

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

01.12 – МКР. 2401 –Є” 2023.12.29.020 ПЗ

**МИКОЛЕНКО АНТОН ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

2024 р.

Форма № Н-9.02

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет \_\_\_\_\_ конструювання та дизайну \_\_\_\_\_  
УДК 681.533.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри  
надійності техніки  
(назва кафедри)

доц. \_\_\_\_\_ Новицький А.В.  
(підпис) (ПІБ)  
— ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему **«Підвищення ефективності та надійності функціонування  
подрібнювачів зерна»**

Спеціальність \_\_\_\_\_ 133 - «Галузеве машинобудування» \_\_\_\_\_  
(код і назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_\_

Магістерська програма «Технічний сервіс машини та обладнання  
сільськогосподарського виробництва»

(назва)

Орієнтація освітньої програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**

\_\_\_\_\_ К.Т.Н., доц. \_\_\_\_\_ Новицький А. В.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

**Керівники магістерської роботи**

\_\_\_\_\_ К.Т.Н., доцент \_\_\_\_\_ Харьковский І. С.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ керівника)

\_\_\_\_\_ К.Т.Н., доцент \_\_\_\_\_ Новицький А. В.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ керівника)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ Миколенко А. О.  
(підпис) (ПІБ студента)



роторі та статорі. 5. Програма і методика експериментальних досліджень. 6. Кути різання в окремих точках на крайці робочого органу та 3D модель. 7. Результати техніко-економічного обґрунтування. Висновки. Перелік літературних джерел. Додатки

---

Дата видачі завдання «25» вересня 2023 р.

**Керівник магістерської роботи**

\_\_\_\_\_

( підпис )

Харьковський І. С.

\_\_\_\_\_

( прізвище та ініціали )

Новицький А. В.

\_\_\_\_\_

( підпис )

\_\_\_\_\_

( прізвище та ініціали )

**Завдання прийняв до виконання**

\_\_\_\_\_

( підпис )

Миколенко А. О.

\_\_\_\_\_

( прізвище та ініціали студента )

## ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	
ВСТУП	
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ У ПОДРІБНЮВАЧАХ	
1.1. Аналіз зернових матеріалів в структурі виробництва комбінованих кормів	
1.2 Процеси подрібнення та фактори, що впливають на них	
1.3. Основні фактори, що впливають на показники ефективності відцентрово-роторних подрібнювачів	
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ПОДРІБНЮВАЧАХ ЗЕРНА РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ З РІЖУЧИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ КРИВОЛІНІЙНОЇ ФОРМИ	
2.1 Способи механічного руйнування зерна робочими органами	
2.2 Визначення частоти обертання ротора, що забезпечує рух зернового матеріалу до зони подрібнення	
2.3. Визначення кількості ступенів подрібнювача	
2.4.1 Геометричні параметри ріжучого елемента криволінійної форми	
2.4.2. Визначення активної довжини ножа, що бере участь у процесі різання	
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПОДРІБНЮВАЧА	
3.1 Характеристика подрібнюваного матеріалу	
3.2 Експериментальні дослідження: установка відцентрово-роторного принципу дії, вимірювальні прилади, апаратура	
3.3. Експериментальне визначення геометричних параметрів ріжучих	

елементів робочих органів подрібнювача	
3.4. Дослідження фізико-механічних властивостей зерна та встановлення раціональної форми ріжучого елемента	
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ	
4.1 Аналіз фізико-механічних властивостей подрібнюваного матеріалу	
4.2. Визначення форми сегмента зернівки на виході першого ступеня подрібнювача	
4.3 Визначення положення зернівки у каналі другого ступеня подрібнювача зернових матеріалів	
4.3. Визначення оптимальних кутів при вершині ріжучої кромки наскрізних пазів кільцевих виступів	
4.4. Визначення потужності та продуктивності подрібнювача	
4.5. Визначення гранулометричного складу подрібнюваного матеріалу	
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	
5.1 Визначення економічної ефективності від впровадження подрібнювача кормового зерна в сільськогосподарське виробництво	
ВИСНОВКИ	

## УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АПК – агропромисловий комплекс;

ПН – показники надійності;

РОБ – ремонтно-обслуговуюча база;

СУН – система управління надійністю;

ТОР – технічне обслуговування і ремонт;

ТЕО – техніко-економічне обґрунтування;

## ВСТУП

Агропромисловий комплекс – значуща складова частина економіки України, де виробляється необхідна для суспільства продукція, а також зосереджений великий економічний потенціал. Найважливіша ланка агропромислового комплексу – сільське господарство. Для успішного подолання проблем аграрному сектору необхідна підтримка з боку держави, з цією метою розроблено програма розвитку АПК на 2013 - 2020 рр.

Одна з цілей програми – забезпечення продовольчої безпеки в параметрах, заданих Програмою розвитку АПК України. Для вирішення цієї мети необхідні технічна і технологічна модернізація, а також підтримка малих форм господарювання. До очікуваних результатів від реалізації програми можна віднести:

Зі збільшенням кількості тваринницьких ферм зростає і потреба в кормах. Виробництво комбінованих кормів із кожним роком збільшується в середньому на 7-10%. За такого зростання виробництва сільськогосподарської продукції слід повною мірою забезпечити кормами сільгоспвиробників.

Найактуальнішою стає проблема розумного використання кормів. Необхідні: удосконалення технологій годівлі та приготування кормів; застосування та використання нових або раніше використаних кормових культур і добавок; застосування та розробка новітніх машин і засобів механізації для приготування кормів.

Важливо відзначити застосування і розробку універсальних машин, призначених для обробки різноманітних видів кормів для різних видів сільськогосподарських тварин і птиці.

**Мета** - Підвищення ефективності використання та надійності подрібнювачів кормів конструкторсько-технологічними методами.

**Об'єкт досліджень:** технічний стан деталей подрібнювачів кормів

**Предмет дослідження** – обґрунтування параметрів технологічного процесу забезпечення ефективності та надійності подрібнювачів кормів.

**Методи дослідження** - емпіричні (спостереження, порівняння, вимірювання), експериментально-теоретичні, методи планування експериментів, статистичні методи обробки даних, аналізу, синтезу та узагальнення отриманих результатів.

**Задачі досліджень:**

- Провести аналіз конструкцій, технічних характеристик, умов експлуатації та характерних відмов подрібнювачів кормів.
- Встановити основні напрямки підвищення довговічності роторних кормодробарок зернових матеріалів.
- Отримати аналітичні залежності обґрунтування параметрів подрібнювача кормів та оцінки ефективності його роботи.
- Провести дослідження параметрів ножів подрібнювача кормів та якості подрібнення зернових матеріалів.
- Експериментально уточнити властивості зернових матеріалів та дослідити вплив параметрів ножів на показники роботи подрібнювачів.
- Провести техніко-економічну оцінку ефективності роботи та підвищення надійності подрібнювачів кормів.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ У ПОДРІБНЮВАЧАХ**

### **1.2. Аналіз зернових матеріалів в структурі виробництва комбінованих кормів**

Зернові культури, широко використовуються при виробництві комбінованих кормів згідно зоотехнічних вимог до подрібнення фуражного зерна. Прискорення темпів розвитку тваринництва в рамках Програми розвитку сільського господарства до 2030 року призвело до збільшення обсягів виробництва комбінованих кормів в Україні [1].

Як показує аналіз літературних джерел, виробництвом комбікормів для тваринництва займаються великі холдинги та заводи, фермерські та сільськогосподарські підприємства, приватні господарства. Найбільш популярними формами малого бізнесу, які підприємства, які займаються виробництвом збалансованих кормових добавок, концентратів та повнораціонних комбінованих кормів. Питання формування підприємств, які можуть готувати комбіновані корми у невеликих обсягах, стає все більш актуальним: пов'язано це із прагненням фермерів та приватних власників невеликих господарств скорочувати витрати на виробництво продуктів тваринництва та підвищувати їх рентабельність. Для всіх видів виробників продукції тваринництва велике значення має раціональний підхід до приготування та використання кормів. За можливості виробництва кормів на місцях їх споживання з'являється перспектива збільшення обсягів виробництва за рахунок зниження цін на корм, відсутня необхідність оплати перевезення кормів, переплати посередникам. Також знижуються ризик виникнення дефіцит кормів, використання кормів низької якості.

Одна з найбільш значущих операцій у приготуванні комбікормів – операція подрібнення. Перед інженерами стоїть відповідальне завдання зі створення подрібнювальних машин, які дозволяють отримувати корми, що відповідають зоотехнічним вимогам, та характеризуються низьким рівнем

енерговитрат при їх виготовленні.

Зерно є основою будь-якого комбікорму і може займати від 30 до 80% всієї маси суміші. Комбінованим кормам віддають перевагу через те, що вони засвоюються організмом тварини за оптимальний термін у більш повній мері порівняно з необробленим зерном [3; 18].

Такий результат можливий лише при правильній обробці компонентів, що входять до складу комбікормів. Ефективність корму може знижуватися до 20% в залежності від кількісного вмісту у ньому необробленого зерна [8].

Тимчасові зоотехнічні вимоги при відгодівлі ВРХ до маси 400-500 кг зоотехнічними вимогам становлять 16 – 18 місяців. Фактично цей термін становить близько 30 місяців через застосування кормів, які не відповідають зоотехнічних вимог [21].

Частка фінансових вливань, що витрачаються на корми від усієї собівартості продукції тваринництва може становити орієнтовно 55-65%, а саме для ВРХ – до 47%, свинарстві – до 67%, птахівництві – до 75-79% [5].

Зниження собівартості продукції дозволяє інтенсивніше розвиватися виробництва, сприяє конкурентоспроможності підприємства та впливає на якість продукції сільгоспвиробника, роблячи її більш доступною для споживача.

Зернові корми для ВРХ використовують для балансування раціонів з енергії, протеїну та інших поживних речовин. Зерно різних кормових культур є джерелом енергії у комбікормах. Відомо, що на корм тваринам використовується, в основному зернові та зернобобові культури. Найбільш часто для приготування комбінованих кормів застосовують культури: пшеницю, ячмінь, овес, горох, просо, кукурудзу, жито. Кількісна частка зернових культур у комбікормах може становити до 60% [11]. Структури зернових культур у приготуванні комбінованих кормів та їх кількісний зміст наведено у таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1

Структура кормів (зернових для годівлі тварин, що застосовуються для виробництва комбінованих кормів, %

Об'єм корму в структурі	Культура						
	Кукурудза	Пшениця	Овес	Ячмінь	Просо	Горох	Інші корма
Необхідні	44.5	9.0	7.3	12.6	2.8	12.6	-
Фактична структура	5.1	59.8	21.1	3.2	1.0	3.0	6.8

Таблиця 1.2

Кількісна характеристика зернових кормів у складі комбінованих кормів для різних видів та груп тварин

Види с/г тварин	Кукурудза	Пшениця	Овес	Ячмінь	Просо	Горох	Жито
Птиця	< 60%	< 30%	< 25%	< 25%	< 40%	< 25%	
ВРХ	< 45%	< 30%	< 40%	< 40%	< 10%	< 10%	< 30%
Свині	< 30%	< 25%	< 60%	< 60%	< 25%	< 25%	< 30%

Аналіз показує, що якість комбікормів залежить від складових компонентів, матеріалів які використовуються та однорідності. Вимоги до однорідності наведено у таблиці 1.3. Попереднім аналізом встановлено, що Чим вища однорідність комбінованого корму, тим вища продуктивність тварин. Однорідність комбікорму залежить від гранулометричного складу подрібненого зерна. Форма частинок, одержуваних в результаті обробки, також важлива [7,11].

Таблиця 1.3

Вимоги до однорідності комбінованих кормів

Однорідність корму в (%)	Оцінка корму	Додаткова обробка
90 та більше	Чудовий	Не потребує
85-90	Хороший	Змішення часу змішування на 25 – 30 %

80-85	Задовільний	Збільшення часу змішування, додаткові налаштування обладнання, в тому числі подрібнювання
Менше 80	Поганий	Комбінування вищезазначених заходів для усунення недоліків комбікорми

З аналізу даних, які представлені в таблиці 1.3 встановлено: однорідність подрібненого продукту впливає на гомогенність комбікорму, що позначається на якості кінцевого продукту. Якщо зернові компоненти, що входять до складу комбікорму, не відповідають зоотехнічним вимогам, ефективність їх використання знижується.

Виходячи із вказаного, можна зробити висновок про важливість і актуальність процесу подрібнення. Модуль помелу, гранулометричний склад, кількість пилоподібної фракції в продукті помелу значною мірою впливають на перетравлюваність, засвоюваність, а загалом раціональне використання кормової бази.

Приклади використання кормових компонентів, які наведені в таблицях 1.4 та 1.5, у яких показано вплив модуля помелу на перетравлюваність.

Таблиця 1.4

Ефективність годівлі свиней зерновими кормами різного помелу

Вид помолу	Перетравлювані органічні речовини, %	Добові прирости ваги, г
Кукурудза		
Крупний	88,4	672,0
Середній	93,8	722,0
Ячмінь		
Крупний	79,3	490,0
Середній	81,8	556,0

Кормова суміш		
Крупний	74,3	638,0
Середній	75,4	714,0

•

Таблиця 1.5

## Коефіцієнт перетравлюваності

Види помолу	Органічне речовина	Сирий протеїн	Сирий жир	Сира клітковина	Безазотисті екстрактивні речовини
Крупний	67,1	60,3	11,8	11,8	75,1
Середній	80,6	80,6	13,3	13,3	87,7
Тонкий	84,6	84,4	30,0	30,3	89,6

За отриманими даними таблиць 1.4 та 1.5 можна зазначити: ступінь подрібнення (модуль помелу) кормових засобів, що йдуть на корм тваринам, може надавати суттєве вплив на процес перетравлюваності кормів та добові прирости ваги ВРХ, свиней, птахів.

### 1.3.1 Процеси подрібнення та фактори, що впливають на них

У дроблення та подрібнення складових кормів немає значних відмінностей. Аналіз літературних джерел показує, що прийнято вважати при дробленні, одержують частинки, які мають розмір понад 5 мм, а при подрібнення – частинки, які менші, ніж 5 мм.

Більшість дослідників, які займалися проблемами подрібнення зернових матеріалів, головною при подрібненні вважали проблему руйнування зернівки і розглядали її як найбільш значущу за впливом на ефективність та надійність. Оцінка співвідношення енергетичних витрат та кількості одержуваного

продукту була головною метою дослідників. На другий план йшли проблеми отримання якісного продукту помелу, що відповідає зоотехнічним вимогам.

Аналіз літературних джерел показує, що процес подрібнення у молоткових дробарках – складний. На нього впливає значна кількість факторів, основними з яких є наступні [12, 15, 25]:

- колова швидкість молотків подрібнювального ротора;
- фізико-механічні властивості сировини, яка подрібнюється, включаючи вологість та структурні характеристики;
- розмір отворів решіт;
- відстань між молотками та решетом;
- товщина, маса та форма молотка;
- спосіб видалення продукту помелу з області подрібнення

Автори статей [3, 7, 12], вивчаючи вплив вологості на процес подрібнення зернових матеріалів, встановили, що вплив певного класу фракцій залежить від вологості складових. Підвищення вологості з 11 до 17% незначно впливає на крупність продуктів подрібнення таких як: середній розмір частинок збільшується на 3 – 5%, а поверхня, що утворилася, зменшується на 5 - 7%. Зміна зазначених показників проходить, в основному, за рахунок підвищення вмісту великої фракції складових [7].

Зазначений висновок пояснюється лише диференційованою дією вологи на стан частини зернового матеріалу. Периферійні частини зернового матеріалу, які переважають у великій фракції, під впливом вологи набувають пластично-в'язких властивостей і подрібнюються значно гірше.

При в значній вологості зерна, що складає більше 16% відзначені суттєві зміни в процесі подрібнення [7; 16].

