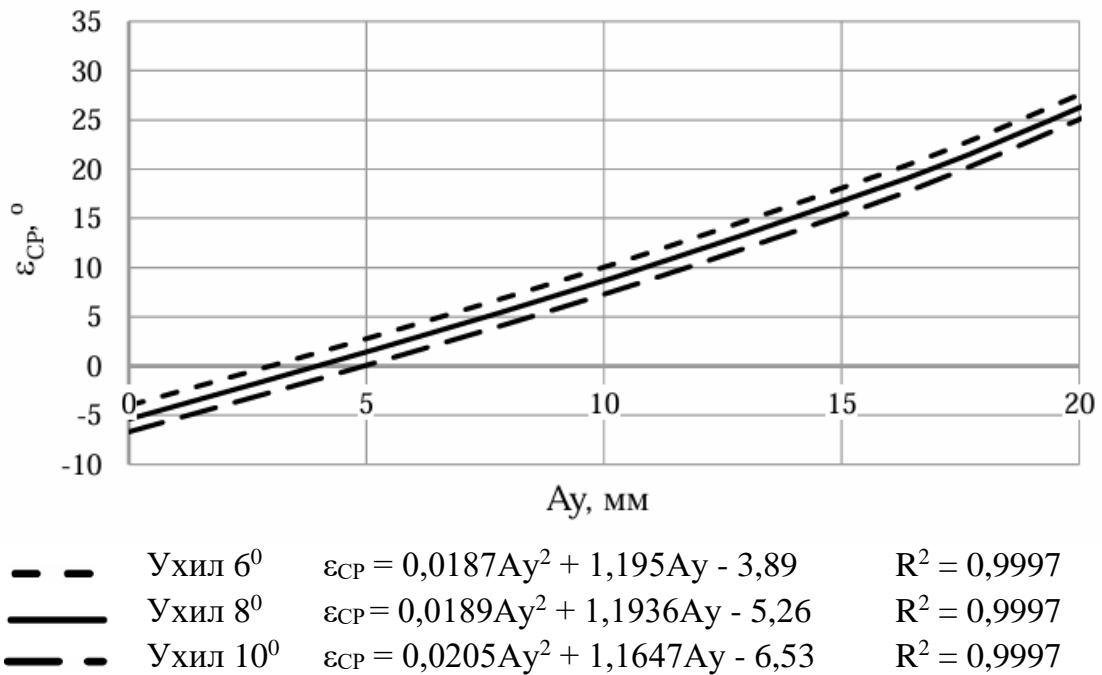


Рис. 2.3 - Графік залежності  $\epsilon_{cp}$  від амплітуди коливань решета в поперечному напрямку та кута поперечного нахилу молотарки

Визначено параметри коливань решета в поперечному напрямку, при яких зернова купа, що контактує з гребінками решета, не зміщується у бік ухилу:

$$\alpha_k = 6^\circ - v \geq 5,5^\circ, A_Y \geq 0,003\text{м}; \alpha_k = 8^\circ - v \geq 7,5^\circ, A_Y \geq 0,004\text{м}; \alpha_k = 10^\circ - v \geq 9,5^\circ, A_Y \geq 0,005\text{м}.$$

## Висновки

1. Розроблена математична модель руху компонентів зернового вороху по жалюзі верхнього решета при роботі комбайна на схилах. методика розрахунку швидкості частинки, що знаходиться на пелюстці жалюзі, і програма для  $\delta_J = \delta_{J_0} + 0,7 \cdot \delta_K$ .

2. Розроблено математичну модель руху зернового вороху по поверхні верхнього жалюзійного решета при поздовжньому та поперечному нахилах молотарки та програма для ПК для її реалізації. Визначено кінематичні параметри руху зернового вороху по поверхні жалюзійного решета: при зміні кута поздовжнього нахилу від 0 до 10° при русі комбайна вгору по схилу швидкість зернового вороху збільшується з 0,43 до 0,50 м/с (на 16,3%), а при зміні поперечного нахилу молотарки від 0 до 10° кут відхилення вектора швидкості зернового вороху від поздовжнього напрямку при швидкості повітряного потоку 3,5 м/с збільшується до 5,8°, при відсутності повітряного потоку - до 9,8°.

3. Розроблено математичну модель руху зернового вороху по нахиленому жалюзійному решітці при додаткових коливаннях решета в поперечному напрямку. Встановлені параметри коливань жалюзійного решета в поперечному напрямку, при яких зернова купа, що контактує з решетом, не зміщується у бік ухилу: при поперечному нахилі молотарки 6° - 1,7 мм, при нахилі 8° - 2,2 мм, при нахилі 10° - 2,8.

4. Розроблено математичну модель руху зернового вороху по пальцевому решеті при зміні напрямку його коливань у горизонтальній площині. Визначено параметри коливань пальцевого решета в поперечному напрямку, при яких зерновий ворох не зміщується у бік ухилу:  $\alpha_K = 6^\circ - v \geq 5,5^\circ, A_Y \geq 0,003\text{м}$ ;  $\alpha_K = 8^\circ - v \geq 7,5^\circ, A_Y \geq 0,004\text{м}$ ;  $\alpha_K = 10^\circ - v \geq 9,5^\circ, A_Y \geq 0,005\text{м}$ .

### 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ. СЕПАРАЦІЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ В СИСТЕМІ ОЧИЩЕННЯ

#### 3.1. Розподіл зернового вороху на системі очищення

Припустимо, що внаслідок плинності зернового вороху його поверхня на струшувальній дошці та верхньому решеті горизонтальна за будь-якого поперечного нахилу комбайна; нахил грохоту щодо молотарки не змінюється; за відсутності поперечного нахилу молотарки переріз зернового вороху є прямокутником (рис. 3.1); товщина шару зернового вороху, що надходить на верхнє решето, прямо пропорційна подачі  $q_B$ .

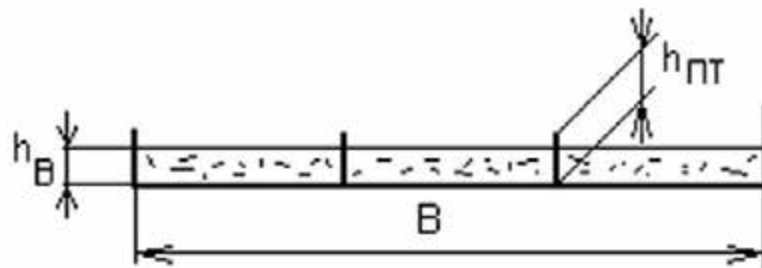


Рис. 3.1 - Поперечний переріз зернового вороху ( $h_{ПТ}$  - висота поздовжньої перегородки або гребінки)

Так як об'ємна маса зернового вороху на верхньому решеті є змінною величиною, а товщина шару залежить, перш за все, від вмісту соломистої фракції, тому товщину шару визначимо за формулою

$$h_B = \frac{q_C}{V_{ХСП} B \gamma_C} \quad (3.1)$$

де  $q_C$  - подання соломистої фракції зернового вороху;  $B$  - ширина робочого органу (струшувальної дошки чи верхнього решета);  $\gamma_C$  - об'ємна маса соломистої фракції зернового вороху.

Площа поперечного перерізу зернового вороху  $F_B = B h_B$ .

Позначимо  $m_n$  кількість поздовжніх перегородок на робочому органі.

Припустимо, що при поперечному нахилі молотарки на кут зерновий ворох

надходить на робочий орган рівномірним шаром. Виділимо обсяг зернового вороху, що переміщається в поздовжньому напрямку за один період коливань решета на відстань  $\Delta x$ .

$$\Delta Q = Bh_B \Delta x = Bh_B V_{XCP} T \quad (3.2)$$

При поперечному нахилі молотарки зерновий ворох об'ємом  $\Delta Q$  переміститься в поперечному напрямку на величину  $\Delta y = V_{YCP} T$ .

Розіб'ємо ширину робочого органу на  $n_1$  ділянок, причому  $n_1 = \frac{B}{\Delta y}$ .

Бічні стінки верхнього табору (або струшувальної дошки) обмежують рух зернового вороху в поперечному напрямку, тому ділянки у нижній бічній стінці збільшаться на елементарний об'єм  $\Delta Q' = \Delta x \Delta y h_B = \Delta x \Delta S$  (тут  $\Delta S$  - площа поперечного перерізу елементарного об'єму), а верхні ділянки зменшаться на вказаний об'єм. Приймаючи, що верхня межа зернового вороху горизонтальна, поперечний переріз елементарного об'єму, що перемістився робочим органом у бік ухилу, перетворюється на прямокутний трикутник зі сторонами  $\Delta b_1$  та  $\Delta h$  (рис. 3.2), причому

$$\Delta b_1 = \sqrt{\frac{2\Delta S}{\operatorname{tg} \alpha}}$$

Якщо прийняти, що за період коливань переміщається один елементарний обсяг зернового вороху, то за  $p$  періодів переміститься  $p$  елементарних обсягів зернового вороху

$$\Delta b_p = \sqrt{\frac{2p\Delta S}{\operatorname{tg} \alpha}} \quad (3.3)$$

Переміщення зернового вороху по решітці у бік ухилу відбуватиметься до того часу, поки його поверхня не займе горизонтальне положення, а саме доки не виконається умова  $\Delta b_p > B/2$ .

Перетин зернового вороху може набувати вигляду трапеції або трикутника (якщо досить великі ширина і кут нахилу робочого органу або невелика товщина зернового вороху).

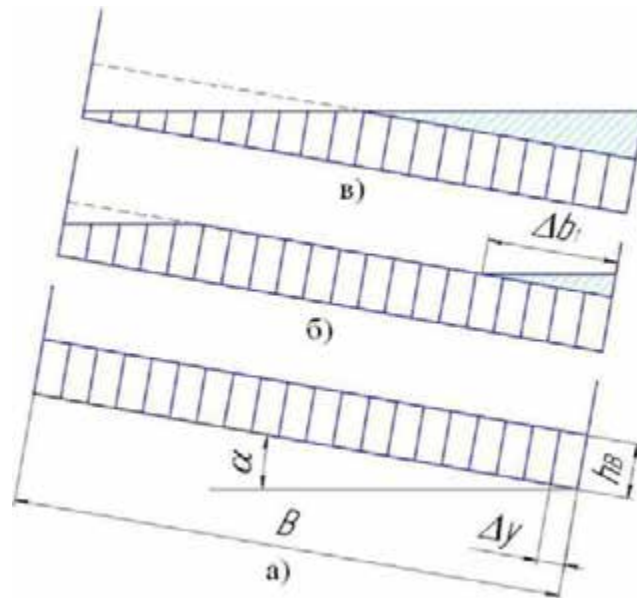


Рис. 3.2 - Перетин зернового вороху при поперечному нахилі струшувальної дошки або верхнього ґрату: а - початкове; б – після одного коливання; в - кінцеве

Описані положення також відносяться до розподілу зернового вороху в секції решета або струшувальної дошки, що обмежена поздовжніми перегородками.

Прийнявши  $\Delta b_p > B/2$  отримаємо кількість коливань робочого органу, при якому поперечний переріз зернового вороху приймає кінцеву форму

$$p_k = \frac{B^2 \operatorname{tg} \alpha}{8 \Delta S}$$

і після перетворень

$$p_k = \frac{B^2 \omega \operatorname{tg} \alpha}{16 \pi V_{\text{ХСР}} h_B} \quad (3.4)$$

Довжина ділянки робочого органу  $X_p$  на якому відбувається зміщення зернового вороху, залежить від поздовжньої швидкості елемента шару, від циклічної частоти і кількості коливань, а саме

$$X_p = \Delta x p_k = V_{\text{ХСР}} \frac{2\pi}{\omega} p_k \quad (3.5)$$

Враховуючи, що  $V_{\text{УСР}}/V_{\text{ХСР}} = \operatorname{tg} \varepsilon$ , Отримаємо

$$X_p = \frac{B^2}{8h_B} \cdot \frac{tg\alpha}{tg\varepsilon} \quad (3.6)$$

тому довжина ділянки робочого органу, на якому відбувається зміщення зернового вороху у бік ухилу, залежить від ширини робочого органу (або його секції), поперечного кута нахилу молотарки, кута відхилення вектора швидкості зернового вороху від поздовжньої осі комбайна та товщини шару зернового вороху.

Як показано раніше, зі збільшенням кута  $\alpha$  кут  $\varepsilon$  також збільшується, причому відношення  $tg\alpha/tg\varepsilon$  має приблизно постійне значення.

За відсутності на решеті поздовжніх перегородок зерновий ворох зміщується у бік ухилу практично по всій довжині решета (рис. 3.3). Установка на робочому органі поздовжніх перегородок сприяє більш швидкому переходу зернового вороху в стан, при якому форма його поперечного перерізу не змінюється.

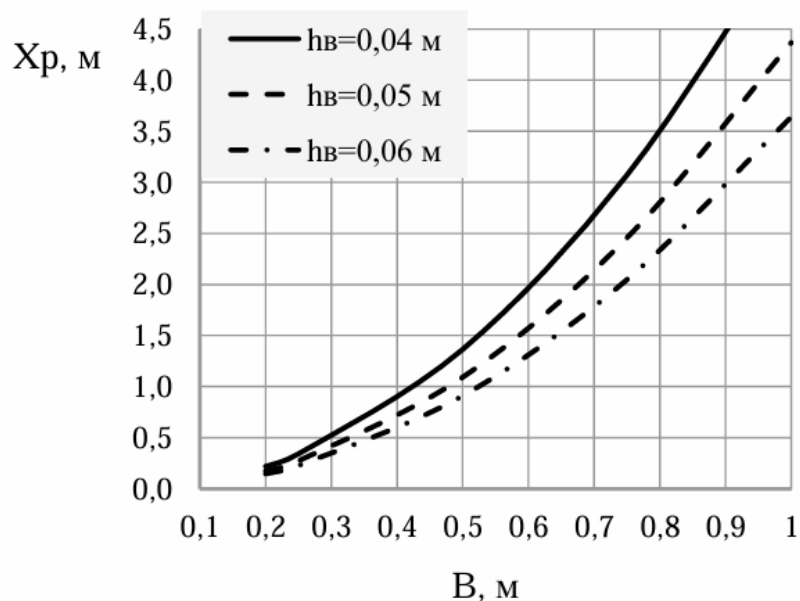


Рис. 3.3 - Параметри усунення зернового вороху у бік ухилу ( $\alpha_K = 8^\circ$ ,  $U = 3,5$  м/с,  $\varepsilon = 4,6^\circ$ )

Оцінку нерівномірності розподілу зернового вороху по ширині очищення виконаємо за допомогою відносного параметра – коефіцієнта варіації.

### 3.2. Методика визначення коефіцієнта варіації товщини шару зернового вороху

Товщина зернового вороху прямо пропорційно його подачі, тому значення коефіцієнта варіації незмінно за його розрахунку як з подачі зернового вороху, і з його товщині, т.і. е.  $V = V_h$  (тут  $V_h$  - коефіцієнт варіації товщини зернового вороху по ширині решета).

$$V = \frac{\sigma_q}{q_B} = \frac{\sigma_h}{h_B} \quad (3.7)$$

де  $\sigma_q$  – середньоквадратичне відхилення подачі зернового вороху по ширині очищення;  $q_B$  - подача зернового вороху на очищення;  $\sigma_h$  - Середньоквадратичне відхилення товщини шару зернового вороху.

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_B)^2}{n-1}} \quad (3.8)$$

де  $h_i$  - товщина зернового вороху на  $i$ -му ділянці струшувальної дошки або верхнього решета;  $n$  - кількість ділянок по ширині струшувальної дошки чи верхнього решета, у яких визначається товщина шару вороха.

Залежно від кута поперечного нахилу гуркоту,  $\alpha$  зерновий ворох в секції може перебувати в декількох станах (рис. 3.4):

1) зерновий ворох залишається в секції, поперечний переріз має вигляд: а) трапеції; б) трикутника;

2) частина вороху перевалюється через перегородку, поперечний переріз вороху має вигляд: а) трапеції; б) трикутника.

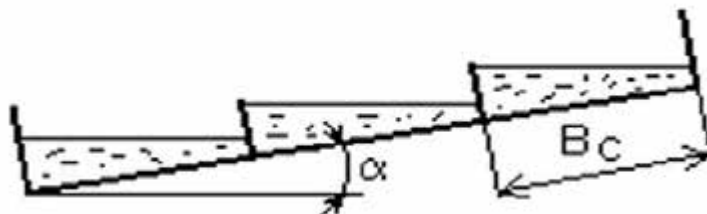


Рис. 3.4 - Поперечний переріз зернового вороху при нахилі грохоту на кут  $\alpha$  ( $B_c$  - ширина секції)

Припущення, що поперечний переріз зернового вороху у системі очищення при поперечному крені комбайна має вигляд трапеції.

Ширина секції  $B_C$  дорівнює

$$B_C = \frac{B}{k_C} \quad (3.9)$$

де  $k_C$  - кількість секцій на струшувальній дошці або верхньому решеті,  $k_C = m_{\Pi} + 1$ .

Площа поперечного перерізу вороха в секції за відсутності крену визначимо за формулою

$$F_C = \frac{F_B}{k_C} = B_C h_B \quad (3.10)$$

Визначимо умови, за яких зерновий ворох розподіляється в секції решета по трапеції або трикутнику (рис. 3.5).

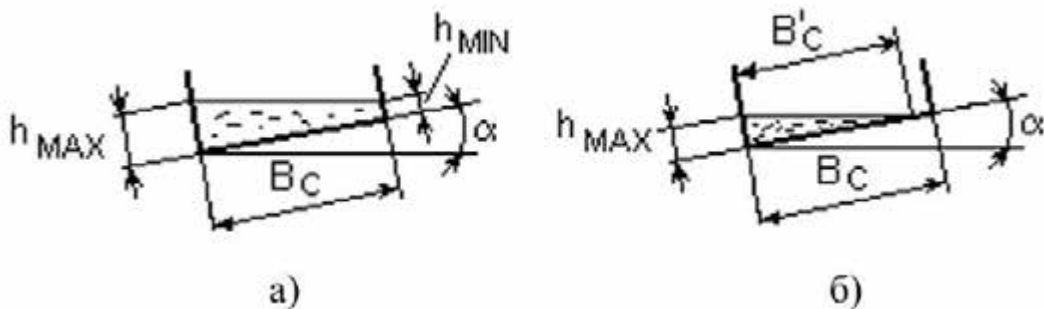


Рис. 3.5 - Схема визначення виду розподілу зернового вороху:  
а - за трапецією; б - по трикутнику

При розподілі за трапецією (рис. 3.5 а)

$$F_C = \frac{h_{MAX} + h_{MIN}}{2} B_C \quad (3.11)$$

де  $h_{MAX}, h_{MIN}$  - відповідно максимальна та мінімальна товщина вороху у секції.

Виразимо

$$h_{MIN} = h_{MAX} - B_C \operatorname{tg} \alpha \quad (3.12)$$

З виразу (3.12) отримаємо, що розподіл вороху трикутником буде у разі, коли  $h_{MIN} < 0$  (рис. 3.5), причому

$$h_{MAX} \leq B_C \operatorname{tg} \alpha \quad (3.13)$$

а площа поперечного перерізу вороху в секції дорівнює

$$F_C = \frac{h_{MAX}^2}{2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (3.14)$$

Підставивши  $h_{MIN}$  з виразу (3.12) у вираз (3.11), отримаємо площу поперечного перерізу вороху, розподіленого по трапеції

$$F_C = B_C h_{MAX} - 0.5 B_C^2 \operatorname{tg} \alpha \quad (3.15)$$

Визначимо граничний кут  $\alpha_{II}$ , при якому купа не переміщається в іншу секцію. При цьому виконується умова  $h_{MAX} = h_{III}$ .

При розподілі вороху по трапеції отримаємо:

$$\frac{h_B B}{k_C} = B_C h_{III} - 0.5 B_C^2 \operatorname{tg} \alpha_{II} \quad (3.16)$$

після перетворень

$$\alpha_{II} = \operatorname{arctg} \left[ \frac{2k_C (h_{III} - h_B)}{B} \right] \quad (3.17)$$

При розподілі вороху трикутником після перетворень

$$\alpha_{II} = \operatorname{arctg} \left[ \frac{k_C h_{III}^2}{2h_B B} \right] \quad (3.18)$$

Якщо нахил робочого органу менший за граничний кут, то купа не переміщається в інші секції, при цьому він може бути розподілений у секціях по трапеції (випадок 1, а) або по трикутнику (випадок 1, б).

