

НУБІП України

НУБІП України

**«ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ  
ЗЕРНОВИХ КОРМОДРОБАРОК  
РОТОРНОГО ТИПУ»**

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ  
КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
01.12 – МР.463«С»28.03.2023.001

**Бовкун Ярослав Васильович**

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

Форма № Н 9 02  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**  
 Факультет \_\_\_\_\_ конструювання та дизайну

УДК 681.533.-027.45

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
 Завідувач кафедри  
 надійності техніки  
 (назва кафедри)  
 доц. \_\_\_\_\_ Новицький А.В.  
 (підпис) (ПІБ)  
 “ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
 на «Підвищення довговічності зернових кормодробарок  
 роторного типу»

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 \_\_\_\_\_ Харківський А.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**  
 \_\_\_\_\_ Бовкун Я.В.  
 (підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ – 2023

# НУБІП України

Форма № Н-9/01

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
Факультет конструювання та дизайну

# НУБІП України

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри надійності техніки

К.Т.Н., доцент Новицький А.В.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)

“ ” 20 року

# НУБІП України

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ  
РОБОТИ СТУДЕНТАБовкуну Ярославу Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

# НУБІП України

Спеціалізація \_\_\_\_\_

(назва)

Магістерська програма «Технічний сервіс машини та обладнання  
сільськогосподарського виробництва»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

# НУБІП України

Тема магістерської роботи «Підвищення довговічності зернових  
кормодробарок роторного типу»

затверджена наказом ректора НУБіПУ від «28»03 2023 р. №463 «С»

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру 11.11.2023 р.

(рік, місяць, число)

3. Вихідні дані магістерської роботи: 3.1. Сучасні конструкції, технічні характеристики зернових кормодробарок. 3.2. Типові норми праці на ТО і ремонт зернових кормодробарок. 3.3. Перспективні методи відновлення деталей машин для приготування кормів. 3.4. Каталоги ремонтно-технологічного обладнання для ремонту кормодробарок

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 4.1. Короткий огляд зернових кормодробарок. 4.2.

Підходи до підвищення довговічності зернових кормодробарок. 4.3.

Теоретичні передумови підвищення довговічності зернових кормодробарок

# НУБІП України

роторного типу. 4.4. Способи підвищення зносостійкості роторних зернових кормодробарок. 4.5. Програма і методика експериментальних досліджень. 4.6. Результати експериментальних досліджень. 4.7. Прогнозування довговічності роторної кормодробарки. Висновки. Літературні джерела. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

5.1. Тема МР, предмет, об'єкт і методи дослідження. 5.2. Мета і задачі дослідження. 5.3. Аналіз конструкції зернових кормодробарок. 5.4. Підвищення довговічності дробарок роторного типу. 5.5. Аналіз методів підвищення зносостійкості. 5.6. Удосконалення технологічного процесу подрібнення. 5.6. Прогнозування довговічності робочих органів зернових кормодробарок. Висновки.

Дата видачі завдання «12» жовтня 2022 р.

Керівники магістерської роботи

(підпис)

Харьковський І.С.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Новицький А.В.

(прізвище та ініціали)

Бовкун Я.В.

(прізвище та ініціали студента)

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОТОРНИХ ДРОБАРОК .....	9
1.1 Подрібнення зерна в аграрних підприємствах .....	9
1.2 Короткий огляд подрібнювачів зернових матеріалів .....	18
1.3 Підвищення довговічності засобів для подрібнення кормів роторного типу .....	22
1.3.1 Аналіз методів підвищення зносостійкості засобів для подрібнення кормів зернових матеріалів .....	22
1.3.2 Передумови підвищення довговічності подрібнювачів роторного типу .....	25
1.4 Висновки і задачі досліджень .....	30
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОТОРНИХ ДРОБАРОК .....	32
2.1 Розробка ієрархічної схеми роторної дробарки .....	32
2.2 Способи підвищення зносостійкості деталей роторної дробарки .....	34
2.3 Обґрунтування процесу подрібнення у роторній дробарці .....	36
2.4 Модель підвищення ресурсу та прогнозування напрацювання до відмови роторної дробарки .....	41
2.5 Висновки .....	48
3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	50
3.1 Мета та програма експериментальних досліджень .....	50
3.2. Методика експериментальних досліджень щодо підвищення	