Багатьма дослідниками було встановлено, що від колової швидкості молотків залежать основні технологічні параметри, які формують ефективність роботи молоткових дробарок та подрібнювачів.

При збільшенні колової швидкості – збільшується ступінь подрібнення зернового матеріалу. Зазначений результат пояснюється тим, що під дією

молотків, що обертаються продукт захоплюється в круговий обертальний рух і подрібнюється за рахунок стирання.

В наукових статтях, включаючи зарубіжні, було підтверджено, що рекомендовані колові швидкості для подрібнення зернового матеріалу. В окремих джерелах оптимальними рахуються швидкості в межах 70 – 90 м/сек, а в інших – 80 – 100 м/сек. Для окремих конструкцій дробарок, та конкретних умов експлуатації, є межа підвищення колової швидкості молотків. Слід зазначити, що значеннях колової швидкості молотків понад граничної відбувається зниження пропускної спроможності решета через зміну вітрового потоку. Це призводить до збільшенню витрат електроенергії [13; 28].

Решета – одні із основних робочих органів молоткових дробарок. Через отвори в решетах подрібнений продукт виводиться з подрібнення. Найбільшого поширення набули решета двох видів: з круглими отворами та лускатної форми. Швидкість видалення подрібнених частинок залежить від форми та розміру отворів решіт.

Відмічається розбіжність в результатах вчених щодо впливу форми отворів решіт на процес виведення частинок зернових матеріалів із зони подрібнення.

Важливим є зазор між молотками та решетом, як фактор, що забезпечує значний вплив на фракційний склад продукту. За підсумками досліджень, проведених багатьох дослідників [12, 11, 26], було винесено пропозиції про збільшенні зазору від 10,0 до 30,0 мм з одночасним збільшенням колової швидкості від 80 до 100 м/сек. У молоткових зернових дробарках зарубіжного виробництва, зазор між молотками та решетом становить 6,0 – 30,0 мм [18; 120; 19].

В багатьох наукових дослідженнях зазначається, що залежно від зернового матеріалу, який подрібнюється, модуля помелу та зоотехнічних вимог використовують різні за розміром, формою та масою молотки. Їх товщина впливає на гранулометричний склад та властивості зернового матеріалу. Для подрібнення зерна рекомендують молотки з товщиною 2,0 – 5,0

мм. Автори статей зазначають, що тонкими молотками процес подрібнення протікає більш ефективно, оскільки, крім деформації стиснення, з'являється деформація зріз. Для товстих молотків характерні лише деформації стиснення [26, 28].

В окремих дослідженнях [11, 27] показано, що за одних і тих самих колових швидкостях та однакових розмірах отворів решета, але з меншою кількістю молотків знижується вміст пилоподібної фракції в подрібнених матеріалах [4].

Важливість використання повітряного потоку при подрібненні зернових матеріалів доведена багатьма авторами [11, 14], які вважають, що відсмоктування повітря з подрібнювальної камери збільшує пропускні характеристики решіт [22; 17; 34].

Продуктивність як індикатор споживчих властивостей, що впливає на показники ефективності та надійності роботи молоткових кормодробарок, детально висвітлено джерелах [22; 28; 33].

Підвищення продуктивності молоткових кормодробарок за рахунок збільшення потужності приводу та швидкісних режимів роботи призводить до небажаних наслідків, включаючи підвищення вібраційної активності, передчасний знос підшипникових опор та вала ротора, збитки часу від простоїв, спричинені заміною решета і молотків [5, 7, 12].

Зазначений вплив призводить до зниження показників надійності кормодробарок та погіршення ефективності використання.

Практика використання кормодробарок та зернових подрібнювачів в умовах комбікормових заводів та технологічних ліній кормоцехів продуктивність подрібнення та помелу зерна часто підвищують за рахунок збільшення потужності дробарок. При цьому недостатньо використовуються удосконалення технологічних процесів та схем подрібнення [18; 23].

Одним із основних критеріїв оцінки та забезпечення якості подрібнення зернових матеріалів рахується однорідність фракційного складу частинок для максимального засвоєння складових корму в організмах тварин та птиці [3; 12].

З представленого слідує, що дробарка вважається тим досконалішим, чим вище її коефіцієнт зоотехнічної оптимізації; підрахувати його можна за слідкуючою залежністю:

$$Q = \frac{Q_{\text{ОПТ}}}{Q_{\text{ЗАГ}}} \quad (1.1)$$

де  $Q_{\text{ОПТ}}$  – кількість продукту, що оптимально засвоюється твариною, від загальної маси, т;

$Q_{\text{ЗАГ}}$  – загальна маса подрібнюваного продукту, т.

Молоткові дробарки, що використовуються на виробництвах, при подрібненні зернових матеріалів на решітках з діаметром отворів 4,0 мм витрачають близько 9,7 ... 12,5 кВт · год./ т електричної енергії. Аналіз розмелених характеристик продукту подрібнення за різних технологій та молоткових кормдробарках з решітним способом регулювання модуля помелу за останні 25 - 30 років показав, що коефіцієнт оптимізації значно відрізняється. Так, для машин ДДМ він становить 55 ... 65%, для дробарок А1-ДДП - 48 ... 51% [5, 10]. Це пояснюється тим, що вказані дробарки мають спільний недолік, - наявність на решітній поверхні киплячого кільцевого шару подрібнюваного продукту. Саме такий киплячий шар перешкоджає вільному проходженню частинок зерна, подрібненого до відповідної фракції.

В наукових роботах [18, 24] зазначено, що у дробарок з решітним способом подрібнення та сепарації продуктів жорсткі обмеження отримання заданого модуля помелу. Це ускладнює можливості встановлення потрібних показників якості продуктів помелу.

Певна група дослідників займалась пошуком шляхів підвищення ефективності та надійності зернових дробарок [5, 15, 25], але конструкції безрешітних дробарок так і не були запропоновані жодним із дослідників, крім ДБ-5, ДЗ-4. Немає теоретичних передумов для створення безрешітного подрібнювача матеріалів. На Всесоюзній науково-технічній нараді «Проблеми удосконалення молочних ферм» у 1977 році, у місті Рига зазначалося, що в наступні десятиліття ефективно будуть розвиватися безрешітні дробарки. Саме

такі машини для подрібнення зернових матеріалів вироблялись на Нововград-Волинському заводі сільськогосподарських машин.

В останні кілька десятиліть в Україні і за кордоном використовується кілька різновидів безрешітних кормодробарок та млинів: молоткові дробарки без колосникових ґрат, струменеві машини та інші [5; 10; 18]. Отримали поширення такі безрешітні дробарки, як ДБ-5, подрібнювач зернових компонентів дискового типу, штифтова дробарка ВАС-850, шведська фірми «Камас».

### **1.3. Основні фактори, що впливають на показники ефективності відцентрово-роторних подрібнювачів**

У багатьох країнах для інтенсифікації процесу подрібнення продуктів широко застосовують у будівельній та харчовій промисловості машини відцентрово-ударної дії.

Робочим органом служить два сталеві диска, які закріплені на горизонтальних або ж вертикальних валах розташовані співвісно і обертаються в різні сторони [14]. Подрібнюючими робочими органами таких машин виступають циліндричні штифти із загальним центром, збігаються з віссю валу.

В таких машинах штифти розташовані по діаметрах кола в рівному видаленні один від одного. Кожен зі штифтів встає між двома штифтами другий диск. Подрібнений матеріал подається до приймальної камери до центру дисків (роторів), приймальний пристрій на одному з дисків (роторів) рівномірно розподіляє його по робочій поверхні у радіальному напрямку. Частинки перш ніж пройти до периферії через ряди штифтів слід роздробити. Це відбувається завдяки неодноразовому їх зіткненню зі штифтами в межах кожної зони подрібнення, утвореної двома суміжними, що рухаються назустріч один одному рядами штифтів.

Подрібнені частинки мають можливість вільно проходити до наступної

зони подрібнення, а більші, навпаки, піддаються подрібненню зі сторони робочого органу. Крок встановлення штифтів кожного ряду різний і зменшується з наближення периферії. Завдяки цьому, а також збільшення колової швидкості у більш віддалених від центру зонах процес подрібнення послідовно зростає.

У дослідженнях [15], висвітлені кращі показники за величиною подрібнення борошна, його якості та питомих енерговитрат досягаються при підвищенні швидкості дезінтегрування приблизно 150 м/с.

Отримане борошно характеризується високим ступенем подрібнення, переважаючи вимоги до борошна для хлібобулочних виробів. Найкраща якість борошна досягалася при коловій швидкості 129,0 – 131,0 м/сек зовнішнього ряду пальців. При зазначеній коловій швидкості просіювання борошна в дезінтеграторі було в 1,5 - 2,0 рази більше в порівнянні з вилученням в вальцових верстатах відповідних систем розмелювання на млині.

Питанням розмелювання в дезінтеграторах займалися автори [27]. Провівши досліди з розмелювання вапна в дезінтеграторі, автор [27] виявив, що при подрібненні досліджуваних речовин у дезінтеграторі можливе отримання силікальцитних виробів із суттєвим підвищенням міцності (до 40%). У результаті досліджень вдалося вивести формули для визначення максимальної пропускної спроможності дезінтегратора та потреби в енергії для подрібнення. Для проведення дослідів застосовувався дезінтегратор зі наступними робочими параметрами: трьома колами пальців на кожному диску, що обертаються назустріч один одному. Найбільший діаметр кола пальців (штифтів) – 650, найменший – 290 мм; відстань між колами – 36 мм; діаметр пальців – 16 мм; відстань між пальцями – 10 мм; висота пальців – 98 мм; привід здійснювався від електродвигунів загальною потужністю 750, 950, 1450 та 28 кВт.

На думку авторів [28, 29], значний вплив на енергоспоживання дезінтегратора мають наступні фактори: поперечний переріз форми пальців дезінтегратора; твердість і вологість матеріалу, що розмелюється.

Автор досліджень встановив [31], що розподіл приросту питомих

поверхонь, пропущених через дезінтегратор пісків (м/кг піску), на кількість енергії, витраченої на розмелювання 1 кг піску, у загальному вигляді приймає залежність:

$$S_{уд} = f(\tau_T) \quad (1.2)$$

де  $\tau_T$  - твердість матеріалу.

Вивченням роботи відцентрових дробарок ударної дії щодо якості технологічних процесів подрібнення фуражного зерна займались ряд дослідників [1, 18, 21]. Авторами була розроблена відцентрова багатоступінчасте встановлення.

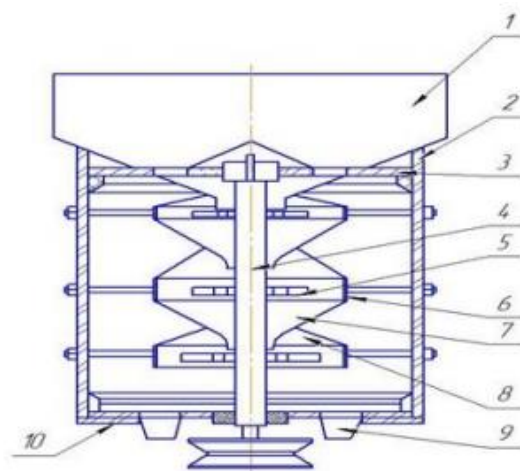


Рис. 1.1. Схема відцентрової багатоступінчастої дробарки зерна

Представлена машина складається з наступних складових: завантажувальний бункер 1; циліндричний корпус 2; верхня опорна плита 3; нижня опорна плита 10, вертикальний вал 4; розгінні диски 5.

Функції відбійних плит виконують решета-матриці, які встановлюють проти кожного розгінного диска. Для транспортування зерна на розгонні диски є корпусні лійки 7, які виконані у вигляді змінних елементів. Подрібнений матеріал відводять по скатних дошках 8 у відвідні патрубки 9. Розгінні диски виконані за аналогією з робочими органами.

Автором статті [12] було запропоновано та досліджено ударно-відцентрову дробарку фуражного зерна з роторами, які обертаються один проти одного, із закріпленими плоскими робочими органами (рис. 1.2)

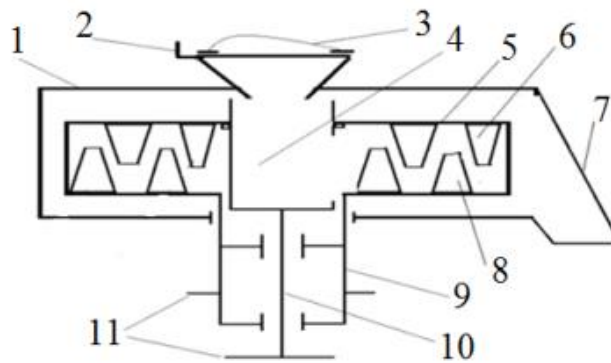


Рис. 1.2 Схема ударно-відцентрової дробарки зерна

Дробарка складається з таких деталей: корпус 1; вивантажувальний патрубок 10; бункер 3; робочі органи у вигляді двох зустрічно обертових дисків 4, 5; чотири ряди плоских подрібнюючих елементів. Подрібнюючі елементи 5, 6 входять у простір між першим подрібнюючим елементом та зубом 8.

Автор [32] розглядав процес подрібнення зернових матеріалів багатостадійною відцентровою дробаркою, що працює за принципом зрізу сколюванням зі своєчасним виведенням готового продукту. Вдосконалення конструктивно-технологічної схеми відцентрово-роторного подрібнювача кормів, який дає можливість отримувати продукт із заздалегідь заданим ступенем помелу, підвищувати продуктивність, зменшувати питому металомісткість.

## РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ПОДРІБНЮВАЧАХ ЗЕРНА РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ З РІЖУЧИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ КРИВОЛІНІЙНОЇ ФОРМИ

### 2.1 Способи механічного руйнування зерна робочими органами

Механічне подрібнення зернових матеріалів умовно розподіляються на два види: руйнування різанням; руйнування подрібненням. Згідно даних багатьох науковців та дослідників, різання є найменш енергоємним технологічним процесом при подрібненні зернових матеріалів [5, 15].

Подрібнення зерна у машинах відбувається за рахунок руху частинок по кругових координатах з подальшим зіткненням з крайками робочих органів. Конструктивні характеристики кормоподрібнювачів дають можливість забезпечити спрямований розгін частинок за рахунок виконання робочих кілець подрібнювача за наскрізними пазами. Траєкторії та значення швидкості частинок у подрібнювача можна представити за використання відомих законів механіки.

Руйнування подрібнювального матеріалу можливе за умови ударної дії з краю робочих кілець на зерно, а також при оптимальній коловій швидкості частинок на розгінних ділянках [5].

Робочі органи подрібнювача розташовані горизонтально і представляють два диски, що мають кільцеві виступи з наскрізними пазами. Орієнтуючись на основний закон подрібнення зернових матеріалів, запропонований П.А.Ребіндером можна отримати обґрунтування технологічної схеми подрібнювача зернових матеріалів [15]:

$$A = f(\Delta V) + f(\Delta S). \quad (2.1)$$

Закон Ребіндера П.А. можна розглядати як суму складових роботи пружних деформацій, що витрачається на утворення нових поверхонь.

$$A = A_y + A_s, \quad (2.2)$$

де  $\Delta V$  – об’єм деформаційної частини тіла;

$\Delta S$  – збільшення питомої площі поверхні матеріалу;

$A_y$  – робота пружних деформацій;

$A_s$  - робота, що витрачається на утворення нових поверхонь.