Максимальну висоту зернового вороху, поперечний переріз якого має вигляд трапеції, визначимо із формули (3.15)

$$h_{MAX} = \frac{F_C}{B_C} + 0.5 B_C \operatorname{tg} \alpha \quad (3.19)$$

Максимальну висоту вороха в секції при розподілі його по трикутнику визначимо з формули (3.14)

$$h_{MAX} = \sqrt{2F_C \operatorname{tg} \alpha} \quad (3.20)$$

Якщо  $\alpha > \alpha_{\text{П}}$  то частина вороха переходить в іншу секцію. Припустимо, що купа з секцій переміститься в крайню, заповнить її, потім заповнить наступну і т. д. (рис. 3.6). Залежно від кута  $\alpha$ , подачі вороха і вмісту в ньому соломистої фракції, кількості та висоти перегородок також можливий розподіл вороху трикутником або трапецією.

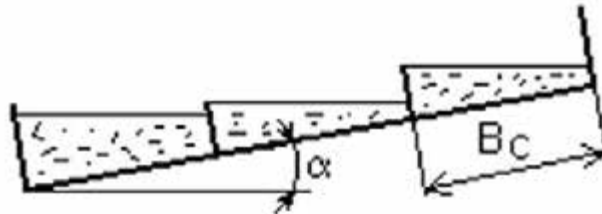


Рис. 3.6 - Поперечний переріз зернового вороху при  $\alpha > \alpha_{\text{П}}$

Вид розподілу в секціях визначимо за умовою

$$B_C = \frac{h_{\text{ПТ}}}{\text{tg}\alpha} \leq B_C \quad (3.21)$$

Якщо виконується умова  $B_C < B_C$ , то розподіл зернового вороху в секції трикутником, якщо ні - то по трапеції.

При розподілі зернового вороху трикутником площа поперечного перерізу вороху в секції, з урахуванням формули (3.14), дорівнює

$$F_C'' = \frac{h_{\text{ПТ}}^2}{2\text{tg}\alpha} \quad (3.22)$$

при розподілі за трапецією

$$F_C'' = B_C h_{\text{ПТ}} - 0.5 B_C^2 \text{tg}\alpha \quad (3.23)$$

Еталонний коефіцієнт сепарації зерна

$$\mu_{P0} = -\frac{1}{L_P} \ln \frac{P}{100} = -\frac{1}{1.3} \ln \frac{0.13}{100} = 5.1 \text{ м}^{-1} \quad (3.24)$$

Аналіз результатів експериментальних даних, отриманих при дослідженні системи очищення при поперечному нахилі, показав, що коефіцієнт  $c$  у формулі (3.24) також залежить від співвідношення товщини шару зернового вороху при подачі подачі і еталонної товщини шару вороху.

$$c = \left( \frac{h_B}{h_{B0}} \right)^{\frac{h_{B0}}{h_B}} M^{-1} \quad (3.25)$$

При відомому значенні втрат зерна за системою очищення на горизонтальній поверхні при певній подачі зернового вороху коефіцієнт сепарації зерна також можна визначити за формулою (3.24), у цьому випадку встановлене значення - еталонний коефіцієнт сепарації, а значення коефіцієнта  $c=1$ .

Розроблена математична модель сепарації зернового вороху дозволяє оцінювати функціонування системи очищення при нерівномірному розподілі зернового вороху на верхньому решеті під час роботи зернозбирального комбайна на схилах, а також роботу пристроїв, що вирівнюють.

### **3.3. Реалізація математичної моделі сепарації зернового вороху на ПК**

Методика розрахунку коефіцієнта варіації товщини шару зернового вороху  $V_h$  реалізована у програмі для ПК «Розрахунок параметрів системи очищення комбайна».

Програмована мова – Java, середовище розробки NetBeans 8.0.1. Вихідними даними є конструктивні та технологічні параметри молотарки та системи очищення, у тому числі подача хлібної маси, висота та кількість поздовжніх перегородок, довжина та ширина верхнього решета, кут поперечного нахилу молотарки, швидкість зернового вороху, коефіцієнти, що характеризують роботу МСУ, та коефіцієнт сепарації зернового. Вихідні дані: товщина та коефіцієнт варіації товщини шару зернового вороху; втрати зерна; вид розподілу зернового вороху. Програма виводить графіки залежностей коефіцієнта варіації товщини шару зернового вороху та втрат зерна від подачі хлібної маси до комбайна, довжини верхнього решета, кількості та висоти поздовжніх перегородок, кута поперечного нахилу.

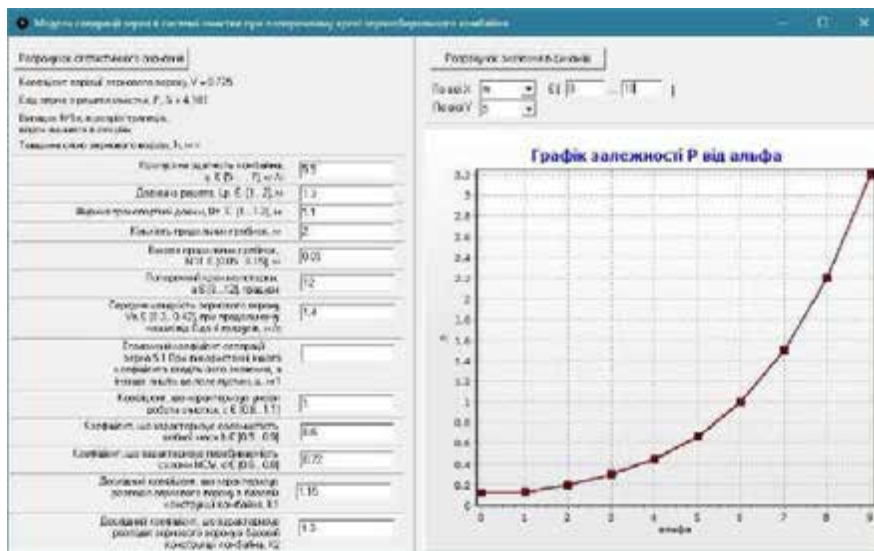


Рис. 3.7 – Інтерфейс програми: а) діалогове вікно; б) фрагмент вікна з візуалізацією розподілу зернового вороху

На рис. 3.7 а представлено діалогове вікно введення вихідних даних і виведення результатів розрахунку у вигляді графіка залежності  $F=f(a)$ , рис. 3.7, б - фрагмент діалогового вікна. Розрахунок втрат зерна у програмі проводиться у разі формулі, тобто. програма оцінює роботу системи очищення при однаковому (або незначному) розподілі зернового вороху на початку і в кінці решета. Програма дозволяє отримати розподіл зернового вороху на струшувальній дошці або на верхньому решітці (введенням відповідних вихідних даних).

Для оцінки вирівнюючих пристроїв, що встановлюються на деякому віддаленні від початку верхнього решета, а також для оцінки роботи системи очищення з відмінними значеннями коефіцієнтів варіації зернового вороху на початку решета, на видаленні  $X_m$  (або  $X_p$ ) і наприкінці решета, слід застосовувати математичну модель сепарації.

Для реалізації математичної моделі сепарації за зазначених умов у середовищі Mathcad розроблено програму для ПК «Математична модель сепарації зернового вороху».

Вихідними даними є технологічні та конструктивні параметри системи очищення, а також коефіцієнти варіації товщини шару зернового вороху на

початку, наприкінці верхнього решета і, за наявності пристрою, що вирівнює, на видаленні  $X_m$  від початку решета. Програма також дозволяє оцінити втрати зерна за системою очищення за відсутності пристроїв, що вирівнюють, але при нерівномірному розподілі зернового вороху на верхньому решітці (введенням параметра  $X_p$ ). У програмі розраховується коефіцієнт сепарації зернового вороху, визначається кількість ділянок для розрахунку, величина зміни коефіцієнта варіації на дільницях. Втрати зерна розраховуються за моделлю сепарації зернового вороху залежно від значення параметра  $X_m$  або  $X_p$ . Програма виводить графік зміни коефіцієнта варіації товщини шару зернового вороху по довжині решета.

#### **3.4. Аналіз роботи системи очищення з використанням моделі сепарації зернового вороху**

Як було зазначено раніше, поздовжні перегородки, встановлені на струшувальній дошці та верхньому решеті, повинні запобігати зміщенню зернового вороху у бік ухилу. Припустимо, що зерновий ворох надходить на струшувальну дошку з МСУ та СГВ рівномірно. Аналіз роботи системи очищення, виконаний за допомогою програми «Розрахунок параметрів системи очищення при поперечному крені зернозбирального комбайна», показав, що при подачі зернового вороху 2,9 кг/с (подача хлібної маси в молотарку дорівнює 5,0 кг/с) збільшення кількості поздовжніх гребінок, які мають висоту 0,05 м, не призводить до покращення роботи системи очищення (рис. 3.8).

Оцінимо втрати зерна за очищенням та розподіл зернового вороху на гуркоті при поперечному нахилі зернозбирального комбайна із шириною молотарки 1200 мм. Розрахунки проведені за наступних параметрів: ширина струшувальної дошки  $B_T = 1,0$  м; кількість поздовжніх гребінок на струшувальній дошці 2 шт; висота поздовжніх гребінок на струшувальній дошці 0,05 м; ширина верхнього решета  $B_P = 1,1$  м;  $L_p = 1,3$  м; кількість поздовжніх перегородок на верхньому решеті 3 шт; висота поздовжніх перегородок на верхньому решеті 0,05 м;  $C = 30\%$ ;  $\mu_{p0} = 5,1 \text{ м}^{-1}$ .

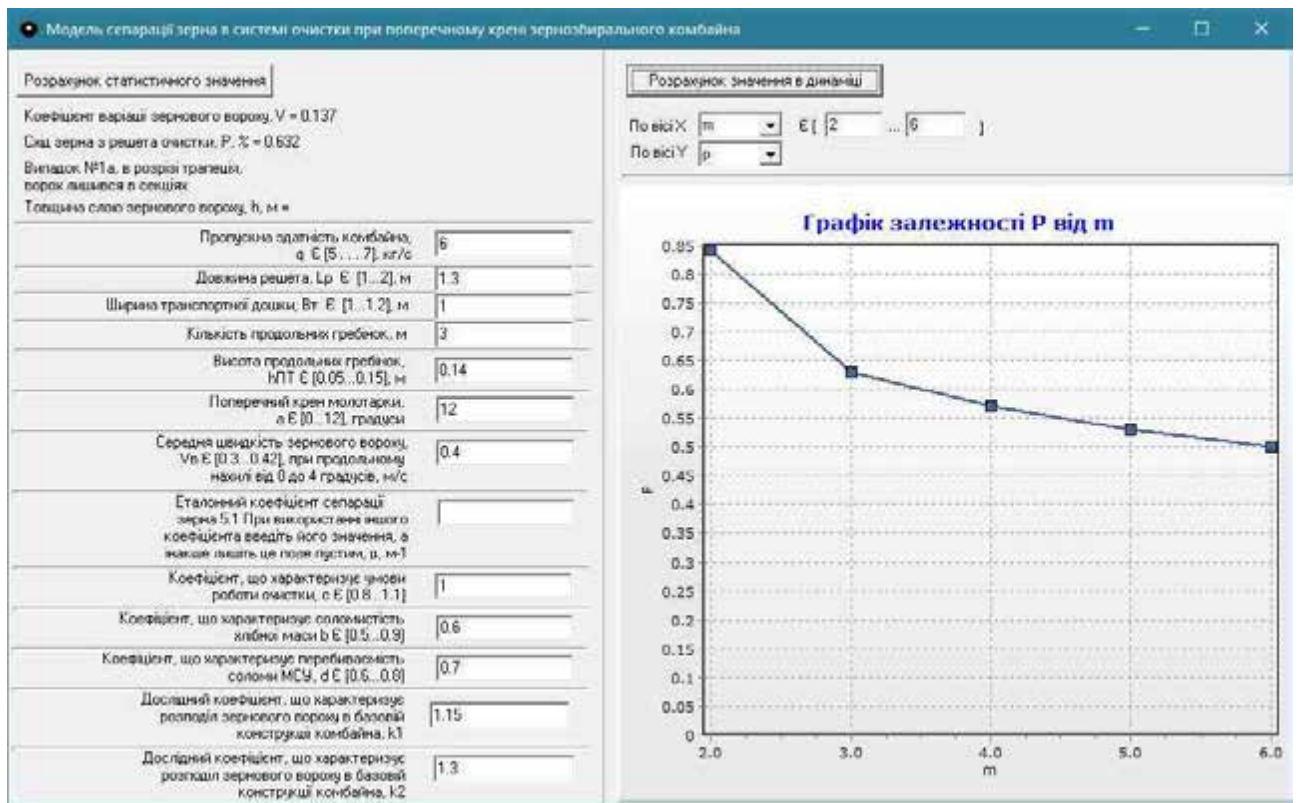


Рис. 3.8 – Робоче вікно програми з результатами розрахунку ( $\alpha_K = 8^\circ$ )



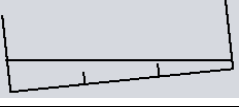






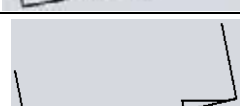
Приймемо, що на верхнє решето зерновий купа надходить з нерівномірністю, придбаной на струшувальній дошці. Коефіцієнти варіації товщини шару зернового вороху на початку  $V_{hn}$  і в кінці  $V_{hk}$  верхнього решета і від розподілу зернового вороху при зернозбирального комбайна», а втрати зерна – за програмою для ПК «Математична модель сепарації зернового вороху».

З збільшенням кута  $\alpha_K$ , як і очікувалося, розподіл зернового вороху на решеті погіршується (таблиця 3.1), причому при нахилі решета більше  $8^\circ$  перетин зернового вороху в секції має вигляд трикутника. Це призводить до нераціонального витрати повітряного потоку. Середній коефіцієнт варіації зернового вороху з зростанням  $\alpha_K$  також збільшується, як і втрати зерна за системою очищення.

Подача зернового вороху також впливає з його розподіл на верхньому решеті, причому наприкінці решета, зі зростанням подачі, коефіцієнт варіації товщини шару зернового вороху спочатку збільшується, та був знижується, що впливає коефіцієнт  $z$ , характеризує умови роботи системи очищення, на

коефіцієнт сепарації зерна2 втрати .

Таблиця 3.1 - Теоретичні значення коефіцієнтів варіації товщини шару зернового вороху на верхньому решеті та втрат зерна ( $q_B = 2,9 \text{ кг/с}$ )

$\alpha_K, ^\circ$	Кінець струшувальної дошки		Кінець решета		$V_{hCP}$	$P_{вирт}, \%$
	Вид розподілу	$V_{hn}$	Вид розподілу	$V_{hk}$		
4		0,230		0,292	0,261	0,40
6		0,345		0,423	0,384	0,76
8		0,462		0,519	0,491	1,25
10		0,579		0,619	0,599	1,96
12		0,684		0,718	0,701	2,87

При подачі хлібної маси в молотарку 6,0 кг/с і установці двох перегородок, зерновий ворох не зміщується у бік ухилу при їх висоті 0,14 м. При встановленні трьох перегородок, що ділять стречну дошку на чотири доріжки, що відповідає конфігурації верхнього грата зернозбирального комбайна третього класу, висота перегородок може бути зменшена до 0,13 м, при якій зерновий ворох не переходить у сусідню секцію.

При граничному куті поперечного нахилу  $12^\circ$  та подачі хлібної маси в молотарку 6,0 кг/с висота поздовжніх перегородок має бути більшою (рис. 3.9). Зерновий ворох не перекидається в сусідню секцію при висоті поздовжніх перегородок 0,14 м.

Таблиця 3.2 - Теоретичні значення коефіцієнтів варіації товщини шару

зернового вороху на верхньому решеті та втрат зерна ( $\alpha_K = 8^\circ$ )

$q_B$ , кг/с	Кінець струшувальної дошки		Кінець решета		$V_{hCP}$	$h_B$ , м	$P_{вум}$ , %
	Вид розподілу	$V_{hn}$	Вид розподілу	$V_{hk}$			
1,5		0,594		0,474	0,534	0,039	0,64
2,2		0,552		0,559	0,556	0,057	0,69
2,9		0,462		0,519	0,491	0,075	1,25
3,6		0,372		0,473	0,422	0,094	2,66
4,3		0,312		0,396	0,354	0,112	4,95

Також проведено аналіз розподілу зернового вороху для зернозбиральних комбайнів четвертого класу (подача хлібної маси 7,5 кг/с, ширина молотарки 1200 мм) та п'ятого класу (подача хлібної маси 9,0 кг/с, ширина молотарки 1500 мм).

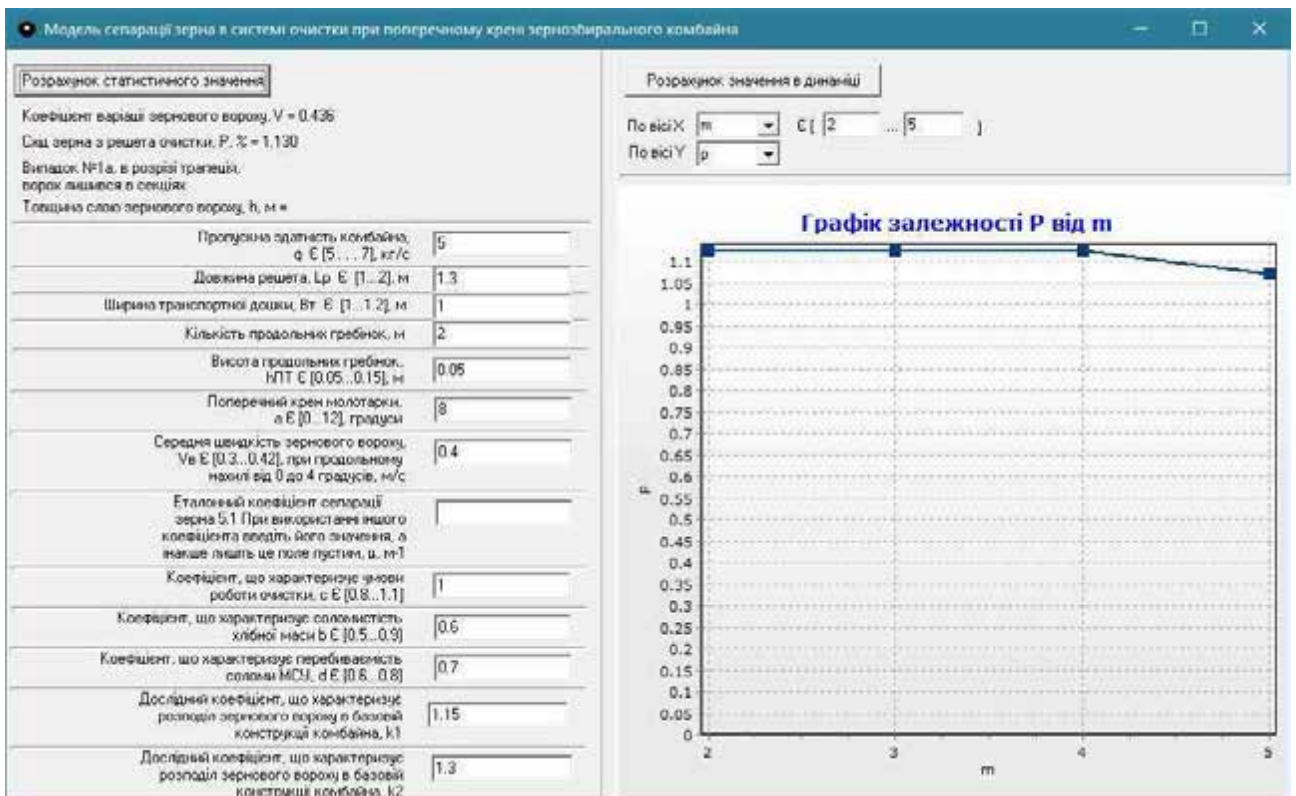


Рис. 3.9 - Робоче вікно програми з результатами розрахунку ( $\alpha_K = 12^\circ$ )

Встановлено, що кількість та висота перегородок, при яких купа не перекидається в сусідню секцію при поперечному крені комбайна до  $12^\circ$  рівні: для комбайна четвертого класу – три перегородки заввишки 0,17 м; для комбайна п'ятого класу – п'ять перегородок заввишки 0,16 м.

## **Висновки**

1. Встановлено залежність довжини ділянки робочого органу (верхнього решета або струшувальної дошки), на якому відбувається зміщення зернового вороху у бік ухилу при поперечному нахилі молотарки, від ширини робочого органу (або секції), кута відхилення вектора швидкості від поздовжнього напрямку і товщини шару зернових.

2. Розроблено методику визначення коефіцієнта варіації товщини шару зернового вороху при поперечному нахилі молотарки комбайна, що враховує ширину робочого органу, подачу зернового вороху, висоту і кількість поздовжніх перегородок, і програма для ПК на її реалізації.

3. Розроблено математичну модель сепарації зернового вороху на верхньому решеті системи очищення при роботі зернозбирального комбайна на схилах, що включає змінний по довжині решета дискретний коефіцієнт варіації товщини шару зернового вороху, та програма для ПК для її реалізації.

4. Виявлено, що кількість та висота поздовжніх перегородок, встановлених на струшувальній дошці, впливають на рівномірність подачі зернового вороху на верхнє решето при поперечному нахилі молотарки. З метою виключення перекидання вороху в сусідні секції струшувальної дошки та підвищення рівномірності подачі вороху по ширині верхнього решета доцільно застосовувати для зернозбиральних комбайнів третього класу - три перегородки заввишки 0,14 см, четвертого класу - три перегородки заввишки 0,1 мм. - п'ять перегородок заввишки 0,16 м-коду.

## **4. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ І ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ КОМБАЙНУ**

### **4.1. Основні вимоги до системи очищення зернозбирального комбайна**

Як було зазначено в першому розділі, відомі пристрої, що забезпечують зниження рівня втрат зерна за системою очищення при збиранні зернових культур на схилах, або недостатньо ефективні, або мають складну конструкцію, яку неможливо застосувати без великих змін конструкції базового зернозбирального комбайна. На основі цього висновку та проведених досліджень, сформулюємо вимоги до системи очищення зернозбирального комбайна, призначеного для роботи на схилах:

1) система очищення, що ускладнює конструкцію зернозбирального комбайна, має підвищувати ефективність збирання зернових культур як на схилах, так і на рівнині;

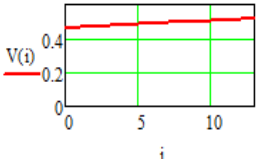
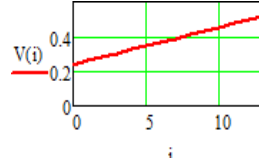
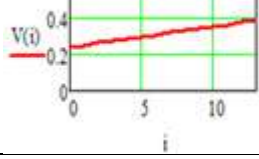
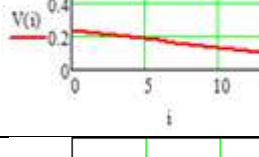
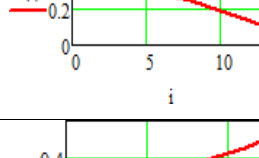
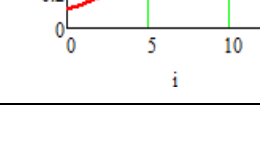
2) пристрій, який застосовується для адаптації роботи системи очищення зернозбирального комбайна на схилах, не повинен значно ускладнювати базову конструкцію комбайна, збільшувати його масу та вартість; мати можливість встановлення у базову конструкцію у вигляді додаткової опції;

3) у рамках агровимог до молотарки зернозбиральних комбайнів при нормованому відношенні зерна до соломи 1:1,5 (рівень втрат зерна 1,5 %, дроблення зерна – 2,0 %, засміченість бункерного зерна – 2,0 %), встановимо допустимий рівень втрат зерна за системою очищення – 0,5 %.

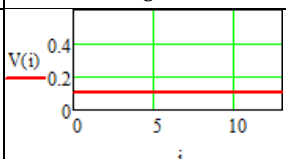
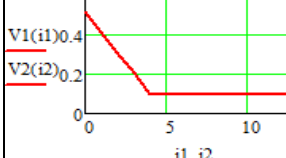
Виконаємо аналіз технологічних операцій, що забезпечують зниження втрат зерна за системою очищення під час роботи зернозбирального комбайна на схилах. Аналіз виконаємо за розробленою моделлю сепарації зернового вороху в системі очищення. Для подальшого порівняння отриманих результатів з експериментальними даними аналіз виконаємо для зернозбирального комбайна третього класу. Кут поперечного нахилу молотарки комбайна -  $8^\circ$ . Параметри базової очистки:  $q_z = 100 \%$ ;  $V_{hm} = 0,462$ ;  $V_{hk} = 0,519$ ; теоретичні втрати зерна  $P_{sum} = 1,25\%$ .

Коефіцієнти варіації товщини шару зернового вороху систем очищення, що виконують досліджувані технологічні операції, прийняті по роботі. Мінімальний коефіцієнт варіації товщини шару зернового вороху прийнято дорівнює 0,1. Результати аналізу наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти технологій сепарації та розподілу зернового вороху, що забезпечують зниження втрат зерна при поперечному нахилі молотарки

Технологічні операції	Вихідні дані				Графік зміни коефіцієнта варіації у перерізах по довжині решета	$P_{вт}$ , % / зниження втрат
	$q_z$ , %	$V_{hn}$	$V_{hk}$	$V_{hx} / X_m$ , м		
1	2	3	4	5	6	7
Попередня сепарація	40	0,462	0,519	-		0,50 / 2,5
Попередня сепарація, зниження нерівномірності подачі на верхнє решето	40	0,237	0,519	-		0,29 / 4,3
Попередня сепарація, зниження нерівномірності подачі на верхнє решето, стабілізація розподілу на верхньому решітці	40	0,237	0,383	-		0,21 / 6,0
Попередня сепарація, зниження нерівномірності подачі на верхнє решето, вирівнювання на верхньому решітці	40	0,237	0,10	-		0,09 / 13,9
Вирівнювання до кінця верхнього ґрату	100	0,462	0,10	-		0,44 / 2,8
Вирівнювання перед верхнім решетом	100	0,10	0,519	-		0,50 / 2,5

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7
Вирівнювання перед верхнім решетом та стабілізація розподілу на верхньому решеті	100	0,10	0,10	-		0,15/8,3
Вирівнювання в передній частині решета та стабілізація розподілу на верхньому решітці	100	0,462	0,10	0,1/0,4		0,23/5,4

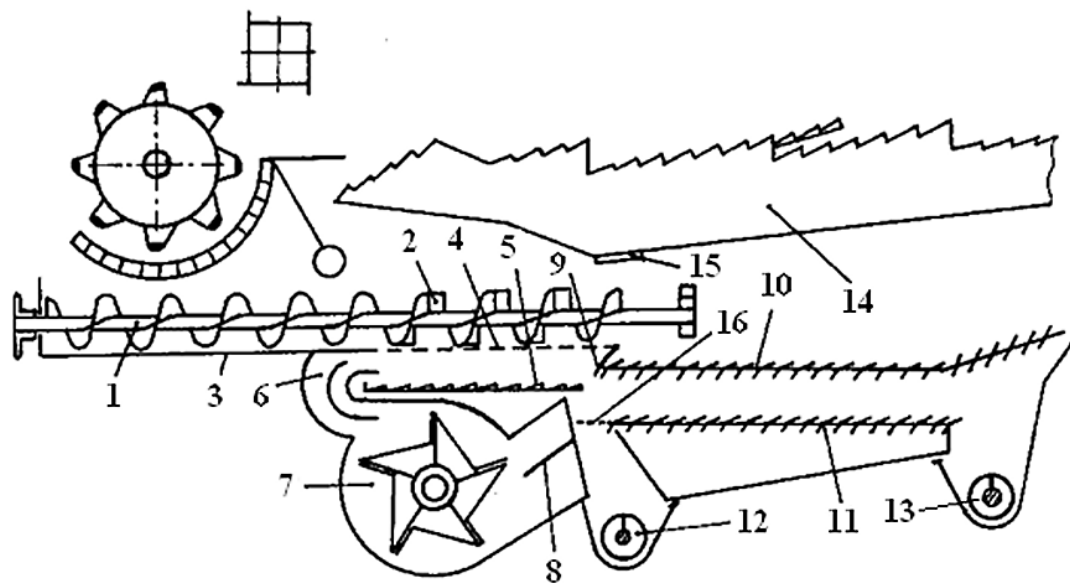
Таким чином, перспективними технологічними операціями, що забезпечують зниження втрат зерна під час роботи комбайна з поперечним креном молотарки є: попередня сепарація зернового вороху; зниження нерівномірності подачі зернового купу на верхнє решето; стабілізація розподілу зернового вороху на верхньому ґраті; вирівнювання зернового вороху на початку та на поверхні верхнього решета.

Найбільший ефект може бути досягнутий при поєднанні перерахованих технологічних операцій - зниження втрат зерна за системою очищення при поперечному крені молотарки більш ніж 5 разів.

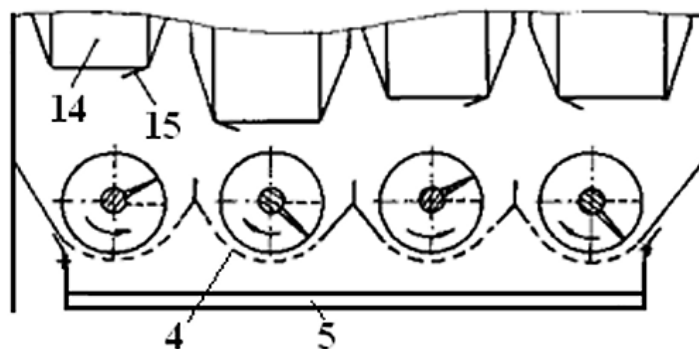
#### 4.2. Попередня сепарація зернового вороха у решітно-гвинтовому сепараторі

Гвинтові транспортери, встановлені замість струшувальної дошки, забезпечують рівномірну подачу зернового вороху на верхнє решето незалежно від поздовжніх нахилів молотарки . Однак відсутність підготовки зернового вороху до розділення (сегрегації зерна) знижує ефективність роботи системи очищення. решітно-гвинтового сепаратора (рис. 4.1).

Решітно-гвинтовий сепаратор встановлений замість струшувальної дошки і містить гвинтові транспортери, що складаються з шнеків 1, з жорстко встановленими на них лопатками 2 і днища 3 з решетом 4 в задній частині, причому лопатки 2 встановлені над решетом 4.



а)



б)

Рис. 4.1 - Принципова схема молотарки зернозбирального комбайна з решітно-гвинтовим сепаратором (а - поздовжній переріз; б - поперечний переріз): 1 - шнек; 2 – лопатка; 3 – днище; 4 – циліндричне решето; 5 - укорочена струшувальна дошка; 6 – додатковий патрубок вентилятора; 7 – вентилятор; 8 – направник повітря; 9 – еластичний екран; 10, 11 - верхнє та нижнє решета; 12, 13 - зерновий та колосовий шнеки; 14 - клавіша соломотрясу; 15 - скатна пластина; 16 - надставка

Шнеки 2 встановлені по черзі з правої та лівої навивками гвинтових поверхонь. Під решетом 4 встановлена укорочена струшувальна дошка 5. Вентилятор 6 забезпечений додатковим патрубком 7 та направником повітря 8, встановленим в основному патрубку. У повітряній камері, обмеженій решетом 4

і укороченою струшувальною дошкою 5, в задній частині встановлений еластичний екран 9, призначений для направлення повітряного потоку через отвори решета 4. У вікнах клавіш соломотрясу встановлені скатні пластини 15. Нижнє решето 11 постачене над.

У пропонованій системі очищення попередня сепарація зернового вороху, що надходить з молотильно-сепаруючого пристрою, відбувається за рахунок впливу повітряного потоку і лопаток 2, встановлених на шнеках 1. У місці надходження зернового вороху з дна клавіш соломотрясу на клавішах встановлені скатні пластини 15, направляючі зерно шнеках у цьому місці лопатки не встановлені.

Нижнє решето пропонованої системи очищення, в порівнянні з базовою конструкцією, в силу рішення компоновання більш завантажене зерновим купою. Тому в основному патрубку вентилятора встановлений направник 8, повітряний потік, що розподіляє між верхнім 10 і нижнім 11 ґратами очищення.

Для визначення параметрів системи очищення були проведені теоретичні та експериментальні дослідження решітно-гвинтового сепаратора (РГС) та всієї системи очищення, представлені в кандидатській дисертації автора. Виявлено параметри РГС та експериментальної системи очищення для зернозбирального комбайна третього класу: «Решотно-гвинтовий сепаратор... доцільно виконати із чотирьох шнеків діаметром та кроком 0,15 м, із частотою обертання шнеків  $330 \text{ хв}^{-1}$ . Діаметр отворів решета 12 мм, ширина лопаток 60 мм, крок лопаток 100 мм, швидкість повітряного потоку на решеті 3,7 м/с. Обґрунтовано конструкцію дворукавного відцентрового вентилятора. Регульовальні параметри запропонованого очищення при вмісті соломистих домішок у бункерному зерні 2%: частота обертання вентилятора  $660 \text{ хв}^{-1}$ ; відношення відстані від дна патрубка до направляючої до висоти патрубка вентилятора 0,3; зазори між жалюзі верхнього решета 12,5 мм, нижнього - 9,5 мм».

Проведені лабораторні та лабораторно-польові випробування системи очищення з решітно-гвинтовим сепаратором показали перевагу запропонованого очищення в порівнянні з еталонною (системою очищення зернозбирального

комбайна третього класу «Скіф-230») за рівня втрат зерна 0,5 % вище еталонної в 1,27 рази»; «Лабораторнопольовими випробуваннями встановлено, що за наведеної подачі хлібної маси 5,0 кг/с втрати вільним зерном і недомолотом за еталонною очисткою становили 0,41 %, а й за експериментальної - 0,22 %»; «Втрати вільним зерном у полові у серійного очищення вищі, ніж у експериментальної: при подачі 3 кг/с у 4,8 рази; при подачі 5,5 кг/с у 3,4 рази; при подачі 6,5 кг/с у 2 рази».

Також проведено лабораторні випробування системи очищення з решітно-гвинтовим сепаратором при поперечному нахилі молотарки  $8^\circ$ , які показали, що «попереднє поділ зернового вороху в решітно-гвинтовому сепараторі сприяє зниженню втрат зерна. Втрати зерна становили 0,82 %, а вміст домішок у бункерному зерні - 1,87 %. При зниженні подачі зернового вороху втрати зерна також зменшуються, а пропускна спроможність експериментального очищення склала 2,39 кг/с, тобто в 1,48 рази вище за еталонну».

Встановлення у решітно-гвинтовий сепаратор гребінки замість лопаток дозволить підвищити ефективність поділу зернового вороху (рис. 4.2, а).

Елементи гребінки виконані криволінійними, увігнутою частиною зверненою у бік обертання шнека (рис. 4.2 б), причому форма гребінки забезпечує рівноможливе переміщення зернового вороху при сході з гребінки. Таке виконання пристроїв, що перемішують, забезпечує прохід зерна крізь гребінку і його надходження на решето сепаратора, а соломиста частина вороха сходять пізніше з гребінки, а саме відбувається попередній поділ зернового вороху. У пристрої елементи гребінки виконані у вигляді сходів, спрямованих від осі шнека до периферії в бік, протилежну обертанню шнека, з можливістю струшування вороху при його переміщенні по гребінці, що забезпечує підвищення.

Крок елементів гребінки визначений із умови проходу зерна крізь гребінку. Так як найбільшу довжину мають зерна вівса (довжина до 18,6 мм), то, виходячи з припущення, що зернівка пройде через гребінку за відсутності торкання з двома сусідніми елементами, крок елементів гребінки встановили рівним 20 мм, при цьому при діаметрі елемента 5 мм, відстань.

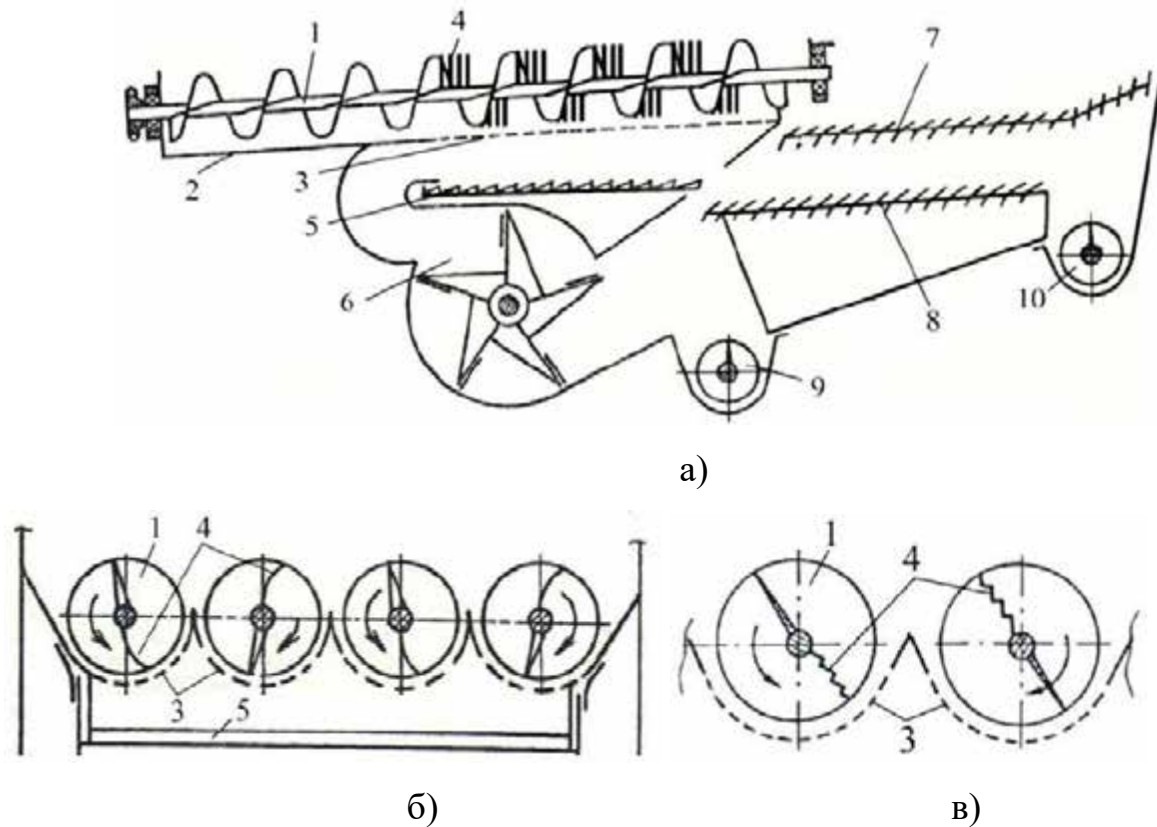


Рис. 4.2 - Схема системи очищення з решітно-гвинтовим сепаратором з гребінками (а - поздовжній переріз; б - поперечний переріз сепаратора; в - поперечний переріз сепаратора):

1 – шнек; 2 – днище; 3 – циліндричне решето; 4 - гребінка; 5 - укорочена струшувальна дошка; 6 – вентилятор; 7, 8 - верхнє та нижнє решета; 9, 10 - зерновий та колосовий шнеки

Імовірність проходу компонентів зернового вороху крізь гребінку дорівнює

$$P_{\text{ПП}} = 1 - P_{2+n} \quad (4.1)$$

де  $P_{2+n}$  - ймовірність перетину частинки довжиною  $2l$  двох і більше паралельних прямих з кроком  $2a_1$  дорівнює

$$P_{\text{ПП}} = \frac{2l}{\pi a_1} \left( \frac{a_1}{l} \left( \arcsin \frac{a_1}{l} - \arcsin \frac{2a_1}{l} + \frac{\pi}{2} \right) + \sqrt{1 - \frac{a_1^2}{l^2}} - \sqrt{1 - \frac{4a_1^2}{l^2}} \right) \quad (4.2)$$

при  $a_1 < l < 2a_1$

$$P_2 = \frac{2l}{\pi a_1} \left( \sqrt{1 - \frac{a_1^2}{l^2}} - \frac{a_1}{l} \arccos \frac{a_1}{l} \right) \quad (4.3)$$

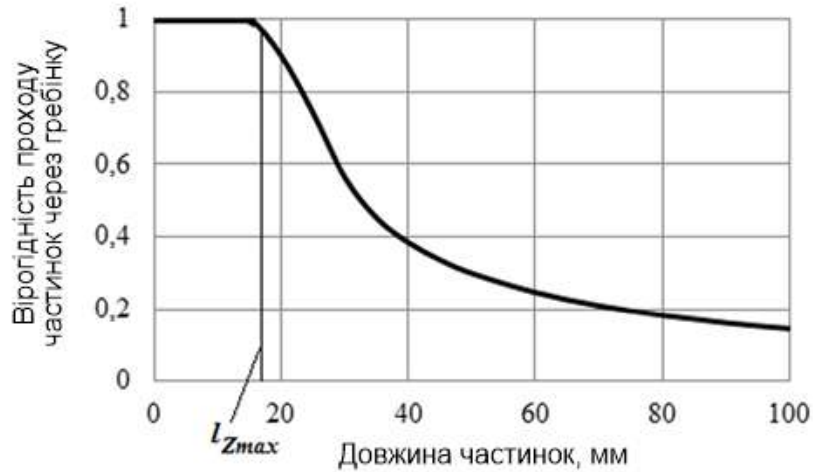


Рис. 4.3 - Поділ компонентів зернового вороху на гребінці ( $L_{zmax}$  - максимальна довжина насіння зернових культур)

Розрахунки показали (рис 4.3), що при вибраному кроку елементів гребінки, насіння зернових культур (пшениці, жита, ячменю, вівса) проходять крізь гребінку, а соломисті частинки, мають довжину від 20 до 100 мм, сходять з гребінки, що інтенсифікує сепарацію зерна у решітно-гвинтовому сепараторі.