Основним завданням процесу подрібнення зернових матеріалів є отримання нових поверхонь внаслідок руйнування частинок. Корисною слід вважати також роботу, яка витрачається на утворення нових поверхонь  $A_s$ . Оцінити ККД ( $\eta_{\text{ізм}}$ ) процесу подрібнення можна за наступною залежністю:

$$\eta_{\text{ізм}} = \frac{A_s}{(A_y + A_s)} \quad (2.3)$$

З аналітичної залежності (2.3) випливає прямо пропорційна залежність ККД процесу подрібнення у пристрої від роботи пружних деформацій  $A_s$ . Так як зерно є тілом з анізотропними властивостями і в процесі подрібнення приймає він безліч пружних деформацій, ККД процесу низький. Для підвищення ефективності подрібнення та підвищення ККД подрібнювача слід реалізувати наступні умови:

- звести до мінімального значення роботи пружних деформацій  $A_y$ . Зазначену умову можна виконати, застосувавши руйнування зерна методом зрізу сколюванням. За цих умов докладати зусилля, що руйнує, необхідно поперек зернівки;

- збільшити складову роботи на утворення нових поверхонь  $A_s$  шляхом ступінчастого подрібнювача зернових матеріалів зі своєчасним та обов’язковим виведенням продукту помелу;

- забезпечити реалізацію найкращого проходження зернового матеріалу між ступенями робочих органів об’єкту досліджень.

Основним завданням процесу подрібнення зернового матеріалу є отримання частинок продукту, які подрібнюється, із заданими параметрами при незмінних витратах електроенергії, її зниження або ж регулювання.

Вагомою проблемою при проектуванні є проблема усунення переподрібнення, яка виникає в результаті несвоєчасного виведення продукту

помелу із зони подрібнення агрегату.

Для реалізації зазначеного завдання є можливість розробки подрібнювача зерна відцентрово-роторного типу, який працює за способом «зрізу сколюванням».

## 2.2 Визначення частоти обертання ротора, що забезпечує рух зернового матеріалу до зони подрібнення

Проведемо визначення частоти обертання ротора подрібнювача, який забезпечує рух зернового матеріалу до зони його подрібнення. Швидкість обертання робочих дисків подрібнювача зерна повинна бути достатньою для того, щоб частинка не переміщалися разом із диском. Рух частинки разом з диском призводить до ефекту зависання матеріалу, який надходить та незадовільного його подрібнення.

При достатній швидкості буде забезпечено рух частинки певною траєкторією, напрям якої описується вектором суми абсолютної та відносної швидкостей. Схема швидкостей сил, які діють на частинку, що обертається на горизонтальній площині з постійною кутовою швидкістю представлено на рис. 2.1.

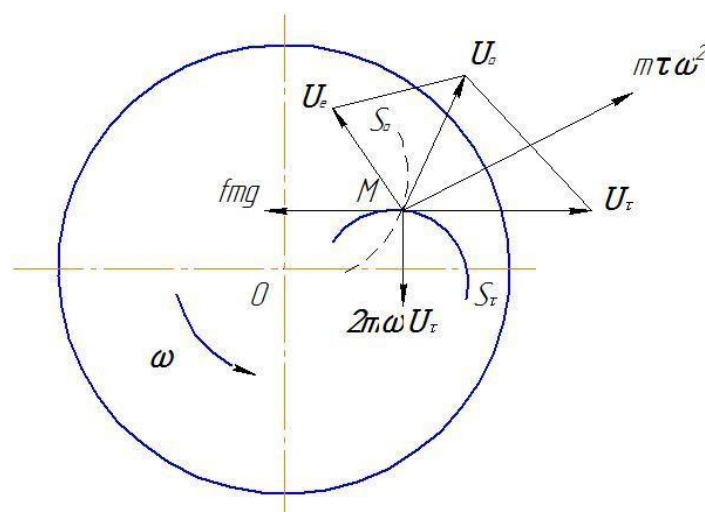


Рис. 2.1. Схема швидкостей сил, які діють на частинку, що обертається на горизонтальній площині з постійною кутовою швидкістю

Частинки зернового матеріалу, який рухаються по бічній поверхні кільцевого виступу, та їх рух описується певним законом, а схема швидкостей сил представлена на рис. 2.2.

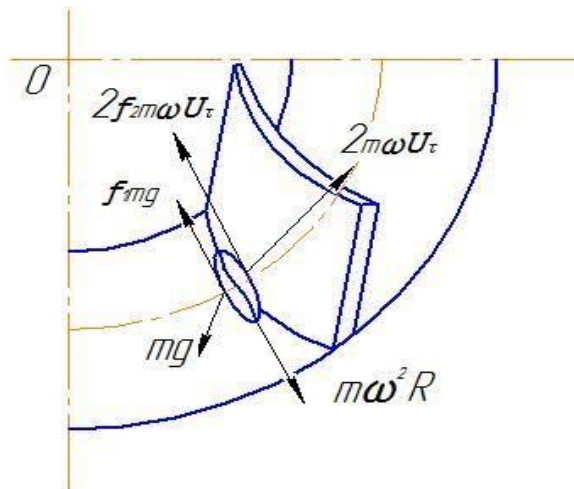


Рис. 2.2. Схема швидкостей сил, що діють на частинку, що рухається по бічній поверхні подрібнювального елемента

Умови переміщення частинки по горизонтальному диску можна представити наступним чином:

$$f_1 = mg + 2f_2 \cdot m\omega \cdot u_r \leq mR\omega^2, \quad (2.4)$$

де  $f_1$  – коефіцієнт тертя частки по диску;

$mg$  - вага зернового матеріалу, що знаходиться на диску;

$mR\omega^2$  – доцентрова сила;

$2m\omega u_r$  - Кориоліса сила (сила, що задає криволінійний рух частинки), перпендикулярно спрямована до швидкості руху частинки і зворотна швидкість руху диска.

За умови виконання диска та робочих органів з одного і того ж матеріалу, за якими переміщується матеріал, що подрібнюється, коефіцієнт тертя буде однаковим

$$f_1 = f_2 = f, \quad (2.5)$$

$$\text{при } u_r = \omega R, \quad (2.6)$$

звідси отримуємо

$$fmg + 2fmR\omega^2 \leq mR\omega^2. \quad (2.7)$$

Для знаходження частоти обертання ротора перетворюємо цей вираз (2.7)

$$\omega = \sqrt{\frac{fg}{R(1-2f)}}. \quad (2.8)$$

### 2.3. Визначення кількості ступенів подрібнювача

Потрібно розрахувати кількість нерухомих робочих дисків подрібнювача, необхідні створення умови подрібнення зернового матеріалу. Для цього знадобиться встановити швидкість, яку має зернівка під час проходження паза під час контакту з ріжучим елементом (рис. 2.3).

$$u_r = \frac{\omega^2 R - fg}{f\omega} \quad (2.9)$$

Припустимо, що:

$$u_r = \frac{M}{t}, \quad (2.10)$$

$$u_e = \frac{S_3}{t}, \quad (2.11)$$

$$u_a = \sqrt{u_e^2 + u_t^2}, \quad (2.12)$$

де в місці контакту з ріжучими кромками робочих органів:

$u_a$  – абсолютна швидкість зернівки;

$u_r$  – відносна швидкість зернівки;

$u_e$  — переносна швидкість зернівки;

$M$  – модуль помелу, зумовлений зоотехнічними вимогами;

$S_3$  – ширина паза між робочими органами подрібнювача;

$t$  – час проходження зернівкою відстані, що дорівнює  $M$ , м.

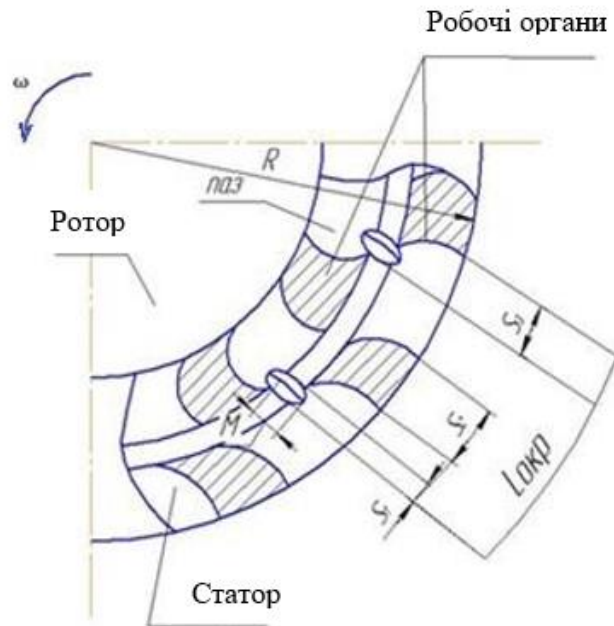


Рис. 2.3. Схема розташування подрібнювальних елементів на роторі та статорі:

$R$  – радіус статора,  $S_1$  – ширина зернівки,  $S_2$  – ширина кільцевого виступу,  $S_3$  – відстань від дотичної до зернівки до початку кільцевого виступу,  $M$  – зазор між робочими дисками подрібнювача.

$$t = \frac{1}{\omega} \ln \left( \frac{(R+M)\sqrt{(R+M)^2 - R}}{R} \right) \quad (2.13)$$

Але оскільки  $u_r = \omega R$ , то після деякого перетворення формул знайдемо ширину паза між робочими органами подрібнювача:

$$S_3 = 2fM. \quad (2.14)$$

Для знаходження необхідної кількості ступенів подрібнювача слід знати: час, що припадає на зріз  $t_1$

$$t_1 = \frac{S_1}{U_{\text{окр}}}, \quad (2.15)$$

де  $U_{\text{окр}}$  – окружна швидкість ротора у зоні подрібнення;

$S_1$  – середня ширина зерна, м;

2)  $t_2$  – час затримки зерна у зоні подрібнення

$$t_2 = \frac{S_1 + S_2}{U_{\text{окр}}}, \quad (2.16)$$

де  $S_3$  - ширина паза між робочими органами подрібнювача, м;

3) час, витрачений на зріз між робочими органами першого ступеня

$$t_3 = \frac{S_2 + S_3}{U_{\text{окр}}}, \quad (2.17)$$

4) час подвійного зрізу зерна  $T$

$$T = t_2 + t_3 \quad (2.18)$$

5) окружний шлях, пройдений за час  $T$

$$L = U_{\text{окр}} \cdot T; \quad (2.19)$$

6) кількість нерухомих подрібнювальних елементів

$$Z = \frac{L}{L_{\text{окр}}}, \quad (2.20)$$

де  $L$  - довжина кола ротора, м.

З метою зниження енергоємності процесу подрібнення та одержання продукту, що відповідає зоотехнічним вимогам до модулю помелу для різних категорій тварин та птахів, пропонується подрібнювач фуражного зерна повинен мати два ступені подрібнення, з умовою що оброблюваний матеріал подрібнюватиметься способом «зріз сколюванням».

#### **2.4.1 Геометричні параметри ріжучого елемента криволінійної форми**

Процес розрізання зернового матеріалу відбувається за рахунок руху робочого органу довкола своєї осі. Розглянемо геометричні параметри кромки різального елемента, показані рис. 2.4.

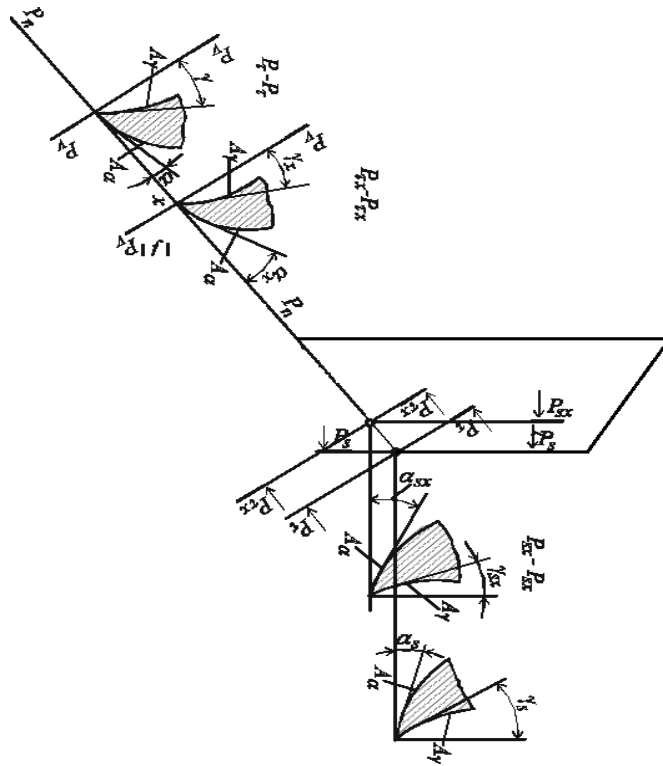


Рис. 2.4 Статичні кути ріжучого елемента робочого органу в головній січній та робочій площинах для різних точок ріжучої крайки

Головний передній кут  $\gamma$  – кут у головній січній площині  $P_T - P_T$  між передньою поверхнею  $A_\gamma$  леза та основною площиною  $P_V - P_V$ . Кут у довільно взятій точці  $x$  ріжучої кромки наочно представлений рисунок 2.4.

Передні кути  $\gamma$  і  $\gamma_s$  у головній січній площині  $P_T - P_T$  та робочій площині  $P_S - P_S$ ,  $\alpha$  – кут у головній січній площині  $P_T - P_T$  між задньою поверхнею  $A_a$  ріжучого елемента та площиною різання  $P_n - P_n$ , задані у робочій площині  $P_S - P_S$ . Задній кут  $\alpha_s$  – між задньою поверхнею  $A_a$  та площиною, перпендикулярною до осі ріжучого елемента.

Порівняємо різання зернового матеріалу з косокутним різанням, обумовленим тим, що кут вектора швидкості і головної ріжучої кромки не дорівнює 0. Розглянемо положення довільної точки взаємодії різального елемента з оброблюваним матеріалом (рис. 2.5).

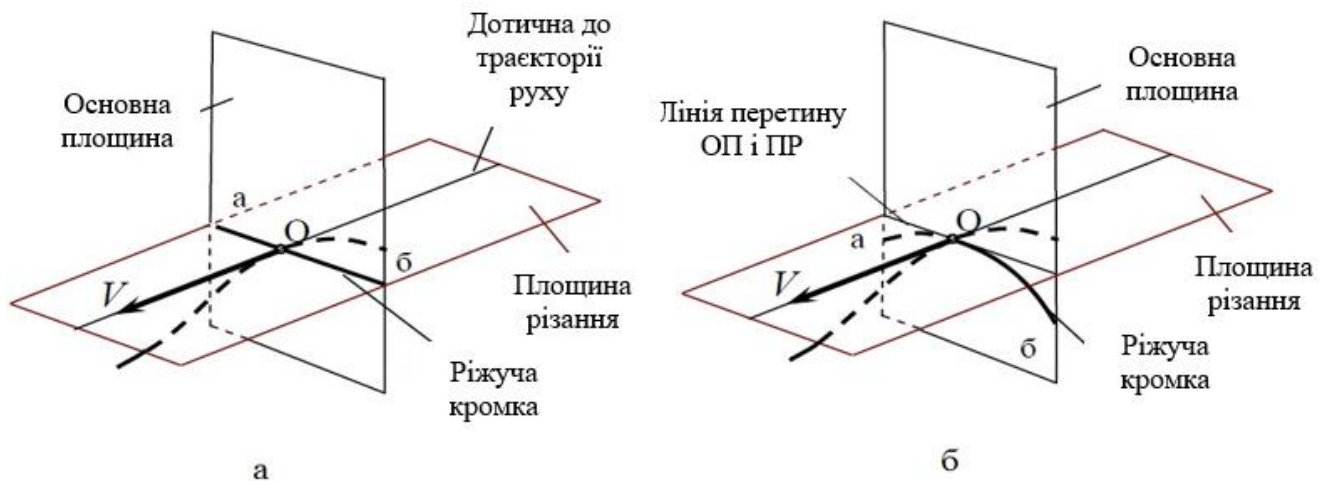


Рис. 2.5 Ортогональні координатні площини: а – площина, що визначає положення точки взаємодії ріжучого елемента та зернового матеріалу перпендикулярно вектору руху зернівки; б - площина, що стосується в точці взаємодії ріжучої кромки і матеріалу і до самої ріжучої кромки.