Розрахунок осьової складової абсолютної швидкості частки при  $v_s = 0^\circ$  проведений при параметрах, значення яких обґрунтовані в роботі:  $U=3,7\text{ м/с}$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $R_s=0,075\text{ м}$ ; крок гвинтової поверхні  $S_s=0,15\text{ м}$ . Параметри зернового вороху:  $U_s=5,0\text{ м/с}$ ; коефіцієнт тертя вороха про спіраль шнека  $f_B=0,4$ ;  $f_{IP}=0,81$ . Розрахунок проведений у програмі Mathcad при різній частоті обертання шнека та кутах поздовжнього нахилу комбайна в інтервалі до  $10^\circ$  під час руху комбайна вниз і вгору схилом (рис. 4.4).

Як видно з представленою малюнка, значення осьової швидкості зернового вороху при русі комбайна вгору або вниз схилом відрізняються від значення швидкості при відсутності поздовжнього нахилу менше в порівнянні з рухом зернового вороху по жалюзійному решітці. При рекомендованій частоті

обертання шнека  $330 \text{ хв}^{-1}$  під час руху комбайна вгору схилом зміна кута поздовжнього нахилу від  $0$  до  $10^\circ$  призводить до збільшення швидкості зернового вороху з  $0,72$  до  $0,76 \text{ м/с}$ , а саме на  $5,6 \%$  (на жалюзійних решітках за тих самих умов швидкість збільшується на  $16,3 \%$ ), а під час руху вниз - зменшується до  $0,68 \text{ м/с}$ , а саме на  $5,6\%$  (на жалюзійних ґратах швидкість зменшується на  $4,7\%$ ).

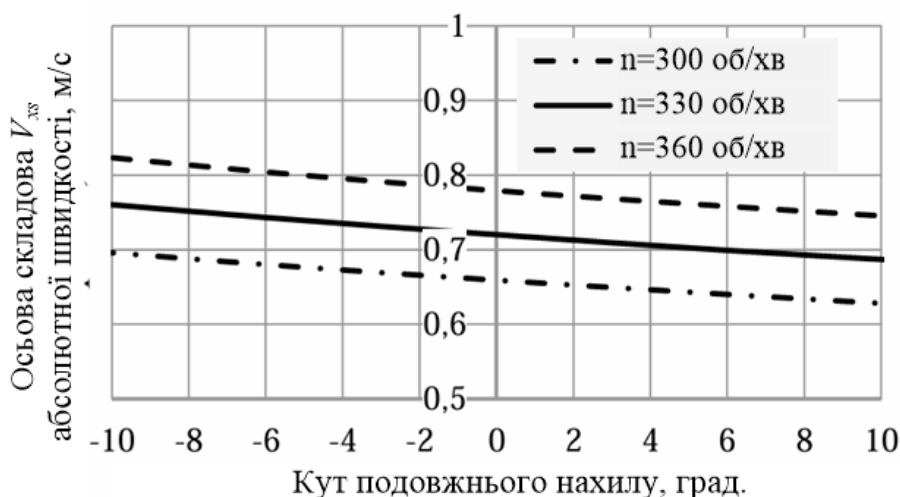


Рис. 4.4 - Результати розрахунку осьової складової абсолютної швидкості частинки (негативні значення кута поздовжнього нахилу - рух комбайна вгору схилом, негативні - вниз)

Таким чином, застосування решітно-гвинтового сепаратора в конструкції зернозбирального комбайна сприяє рівномірному за часом подачі зернового вороху в систему очищення при збиранні зернових культур при русі зернозбирального комбайна вгору схилом.

Розглянемо розподіл зернового вороху, що надходить на верхнє решето системи очищення з решета сепаратора. Як було зазначено раніше, скатні пластини 15 (див. рис. 4.1), встановлені на клавішах соломотрясу, направляють зернову купу на незайняту купою частина решета, причому на шнеках в цьому місці пристрої не встановлені.

Під дією гвинтової поверхні зерновий ворох зміщується у бік обертання шнека на кут  $\nu_s$ . Розрахунковий коефіцієнт варіації зернового вороху при сході

з решета РГС при поперечному нахилі молотарки  $8^\circ$  і подачі  $2,9$  кг/с дорівнює  $0,237$ , але на верхньому решете зерновий оберемок зміщується у бік ухилу. Розрахунковий коефіцієнт варіації товщини шару зернового вороху наприкінці верхнього решета дорівнює  $0,519$ , що призводить до збільшення середнього коефіцієнта варіації до  $0,378$  (тобто менше, порівняно з базовим очищенням, в  $1,3$  рази).

Таким чином, у системі очищення з решітно-гвинтовим сепаратором покращується розподіл зернового вороху, що надходить на верхнє решето. Враховуючи, що відбувається попередня сепарація зернового вороху, поєднання зазначених факторів сприяє підвищенню ефективності роботи системи очищення при роботі комбайна на схилах з поперечним і поздовжнім нахилом молотарки.

#### 4.3. Стабілізація розподілу зернового вороху на верхньому решеті

Технологічною операцією, що дозволяє знизити втрати зерна за системою очищення при роботі комбайна на схилах, є стабілізація розподілу зернового вороху на верхньому решеті шляхом вирівнювання решета (або його частини) щодо горизонту. Цей напрямок реалізовано в конструкції двосекційного верхнього решета з (рис. 4.5), в конструкції самовстановлюваного верхнього решета (рис. 4.6) і в очищенні з вирівнювання (рис. 4.7).

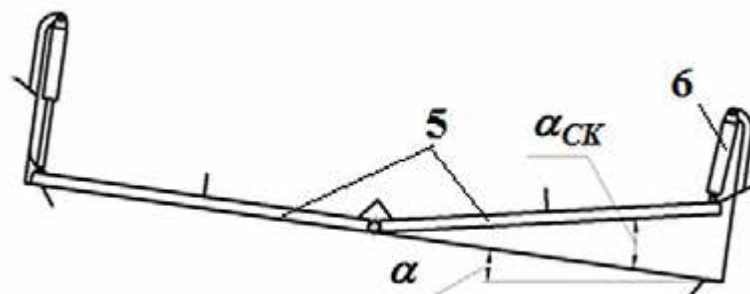


Рис. 4.5 - Очищення з двосекційним решетом: 1 - секції верхньої решітки; 2 - гідроциліндр

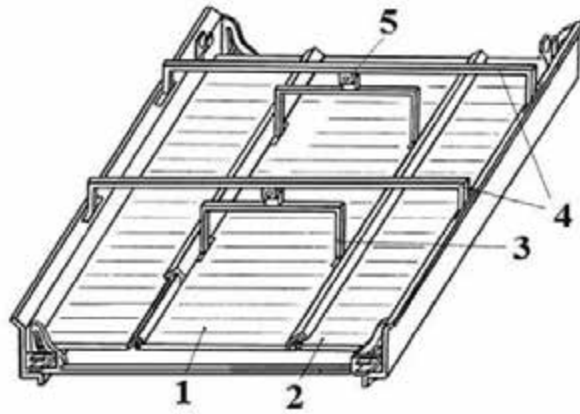
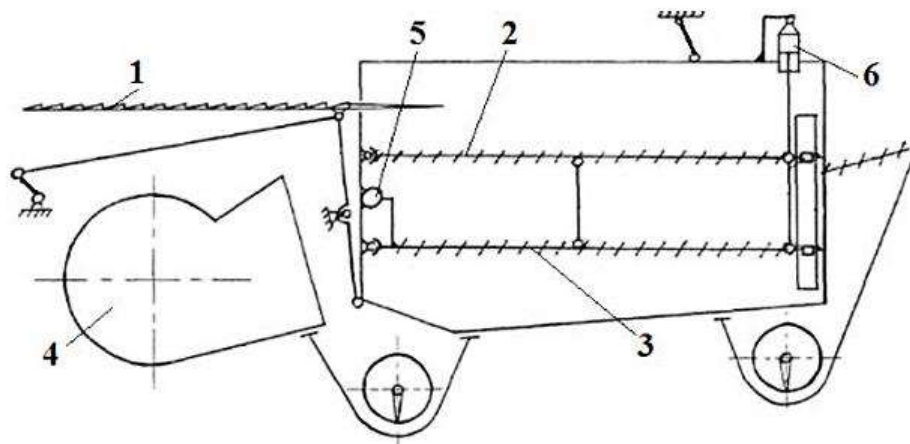
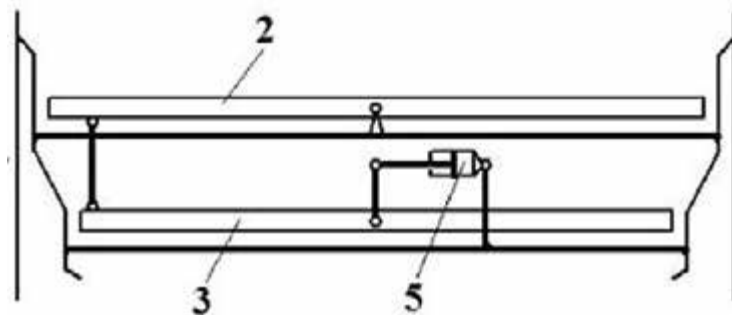


Рис. 4.6 - Очищення із самовстановлюваним решетом: 1 - середня секція решета; 2 – крайня секція решета; 3 – підвіска; 4 – поперечні балки; 5 - шарнір з компенсуючим механізмом



а)



б)

Рис. 4.7 - Очищення з вирівнюванням вирішує в поперечній та поздовжній площинах: а - поздовжній переріз; б – поперечний переріз; 1 – струшувальна дошка; 2 – верхнє решето; 3 – нижнє решето; 4 – вентилятор; 5 - гідроциліндр поперечного вирівнювання решіт; 6 - гідроциліндр поздовжнього вирівнювання решіт

Так як зерновий ворох при поперечному нахилі молотарки зміщується у бік ухилу, то застосування двосекційного решета, конструкція якого дозволяє змінювати нахил секцій, дозволить зменшити нерівномірність розподілу зернового вороху. На початок решета зерновий ворох надходить із струшувальної дошки, тому припустимо, що на початку решета розподіл такий самий, як у базовому очищенні. При  $\alpha_K = 8^\circ$ ,  $q_B = 2,9$  кг/с розрахунковий коефіцієнт варіації вороху на початку решета  $V_{hm} = 0,462$ , а при встановленні нижньої секції під кутом  $\alpha_{СК} = 12^\circ$  (див. рис. 4.5), що запобігає зміщенню зернового вороху у бік ухилу, коефіцієнт варіації в кінці решета  $V_{hk} = 0,383$ , причому середній коефіцієнт дорівнює  $V_{hCP} = 0,423$ . Таким чином, застосування двосекційної решітки незначно (в 1,16 рази) зменшує середній коефіцієнт варіації товщини шару вороху в порівнянні з базовим очищенням (середнє значення коефіцієнта варіації 0,491). Однак, як зазначено в главі 2, хоча нахил секції решета в поперечному напрямку в бік, протилежний ухилу, знижує інтенсивність зміщення зернового вороху в бік ухилу, але повітряний потік і коливання решета в поздовжньому напрямку сприяють зазначеному зсуву, що знижує ефективність роботи запропонованого пристрою.

Застосування самовстановлювального решета, крайнє положення якого в поперечному перерізі обмежено нахилом його поверхні щодо молотарки в  $6^\circ$ , також не може значно знизити коефіцієнт варіації вороху до кінця решета через повітряного потоку і коливань решета, напрямки яких не змінилися щодо молотарки. а середній коефіцієнт варіації дорівнює 0,462, а саме нижче, ніж у базової очищенні, в 1,06 рази.

Вирівнювання всієї поверхні решета щодо лінії горизонту досягається у іншому пристрої. Застосування пропонованого пристрою ускладнює конструкцію комбайна і для ефективної роботи системи очищення необхідно встановити перед решетом вирівнювачів вороху. Припустимо, що розподіл зернового вороху на початку решета такий самий, як і серійної очищенні, так як  $V_{hm} = 0,462$ . На рух зернового вороху по решітці так само, як і в попередніх випадках, впливають напрям повітряного потоку і напрям коливань решета.

Тому для очищення, що розглядається, велике значення має розподіл зернового вороху на початку решета. Припустимо, що й у разі коефіцієнт варіації товщини зернового вороху постійний по всій довжині решета, тобто. середній коефіцієнт дорівнює 0,462.

Таким чином, застосування пристроїв, що вирівнюють верхнє решето (або його частина) щодо горизонту, знижує нерівномірність розподілу зернового вороху на верхньому решітці, проте нерівномірна його подача не дозволить досягти значного підвищення ефективності роботи системи очищення при поперечному нахилі молотарки .

Як було зазначено раніше, збільшення висоти та кількості поздовжніх перегородок, встановлених на струшувальній дошці, сприяє покращенню розподілу зернового вороху, що надходить на верхнє решето, що доцільно застосовувати для пропонованих технічних рішень. Установка на струшувальній дошці двох поздовжніх перегородок заввишки 130 мм виключає перерозподіл зернового вороху між секціями, при цьому необхідно враховувати велике завантаження нижньої секції по відношенню до ухилу.

Коефіцієнт варіації вороху на початку решета (при  $\alpha_K = 8^\circ$  і  $q_B = 2,9$  кг/с) знизився до  $V_{hm} = 0,223$ . При встановленні трьох перегородок висотою 130 мм з урахуванням більшого завантаження нижньої секції коефіцієнт варіації зернового вороху наприкінці решета  $V_{hk} = 0,243$ .

Попередня сепарація зернового вороху, зниження нерівномірності подачі на верхнє решето і стабілізація розподілу зернового вороху на верхньому решітці відбуваються в комбінованих системах очищення з РГС і з двосекційним верхнім решетом і з РГС і верхнім верхнім решетом. При оптимальних параметрах РГС (діаметр отворів решета 12 мм, ширина лопаток 60 мм, швидкість повітряного потоку 3,7 м/с) схід зерна з решета сепаратора вбирається у 10,0 %. Таким чином, на початок верхнього решета, враховуючи зерно, що надходить із соломотрясу, надходить близько 40% від усього зерна, що надходить на очищення. У таблиці 4.2 наведено результати розрахунку коефіцієнтів варіації товщини шару зернового вороху і втрат зерна для розглянутих схем очищення. Втрати зерна

розраховувалися за моделлю сепарації.

Таблиця 4.2 - Результати розрахунку

Найменування очищення	$V_{hn}$	$V_{hk}$	$V_{hCP}$	$P_{вип}, \%$
ПРО із двосекційним решетом	0,462	0,383	0,422	0,92
ПРО з самовстановлюваним решетом	0,462	0,462	0,462	1,10
ПРО з трьома поздовжніми перегородками на струшувальній дошці висотою 130 мм та двосекційним решетом	0,243	0,383	0,313	0,53
ПРО з двома поздовжніми перегородками на струшувальній дошці висотою 130 мм і решетом, що самовстановлюється.	0,223	0,223	0,223	0,33
Очищення з РГС та двосекційним решетом	0,237	0,383	0,310	0,21
Очищення з РГС та самовстановлюваним решетом	0,237	0,237	0,237	0,14

Таким чином, з очисток, що розглядаються, найбільш ефективні комбіновані очищення: з РГС і двосекційним решетом; з РГС та самовстановлюваним решетом.

#### **4.4. Вирівнювання товщини шару зернового вороху додатковими коливаннями решета в поперечному напрямку**

Вирівнювання товщини шару зернового вороху забезпечується коливаннями решета в поперечному напрямку (при русі до кінця решета - рух у бік, протилежний ухилу). Для визначення необхідної швидкості руху зернового вороху в поперечному напрямку по верхньому решіті, що здійснює поздовжні і поперечні коливання, в роботі розглянуто переміщення елементарного шару вороха, що контактує з поверхнею решета. Однак внаслідок хаотичності розташування компонентів зернового вороху доцільно розглядати зміну поперечного перерізу вороху за рахунок переміщення порції зернового вороху за один період коливань решета. Зазначена порція залежить від поперечного кута нахилу молотарки, напрямку переміщення зернового вороху щодо поздовжньої осі молотарки, ширини решета, товщини зернового вороху. Виходячи з цього,

перетворюючи залежність (3.6), визначимо необхідний кут напрямку переміщення зернового вороху щодо осі X

$$\varepsilon_T = \arctg \left[ \frac{B^2}{8h_B} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{X_p} \right] \quad (4.8)$$

Результати розрахунку для зернозбирального комбайна при ширині решета  $B=1,1$  м, довжині решета  $L_p = 1,0$  м (без подовжувача верхнього решета), прийнятої товщини шару зернового вороху, що контактує з поверхнею решета  $h_B = 0,035$  м, наведені в таблиці 4.3. Амплітуда коливань решета в поперечному напрямку, що забезпечує переміщення шару зернового вороху, контактуючого з решетом, під заданим кутом, визначено апроксимуючим рівнянням.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку

$\alpha, ^\circ$	$\varepsilon_T, ^\circ$	$r_{II}, \text{мм}$
6	24,4	15
8	31,3	20
10	37,3	25

Припустимо, що за рахунок інерційного вирівнювання до кінця решета досягнемо повного вирівнювання товщини шару ( $V_{hm} = 0,462$  і  $V_{hk} = 0$ ). Втрати зерна, розраховані за моделлю сепарації, становитимуть 0,32 %.

Вирівнювання товщини зернового вороху додатковими коливаннями решета в поперечному напрямку з амплітудою  $\Gamma_{II}$  при незмінних коливаннях решета в поздовжньому напрямку (амплітуда коливань  $\Gamma$  постійна) реалізовано в пристроях за патентами.

Інерційний вирівнювач зернового вороху за патентом №2177683 складається з верхнього решітного стану, що включає решето 1, встановлене в каркасі 2 з можливістю переміщень у поперечному напрямку, і приводного валу 3 (рис. 4.8). Зміна напрямку та амплітуди поперечних коливань здійснюється гідроциліндром двосторонньої дії 4, який закріплений на приводному валу, шатуна 5, двоплечого важеля 6 і тяги 7, з'єднаної шарнірно з решетом 1.

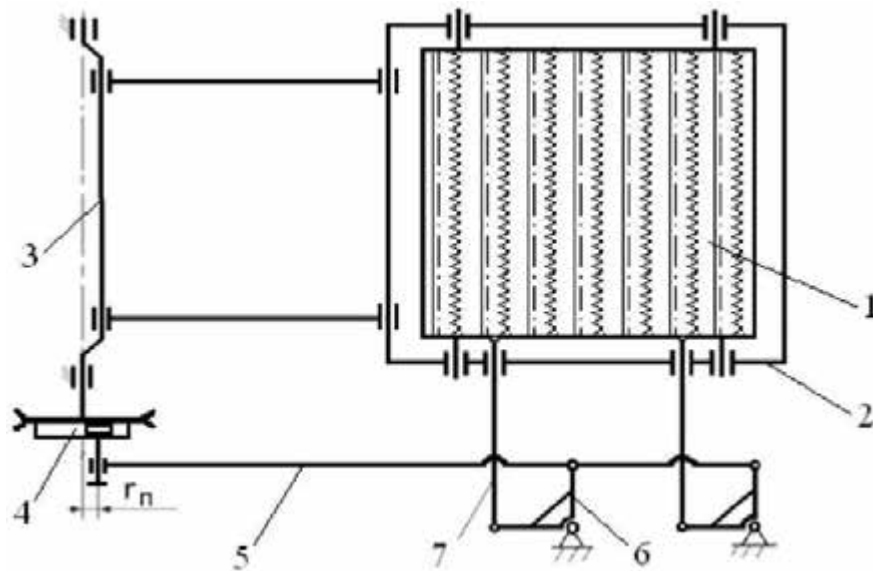


Рис. 4.8 - Схема інерційного вирівнювача зернового вороху

Синхронізація поздовжніх коливань решітного та поперечних коливань решета здійснюється так, що при переміщенні решітного стану від переднього положення до заднього решето 1 переміщається в поперечному напрямку в бік, протилежну ухилу. Це призводить до розподілу зернового вороху по всій поверхні решета.

Вирівнювання товщини шару зернового вороху в решітному стані за патентом досягається також переміщенням решета 1 щодо каркаса 2 у поперечному напрямку (рис. 4.9). Зазначене переміщення досягається двома гідроциліндрами 3 і 4 двосторонньої дії, один з яких встановлений перпендикулярно боковині каркаса і з'єднаний з нею і решетом, а інший встановлений вздовж боковини і з'єднаний з нею і стінкою молотарки, причому гідроциліндри пов'язані між собою за допомогою трубопроводів 5 і гідророзподільника 6. При поперечно (рис. не показані) сигнал передається на шток гідророзподільника 6, який за допомогою трубопроводів з'єднує робочі порожнини гідроциліндра 3 з робочими порожнінами гідроциліндра 4. Причому при нахилу молотарки вправо порожнину «з» гідроциліндра 3 з'єднується з порожниною «е» гідроциліндра 4, а при крені вліво – порожнина «с» з'єднана з порожниною «d». Зазначене з'єднання порожнин гідроциліндрів сприяє переміщенню решета в поперечному напрямку вгору схилом при русі решітного

стану назад. Для перерозподілу робочої рідини між порожнинами гідроциліндрів у перехідних режимах служать запобіжні клапани 7. Амплітуда поперечних коливань у цій конструкції залежить від діаметрів та ходів штоків гідроциліндрів 3 та 4.

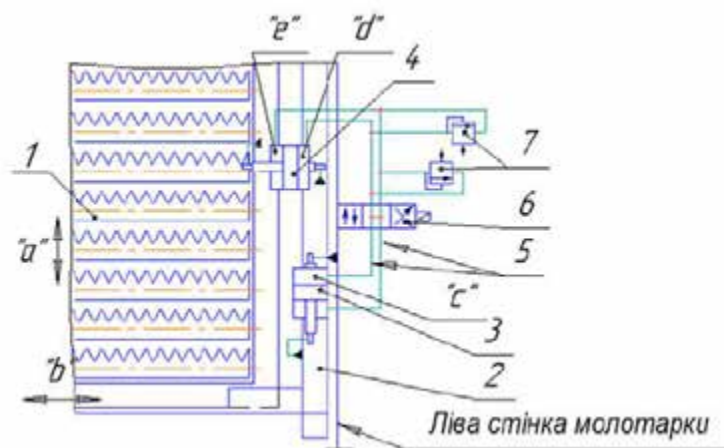


Рис. 4.9 - Схема інерційного вирівнювача зернового вороху (а - коливання решітного стану в поздовжньому напрямку; б - коливання решета в поперечному напрямку; розшифрування позицій у тексті)

#### **4.5. Вирівнювання товщини шару зернового вороху шляхом зміни напрямку коливань решета в горизонтальній площині**

Вирівнювання товщини шару зернового вороху також можна забезпечити зміною напрямку коливань решета в горизонтальній площині, при цьому з'являється поперечна складова коливань, а амплітуда коливань решета в поздовжньому напрямку зменшується.

При зменшенні поздовжньої складової коливань знижується швидкість зернового вороху по решеті в поздовжньому напрямку, тому спосіб доцільно використовувати для вирівнювання зернового вороху перед його надходженням на верхнє решето. Як було зазначено в першому розділі, на пальцевій решітці 3 струшувальної дошки відбувається виділення частини зерна, а решта зернової купи йде сходом з ґрат і надходить на верхнє решето. Таким чином, надавши поперечні коливання пальцевих ґрат, не порушуючи технологічного процесу сепарації зерна, можна вирівняти товщину зернового вороху, що надходить на верхнє решето. Пристрій, що встановлюється замість пальцевих ґрат і

призначений для вирівнювання товщини зернового вороху, названо адаптером для схилів. Для забезпечення сталого руху зернового вороху по поверхні адаптера замість пальців встановлені поздовжні гребінки із соломозачепами (рис. 4.10).

Адаптер для схилів включає решето, що складається з рами 3, до якої жорстко приєднані поздовжні гребінки 4 і пластина 5 з планками 6. Пластина розташовується над дошкою, а поздовжні гребінки - над верхнім решетом. Рама з'єднана зі струшувальною дошкою шатунами 7 і шаровими шарнірами 8, а з молотаркою комбайна - підвісками 9, з'єднаними одними кінцями через шарові шарніри 8 з рамою, а іншими - циліндричними шарнірами 10 з нижніми частинами поворотних важелів 1.

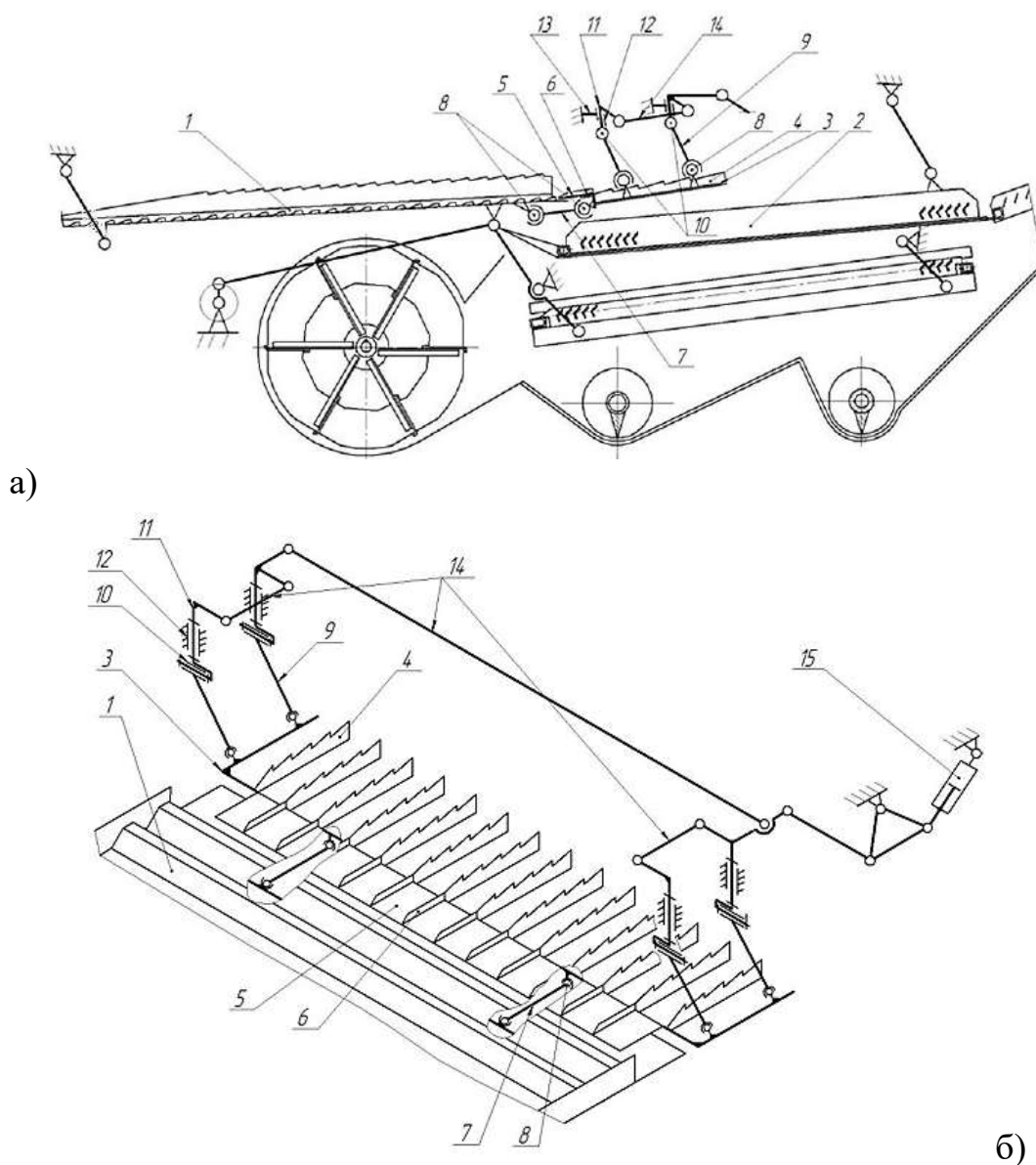


Рис. 4.10 – Схема системи очищення з адаптером

Поворотні важелі з'єднані циліндричними шарнірами 12 з кронштейнами 13, встановленими на молотарці, а між собою з'єднані тягами 14. Один поворотний важіль з'єднаний з пристроєм для зміни напрямку коливань решета, яке може бути виконане з гідравлічним (рис. 4.10).

Коливальний рух рамі 3 передається шатунами 7 від струшувальної дошки при роботі зернозбирального комбайна з поперечним нахилом від датчика нахилу передається сигнал на пристрій для зміни напрямку коливань, поворотні важелі 11 повертаються, що призводить до зміни напрямку коливань від переміщення в поперечному напрямку. гребінки решета, тобто повинна бути фаза польоту.

Для зміни напрямку коливань решета адаптера при поперечному нахилі молотарки комбайна вправо або вліво доцільно застосовувати електричний привід з використанням гвинтового механізму, крокового двигуна, датчика крену, датчиків положення та контролера.

Амплітуда коливань решета в поперечному напрямку має забезпечувати вирівнювання товщини зернового вороху до кінця решета адаптера. Необхідний напрямок переміщення зернового вороху (кут  $\varepsilon_T$ ) визначимо залежно (4.8), прийнявши ширину решета 0,9 м, довжину решета 0,4 м, довжину надставки 0,1 м. Кут  $\nu$  та амплітуду коливань решета адаптера в поперечному напрямку, що забезпечують переміщення шару вороху під заданим кутом, визначимо за графіком. Результати розрахунку зведено до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

$\alpha_K, ^\circ$	$\varepsilon_T, ^\circ$	$\nu, ^\circ$	$A_Y, \text{мм}$
6	16,9	28,1	15
8	22,1	36,8	18
10	27,0	44,9	21

Припустимо, зернова купа, що сходить з решета адаптера (на віддаленні 0,4 м від початку верхнього решета), розподілений по ширині верхнього решета так само, як у базовій конструкції, а в подальшому за рахунок гребінок,

встановлених на верхньому решітці, розподіл вороху зберігається, так як  $V_{hm} = 0,462$ ,  $V_{hx} = 0,091$ ,  $V_{hk} = 0,091$ . Втрати зерна, розраховані за моделлю сепарації, становитимуть 0,21 %.

#### 4.6. Автоматичне регулювання напрямку та амплітуди коливань решета в поперечному напрямку

Для автоматичного регулювання напрямку та амплітуди коливань решета у поперечному напрямку розроблено пристрій, представлений на рис. 4.11.

Система очищення містить решітний стан з решетом 1, встановленим на каркасі 2, який пов'язаний через кульові шарніри 3 і шатуни 4 з приводним валом 5. Решето встановлено на підвісках 6, з'єднаних за допомогою кульових шарнірів 3 з каркасом 2, а циліндричних шарнірів 7 - з нижніми . з'єднані за допомогою циліндричних шарнірів 7 з кронштейнами 9, встановленими на корпусі молотарки, з поперечною 11 і поздовжніми 10 тягами. Під решетом 1 встановлені п'єзодатчики 12, з'єднані проводами 13 з пристроєм, що управляє (контролером) 14.

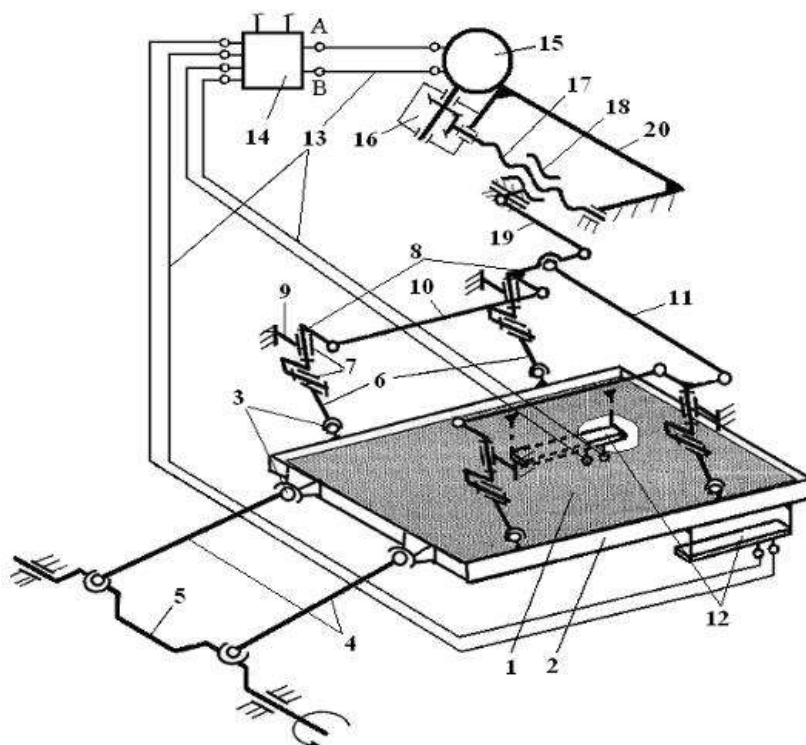


Рис. 4.11 - Схема пристрою для автоматичного регулювання напрямку та амплітуди коливань решета у поперечному напрямку (розшифрування позицій у тексті)

Керуючий пристрій з'єднаний з електродвигуном 15 (наприклад,

кроковим), який за допомогою редуктора 16 з'єднаний з гвинтом 17 гвинтового механізму. Гайка 18 гвинтового механізму має одну міру свободи і шарнірно з'єднана за допомогою тяги 19 з одним з поворотних важелів 8. Гвинт 17 гвинтового механізму встановлений з можливістю обертання в кронштейні 20, встановленим на корпусі молотарки .

Напрямок та амплітуда коливань решета в поперечному напрямку у пристрої змінюються з урахуванням оцінки нерівномірності розподілу зернового вороху, що знаходиться на верхньому решітці. Якщо в одній із стінок молотарки зерновий потік, що пройшов через решето, значно перевищує зерновий потік, що пройшов через решето біля іншої бічної стінки, це свідчить про нерівномірний розподіл зернового вороху на решеті. Вимірювання цих потоків проводиться п'єзодатчиками 12, імпульсні сигнали яких підсумовуються, усереднюються і порівнюються в керуючому пристрої 14. Якщо сигнали від датчиків відрізняються незначно, менше ніж  $\Delta_{ВКЛ}$  (значення цього параметра визначено в розділі 5), то припускаємо, що зерновий куп розподілу на коливань решета оптимальні за даних умов. Якщо сигнал від одного датчика перевищує сигнал від іншого на величину  $\Delta_{ВКЛ}$ , то від пристрою, що управляє, подається напруга на електродвигун. При обертанні валу електродвигуна відбувається переміщення гайки гвинтового механізму, повідця та поворотного механізму, що призводить до зміни напрямку хитання підвісок щодо циліндричних шарнірів поворотних важелів. З'являються поперечні коливання решітного стану, що забезпечують переміщення зернового вороху по решітці у бік, протилежний ухилу. Амплітуда поперечних коливань решета буде збільшуватися доти, поки сигнали від п'єзодатчиків не відрізнятимуться один від одного незначно (не більше величини  $\Delta_{ВКЛ}$ ) або амплітуда коливань решета не досягне граничного значення.

## **5 . ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ РЕЗУЛЬТАТИ**

### **5.1. Програма експериментальних досліджень**

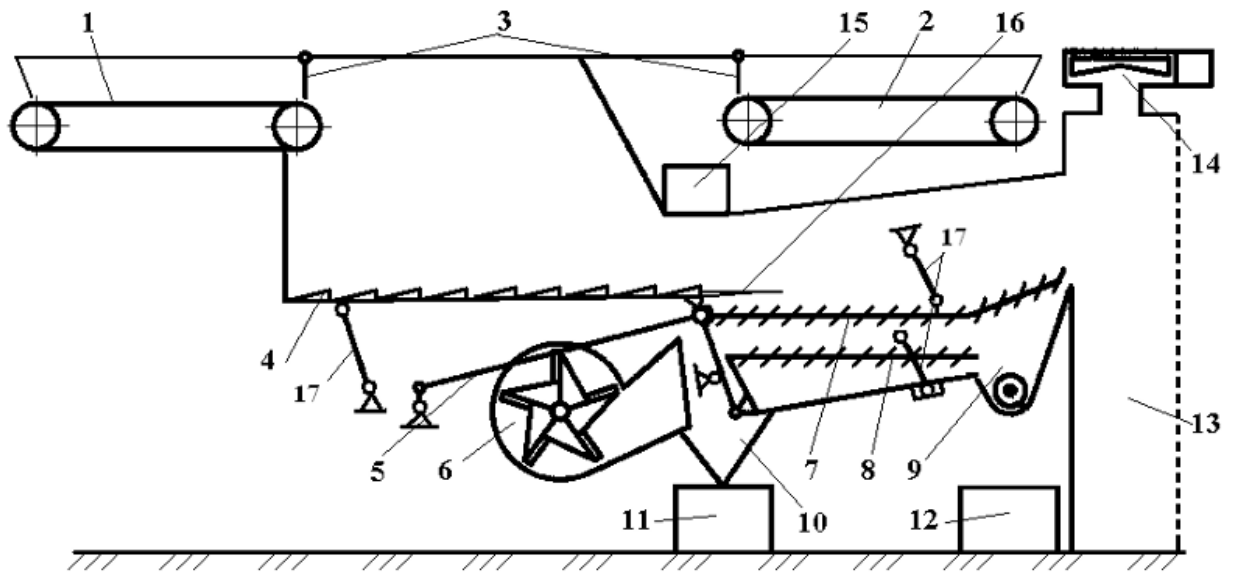
Програмою експериментальних досліджень передбачено:

- дослідити роботу повітряно-решітного очищення в умовах роботи зернозбирального комбайна на схилах;
- підтвердити одержані теоретичні залежності;
- визначити параметри та якісні показники функціонування розроблених систем очищення зернозбирального комбайна;
- провести порівняльні лабораторні та лабораторно-польові випробування розроблених систем очищення зернозбирального комбайна.

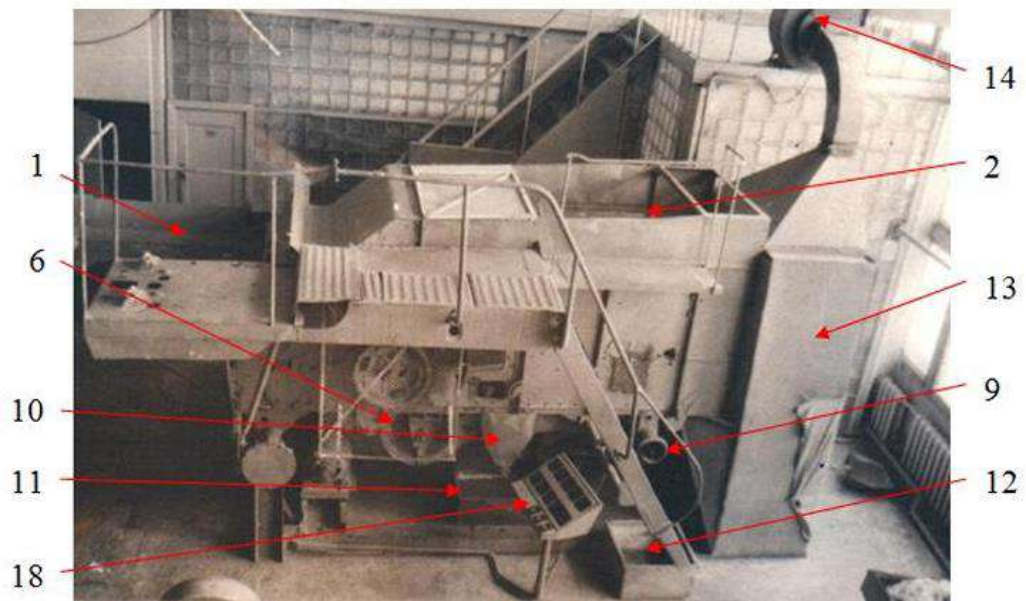
### **5.2. Опис лабораторних установок, методики проведення експериментів та обробки отриманих результатів**

Дослідження роботи системи очищення проведено на лабораторній установці «Система очищення зернозбирального комбайна», виготовленої на базі молотарки зернозбирального комбайна третього класу «Скіф-230» (рис. 5.1).