З досліджень Н.С. Сергєєва, В.А. Дронова, В.А. Зотова та ін. У дисертації зроблено висновок, що кути заточування відрізняються для розрізання різних культур. З робіт Н.С. Сергєєва, В.В. Фоміна, І.Я Федоренко, В.І. Сироватки та ін.. були прийняті критичні значення раціональних кутів ріжучого інструменту від  $15^\circ$  до  $32^\circ$ .

Значення даних кутів обґрунтоване зниженням зусиль різання, зносостійкістю та терміном служби, встановленими у цих роботах [5].

Так як кожна зернівка розрізатиметься на окремій ділянці леза, умовимося, що криволінійна кромка ріжучого елемента складається з безлічі прямолінійних відрізків, що лежать під різними кутами на одній лінії і утворюють цю лінію (рис. 2.6).

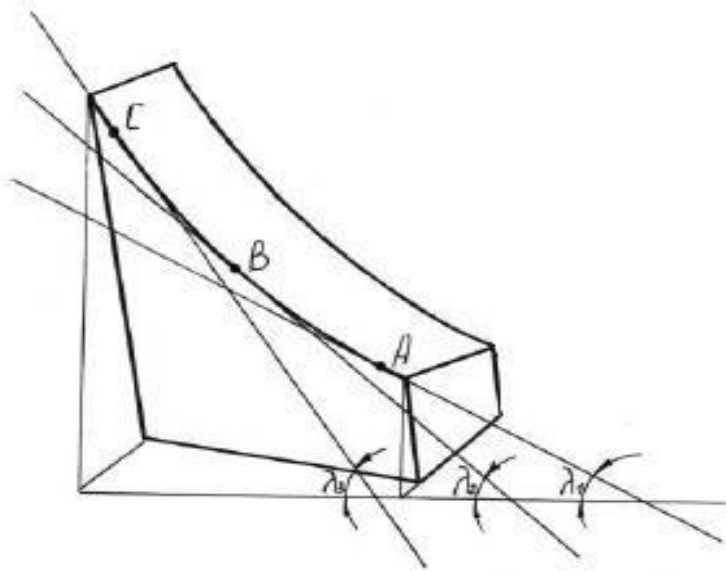


Рис. 2.6. Кути різання в окремих точках на крайці робочого органу

При побудові криволінійної кромки було прийнято обмеження з урахуванням використання раціональних кутів різання від  $15^\circ$  до  $32^\circ$ , а також геометричних параметрів розмірів робочого кільця подрібнювача. Графічно було побудовано 3D-модель подрібнюючого елемента криволінійної форми, представлена на рис. 2.7.

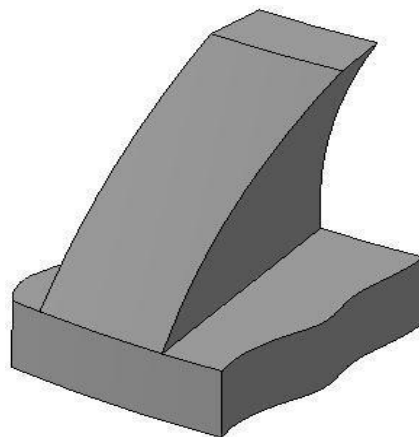


Рис. 2.7 – 3D-модель подрібнюючого елемента криволінійної форми

Геометрія криволінійної кромки зуба подрібнювача описується деякою кривою. Під час проектування ніжки зуба перед авторами постало питання про подальше виготовлення робочого органу подрібнювача. У зв'язку з цими обставинами було розроблено технологічний процес його виготовлення. Вирішили виконувати робочий орган на доступному універсальному обладнанні, а саме на верстаті МАНО-400 з використанням поворотного столу. Для цього було розроблено оснащення зі зміщеним центром, що дозволяє

описувати якусь криву із заданими параметрами. Для виготовлення робочого органу автори збудували його рухи щодо пересування інструменту. За цією моделлю отримана крива з координатами для виконання операції фрезерування. Дана крива, що описує спільний рух інструменту та робочого органу, представляє циклоїду з утворюючим діаметром кола, рівним 4,81 мм, і з довжиною, що дорівнює двом висот диска без урахування перемички у підстави 38,6 мм (рис. 2.8).

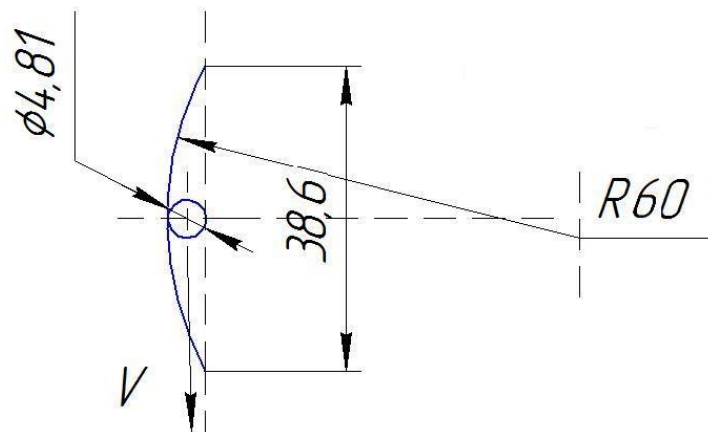


Рис. 2.8 Крива різання, що утворює крайку ріжучого елемента

Розглянемо криву, яка безпосередньо бере участь у процесі різання. Для цього звернемося до ріжучої кромки у двокоординатній системі площин. Для кращої наочності перевернемо дзеркально зуб і розташуємо вершину на початку координат (Рисунок 2.9). Отримана крива є гілкою параболи та описується рівнянням  $y = \sqrt{x}$ .

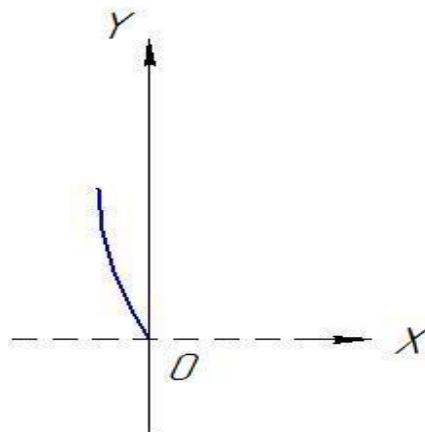


Рис. 2.9 Крайка леза подрібнювального елемента у плоскій системі координат

Порівняємо використання подрібнювальних елементів з прямолінійною та криволінійною ріжучими кромками. Для цього необхідно дізнатися про зусилля різання. Для розрахунку скористаємося формулою, запропонованою А.С. Воскресенським, що показує, що зусилля різання складається із складових (рис. 2.10) [20].

$$P = P_H + P_\delta + P_3 + P_B, \quad (2.21)$$

де  $P_H$  - зусилля різання оболонки зернівки;

$P_\delta$  - зусилля деформування зернового матеріалу гранню ріжучої кромки;

$P_3$  - зусилля подолання опору тертя допоміжної кромки ножа про зернівку;

$P_B$  - зусилля подолання опору тертя грані зовнішньої поверхні.

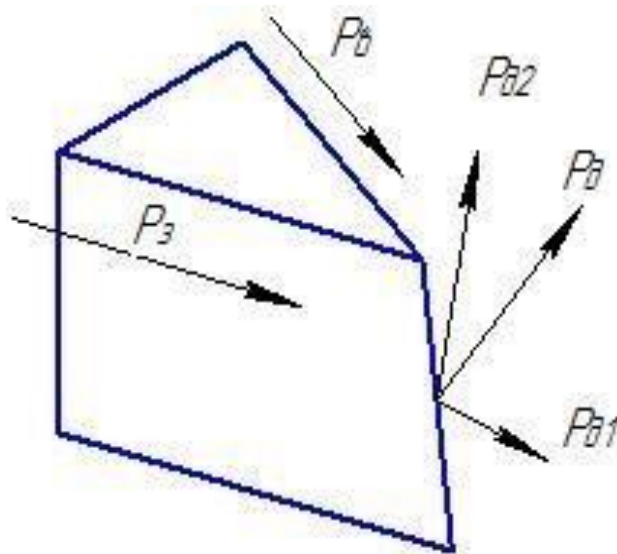


Рис. 2.10 – Схема сил, що становлять зусилля різання у роботі з плоским лезом

Зусилля надрізання зернівки плоскими ножами з криволінійною ріжучою кромкою визначається за формулою

$$P_H = 2q_L p \sqrt{x(d_c - x)(2 + \mu_L(1 + \cos \delta))}, \quad (2.22)$$

де  $q$  – нормальний питомий тиск на лезо ножа, у якому відбувається

руйнація оболонок зернівки;

$x$  – глибина застосування ножа, м;

$\rho$  – радіус закруглення леза ножа;

$\mu_d$  – коефіцієнт тертя леза ножа про зернівку;

$\delta$  – кут різання ножа, що дорівнює куту його заточування;

$d_c$  – діаметр зернівки у місці перерізання, м.

Зусилля деформування зернівки передньою гранню для плоских ножів із прямолінійною ріжучою кромкою обчислюємо за формулою:

$$P_d = 2 \cdot \sigma_{\text{в.см.}} \cdot t_n (1 + \mu_d \operatorname{ctg} \delta t \sqrt{x(d_c - x)}), \quad (2.23)$$

де  $\sigma_{\text{в.см.}}$  – тимчасове опір зім'яттю зерна пшениці передньою гранню ножа, кН/м<sup>2</sup>;

$t_n$  - ширина ріжучої кромки ножа, м;

$\mu_d$  – коефіцієнт тертя леза ріжучого елемента про зернівку.

Визначимо зусилля на подолання опору по задній та передній поверхнях ріжучого елемента:

$$P_3 = K_{\text{у.в.}} \cdot p F_3 \mu_3, \quad (2.24)$$

де  $K_{\text{у.в.}}$  - коефіцієнт відновлення зернового матеріалу;

$F_3$  – площа контакту задньої грані ріжучого елемента та зернового матеріалу;

$\mu_3$  – коефіцієнт тертя зерна об задню поверхню.

$$P_B = K_{\text{у.в.}} \cdot p F_B \mu_B, \quad (2.25)$$

$K_{\text{у.в.}}$  – коефіцієнт відновлення зернового матеріалу,

$F_3$  – площа контакту задньої грані ріжучого елемента та зернового матеріалу;

$\mu_B$  – коефіцієнт тертя зерна про передню поверхню. Загальне зусилля

різання розрахуємо за формулою

$$P = P_k \sin \lambda + P_3 + P_B \quad (2.26)$$

де  $\lambda$  – кут нахилу різальної кромки до вектора швидкості різання.

При різанні ножем з кутом  $\lambda$  до вектора швидкості виникають дві супутні різання сили:  $P_k \cos \lambda$  - віджимна сила, що діє перпендикулярно вектору різання,  $P_k \sin \lambda$  – зусилля впровадження ріжучого елемента (Рисунок 2.11). Для розрахунку необхідно визначити змінні та постійні дані. Постійні дані взяті із різних джерел [156; 173].

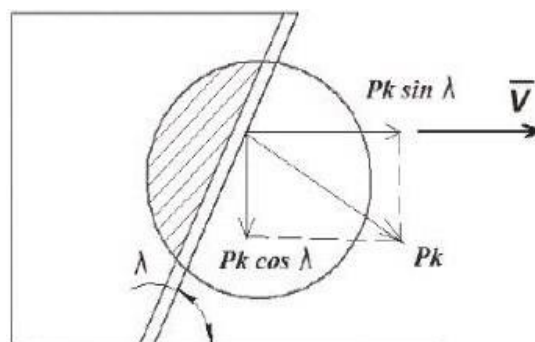


Рис. 2.11 – Залежність зусилля різання зернового матеріалу від кута нахилу ріжучого елемента

У процесі різання зернового матеріалу різальними елементами прямолінійної та криволінійної форми змінними будуть кут нахилу ріжучої кромки до вектора швидкості, площа контакту зернового матеріалу з допоміжними кутами, що утворюють клин.

### 2.4.2. Визначення активної довжини ножа, що бере участь у процесі різання

За допомогою програми компас-3d проведемо виміри площі контакту леза та зернівки у момент різання (рис. 2.12). Для цього збудуємо графічні схеми руху прямого та криволінійного лез у тілі зернівки, крок вимірювання площі - 0,01 мм.

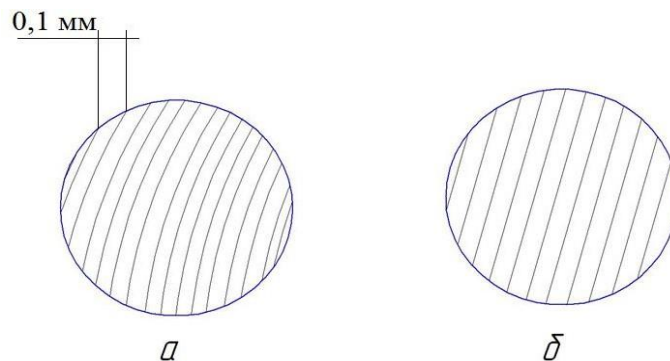


Рис. 2.12 Схема визначення довжини ріжучої крайки: а – для криволінійної ріжучої крайки, б – для прямолінійної ріжучої крайки

Визначення значення кута різання  $\lambda$  в кожній точці кривої. Значення кута  $\lambda$  при прямолінійній і криволінійній кромках будуть різними в кожній точці на ріжучих кромках ріжучого елемента, тому в розрахунках будемо використовувати середнє значення кута різання. Визначимо його як середнє арифметичне значення в точках на лезі, довжина якого зараз бере участь у різанні. При перерізанні довжина ріжучої кромки в обох ножів зменшуватиметься, а середнє значення кута буде прагнути до  $90^\circ$ , це видно на рисунку. Знайдемо значення кута  $\lambda$  для прямолінійної та параболічної функцій за допомогою дотичних функцій у місцях контакту леза та зернівки.

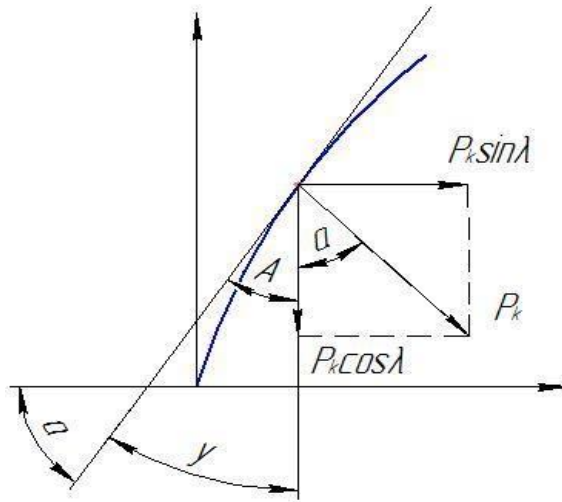


Рис. 2.13 – Визначення кута  $\lambda$  для криволінійного ріжучого елемента

## **РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПОДРІБНЮВАЧА**

### **3.1 Характеристика подрібнюваного матеріалу**

Для перевірки теоретичних даних, отриманих у розділі 2, проведено експериментальні дослідження. Програма досліджень передбачає проведення експериментальних дослідів у лабораторних умовах, реалізованих у кілька етапів:

1. Розробка методик експериментальних досліджень.
2. Виготовлення робочих органів з ріжучими елементами криволінійної форми для дослідження процесу подрібнення фуражного зерна.
3. Підготовка експериментального обладнання та вимірювальних приладів та апаратури.
4. Проведення експериментальних досліджень та обробка результатів.

Головним завданням з розробки методик досліджень є вивчення фізико-механічних властивостей матеріалу, який подрібнюється.