Лабораторна установка складається з рами (на рис. не показано), двох живильників 1 та 2, виконаних у вигляді стрічкових транспортерів з автономними приводами. Система очищення складається з струшувальної дошки 4 з пальцевою решіткою 16, приводного механізму 5, 6 вентилятора, верхнього 7 і нижнього 8 решітних станів. Привідний механізм 5 і 6 вентилятор наводяться від однієї приводної станції, а для зміни частоти обертання крильчатки вентилятора використовували клиноремінний варіатор.



а)



б)

Рис. 5.1 – Лабораторна установка «Система очищення зернозбирального комбайна»: а – схема; б - загальний вигляд: 1 - транспортер-живильник I; 2 - транспортер живильник II; 3 - ступка; 4 - струшувальна дошка; 5 - приводний коливальний механізм; 6 – вентилятор; 7 - верхній решітний стан; 8 - нижній решітний стан; 9 - колосовий відбірник; 10 - зерновий відбірник; 11 - зерновий ящик; 12 - колосовий ящик; 13 - приймач соломистої фракції; 14 – витяжний вентилятор; 15 – направник зернового вороху; 16 - пальцеві грати; 17 – підвіски; 18 – пульт управління

Використання в лабораторній установці двох транспортерів-живильників дозволило максимально наблизитися до подачі вороху на очищення у реальній молотарці комбайну. Транспортер-живильник 1 завантажувався дрібним зерновим оберемком з великим вмістом зерна і імітував подачу вороха з молотильно-сепаруючого пристрою, а транспортер-живильник 2 завантажувався дрібним оберемком з рівною кількістю соломистих домішок і зерна і імітував подачу вороха з клав. Зерновий відбірник 10 забезпечував виведення продуктів без порушення процесу технологічного. Для виведення вороха колосового відбірника 9 використовували штовхач. Збір продуктів очищення виробляли в зерновій 11 та колосової 12 ящики. Збір соломистій фракції виконували в приймальнику соломистій фракції 14, в якому встановлено витяжний вентилятор 14.

Технічна характеристика лабораторної установки «Система очищення зернозбирального комбайна» представлена у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Технічна характеристика лабораторної установки «Система очищення зернозбирального комбайна»

Найменування параметра	Значення
Ширина молотарки , м	1,2
Максимальна подача зернового вороху на очищення, кг	5,7
Час вивантаження вороху живильниками,	23
Загальна площа вирішує системи очищення, м	2,52
Частота обертання коливального валу, хв <sup>-1</sup>	256
Зазор між жалюзі верхнього ґрату, мм	0-18
Зазор між жалюзі нижньої решітки, мм	0-12
Частота обертання крильчатки вентилятора, хв <sup>-1</sup>	540-750

Експерименти проводили у наступній послідовності.

1) Встановлювали необхідний кут нахилу  $\alpha_K$  до молотарки щодо горизонту. За відомої відстані між опорами лабораторної установки ( $B_{US} = 1500$  мм) висоту підйому  $h$  однієї сторони визначали за формулою

$$h = B_{US} \sin(\alpha_K) \quad (5.1)$$

2) Встановлювали регульовані параметри очищення (частоту обертання крильчатки вентилятора, зазори між гребінками верхнього, нижнього решіт і подовжувача, положення подовжувача).

3) Завантажували в транспортери-живильники зернову купу певного складу та вологості. Включали привід решітних станів та вентилятора. При досягненні крильчатки вентилятора номінальних оборотів включали привод транспортера-живильника I і транспортера-живильника II. Після закінчення досвіду визначали якісні показники очищення:

- втрати зерна

$$P = \frac{m_{ZP}}{m_Z} 100\% \quad (5.2)$$

де  $m_{ZP}$  - маса зерна в приймальнику соломистої фракції;

$m_Z$  - маса зерна у вихідному зерновому купі;

- сход зерна в колосовий шнек

$$P_K = \frac{m_{ZK}}{m_Z} 100\% \quad (5.3)$$

де  $m_{ZK}$  - маса зерна в колосовому ящику; - засміченість бункерного зерна

$$Z = \frac{m_{CZ}}{m_{BZ}} 100\% \quad (5.4)$$

де  $m_{CZ}$  - маса соломистої фракції в зерновому ящику;  $m_{BZ}$  - маса вороху в зерновому ящику;

- схід вороху в колосовий шнек

$$q_{BK} = \frac{m_{BK}}{m_B} 100\% \quad (5.5)$$

де  $m_{BK}$  - маса зернового вороху в колосовому шнеку;

$m_B$  - маса зернового вороху, що надійшла на очищення.

Для поділу продуктів сепарації використовували лабораторну установку «Секція решітно-гвинтового сепаратора» (рис. 5.2) та набір лабораторних сит.

Продукти сепарації зважували на терезах РН-10Ц13У з точністю 5 г, масу зерна (втрати зерна), що надійшов у приймач соломистої фракції, визначали на терезах ВЛКТ-500 з точністю 0,1 г і електронних терезах MW-200 з точністю 0,01 г.

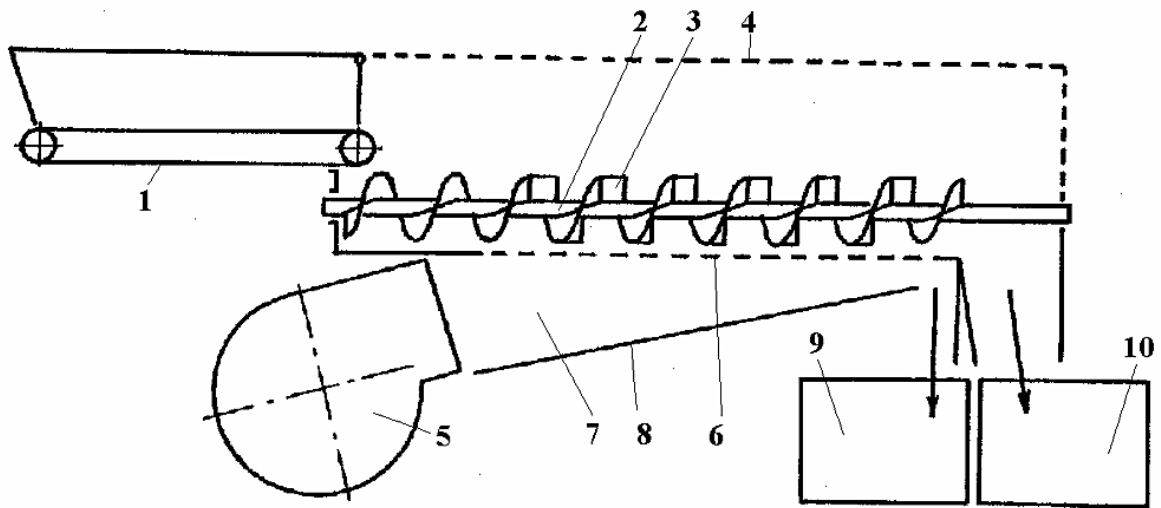


Рис. 5.2 – Лабораторна установка «Секція решітно-гвинтового сепаратора»: 1 - транспортер-живильник; 2 – шнек; 3 – лопатка; 4 – сітка; 5 – вентилятор; 6 – решето; 7 – повітряний канал; 8 – дно каналу; 9 - зерновий ящик; 10 - половозбірник

Продукти сепарації зважували на терезах РН-10Ц13У з точністю 5 г, масу зерна (втрати зерна), що надійшов у приймач соломистої фракції, визначали на терезах ВЛКТ-500 з точністю 0,1 г і електронних терезах MW-200 з точністю 0,0.

При призначенні повторності дослідів керувалися роботами, задаючись довірчою ймовірністю 0,95 та помилкою дослідів  $3\sigma_i$  (тут  $\sigma_i$  - середньоквадратична помилка). Повторність дослідів прийнята – від трьох. При статистичній оцінці результатів експерименту перевірялася однорідність дисперсій вихідних параметрів: за однакової повторності дослідів - за критерієм Кохрена, за різної - за критерієм Бартлетта.

Досліджувалися такі системи очищення: повітряно-решітна система очищення (базова); система очищення з решітно-гвинтовим сепаратором; система очищення із двосекційним решетом; система очищення із самовстановлюваним решетом; комбінована система очищення з решітно-гвинтовим сепаратором та двосекційним решетом; комбінована система очищення з решітногвинтовим сепаратором і самовстановлюваним решетом; система очищення з інерційним вирівнювачем вороху рахунок додаткових поперечних коливань верхнього решета; система очищення із адаптером для

схилів.

Схема системи очищення з РГС представлена рис. 5.3, основні параметри - у таблиці 5.2. Решотно-гвинтовий сепаратор встановлений замість струшувальної дошки і складається з чотирьох шнеків 7, встановлених по черзі з правої та лівої навивкою. На шнеках 7 жорстко закріплені лопатки 8. Дно 9 шнеків виконано хвилеподібним з встановленими розділовими вертикальними перегородками. У задній частині днище виконано у вигляді перфорованих решіт 10 з циліндричним дном. Укорочена струшувальна дошка 11 в задній частині за допомогою кронштейна 15 шарнірно з'єднана з верхнім решітним станом і з двоплечим важелем 29 коливального механізму, а в передній, за допомогою тяг 27, встановлена на підвісках 28, розташованих перед додатковим рукавом 12 вентиля. Нижнє решето 18 порівняно з очищенням комбайну «Скіф-230» опущено, з фіксуванням на нижньому отворі.

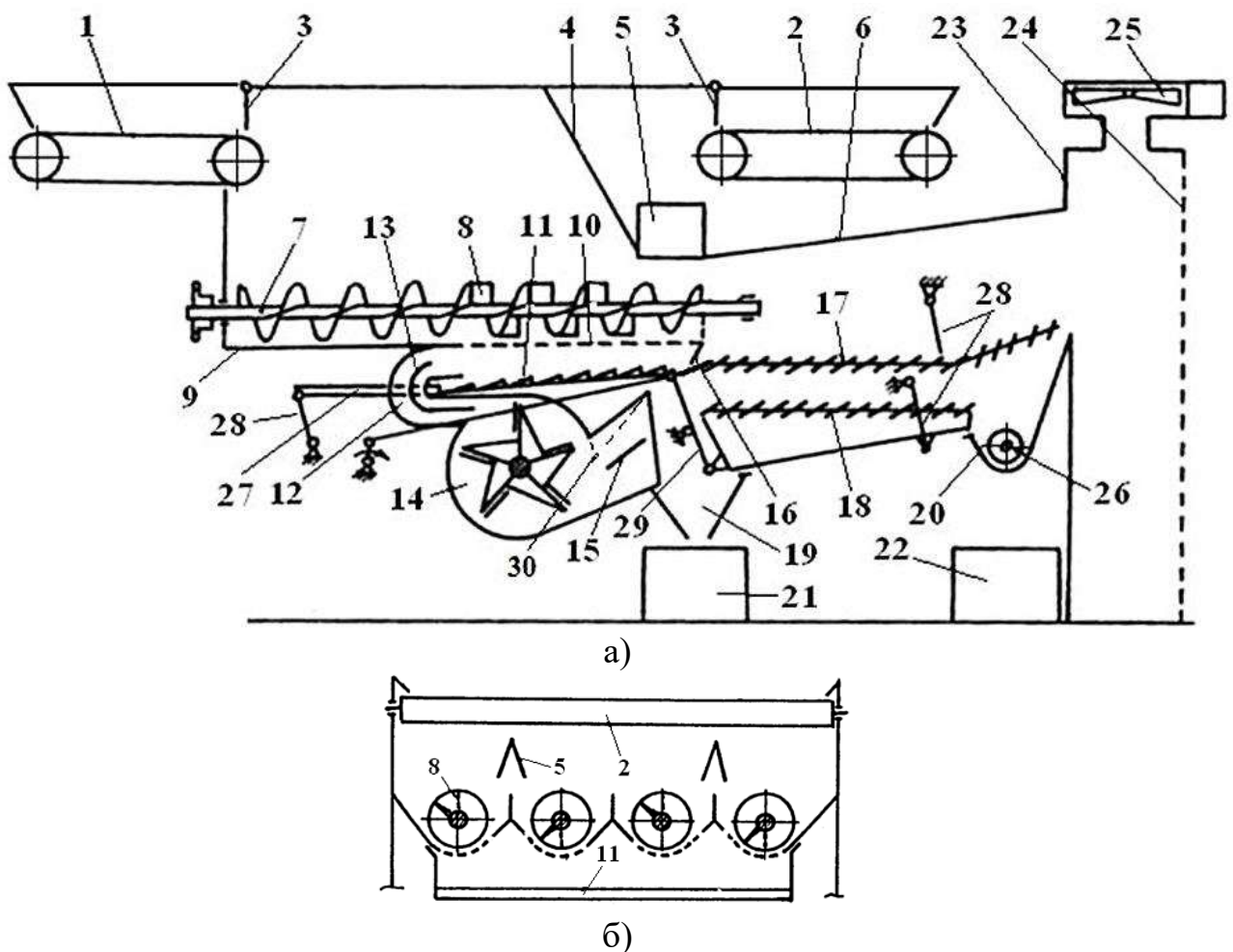


Рис. 5.3 – Схема лабораторної установки «Система очищення зернозбирального комбайна з РВС»: а – схема збоку; б – поперечний розріз; 1 - транспортер-живильник I; 2 - транспортер-живильник II; 3 - стулка; 4 -

напрямний щиток; 5 - скатна пластина; 6 – екран; 7 – шнек; 8 – лопатка; 9 - кожух гвинтових транспортерів; 10 – циліндричне решето; 11 - укорочена струшувальна дошка; 12 – додатковий рукав вентилятора; 13 – перегородка; 14 – вентилятор; 15 - напрямник повітря; 16 - еластичний щиток; 17 - верхній решітний стан; 18 - нижній решітний стан; 19 - зерновий відбірник; 20 - колосовий відбірник; 21 - зерновий ящик; 22 - колосовий ящик; 23 - половозбірник; 24 - полотно; 25 – витяжний вентилятор; 26 - штовхач колосового вороху; 27 - тяга; 28 - підвіски; 29 - двоплечий важіль; 30 - циліндрична заслінка

Таблиця 5.2 - Технічна характеристика лабораторної установки «Система очищення зернозбирального комбайна з решітно-гвинтовим сепаратором»

Найменування параметра	Значення
Кількість шнеків, шт	4
Діаметр і крок шнеків, м	0,15
Ширина лопаток, мм	60
Крок лопаток, мм	100
Частота обертання шнека, хв <sup>-1</sup>	330
Тривалість одного досвіду, з	23
Довжина решета гвинтового сепаратора, м	0,9
Ширина решета гвинтового сепаратора, м	0,88
Діаметр отворів решета, мм	12
Загальна площа вирішить очищення, м	2,82
Частота обертання крильчатки вентилятора, хв <sup>-1</sup>	від 500 до 800

Лабораторні дослідження повітряно-решітної системи очищення з двосекційним решетом виконували на лабораторній установці «Система очищення зернозбирального комбайна», в якій у верхньому стані встановлене експериментальне двосекційне решето (рис. 5.4). Решітний стан складається з каркаса 1, двох секцій 2 і 3 жалюзійних решіт, причому одна

секція встановлена щодо каркаса під кутом  $a_{СК} = 12^\circ$ .

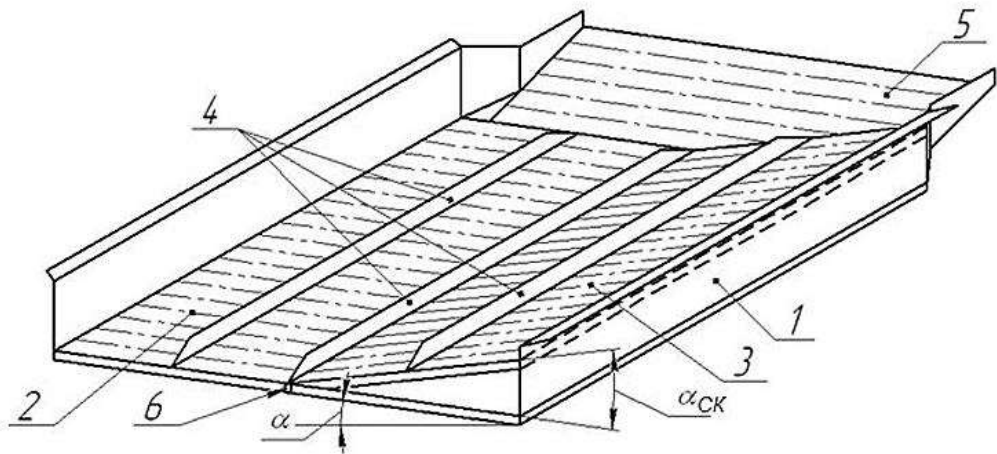
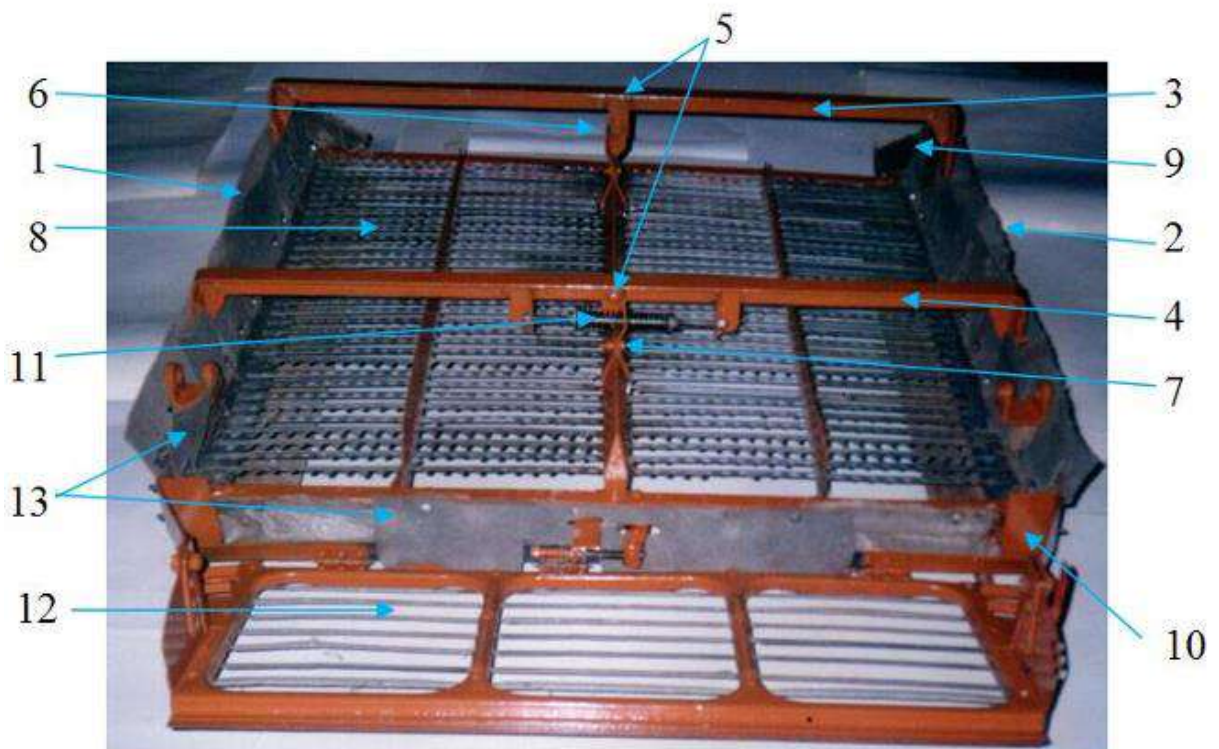


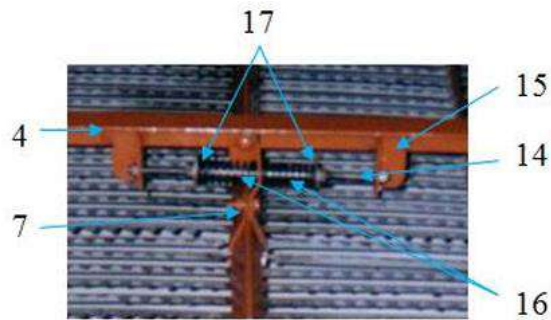
Рис. 5.4 - Схема верхнього решітного стану з двосекційним решетом:

1 – каркас; 2, 3 - секції решета; 4 – поздовжні планки; 5 - подовжувач верхнього решета; 6 - шарнір

Лабораторні дослідження повітряно-решітної системи очищення із самовстановлюваним решетом виконували на лабораторній установці «Система очищення зернозбирального комбайна». Дослідний зразок самовстановлюваного решета представлений на рис. 5.5.



a)



б)

Рис. 5.5 - Дослідний зразок самовстановлюваного решета: а - загальний вигляд; б - компенсуючий механізм (розшифрування позицій у тексті)

До боковин 1 і 2 каркаса приєднані передня 3 і задня 4 поперечні балки, в центрі яких за допомогою шарнірів 5 і підвісок 6 і 7 підвішено жалюзійне решето 8. Переміщення жалюзійного решета щодо каркаса в поздовжньому напрямку обмежене упорами 9 і 7. компенсуючий механізм 11.



а)



б)

Рис. 5.6 - Дослідний зразок адаптера для схилів: а - загальний вигляд; б - підвіска адаптера

На рис. 5.6 представлено лабораторний зразок адаптера. Адаптер виконаний з решета та пристрою зміни напрямку коливань. Решето виконано з рами 1 з гребінками 2. До рами 1 приєднані пластина 3 з планками і за допомогою кульових шарнірів 5 чотири підвіски 4, іншими кінцями з'єднані циліндричними шарнірами з нижніми частинами поворотних важелів 6, встановлених шарнірно в поперечних балках 7. причому один поворотний важіль з'єднаний з пристроєм для зміни напрямку коливань решета, що знаходиться на зовнішній стороні молотарки. Привід адаптера від струшувальної дошки здійснюється шатунами 9 з'єднаними з рамою 1.

### **5.3. Конкуренентоспроможність пропонуванних систем очищення**

Виконаємо, ґрунтуючись на результатах лабораторних досліджень, порівняльний аналіз розроблених очищень зернозбирального комбайна, призначеного для роботи на схилах. Порівняльний аналіз виконаний для наступних очищень :

- з решітно-гвинтовим сепаратором;
- із двосекційним верхнім решетом;
- із самовстановлюваним верхнім решетом;
- комбінованого очищення з решітно-гвинтовим сепаратором і верхнім решетом, що самовстановлюється;
- з інерційним вирівнювачем зернового вороху на верхньому решеті;
- з адаптером для схилів.

Особливості конструкцій та налаштувань очищення:

- у базовому очищенні на струшувальній дошці встановлені два поздовжні гребінки висотою 50 мм;
- у базовій очистці з перегородками встановлені три поздовжні перегородки заввишки 130 мм на струшувальній дошці та збільшені до 130 мм поздовжні перегородки на верхньому решеті;
- параметри системи очищення з решітно-гвинтовим сепаратором (1 схема): кількість шнеків – 4 шт; частота обертання шнеків -  $330 \text{ хв}^{-1}$ ; положення

направника повітря в патрубку вентилятора (частка нижньої частини) – 0,3;  
 поздовжній кут нахилу нижнього решета до горизонту – 4°;

- у системі очищення з двосекційним верхнім решетом (2 схема): на струшувальній дошці встановлені три перегородки заввишки 130 мм; секція, розташована нижче, встановлена під кутом 12°;

- граничний кут установки самовстановлюваного верхнього решета (3 схема) щодо решітного стану - 6°; на струшувальній дошці встановлені дві поздовжні перегородки заввишки 130 мм;

- у системі очищення з інерційним вирівнювачем вороху (5 схема); - амплітуда поперечних коливань решета - 20 мм;

- параметри системи очищення з адаптером (6 схема): довжина решета адаптера – 400 мм, крок гребінки – 75 мм; амплітуда коливань решета адаптера у поперечному напрямку – 18 мм.

Загальні регульовальні параметри очищення наведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 - Регульовальні параметри очищення

Параметр, розмірність	Схеми очищення						
	базова (базова з перегородками)	1	2	3	4	5	6
Зазор між жалюзі вирішує, мм верхнього нижнього	13	13	13	12	13	12	15
	9	10	10	9	9	9	10
Частота обертання вентилятора, хв <sup>-1</sup>	600	660	600	640	690	600	630

Порівняння роботи очищення з базовим очищенням проведено за втратами зерна при поперечному нахилі лабораторної установки на кут 8° (рис. 5.7 і 5.8). Вміст соломистих домішок у порівнюваних очищеннях не перевищував 2%.

Оцінку очищення виконали за допомогою інтегрального показника конкурентоспроможності машини  $k_M$  відповідно до ДСТУ «Машини сільськогосподарські. Методи оцінки конкурентоспроможності».

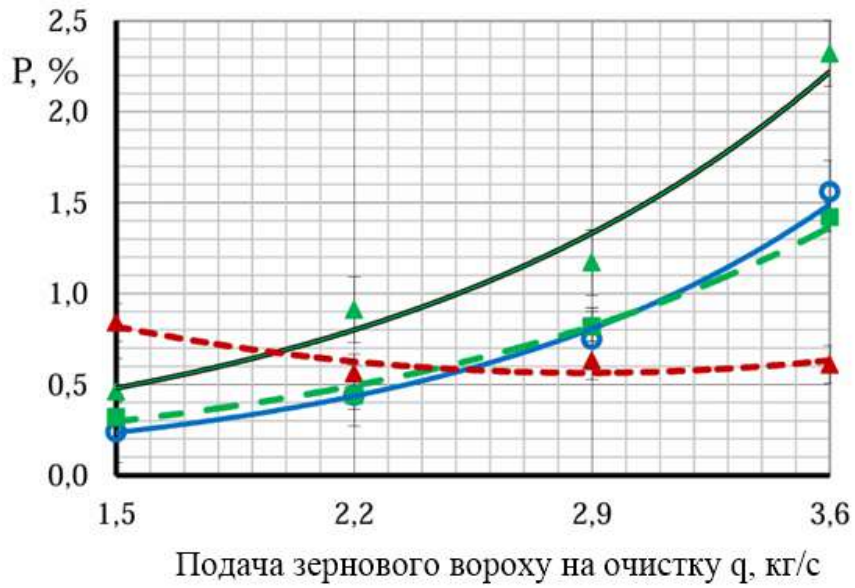


Рис. 5.7 - Результати порівняльних лабораторних досліджень очищення

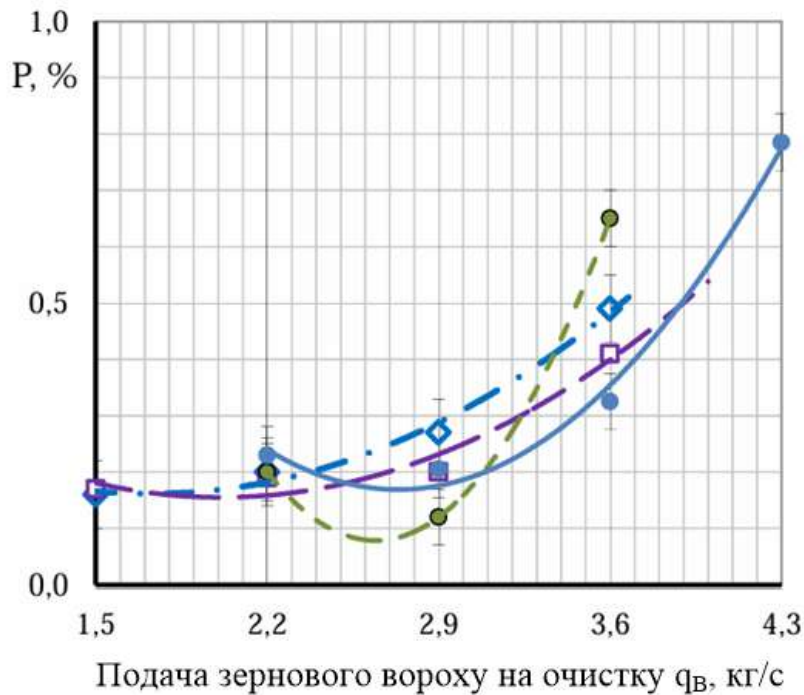


Рис. 5.8 - Результати порівняльних лабораторних досліджень очищення

Враховували факторні коефіцієнти ціни  $k_1$  та продуктивності  $k_3$  конкуруючої машини

$$k_M = k_1\gamma_1 + k_3\gamma_3, \quad (5.6)$$

де  $\gamma_1, \gamma_3$  - Значення питомої ваги факторних коефіцієнтів значимості.

Значення питомої ваги прийняті:  $\gamma_1 = 0,5, \gamma_3 = 0,5$ .

Прийнявши ціну машин прямо пропорційно їх масі, коефіцієнт дорівнює

$$k_1 = \frac{B_{\bar{b}}}{B_K} = \frac{M_{\bar{b}}}{M_K}, \quad (5.7)$$

де  $B_B, B_K$  - ціна базової та конкуруючої машини відповідно;  $M_B, M_K$  - маса базової та конкуруючої машини відповідно.

Коефіцієнт  $k_3$

$$k_3 = \frac{q_{BK}}{q_{BB}}. \quad (5.8)$$

де  $q_{BK}, q_{BB}$  - подача зернового вороху в базовій та досліджуваній очистці відповідно при прийнятому рівні втрат зерна (0,5 %).

Маси комбайнів з розробленими очищеннями розраховані за масою зернозбирального комбайна «Скіф-230» та масою дослідних зразків очищення. Результати розрахунку зведено до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати розрахунку інтегрального показника конкурентоспроможності пропонуваніх технічних рішень

Схема очищення	Маса комбайна, кг	Подача, кг/с	$k_1$	$k_3$	$k_M$
Базова	7320,0	1,55	1	1	-
Базова зі щитками	7329,0	2,35	0,998	1,516	1,26
1	7445,5	2,2	0,983	1,419	1,20
2	7335,3	0	0,998	0	-
3	7326,2	3,6	0,999	2,323	1,66
4	7460,8	3,9	0,981	2,516	1,75
5	7359,0	3,45	0,995	2,226	1,61
6	7353,3*	3,9	0,996	2,516	1,76

Примітка - маса комбайна з адаптером розрахована з урахуванням маси приводного механізму

За ДСТУ значення показника понад 1,3 свідчить про високий рівень конкурентоспроможності машини, таким чином, найбільш конкурентоспроможні схеми очищень - комбінована очищення з решітногвинтовим сепаратором і самовстановлюваним верхнім решетом (4 схема; показник конкурентоспроможності дорівнює 4 схема; 1,76).

#### **5.4. Порівняльні лабораторно-польові випробування системи очищення з решітно-гвинтовим сепаратором**

Очищення з решітно-гвинтовим сепаратором випробувано у господарстві Київщини. Випробування проведено на зернозбиральному комбайні третього класу «Скіф-230», у якому замість серійного очищення встановлено очищення з решітно-гвинтовим сепаратором.

Решотно-гвинтовий сепаратор складається з чотирьох шнеків 1 і хвилеподібного днища 2 з перфорованою зоною 3 над якою на шнеках встановлені радіальні лопатки 4, а по зовнішній кромці шнеків закріплена еластична стрічка. Шнеки по черзі мали ліву та праву навивку гвинтових поверхонь. Під перфорованою зоною днища розташована укорочена струшувальна дошка 5, яка в передній частині встановлено на підвісках, а в задній – шарнірно пов'язана з верхнім решетом та двоплечим важелем приводу очищення.

Під струшувальною дошкою встановлений вентилятор 6, опущений на 40 мм порівняно з серійною очищенням, і має додатковий вихідний канал 7, напрямний повітряний потік під перфоровану зону днища. У додатковому каналі, повторюючи його конфігурацію, встановлена перегородка 8. повітряного потоку, що надходить на очищення.

Нижнє решето 12 в передній частині подовжено на 7 см і встановлено в нижній отвір. Шнеки приводилися від верхнього валу похилої камери (з лівого

боку) за допомогою двох ланцюгових передач та конічного редуктора. Технічна характеристика експериментального очищення наведена у таблиці 5.5.

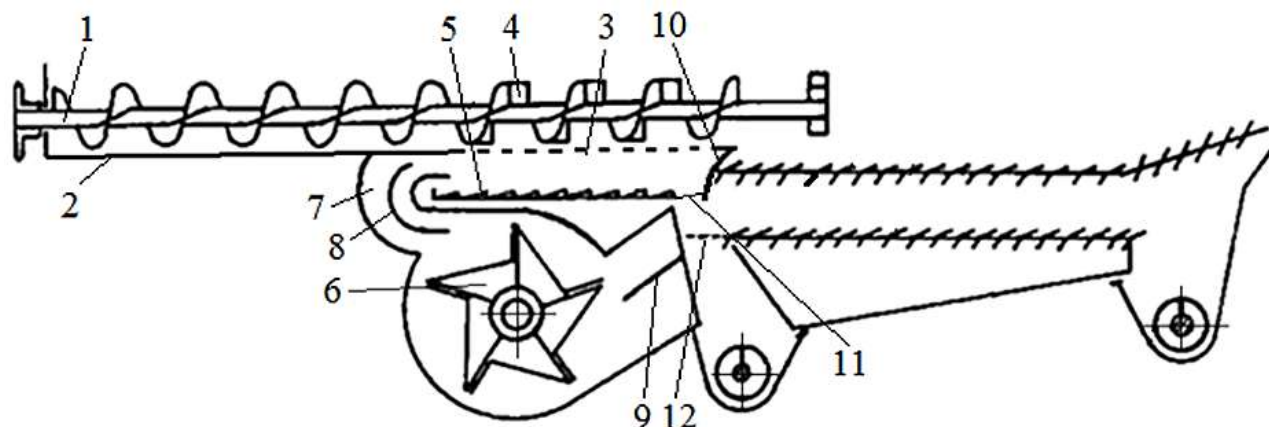


Рис. 5.9 - Схема експериментальної очистки з решітно-гвинтовим сепаратором

Таблиця 5.5 - Технічна характеристика очищення з решітно-гвинтовим сепаратором

Найменування параметра	Значення
Число шнеків, шт	4
Крок гвинтової поверхні шнеків, мм	150
Діаметр шнеків, мм	150
Частота обертання шнеків, $\text{мін}^{-1}$	330
Довжина гвинтової поверхні шнеків, мм	2000
Крок установок лопаток, мм	100
Число лопаток на одному шнеку, шт	8
Ширина лопаток, мм	60
Ширина перфорованої зони днища (по дугах), мм	880
Довжина перфорованої зони днища, мм	900
Діаметр отворів перфорованого днища, мм	12
Частота обертання вентилятора, об/хв	від 530 до 850
Додаткова маса комбайна, кг	125,5

Умови випробувань: культура –пшениця, сорт «Богдана»; врожайність – 23,7 ц/га; коефіцієнт варіації врожайності – 15,47 %; відношення маси зерна до маси соломи над фактичною висотою зрізу – 1:0,87; маса 1000 насінин - 17,19 г;

вологість зерна – 11,4 %; вологість соломи – 9,5 %; тип валка – одинарний; маса одного метра валка від 6,8 до 7,5 кг; відстань між валками – 9,35-9,0 м; засміченість культури над фактичною висотою зрізу – від 4,3 до 12,5 %; висота зрізу (висота стерні) – 17,5 см; ширина захвату жнивarki - 10,51-10,54 м.

Випробуваннями встановлено:

- дроблення і вміст бур'яну домішки в бункерному зерні знаходиться в одних межах як на комбайні, що випробовується, так і на порівнюваному;

- показники втрат зерна за очищенням по комбайну, що випробовується, нижче, ніж у порівнюваного, при оптимальному завантаженні в 3,4 рази (рис. 5.10).

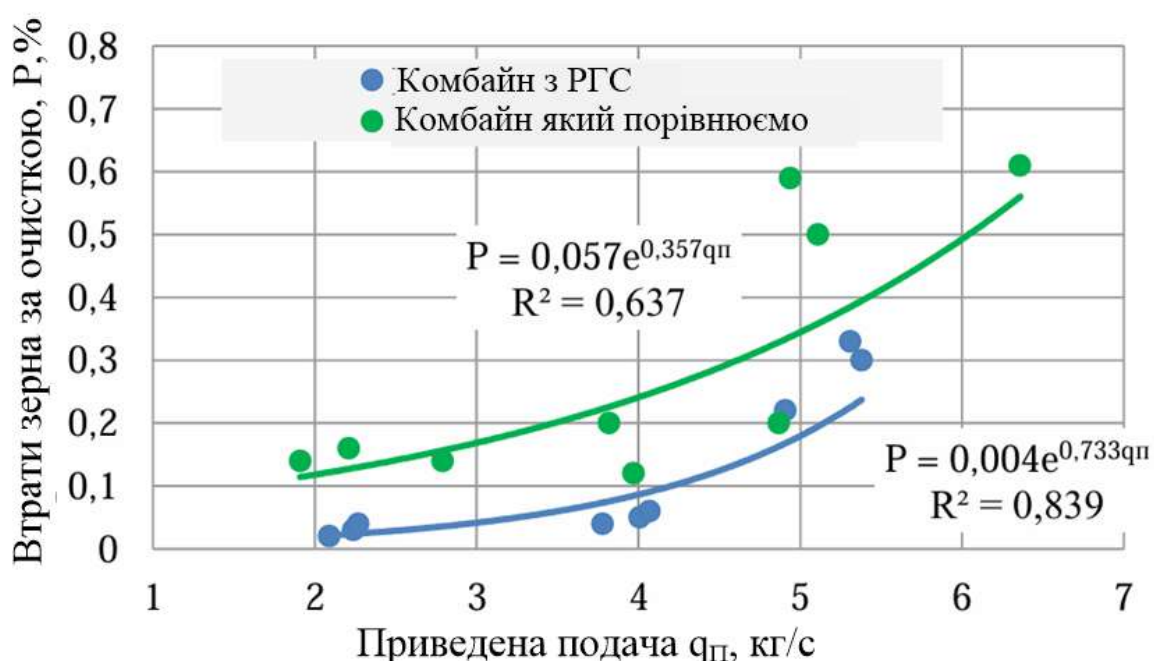


Рис. 5.10 - Графіки залежності втрат вільним зерном за системою очищення від наведеної подачі хлібної маси

### 5.5. Порівняльні лабораторно-польові випробування системи очищення

Польові випробування адаптера очищення проведено у фермерському господарстві Київської області. Випробування проведено на зернозбиральному комбайні «Скіф-230» (рис. 5.11).

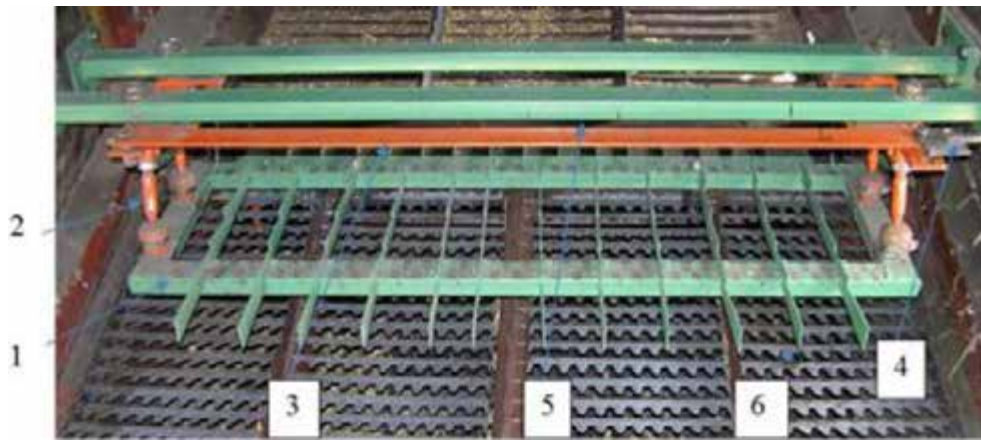


Рис. 5.11 – Адаптер системи очищення, встановлений у зернозбиральному комбайні «Скіф-230»: 1 – рама решета; 2 – підвіска; 3 – поперечна тяга; 4 - тяга механізму зміни амплітуди та напрямів коливань решета; 5 – поперечна балка; 6 - гребінка решета

## 6. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА

Розрахунок економічної ефективності застосування системи очищення з адаптером для схилів проводили відповідно до методики.