Для проведення експериментальних досліджень використовувались зернові матеріали: пшениця, ячмінь та овес. Це найбільш поширені зернові культури та кормові матеріали в Україні.

Показники якості зернового матеріалу визначали за наступними методиками:

1. Вологість зернового матеріалу за «Комбікорми, сировина. Методи визначення вологості»;
2. Об'ємну масу за «Зерно. Методи визначення натуральної ваги»;  
- Маса 1000 зерен за «Зерно. Методи визначення маси 1000 зерен».

У таблиці 3.1 наведено основні показники зернових культур, що подрібнюються в процесі експериментів.

Таблиця 3.1

## Фізико-механічні властивості зернових матеріалів

Показник	Культура			
	Ячмінь	Пшениця	Овес	Горох
Довжина, мм	6,34 – 11,15	4,67 – 7,98	6,54 – 14,94	—
Ширина, мм	2,90 – 4,71	2,32 – 4,20	2,3 – 4,13	5,44 – 8,00
Товщина, мм	2,3 – 3,32	1,44 – 3,99	1,22 – 3,55	4,2 – 7,65
Еквівалентний діаметр, мм	4,21	3,88	4,11	6,54
Щільність, 1000 кг/м <sup>3</sup>	1,23 – 1,40	1,21 – 1,55	1,11 – 1,42	1,34 – 1,65
Маса 1000 зерен, г	30 – 54	20–43	20–42	131 – 136
Об'ємна маса, т/м <sup>3</sup>	0,65 – 0,73	0,71 – 0,88	0,4 – 0,56	0,73 – 0,86

### 3.2 Експериментальні дослідження: установка відцентрово-роторного принципу дії, вимірювальні прилади, апаратура

Програму досліджень виконано на модернізованій установці, яка виготовлена на базі відцентрово-роторного подрібнювача ІЛС-0,15. Установка ІЛС-0,15 серійно випускається на машинобудівних підприємствах (рис. 3.1, 3.2). Установка складається з частин: корпус 1, нижній диск-ротор 2, кільця першого та другого ступенів подрібнення 3, 4, кришка 5.

Робочий процес відбувається наступним чином: оброблюваний зерновий матеріал із завантажувального патрубку через радіальні вікна в підлогу валу подається в простір між дисками, які обертаються в протилежних напрямках. Проходячи під дією відцентрових сил по радіальних наскрізних пазах, виконаних по циклоїді в кільцевих виступах зерно, що має меншу твердість і щільність набуває меншої швидкості, ніж зерно з більшою твердістю та

щільністю, отже, переважно подрібнюється за допомогою зрізу на ріжучих парах. Вони утворені сусідніми кільцевими виступами, розташованими ближче до центру протилежних дисків, де встановлений оптимальний кут різання більш м'якого матеріалу. Подрібнюваний матеріал рухається до периферії під дією відцентрових сил за пазами.

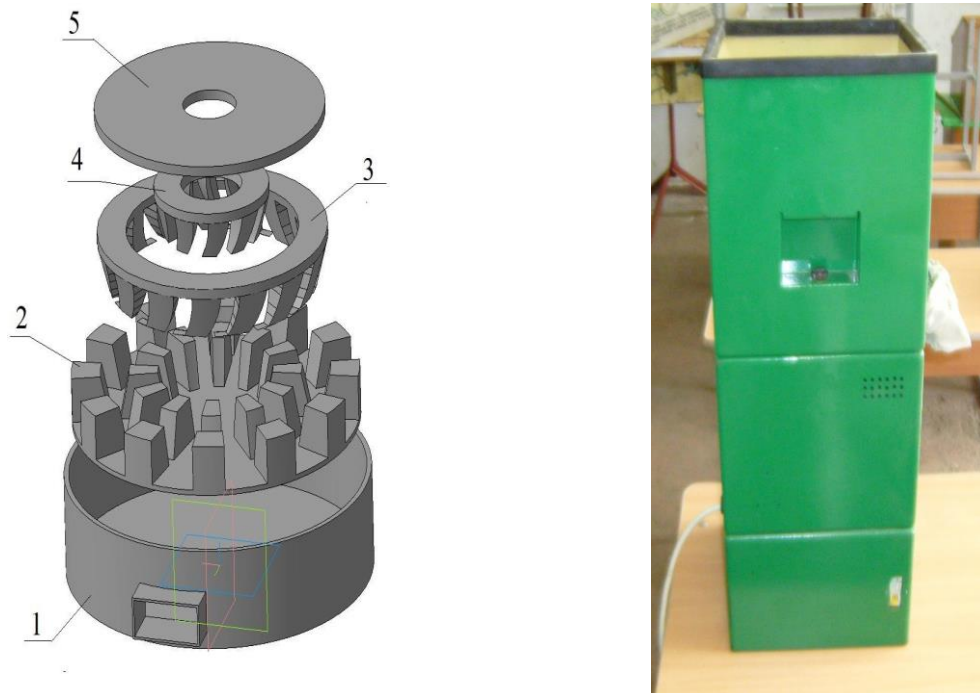


Рис. 3.1 Схематичне зображення (а) та схема експериментальної установки (б): 1 – корпус; 2 – диск-ротор; 3, 4 – подрібнюючі кільця; 5 – кришка

Процес подрібнення кормових зернових культур здійснюється за допомогою робочих органів.

Елементи протирізальних кілець першого та другого ступенів подрібнювача мають форму циклоїди. Це удосконалення сприяє кращому орієнтуванню зерна, перешкоджає затримці матеріалу в зоні подрібнення. Удосконалене конструктивне виконання різальних елементів подрібнювача дозволяє забезпечити процес різання із зменшенням енерговитрат порівняно з використанням серійних робочих органів.



Рис. 3.2 Експериментальні робочі органи подрібнювача зернових матеріалів

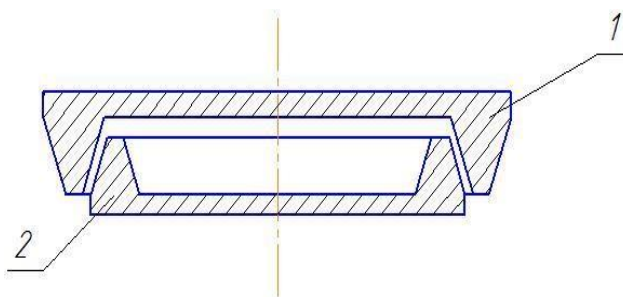


Рис. 3.3 Схема розташування робочих органів - дисків один відносно одного

Ступінь подрібнення (модуль помелу) регулюється за рахунок зміни відстані між робочими органами 1 та 2, які представлені на рис. 3.3.

Регулювання різальних органів здійснюється за допомогою гвинтів, на яких встановлена проставка. Проставка підтримує верхній диск із прикріпленими до нього робочими органами подрібнювача. Технічні характеристики установки наведені у таблиці 3.2.

Основні фактори, що реалізуються при удосконаленні установки:

1. Зручність монтажних та підготовчих робіт установки перед запуском.
2. Можливість швидкого та легкого регулювання аналізованих параметрів.
3. Можливість стабілізації основних робочих параметрів, які впливають на процес подрібнення та досягнення стійких режимів роботи установки.

4. Можливість контролю робочих параметрів процесу подрібнення за допомогою пристроїв.

5. Можливість швидкого та легкого виготовлення робочих органів подрібнювача з використанням універсального обладнання та оснащення.

Таблиця 3.2

## Технічні характеристики експериментальної установки

Назва показника	Значення показника
Продуктивність, т/год.	до 0,15
Потужність на валу двигуна	0,8 кВт
Частота обертання ротора, $\text{мін}^{-1}$	3000
Діаметр роторного диска, мм	140
Напруга живлення, В	220
Габаритні розміри, мм:	400 x 400 x 1300
довжина	370
ширина	280
висота	620
Маса установки, кг	30

Експерименти щодо встановлення енергоспоживання проводилися в такий спосіб. Кормова культура подавалася в приймальний бункер, що саморозвантажуються.

Під час проведення кожного досвіду в бункер засипали по 1 кг зерна. Цієї кількості вистачило для того, щоб вийти на режим різання і отримати дані про енергоспоживання в період до 1 хв.

Для аналізу якості подрібнення зернового матеріалу використовувався вібраційний класифікатор із набором сит.

Зважування отриманих зразків проведено на електронних вагах ВЕТ 6 - 1е. Достовірність даних, що одержуються з приладу, підтверджена документами про повірку (Додаток К).



Рис. 3.4 Електронні ваги ВЕТ 6-1е

Для встановлення отриманої форми зерна при подрібненні, а також візуальної оцінки поверхні обробленого матеріалу використовували мікроскоп УІМ-215 (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Мікроскоп УІМ-215

### **3.3. Експериментальне визначення геометричних параметрів ріжучих елементів робочих органів подрібнювача**

Кути різання, утворені ріжучими крайками робочих органів подрібнювача зерна мають визначальне значення в процесі подрібнення.

Вивчення робіт, присвячених проблемі різання, дозволяє оцінити вплив

кутів, що утворюють ріжучу кромку, на енергоємність та продуктивність процесу обробки [19]. Застосування поверхонь різання з криволінійною формою ріжучої крайки дає можливість зменшити значення кута ковзання оброблюваного матеріалу та збільшити значення кута ковзання різання, у свою чергу це може сприятливо позначитися на процесі різання зернових матеріалів.

Виготовлення стінок наскрізних пазів виконане за циклоїдом, за рахунок різниці зовнішнього та внутрішнього діаметрів робочих кілець, а також за рахунок кривизни лопатки наскрізного пазу.

Ріжуча крайка кільцевого виступу біля своєї вершини утворює клин, що представлено на рис. 3.6. Позначимо кути, що утворюють клин біля поверхонь ріжучої крайки, назвемо умовно:  $\gamma$  – допоміжний кут, який утворений положенням диска подрібнювача щодо оброблюваного матеріалу,  $\alpha$  – головний кут різання,  $\beta$  - допоміжний кут, що змінюється.

Враховуючи той факт, що оброблюваний матеріал має анізотропні властивостями, а процес обробки зерна в подрібнювачі включає кілька видів руйнування, автори дійшли висновку: для цього випадку немає методики, що враховує всі фактори, що впливають на процес руйнування матеріалу та що дозволяє провести розрахунки кута різання. Оптимальний кут різання встановлювався дослідним шляхом. Також автори врахували результати досліджень з визначення зносостійкості робочих органів, наведені у розділі.

Для встановлення оптимального кута, що утворює клин при вершині ріжучої крайки, було поставлено експеримент.

Було виготовлено робочий орган з єдиним кільцевим вирізом. В процесі експериментів, після кожної серії запусків подрібнювача кут крайки змінювався на 5 градусів. Далі проводився відбір проб зернового матеріалу, що подрібнюється; отримуваний продукт помелу розглядали на мікроскопі. Також встановлювали гранулометричний склад та фіксували значення енергоспоживання за допомогою ватметра. За результатами проведених дослідів отримано значення, за ними побудовано графіки середніх показників споживання енергії залежно від різних кутів клину.

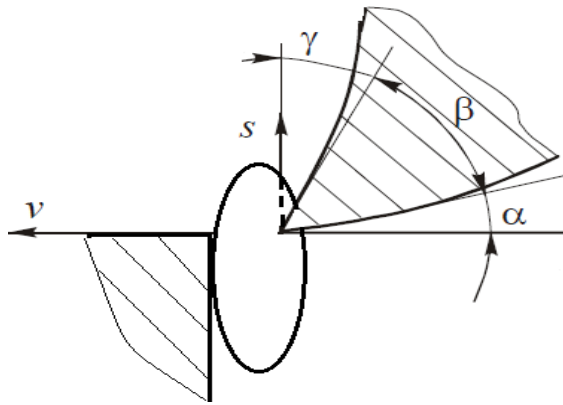


Рис. 3.6. Перетин ріжучого клина крайки робочих кілець подрібнювача:  
 $\gamma$  – допоміжний кут, утворений положенням диска подрібнювача щодо оброблюваного матеріалу,  $\alpha$  – головний кут різання,  $\beta$  – допоміжний змінний кут

### 3.4. Дослідження фізико-механічних властивостей зерна та встановлення раціональної форми ріжучого елемента

Серед основних параметрів, які слід враховувати під час проектування подрібнювального пристрою, є фізико-механічні властивості матеріалу, який обробляється. Для встановлення оптимальної форми ріжучого елемента матеріалу авторами виготовлено пристрій, представлений на рис. 3.7.

Пристрій агрегується з ручним пресом, через який передається зусилля різання. Пристрій складається з наступних складових частин: набору змінних лез, що імітують ріжучі елементи різної форми; затискних гвинтів, за допомогою яких здійснюється кріплення змінних лез; хвостовика та корпусу. Пристрій працює наступним чином. Зерновий матеріал укладається на протиризальну пластину при піднятому утримувачі, потім утримувач опускається. Відбувається опускання тримача за рахунок тиску, створюваного вантажами, підвішеними до ручки преса. Зерновий матеріал починає виштовхуватися з розчину до моменту утворення кута різання, при якому сили тертя перевищують сили тиску робочих органів на матеріал В.П. Горячкін називав цей кут кутом затискання і показав, що виштовхування предмета та його нерухоме становище в момент досягнення критичного значення кута

затискання залежить від кутів тертя між кромками лез та предмета.



Рис. 3.7. Пристрій для визначення кута різання: 1 – ручний прес, 2 – затискні гвинти, 3 – змінне лезо, 4 – хвостовик, 5 – корпус пристрою

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ

### 4.1 Аналіз фізико-механічних властивостей подрібнюваного матеріалу

Визначаючи ефективність та надійність використання подрібнювача зернових матеріалів, необхідно знати їх фізико-механічні властивості. Основні властивості, які розглядаються є наступні: об'ємна маса; абсолютна маса; щільність; вологість; фізичний склад; середня твердість [20,25].

За представленою у третьому розділі методикою було визначено середні геометричні розміри кормових матеріалів, які використовувались в процесі досліджень (Таблиця 4.1).

За результатами вимірювань встановлені: максимальна довжина – для вівса (14,94 мм), найменша довжина – для пшениці (4,67 мм), найбільша ширина – для гороху (8,00 мм), найменша – у вівса (4,13 мм) .

Зернові матеріали, що подрібнюються, крім гороху, мали форму, близьку до еліпсоїда. Враховуючи той факт, що довжина зернівки у 2 – 3 рази перевищує її ширину, припущення про умовне прийняття зернівки за еліпсоїд можна вважати справедливим. Подаємо зернівку у вигляді еліпсоїда (рис. 4.1).

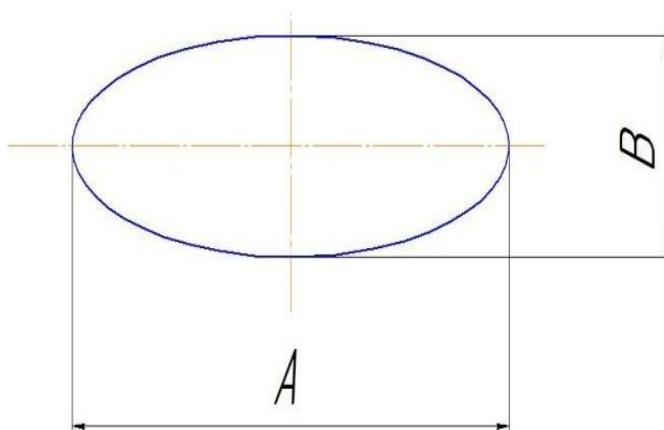


Рис. 4.1 Умовне зображення зернини

#### 4.2. Визначення форми сегмента зернівки на виході першого ступеня подрібнювача

Дані експериментальних досліджень, які отримано за методикою, яка описаною в розділі 3.5, наведено у додатку А та на графіку (рис. 4.2).

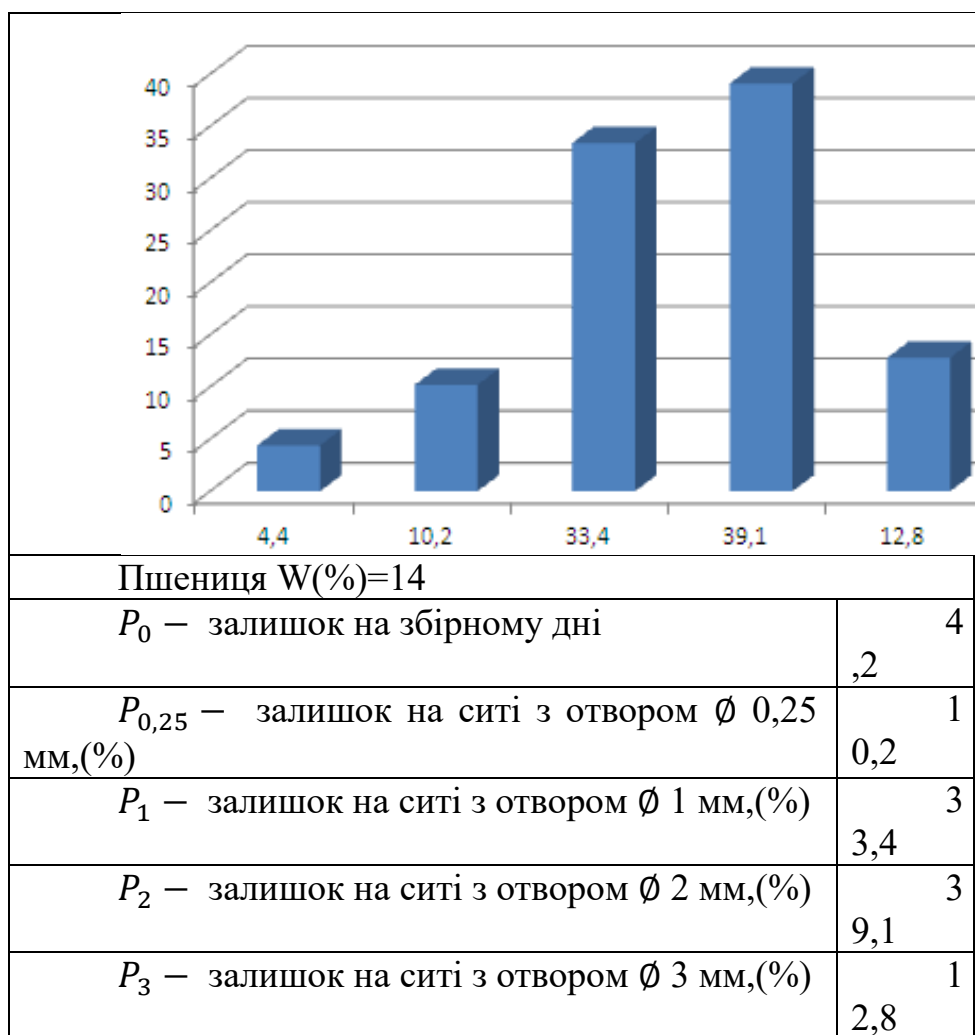


Рис. 4.2 Гранулометричний склад зернового матеріалу після першого ступеня подрібнювача зернових матеріалів

Дослідженнями було встановлено, що під час руху зерна в каналі першої ріжучої пари робочого органу відцентрово-роторного подрібнювача зернівка повертається, переважно орієнтуючись довгою віссю вздовж стінки каналу, при цьому різання відбувається поперек частки.

Зі сказаного вище, а також за результатами експериментальних випробувань, представлених на рис. 4.2, впливає: у сегмента зернівки форма

еліпсоїда товщиною від 1,0 до 2,0 мм, що відповідає теоретичним розрахункам, які виконані у розділі 2.

#### **4.3. Визначення положення зернівки у каналі другого ступеня подрібнювача зернових матеріалів**

Згідно даними, отриманими в ході експериментів, слідує, що зернівка орієнтується довгою віссю вздовж радіуса ротора і розрізається на сегменти. Під дією сили Коріоліса сегмент зернівки повертається. Також цьому сприяє положення сегмента зернівки на опуклій поверхні стінки наскрізного паза. На другому ступені подрібнення зернівка розрізається перпендикулярно поверхні попереднього зрізу (після першого ступеня подрібнення). Як приклади показані фотографії фрагментів зернин, отримані після першого та другого ступенів подрібнення (рис. 4.3 та 4.4).

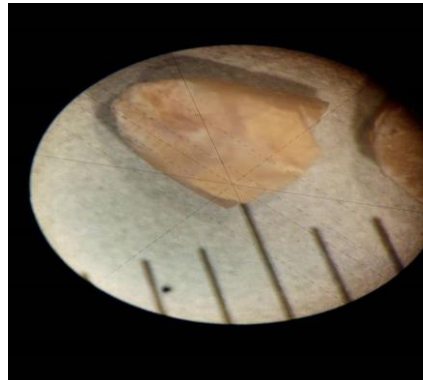


Рис. 4.3 – Фрагмент зернівки, отриманий після першого ступеня подрібнення

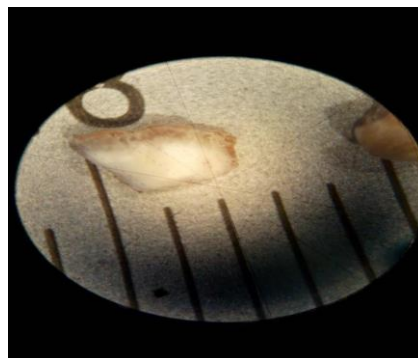


Рис. 4.4 Фрагмент зернівки, отриманий після другого ступеня подрібнення



Рис. 4.5. Сліди зносу, які залишені зерновим матеріалом на поверхні стінки наскрізного паза подрібнювача: а – після першого запуску; б – після серії запусків подрібнювача

На рис. 4.5 наведені борозенки, які залишені зернівкою та описують траєкторію руху подрібнюваного матеріалу.

Дослідженнями встановлено, що ширина борозенок дає можливість сказати: зернівка орієнтується довгою віссю до зони подрібнення в подрібнювачі.

#### **4.4. Визначення оптимальних кутів при вершині ріжучої кромки наскрізних пазів кільцевих виступів**

Вивченням впливу конструктивних параметрів ріжучої пари на процес різання займалося багато дослідників: [5, 11; 34]. Для вивчення процесу різання спроектовано та розроблено експериментальну установку та пристрої, які описані у розділі 3.

Для практичного визначення оптимальних співвідношень кутів різання та кривизни лопаток ріжучого елемента установки проводилися згідно Розглянемо методологію та контрольні розрізання зернівок, а також їх сегментів.

Досліди проведені з п'ятикратною послідовністю згідно з

загальновідомими методиками [2; 18]. За результати досліджень отримано оптимальні (раціональні) кути різання. При статичних навантаженнях побудовано графічні залежності використання маси вантажу на важелі залежно від геометрії ріжучого елемента (рис. 4.6).

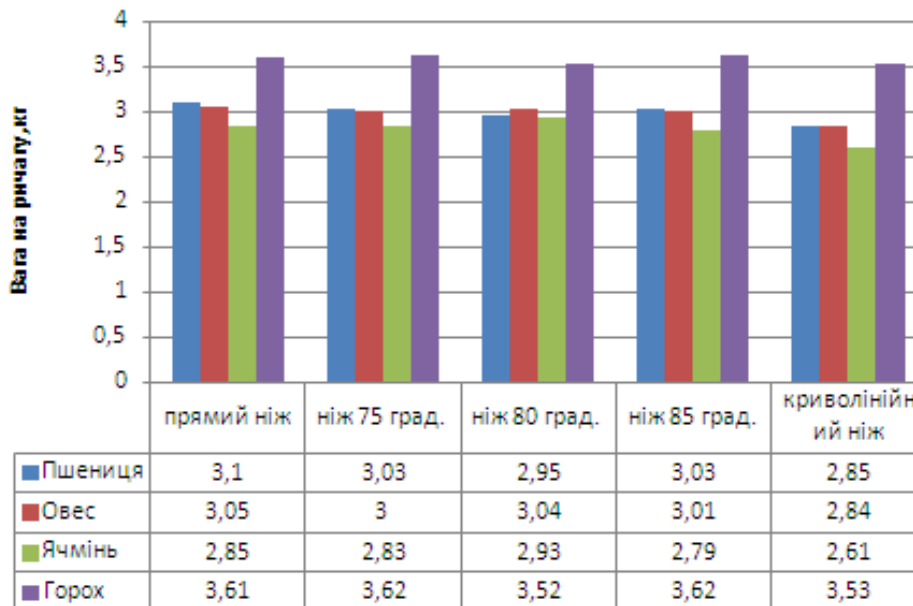


Рис. 4.6 – Діаграма величини ваги вантажів на важелі пристрою залежно від геометрії ріжучого елемента

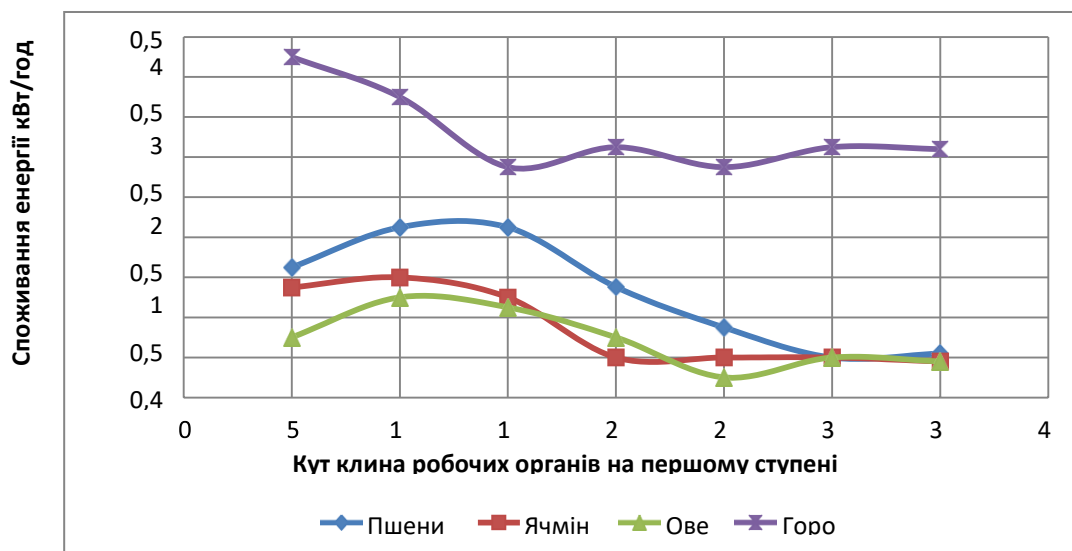


Рис. 4.7. Графік середніх показників споживання енергії з використанням кута клину до  $\beta = 30^\circ$

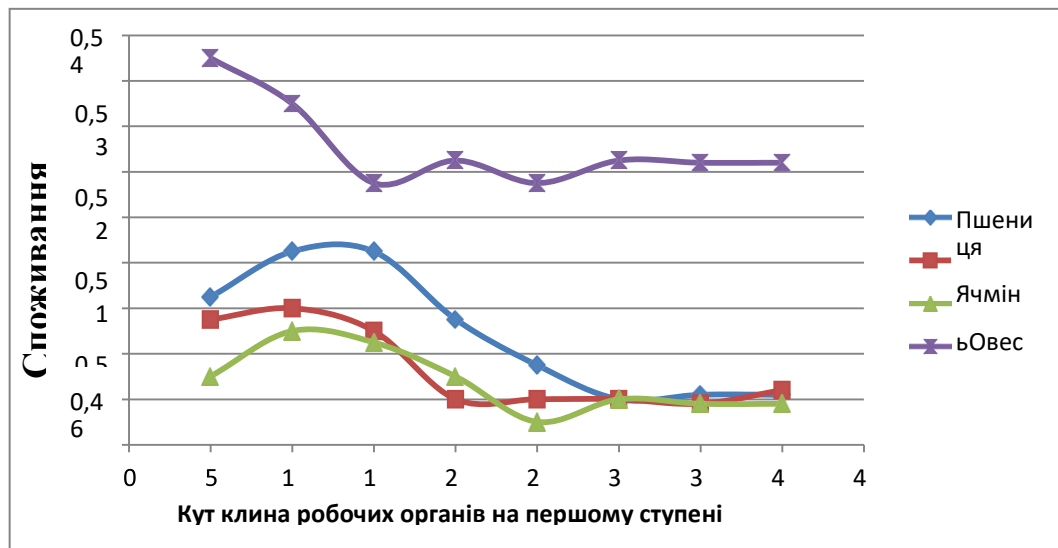


Рис. 4.8 Графік середніх показників споживання енергії з використанням кута клину до  $\beta = 35^\circ$

Результатом досліджень було встановлення оптимальних кутів різання для першого та другого ступенів подрібнення: для першого ступеня:  $\beta = 30^\circ$ , для другого –  $\beta = 35^\circ$ .

Контрольні виміри кутів проводилися на мікроскопі УІМ-215 (розділ 3). Клини, утворені при ріжучих кромках наскрізних пазів кільцевих виступів першого та другого ступенів подрібнення, представлені на рис. 4.9 та 4.10.

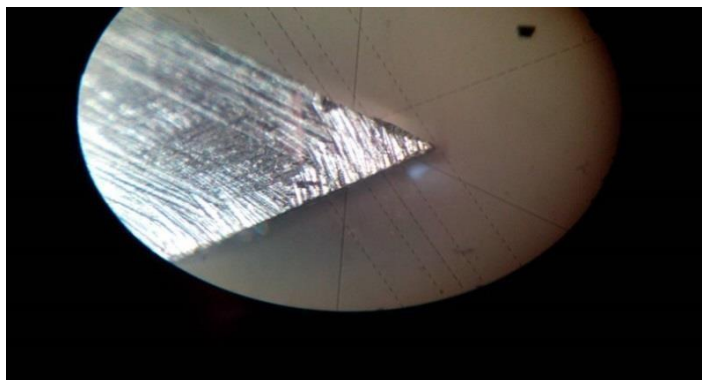


Рис. 4.9. Клини на робочих органах першого ступеня подрібнення  $\beta = 30^\circ$

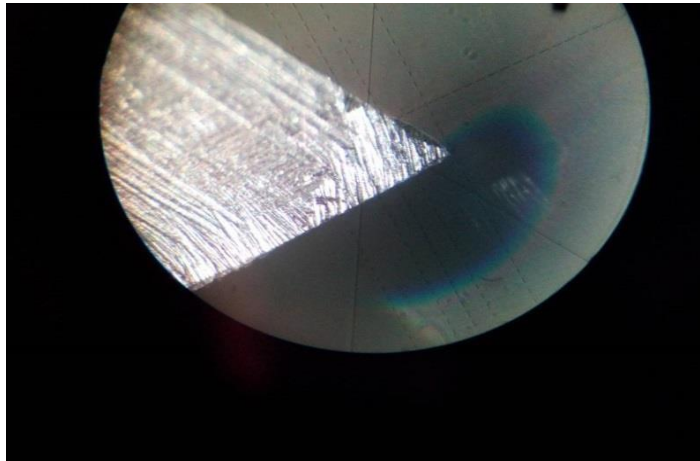


Рис. 4.10. Клин на робочих органах другого ступеня подрібнення  $\beta = 35^\circ$

Проаналізувавши дані експериментів щодо визначення раціональної геометрії поверхонь ножа, дістали висновок: кут защемлення однаковий для першої та другої пар подрібнення подрібнювача.