При розрахунку маси експериментального зернозбирального комбайна враховували, що адаптер для схилів встановлюється замість пальцевих ґрат струшувальної дошки.

$$M_K = M_B - M_{ПР} + M_A = 8370 - 2,7 + 28,5 = 8395,8 \text{ кг}, \quad (6.1)$$

де  $M_B$  - маса порівнюваного комбайна третього класу «Скіф-230» (без жниварки),  $M_B = 8370$  кг;  $M_{ПР}$  - маса пальцевої решітки,  $M_{ПР} = 2,7$  кг.

Ціна зернозбирального комбайна третього класу комбайна, що порівнюється, визначена за ціною комбайна «Скіф-230» (маса без жниварки 9230 кг, ціна без ПДВ 18 % - 2987712 грн.)

$$B_B = \frac{2709333 \cdot 8370}{9230} = 2709333 \text{ грн.},$$

а ціна експериментального комбайна без урахування ціни керуючого пристрою

$$B_K = \frac{B_B M_K}{M_B} = \frac{2709333 \cdot 8396}{8370} = 2717749 \text{ грн.}, \quad (6.2)$$

Ціна крокового двигуна А63К-М5913 (13360 грн.), контролера ML5-HF14 (21340 грн.) і шести датчиків положення ( $6 \cdot 1450 = 8700$  грн.), Тоді

$$B_K = 2717749 + 13360 + 21340 + 8700 = 2761149$$

Розрахунок проведений при встановлених втратах зерна за системою очищення з адаптером - 0,5%, при цьому втрати зерна за системою очищення порівнюваного комбайна склали 4,0%, а робоча швидкість комбайна  $V_K = 6,1$  км/год.

Річна економія сукупних витрат коштів від експлуатації комбайна з адаптером складала 66852,0 грн, термін окупності 0,78 років.

## ВИСНОВОК

1. Збирання зернових культур на схилах зернозбиральними комбайнами рівнинного виконання супроводжується підвищенням рівнем втрат зерна, причому основна частка втрат посідає систему очищення, а основною причиною є збільшення нерівномірності розподілу зернового вороху на верхньому решеті при поперечному нахилі молотарки. Система очищення за цих умов стає лімітуючим робочим органом, порушується принцип гармонійності конструкції комбайна. Підвищення ефективності роботи комбайна на схилах до  $10^\circ$  шляхом зниження втрат зерна доцільно здійснити за рахунок удосконалення попередньої сепарації зернового вороху та зниження нерівномірності його розподілу на верхньому решеті системи очищення.

2. Розроблені математичні моделі руху зернового вороху по решітці в умовах роботи комбайна на схилах та програми для ПК для їх реалізації дозволили визначити:

- кінематичні параметри руху зернового вороху по поверхні жалюзійного решета: при зміні кута поздовжнього нахилу від  $0$  до  $10^\circ$  при русі комбайна вгору по схилу швидкість зернового вороху збільшується з  $0,43$  до  $0,50$  м/с (на  $16,3\%$ ), а при русі в 4; при зміні поперечного нахилу молотарки від  $0$  до  $10^\circ$  кут відхилення вектора швидкості зернового вороху від поздовжнього напрямку при швидкості повітряного потоку  $3,5$  м/с збільшується до  $5,8^\circ$ , за відсутності повітряного потоку - до  $9,8^\circ$ ;

- можливість збереження умов для проходу зерна та сходу соломистих домішок, що знаходяться на жалюзі решета, шляхом зміни кута відкриття жалюзі при зміні поздовжнього нахилу молотарки при русі комбайна вгору по схилу -  $\delta_j = \delta_{j0} + 0,7\delta_K$  (тут  $\delta_{j0}$  - кут відкриття жалюзі при горизонтальному положенні молотарки;  $\delta_K$  - кут поздовжнього нахилу молотарки).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Aliiev E. Justification of constructive-mode parameters of a photoelectron separator of sunflower seeds. [Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів фотоелектронного сепаратора насіння соняшника]. Scientific Horizons, 2019. 5 (78): 23-30. DOI: 10.33249/2663-2144-2019-78-5-23-30.
2. Алієв Е. Б., Кутіщев В. Л. Очищення та розділення насіннєвого матеріалу олійних культур. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури. тенденції та перспективи» (1 листопада 2016 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. 2016. С. 134–135.
3. Алієв, Е. Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 2019. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.
4. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. С. Сільськогосподарські машини. Київ: Каравелла, 2008. С. 317–407.
5. Akyurek Technology – Seed Processing & Conditioning Equipment URL: [akyurekltd.com](http://akyurekltd.com) (дата звернення: 20.12.2022).
6. Фадєєв Агро – Обладнання для очистки и калібрування насіння URL: [fadeevagro.com](http://fadeevagro.com) (дата звернення: 26.11.2022).
7. PETKUS Technologie GmbH – Saatgut Technologien und Getreide Lagersysteme. URL: [petkus.com](http://petkus.com) (дата звернення: 11.11.2022).
8. Зерноочисні машини, зерновий сепаратор. Пропозиція. URL: [propozitsiya.com/otchestvennye-zernoochistitelnye-mashiny\\_dlya-proizvodstva-vysokokachestvennogo-zerna](http://propozitsiya.com/otchestvennye-zernoochistitelnye-mashiny_dlya-proizvodstva-vysokokachestvennogo-zerna) (дата звернення: 22.12.2022).
9. Алієв Е. Б. Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику : дис. ... докт. техн. наук. Харків, 2020. 364 с.
10. Грабар І. Г., Дерев'яно Д. А., Герук С. М. Вплив чинників післязбиральної обробки зерна на якість насіннєвого матеріалу Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2010. Вип. 40, ч. І.

С. 340–349.

11. Дерев'янку Д. А. Травмування та якість насіння на різних стадіях технологічних процесів. Інженерія природокористування. 2014. № 1(1). С. 114–123.

12. Богатирьов Д. В. Обґрунтування параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Кіровоградський національний технічний ун-т. Кіровоград, 2005. 19 с.

13. Богатирьов Д. В., Скриннік І. О., Юрченко О. В. Обґрунтування технологічних параметрів зернового сепаратора. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Кропивницький : ЦНТУ, 2019. Вип. 49. С. 34–42.

14. Кирпа Н. Я. Принципи і способи сепарування зернових мас. Зберігання і переробка зерна. 2011. № 4 (142). С. 33–36.

15. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження) / Б. І. Котов та ін. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 487 с.

16. Пневмоімпульсна машина для сепарації насіння за густиною : пат. 54279 Україна : МПК 7 А01С1/00 / М. М. Петренко, Д. В. Богатирьов. № 2002075688 ; заявл. 10 07 2002 ; опубл. 17 02 2003, Бюл. № 2.

17. Степаненко С. П., Волик Д. А. Обґрунтування конструкції технічного засобу для поділу насіння за густиною. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції : Програма та тези матеріалів XI Міжнародної науково-технічної конференції. Київ, 2022. С. 80–82.

18. Решето Фадеева : пат. 101180 Україна : МПК (2015.01) В07В 1/46 / Л. В. Фадеев та ін. № u201502949 ; заявл. 31.03.2015 ; опубл. 25.08.2015, Бюл. № 16.

19. Сенчук М. М., Демещук В. А. Насіннеочисні машини : навчально-методичний посібник для самостійної роботи та лабораторно-практичних занять. Біла Церква, 2015. 195 с.

20. Сепаратор зерноочисний : пат. 127890 Україна : МПК (2018.01) B07B 1/00 / С. М. Савицький та ін. № у 201802500 ; заявл 12.03.2018 ; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16. 15. Степаненко С. П., Котов Б. І., Попадюк І. С. Дослідження процесу пневмовібраційного поділу зерна за густиною під час одномірного переміщення зернового потоку. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний зб. Глеваха, 2021. № 14 (113). С. 77–88.* <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8>

21. Bai C. Modelling of spray impingement processes. Ph.D Thesis. University of London. 1996.

22. Dominik Kubicki, Simon Lo. Slurry transport in a pipeline – Comparison of CFD and DEM models. Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. CSIRO, Melbourne, Australia (10-12 December 2012) 2012. P. 1–6.

23. Sang Won Han, Won Joo Lee, Sang Jun Lee. Study on the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage Cyclone by CFD Simulation. *World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 6. 2012. P. 411–415.*

24. Satish G., Ashok Kumar K., Vara Prasad V., Pasha Sk. M. Comparison of flow analysis of a sudden and gradual change of pipe diameter using fluent software. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. Vol. 2. 2013. P. 41–45.*

25. 1. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г С. *Сільськогосподарські машини.* Київ: Каравелла, 2008. С. 317–407.

26. Грабар І. Г., Дерев'яно Д. А., Герук С. М. Вплив чинників післязбиральної обробки зерна на якість насінневого матеріалу Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2010. Вип. 40, ч. І. С. 340–349.

27. Дерев'яно Д. А. Травмування та якість насіння на різних стадіях технологічних процесів. *Інженерія природокористування.* 2014. № 1(1). С. 114–123.

28. Дерев'янюк Д. А., Тарасенко О. П., Орбінський В. І. Вплив травмування на якість насіння зернових культур : монографія. Житомир: Нілан-ЛТД, 2012. 440 с.
29. Журнал «Агроном». URL: <http://www.agronom.com.ua> (дата звернення 23.07. 2024).
30. Кісь-Коркіщенко Л. В. Обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів завантаження ковшів зернових норій. Дис. ... доктора філософії: 133. Харків, 2021. 182 с.
31. Опалко В., Шатров Р. Механічне травмування зерна після збирання. Agroexpert. 2017. № 2.
32. Скрипник І. О., Пісарькова І. О., Петренко М. М Механічне травмування зерна. Конструювання виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2018. Вип.48. С. 143–153. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.143-153>.
33. Тищенко Л.М., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Виброрешітна сепарація зернових сумішей. Харків: МД, 2011. 280 с.
34. Харченко, Є. І. Шаран А. В., Янюк Т. І. Інноваційні технології галузі: Конспект лекцій для студ. спец. 7.05170101, 8.05170101 «Технології зберігання і переробки зерна» денної та заочної форм навчання. Київ: НУХТ, 2014. 94 с.
35. Шаповаленко О. І., Євтушенко О. О., Кожевникова М. І., Шпак О. О. Дослідження ступеню травмування зерна кукурудзи у виробничих умовах. Хранение и переработка зерна. 2015. № 2. С. 31–33.
36. Shaaya E., Kostjukovski M., Eilberg J., Sukprakarn C. Plant oils as fumigants and contact insecticides for the control of stored-product insects. J. Stored Prod. Res. 1997. Vol. 33. P. 7–15. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(96\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(96)00032-X).
37. Mareček J. Conditions for maintaining the quality of the grain at harvest. URL: <http://www.agroporadenstvo.sk> RIGO.
38. Adamchuk V., Bulgakov V., Gadzalo I. [et al.]. Theoretical study of vibrocentrifugal separation of grain mixtures on a sieveless seedcleaning machine.

Rural Sustainability Research. 2021. Vol. 46(341). P. 116-124.  
<https://doi.org/10.2478/plua-2021-0023>.

39. Bala B. K., Haque M. A., Hossain M. A., Majumdar S. Post Harvest Loss and Technical Efficiency of Rice, Wheat and Maize Production System: Assessment and Measures for Strengthening Food Security. Bangladesh Agricultural University; Mymensingh, Bangladesh: 2010.

40. Baoua I., Amadou L., Lowenberg-DeBoer J., Murdock L. Side by side comparison of GrainPro and PICS bags for postharvest preservation of cowpea grain in Niger. *J. Stored Prod. Res.* 2013. Vol. 54. P. 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2013.03.003>.

41. Ben D. C., van Liem P., Dao N. T., Gummert M., Rickman J. F. Effect of Hermetic Storage in the Super Bag on Seed Quality and Milled Rice Quality of Different Varieties in Bac Lieu, Vietnam. *Int. Rice Res. Notes.* 2009. <https://doi.org/10.3860/irmn.v31i2.1138>.

42. De Groote H., Kimenju S. C., Likhayo P., Kanampiu F., Tefera T., Hellin J. Effectiveness of hermetic systems in controlling maize storage pests in Kenya. *J. Stored Prod. Res.* 2013. Vol. 53. P. 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2013.01.001>.

43. Kimanya M. E., Meulenaer B., Camp J., Baert K., Kolsteren P. Strategies to reduce exposure of fumonisins from complementary foods in rural Tanzania. *Matern. Child Nutr.* 2012. Vol. 8. P. 503–511. <https://doi.org/10.1111/j.1740-8709.2011.00337.x>.

44. Kitinoja L. Innovative small-scale postharvest technologies for reducing losses in horticultural crops. *Ethiop. J. Appl. Sci. Technol.* 2013. Vol. 1. P. 9–15.

45. Kotov B., Stepanenko S., Tsurkan O. [et al.]. Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99(1). P. 100-104. <https://doi.org/10.15199/48.2023.01.19>.

46. Mykhailov Ye., Golebiewski J., Kiurchev S., Hutsol T., Kolodii O., Nurek T., Glowacki Sz., Zadosna N., Verkholtantseva V., Palianychka N., Kucher O.

Economic and technical efficiency of sunflower seed processing. Monograph. – Warszawa: 2020. 158 c. <https://doi.org/10.22630/SGGW.WE.9788375839340>.

47. Njoroge A., Affognon H., Mutungi C., Manono J., Lamuka P., Murdock L. Triple bag hermetic storage delivers a lethal punch to *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) in stored maize. *J. Stored Prod. Res.* 2014. Vol. 58. P. 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.02.005>.

48. Shvidia V., Stepanenko S., Kotov B. [et al.]. Influence of vacuum on drying of seeds of grain crops. In: *Bulletin of the Karaganda University. Physics series.* 2022. Vol. 3(107). P. 90-98. <https://doi.org/10.31489/2022PH3/90-98>.

49. Stepanenko S., Kotov B., Kuzmych A. [et al.]. To the theory of grain motion in an uneven air flow in a vertical pneumatic separation channel with an annular cross section. *Processes.* 2022. Vol. 10(10). P. 1929. <https://doi.org/10.3390/pr10101929>.

50. Stepanenko S., Kotov B., Spirin A. [et al.]. Scientific foundations of the movement of components of grain material with an artificially formed distribution of air velocity. In: *Bulletin of the Karaganda University. Physics series.* 2022. Vol. 1(105). P. 43–57. <https://doi.org/10.31489/2022PH1/43-57>.

51. Suleiman R. A., Kurt R. A. Current maize production, postharvest losses and the risk of mycotoxins contamination in Tanzania; *Proceedings of the American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting; New Orleans, LA, USA. 26–29 July 2015.*

52. Tefera T., Kanampiu F., de Groote H., Hellin J., Mugo S., Kimenju S., Beyene Y., Boddupalli P.M., Shiferaw B., Banziger M. The metal silo: An effective grain storage technology for reducing post-harvest insect and pathogen losses in maize while improving smallholder farmers' food security in developing countries. *Crop Prot.* 2011. Vol. 30. P. 40–245. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.11.015>.

53. Vales M., Rao C. R., Sudini H., Patil S., Murdock L. Effective and economic storage of pigeonpea seed in triple layer plastic bags. *J. Stored Prod. Res.* 2014. Vol. 58. P. 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.01.004>.

54. Bai C., Gosman A. D. Development of methodology for spray impingement simulation. *SAE Technical Paper Series.* 2015. 21 p.

55. Khalid M. Saqr, Hossam S. Aly, Mazlan A. Wahid, Mohsin M. Sies. Numerical Simulation of Confined Vortex Flow Using a Modified  $k$ - $\epsilon$  Turbulence Model. *CFD Letters*. 2009. Vol. 1(2). P. 87–94.

56. Wallin S. Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynolds stress models. Doctoral thesis. Norstedts truckeri, Stockholm, Sweden. 2000. 124 p.

57. Алієв Е. Б., Яропуд В. М. Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця, 2017. №2 (97). С. 19–23.*

58. Алієв Е. Б. Результати чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення насіннєвого матеріалу олійних культур під дією повітряного потоку. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету. Житомир, 2017. №1 (58), т.1. С. 173–180.*

59. Алієв Е. Б., Лабатюк Ю. М. Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: *Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2017. Вип. 180. С. 67–71.*

60. Пешук Л. В. Біохімія та технологія оліє-жирової сировини. Навч. посіб. Л. В. Пешук, Т. Т. Носенко – К. : Центр учбової літератури, 2011. – 296 с.

61. Mohsenin N.N. Physical properties of plant and animal materials / N.N. Mohsenin // New York: Gordon and Breach Science Publishers Inc. – 2020 – P. 51-87.

62. Aydin C. Physical properties of almond nut and kernel / C. Aydin // *New Food Eng.* 2020. – Vol. 60 – P. 315-320.

63. Gupta R.K. Physical properties of sunflower seeds / R.K. Gupta, S.K. Das // *Food Eng.* – 2017 – Vol. 66 – P. 1-8.

64. McCabe W.L. Unit operations of chemical engineering / W.L. McCabe, J.C. Smith, P. Harriott // McGraw-Hill Book Co, New York. – 2016.

65. Jain R.K. Properties of pearl millet / R.K. Jain, S. Bal // *Journal of*

Agricultural Engineering Research. – 1997 – P. 85-91.

66. Sahay K.M. Unit operations in agricultural processing / K.M. Sahay, K.K. Singh // Vikas Publishing House Pvt Ltd, New Delhi. – 2024.

67. Singh K.K. Physical properties of sunflower seeds / K.K. Singh, T.K. Goswami // Physical properties of cumin seed. J. Agric. Eng. – 2016 – Vol. 64 – P. 93-98.

68. Nimkar M.P. Some Physical properties of green gram / M.P. Nimkar, K.P. Chattopadhyay // Journal of Agricultural Engineering Research. – 2001– Vol. 80(2) –P. 183-189

69. ДСТУ 4138-2002 Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. Наказ Держспоживстандарту України від 28.12.2002 № 31

70. ДСТУ 3768:2019 Пшениця. Технічні умови. Прийнято та надано чинності: наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») від 14 травня 2019 р. № 125 з урахуванням змін, внесених наказом ДП «УкрНДНЦ» від 22 травня 2019 р. № 133 з 2019-06-10.

71. ДСТУ 4762:2007 ТРИТИКАЛЕ Технічні умови. Прийнято та надано чинності: наказ Держспоживстандарту України від 28 квітня 2007 р. № 95 з 2007–08–01.

72. ДСТУ 4748:2007 Машини сільськогосподарські. Методи оцінювання пристосованості до технічного обслуговування. Прийнято та надано чинності: наказ Держспоживстандарту України від 26.02.2007 № 40.

73. ДСТУ 4397:2005 Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Прийнято та надано чинності: наказ Держспоживстандарту України від 28.04.2005 № 101.

74. Півень В.В. Основні напрямки вдосконалення технології та техніки для післязбиральної обробки зерна / В.В. Півень, О. Л. Уманська // Зберігання та переробка сільгоспсировини. - 2003. - №8. - З. 205-208.

75. Тарасенко О.П. Вплив вологості зерна при збиранні та післязбиральній обробці на посівні якості насіння / О.П. Тарасенко, В.І.

Оробінський, М.Е. Мерчалова // Зберігання та переробка зерна. – Дніпропетровськ, 2000. – № 2. – С. 12-13.

76. Тарасенко О.П. Нове покоління зерноочисних машин/О.П. Тарасенко, В.І. Оробінський, А.А. Сундєєв, В.В. Шередєкін, А.М. Гієвський // Трактори та сільгоспмашини. – 2007. – № 5. – С. 12 – 14.

77. Bohnet M. Mechanische Verfahrenstechnik / M. Bohnet. - Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. – 270 s.

78. Cajueiro DO Controlling self-organized criticality в sandpile models [Text] / DO Cajueiro, RFS Andrade // Physical Review E: Statistical, Nonlinear, і Soft Matter Physics. – 2010. – Vol. 81. – pp. 015102.

79. Chahal BC Діяльність різних рівнів граїнної похмурості на здатності синього сіда / BC Chahal, M. Ramzan // Bull. Grain Technol. – 2024. – № 1. – P. 11-12.

80. Dhar D. Theoretical studies of self-organized criticality, Physica A 369 (2006) 29-70.

81. Шнірман MG Scale invariance and invariant scaling in mixed hierarchical system // Phys. Rev. E. 2019. V.60. - №5. - P.5111-5120.

82. Stuke F. Sortenmischungen im Weizenanbau / F. Stuke, H. Fehrmann // Mitt. Biol. Bundensamst. Land-und Forstwirt. - Berlin; Dahlem, 2016. – N 232. – S. 105-114.