З урахуванням наведених результатів експериментальних досліджень подрібнювача, було розроблено робочі органи, які дозволяють покращити якість подрібнення фуражного зерна за рахунок зміни форми ріжучого елемента (рис. 4.11).



Рис. 4.11 Робочі органи подрібнювача фуражного зерна

#### 4.5. Визначення потужності та продуктивності подрібнювача

Проведений аналіз експериментальних досліджень щодо визначення витрат енергії на подрібнення показав: у результаті виконання ріжучих елементів за криволінійною формою наскрізних пазів під кутами питома енергоємність знижується на 11,9% (рис. 4.12, 4.13). Продуктивність збільшується на 10,7%. Результати показників, отримані під час подрібнення зернових культур, представлені на малюнках 4.12 та 4.13.

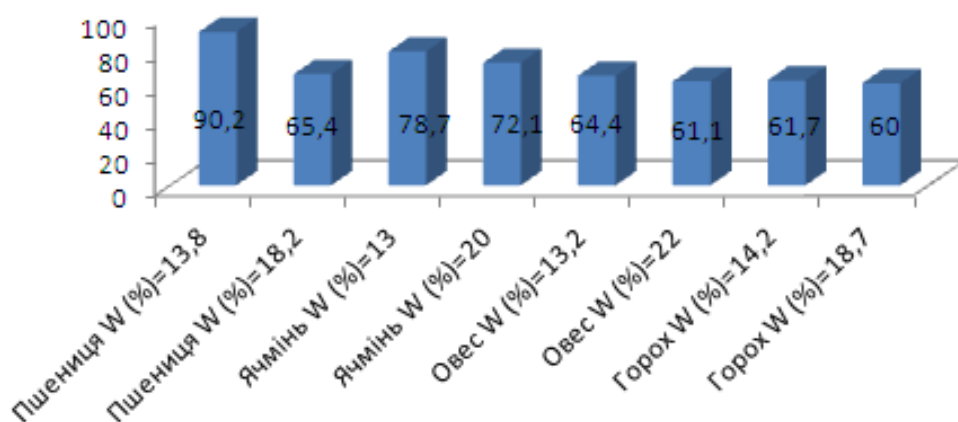


Рис. 4.12 Продуктивність подрібненні зерна на робочих органах, що серійно випускаються

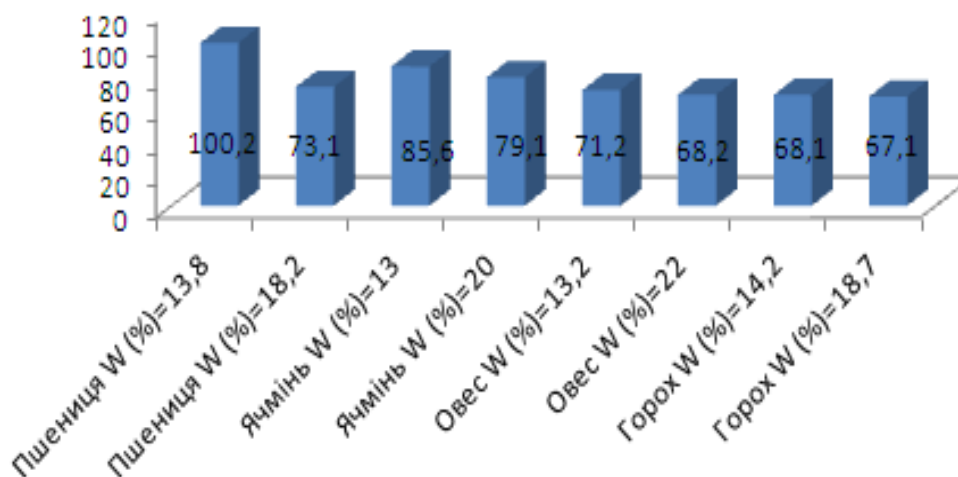


Рис. 4.13 Продуктивність подрібнювача на пропорованих робочих органах з криволінійними ріжучими елементами у формі циклоїди



Рис. 4.14 Питома енергоємність подрібнення зерна на серійних робочих органах

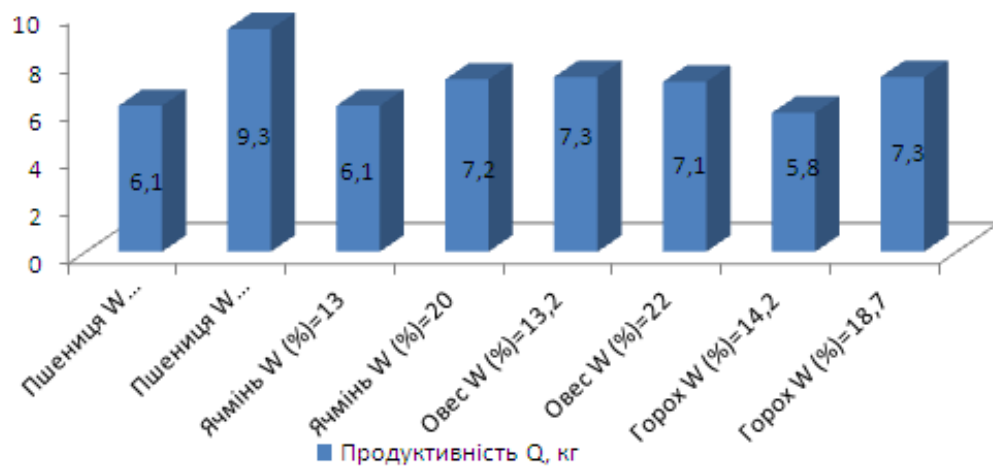


Рис. 4.15 Питома енергоємність подрібнення на експериментальних робочих органах

Проаналізувавши експериментальні дані, зазначено, що питома енергоємність процесу під час використання робочих органів із криволінійними ріжучими елементами загалом знижується на 12 % з допомогою підвищення продуктивності на 11 - 12%.

Вологість подрібнюваного матеріалу істотно впливає на процес подрібнення. Встановлено, що з підвищенням вологості зростає пластичність матеріалу, це збільшує енерговитрати на подрібнення.

#### 4.6. Визначення гранулометричного складу подрібнюваного матеріалу

Аналіз результатів експерименту визначення гранулометричного складу подрібненого зерна показав, що в результаті обліку зміни геометрії ріжучого елемента робочого органу спостерігається зниження пилоподібної фракції та кількості цілих зерен у готовому продукті помелу.

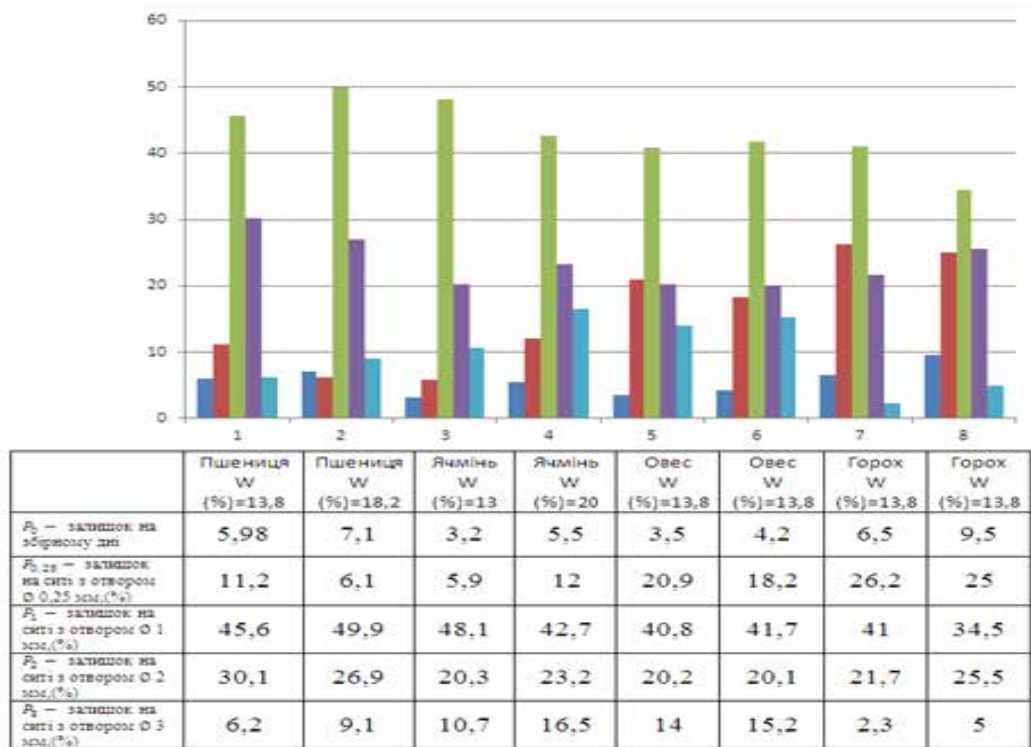


Рис. 4.16. Гранулометричний склад подрібненого зерна на серійних робочих органах ( $\chi_1 = 18^\circ$ ,  $\chi_2 = 18^\circ$ )



Рис. 4.17. Гранулометричний склад подрібненого зерна на експериментальних робочих органах з ріжучими елементами у формі циклоїди

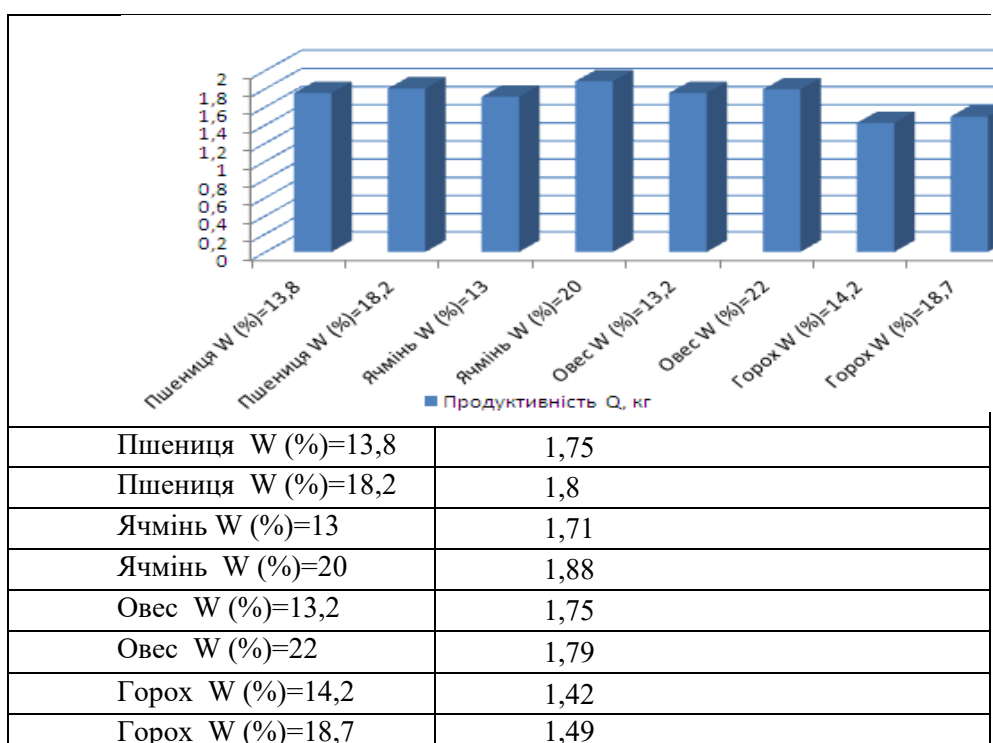


Рис. 4.18 Модуль помелу  $M$  (мм) на серійних робочих органах ( $\chi_1 = 18^\circ$ ,  $\chi_2 = 18^\circ$ )

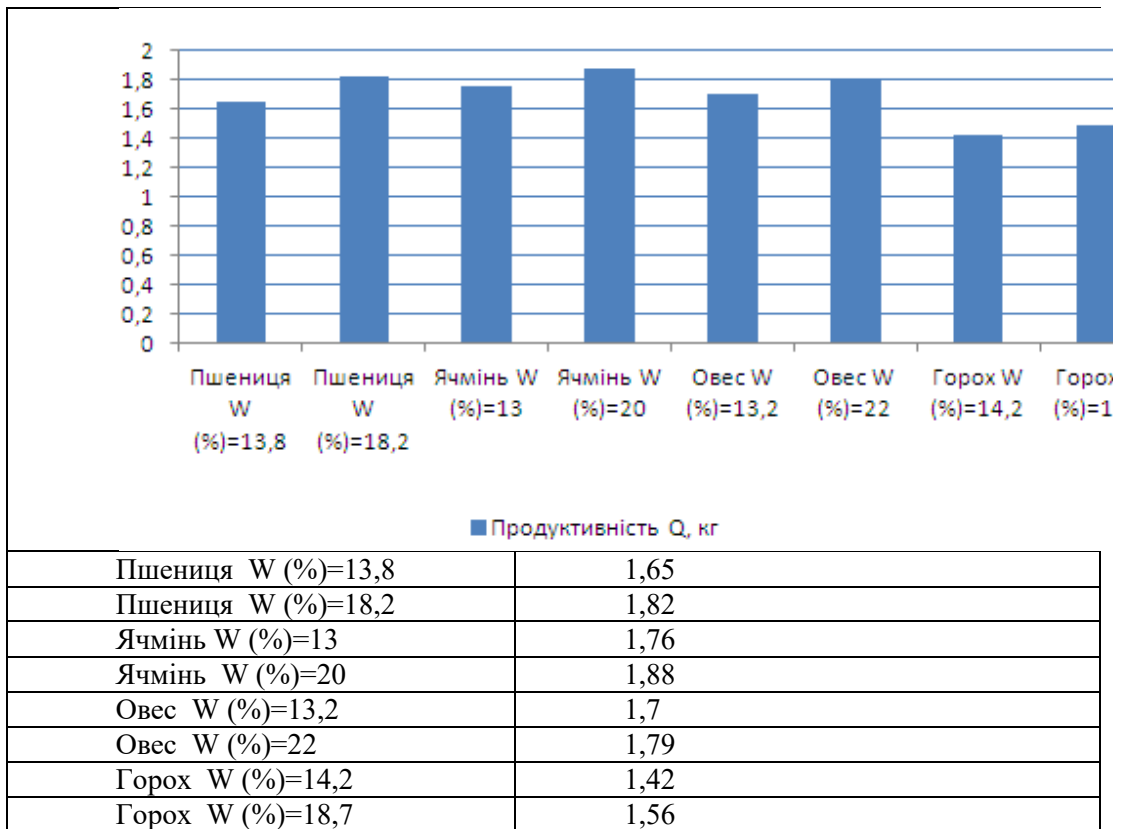


Рис. 4.19 – Модуль помелу М (мм) на робочих органах із криволінійними ріжучими елементами, виконаними у формі циклоїди

## РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 5.1 Визначення економічної ефективності від впровадження подрібнювача кормового зерна в сільськогосподарське виробництво

Доцільність впровадження нової машини для процесу механізації подрібнення зернових кормів у серійне виробництво оцінюється за її економічною ефективністю. Згідно з ДСТУ економічна ефективність визначається через показники економічного ефекту, а також економічний ефект від використання нового обладнання за весь період його експлуатації.

В якості базової моделі використовується відцентрово-обертовий подрібнювач ІЛС-0,15. Завдяки тому, що пропонується машина підвищує ефективність процесу шліфування, знижується витрата енергії на одиницю продукції при збереженні якості подрібнення, та підвищенні продуктивності.

Річний економічний ефект складатиметься з показників зниження операційних витрат і підвищення продуктивності праці. Розрахунок ефективності подрібнювача зерна в порівнянні з дослідним зразком ІЛС-0,15 проводиться на підставі даних, які отримані в результаті лабораторних досліджень, представлених в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Показник	ІЛС-0,15	Пропонований пристрій
Погодинна продуктивність, т/год.	0,09	0,101
Встановлена потужність, кВт	0,8	0,8
Питома витрата енергії кВт·год./т	8,3	7,1
Річний фонд робочого часу, год.	1760	1760
Річний обсяг виробництва, т	158,4	190,3
Кількість обслуг. персонал, люд.	1	1
Вартість машини, грн.	35000	35000
Маса, кг	30	30

Щорічна економія розраховувалася за формулою, взятою в джерелі [98]

$$\Delta Z_e^{\text{Год}} = ((Z_B + E_H K_{UB}) - (Z_H + E_H K_{UB})) \cdot A_r, \quad \square(5.1)$$

де  $Z_B, Z_H$  – питомі експлуатаційні витрати за основним і новим варіантами, грн./т;

$E_H$  – нормативний коефіцієнт капітальних інвестицій  $E_H = 0,15$  відповідно до [18];

$K_{UB}, K_{UH}$  – питомі капітальні вкладення основних і нових варіантів конструкції, грн./т;

$A_r$  – річний обсяг робіт заводу в обліковому році, т.

Питомі експлуатаційні витрати або собівартість одиниці продукції, за умови однієї тонни подрібненого зернофуражу, визначають за формулою:

$$Z = Z_{\text{ПЛ}} + Z_A + Z_{\text{ТО}} + Z_E + Z_{\text{ДПМ}} + Z_{\text{ЗР}} \quad (5.2)$$

де  $Z_{\text{ПЛ}}$  – витрати на утримання персоналу;

$Z_A$  – амортизаційні відрахування на ремонт автомобіля;  $Z_{\text{ТО}}$  – витрати на технічне обслуговування та ремонт;

$Z_E$  – витрати на електроенергію;

$Z_{\text{ДПМ}}$  – витрати на допоміжні матеріали;

$Z_{\text{ЗР}}$  – витрати на зберігання машини.

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховуються за формулою:

$$: Z_{\text{ПЛ}} = Z_{\text{ОП}} + Z_{\text{СОЦ}}, \quad (5.3)$$

Де  $Z_{\text{ОП}}$  – витрати на оплату певного обсягу робіт;

$Z_{\text{СОЦ}}$  – відрахування на соціальні потреби.

Витрати на оплату певного обсягу робіт розраховуються за формулою:

$$Z_{\text{оп}} = \frac{L \cdot C_{\text{ПС}} \cdot K_{\text{СЛ}} \cdot (1 + K_{\text{ДОП}})}{W_{\text{ч}}} \quad (5.4)$$

де  $L$  – кількість обслуговуючого персоналу, чол ( $L = 1$ );  $C_{\text{ПС}}$  – погодинна ставка ( $C_{\text{ТАР}} = 6$  грн./год.);

$K_{\text{СЛ}}$  – коефіцієнт складності роботи ( $K_{\text{СЛ}} = 1,3$ );

$K_{\text{ДОП}}$  – розмір додаткової винагороди працівникам (прийнято  $K_{\text{ДОП}} = 15\%$ );

$W_{\text{ч}}$  – погодинна продуктивність, т/год..

Відрахування на соціальні потреби ( $Z_{\text{СОЦ}}$ ) залежать від заробітної плати, вони розраховуються за формулою:

$$Z_{\text{СОЦ}} = \frac{Z_{\text{оп}} \cdot K_{\text{ОТ}}}{100} \quad (5.5)$$

де  $K_{\text{ОТ}}$  – норматив відрахувань на соціальні потреби:

пенсійний фонд для сільськогосподарських підприємств – 20,6%; фонд зайнятості – 1,5%;

фонд медичного страхування – 5,4% від річного фонду заробітної плати.

Трудовитрати на утримання і ремонт машин оцінюють по трудомісткості цих операцій, для порівнюваних машин в силу їх конструктивної схожості вони будуть однаковими (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2

Загальні затрати праці

Показник	ІЛС-0,15	Пропонована модель
Щорічні трудовитрати на утримання основного процесу, люд.-год.	1530	1530
Щорічні витрати на утримання та ремонт основного процесу, люд.-год.	45	45
Всього	1575	1575

Сума амортизаційних відрахувань з реалізації розраховується за формулою:

$$Z_A = \frac{B \cdot N_A}{100 \cdot T_{\text{ГОД}} \cdot W_{\text{Ч}}} \quad (5.6)$$

де  $B$  – балансова вартість машини, грн.;

$N_A$  – норма амортизаційних відрахувань ( $N_A = 10\%$ );

$T_{\text{ГОД}}$  – нормативне річне навантаження машини, год.

Балансова вартість серійної машини залежить від віддаленості замовника від виробника. У нашому випадку при покупці техніки у дилерів виробника вартість буде визначатися за формулою:

$$B = C \cdot \xi, \quad (5.7)$$

де  $C$  – ціна установки серійної в регіонального представника, грн.;

$\xi$  – коефіцієнт, що враховує додаткові витрати на транспортування і монтаж обладнання, приймається рівним 1,2.

Визначаємо ціну запропонованого подрібнювача,  $C$ :

$$C = C_M \cdot N \cdot E \cdot 1,15 + B_D \quad (5.8)$$

де  $C_M$  – маса машини без покупних вузлів і деталей, кг (маса запропонованої моделі без електродвигуна,  $G_H = 5$  кг);

$N$  – стандартна вартість 1 кг від ваги конструкції, при річному виробництві 500 шт., грн. ( $N = 5430$  грн.);

$E$  – коефіцієнт відхилення преїскурантної ціни від вартості машини;

$B_D$  – балансова вартість придбаних вузлів і конструктивних частин, грн.

Згідно з (5.7), балансова вартість придбаних вузлів і деталей, обумовлена однаковістю

$B_C = 54000$  грн., у запропонованої (нової) моделі; у старій моделі  $B_H = 53000$  грн.

Розрахувати вартість обслуговування та ремонту машини на 1 тонну зернового корму :

$$Z_{TO} = \frac{B \cdot H_{TO}}{100 \cdot T_{ГОД} \cdot \xi} \quad (5.9)$$

де  $H_{TO}$  – норматив витрат на утримання та ремонт машин ( $H_{TO} = 14,5\%$ ).

Знайдіть питоме споживання електроенергії;

$$Z_E = q_E \cdot C_E \quad (5.10)$$

де  $q_E$  – питома витрата енергії, кВт·год./т;

$C_E$  – ціна 1 кВт·год. енергії ( $C_E = 3,8$  грн.).

Витрати на допоміжні матеріали  $Z_{ДПМ}$  і зберігання машини  $Z_{ЗР}$  незначні, тому на них можна не звертати уваги.

Таблиця 5.3

Експлуатаційні витрати

Показник	ІЛС-0,15		Пропонований подрібнювач	
	Специфічні витрати, грн./т	Річні витрати, грн.	Специфічні витрати грн./т	Річні витрати грн.
Оплата труда з відрахуванням	160,1	23354,9	190,0	34458,3
Амортизаційні відрахування	34,1	5420,4	50,2	9089,01
Технічне обслуговування та ремонт	50,5	7945,0	61,2	10995,1
Електроенергія	38,4	6081,55	26,9	4876,89
Всього	283,1	37901,8	328,3	59419,3

Питомі капітальні вкладення визначаються відношенням капітальних вкладень до річного обсягу робіт:

$$K_y = \frac{K}{A_T}$$

де  $K$  – обсяг капітальних інвестицій, грн.

Зниження енергоємності нової конструкції оцінюється за рахунок щорічної економії споживання електроенергії.

$$\Delta E_{\text{ЕЛ}}^{\text{ГОД}} = (E_{\text{ЕЛ}}^{\text{С}} - E_{\text{ЕЛ}}^{\text{Н}}) \cdot A_{\text{Г}} \quad (5.12)$$

де  $E_{\text{ЕЛ}}^{\text{С}}$  і  $E_{\text{ЕЛ}}^{\text{Н}}$  - енергоємність процесу машини, що випускається запропонованою моделлю, кВт·год./т.

Зниження металоємності нової машини встановлюється за формулою:

$$\Delta M_{\text{М}} = M_{\text{УД}}^{\text{С}} + M_{\text{УД}}^{\text{Н}}, \quad (5.13)$$

де  $M_{\text{УД}}^{\text{С}}$  і  $M_{\text{УД}}^{\text{Н}}$  - питома металоємність серійної конструкції та нової версія, кг/(т/ч).

*М* и Розраховується питома металоємність машини:

$$M_{\text{УД}} = \frac{M_{\text{КОН}}}{\text{ч}}, \quad (5.14)$$

де  $M_{\text{КОН}}$  – загальна конструкційна вага машини, кг.

Для зручності розрахунків і більшої наочності отриманих даних результати розрахунків представлені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Зниження операційних витрат за рахунок капітальних інвестицій

Показник	ІЛС-0,15	Пропонована модель
Інвестиція, грн.	58000	58000
Прямі експлуатаційні витрати, грн.	41054,1	39933,7
Інвестиції в одиницю продукції, грн./т	265,2	231,7
Питома щорічна економія коштів, грн./т		33,5
Загальні трудовитрати, люд.-год.	1575	1575
Питомі витрати на оплату праці, люд.-год./т	11,4	9,9
Річне споживання електроенергії, кВт год.	1437,2	1437,2
Річне споживання електроенергії, кВт год./т	8,3	7,4

Річна економія одиниці споживання електроенергії, кВт год./т		0,9
Щорічна економія споживання електроенергії, кВт год.		173,1
Питома інтенсивність металу конструкції, кг/(т/год.)	55,5	50

## ВИСНОВКИ

1. Процес подрібнення кормових складових для тварин і птиці недостатньо вивчений. Необхідно підвищити якість подрібнюваного матеріалу, знизити енерговитрати в процесі подрібнення за рахунок розробки новітніх засобів подрібнення.
2. Теоретично й експериментально встановлено, що під час руху зернового матеріалу стінками наскрізних пазів робочих органів подрібнювача, зерно орієнтується довгою віссю до напрямку виходу.
3. Теоретично визначено та експериментально підтверджено раціональне використання ріжучих елементів у формі циклоїди з утворюваним колом 4,81 мм.
4. Обґрунтовано схему подрібнювача фуражного зерна зі стінками наскрізних пазів робочих органів.
5. В результаті підбору раціонального ріжучого клина і виконання стінок наскрізних пазів за циклоїдою на наскрізних пазах робочих органів подрібнювача фуражного зерна відбувається вирівнювання гранулометричного складу. Встановлено, що зниження пилоподібної фракції, цілі зерна в продукті помелу відсутні.
6. Аналіз економічної ефективності використання пропонованого подрібнювача зерна показує, що за рахунок зниження експлуатаційних витрат, зниження витрати енергії і питомої металоємності розрахункова річна економія витрат від застосування подрібнювача нової конструкції.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Boyko A., Novitskiy A. Mathematical model of reliability of human-machine system under reduced efficiency of its generalized work. *Machinery & Energetics*. Kyiv. Ukraine. 2018. Vol. 9. No. 3. 271. P. 165–174.
2. Novitskiy A., Karabinhosh S. Some aspects of information support for operability of complex agricultural machinery. *Machinery & Energetics*. Kyiv. Ukraine. 2018. Vol. 9. No. 2. 241. P. 106–121.
3. Rebenko V., Khmelovskyi V. Study of elements of biotechnical system in production of livestock products. *Machinery & Energetics*. 2018, Vol. 9, No. 4, P. 150–165.
4. Vasyl Khmelovskyi, Volodymyr Otchenashko, Semen Voloshyn, Olena Pinchevska. Providing processes of preparation and distribution of feed for cattle on animal husbandry farms. *Proceedings of 18th International Scientific Conference –Engineering for rural development*”. Jelgava, Latvia, May 20-22, 2020. pp. 778–783. Scopus. WoS.
5. Andriy Novitskiy. Forming reliability of means for preparation and disposal of forage. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2017. Vol. 19. No 3. P. 123–128.
6. Бойко, А. І., Новицький А. В., Банний О. О. Оцінка надійності системи «людина-машина» в умовах зниження рівня її працездатності й удосконаленні складової «людина-оператор». *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* - Кіровоград: КНТУ, 2013. - Вип. 43, ч. 2. - С. 32-38.
7. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Видання офіційне. Держстандарт України. Київ. 16 с.
8. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги.
9. Мельник В. І. Ружило З. В., Мельник В. І., Новицький А. В., Ревенко Ю. І., Бистрий О. М., Попик П. С. Надійність машин та обладнання.

Ремонтування машин та відновлення деталей. Том 2. Навчальний посібник: НУБіП України. Київ. 2023. 313 с.

10. Новицький А. В. Інноваційність надійного функціонування операторів складних технічних систем «людина-машина» в рослинництві. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК, 2018. Випуск 282, С. 236–244.

11. Новицький А. В. Методичні підходи до формування програми забезпечення надійності сільськогосподарської техніки. Центральноросійський науковий вісник. Технічні науки, Кропивницький. Україна. 2022. Вип. 6(37), ч. I. С. 134–143.

12. Новицький А. В. Моніторинг матеріально-технічного забезпечення та надійності техніки АПК в системі розвитку інноваційних процесів. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No 3, P. 87–94.

13. Новицький А. В. Огляд теоретичних досліджень надійного функціонування складних технічних систем у тваринництві. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. К., 2016. Вип. 254, ч. 3. С. 334-338.

14. Новицький А. В., Банний О. О. Надійність сільськогосподарської техніки в системі інноваційних процесів з досвіду зарубіжних компаній. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2020, Vol. 11, No 2, p. 115-124.

15. Новицький А. В., Новицький Ю. А. Технічна оцінка споживчих якостей сільськогосподарської техніки. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. К., 2017. Вип. 264. С. 293–303.

16. Новицький А. В., Ружи́ло З. В. Визначення функції готовності систем «людина – машина» при зростанні інтенсивностей відмов. *Machinery &*

energetics. *Journal of Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No. 2. P. 89–96.

17. Новицький А. В., Ружи́ло З. В. Моніторинг забезпечення молочного скотарства машинами та обладнанням. *Науковий Журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»*. Харків, 2014, вип. 1 С. 56-63.

18. Новицький А. В., Ружи́ло З. В., Бистрий О. М., Банний О. О., Сиволапов В.А. Надійність машин та обладнання. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання.. Том 1. Навчальний посібник: НУБіП України. Київ. 2023. 213 с.

19. Новицький А. В., Ружи́ло З. В., Котречко О. О. Забезпечення надійності сільськогосподарської техніки в системі розвитку інноваційних процесів. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No 3, P. 151–157.

20. Новицький А. В., Банний О. О., Бистрий О. М. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на технічний стан сільськогосподарської техніки. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 4. P. 39–46.

21. Новицький А. В., Харьковський І. С., Новицький Ю. А. Моніторинг технічного стану сільськогосподарської техніки за керівними матеріалами на її експлуатацію. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12, No 4. P. 85–93.

22. Проектування і розрахунок технологічних систем у тваринництві: навчальний посібник / О.О.Заболотько, В.С.Хмельовський, В.І.Ребенко, С.Є.Потапова, О.М.Ачкевич, В.В.Радчук. К.: Видавництво «Наукова столиця», 2019. – 283с.

23. Ружи́ло З. В., Новицький А. В. Огляд теоретичних досліджень надійного функціонування систем «ЛМС» під впливом технічного обслуговування і ремонту. *Науковий Журнал «Технічний сервіс*

агропромислового, лісового та транспортного комплексів». Харків. 2016, Вип. 2. С. 223 – 231.

24. Сідашенко О.І. Ремонт машин та обладнання: підручник / О.І. Сідашенко, О.А. Науменко, О.В. Тіхонов. К.: Агроосвіта, 2014. 665 с.

25. Хмельовський В. С., Ребенко В. І. Обґрунтування елементів біотехнічної системи при виробництві тваринницької продукції. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. К., 2018. Вип. 298. С. 79–84.