НУБІП України

довговічності роторної дробарки .....	52
4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	57
4.1. Оцінки надійності процесу подрібнення роторної дробарки з обліком зносу протирізу .....	57
4.2 Прогнозування довговічності роторної кормодробарки для різних варіантів конструктивних виконань .....	60
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ .....	70
5.1. Розрахунок витрат на збільшення ресурсу роторної дробарки .....	70
ВИСНОВКИ .....	76
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....	78

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Однією з основних операцій підготовки кормів до згодовування є подрібнення зернових матеріалів до заданих розмірів. Як показують дослідження, підвищення продуктивності

тварин забезпечується як за рахунок збалансованості кормів за необхідними елементами живлення, так і вирівнюванню гранулометричного складу зернових матеріалів. При цьому, найбільш поширені в лініях приготування

комбікормів молоткові кормодробарки забезпечують заданий ступінь подрібнення зернових матеріалів, але у готовому продукті міститься в середньому 17...21% цілих частинок, 30...33% пилкоподібних фракцій і лише 47...50% подрібненої маси відповідає зоотехнічним вимогам. Для

забезпечення надійності та ефективності процесу подрібнення зернових матеріалів, необхідно дотримуватися заданих параметрів при подрібненні

зерна, які безпосередньо залежать від конструктивно-технологічних схем та довговічності робочих органів кормодробарок та подрібнювачів кормів.

В останні десятиліття перспективним напрямком є використання в лініях приготування кормів засобів для приготування і роздавання кормів, які реалізують у своїх конструктивно-технологічних схемах енергоефективні

способи руйнування зерна в ударно-відцентрових та роторних кормодробарках. Ударно-відцентрові та роторні кормодробарки успішно застосовуються як у особистих та фермерських господарствах, так і в

кормоцехи сільськогосподарських підприємств. Однорідність гранулометричного складу у цих засобах становить не менше 80%.

Аналіз показує, що представлені дослідження ударно-відцентрових та роторних кормодробарок спрямовані на забезпечення цих важливих якісних показників і в них не розглядалися питання довговічності робочих органів

подрібнювачів. Разом з тим, якісні характеристики таких способів подрібнення забезпечуються дотриманням встановлених робочих зазорів,

величини яких визначаються як зносостійкістю деталей подрібнювачів, так і зношує здатністю зернових матеріалів.

Виходячи із зазначеного, підвищення довговічності засобів для приготування кормів із зернових матеріалів роторного типу, за рахунок удосконалення конструктивно - технологічних схем подрібнення, підбору конструкційних матеріалів робочих органів та обґрунтування їх режимів роботи з урахуванням умов їх використання, являють не тільки практичний інтерес, але й наукову актуальність.

Теоретичні засади процесу дроблення матеріалів, дослідження зв'язку між витратами енергії та характеристиками подрібнюваного продукту виклали у своїх роботах такі вчені, як Ревенко І.І., Бойко А.І., Брагинець С.В., Ковбаса В.П., Хмельовський В.С., Ялпачик О.В. та інші [5, 12, 14, 16, 27, 41, 45, 53].

Вдосконалення процесів роботи в ударно-відцентрових та роторних кормодробарках досліджували Ревенко І. І., Бойко А. І., Моїсєєв О. М., Лебедєв А.Т., Соломка О.В., Ревенко Ю.І. та інші [5, 12, 14, 27, 41, 45].

Питання підвищення довговічності робочих органів молоткових дробарок, включаючи молотки решета та дека розробляли Бойко А. І., Моїсєєв О. М., Новицький А.В., Федченко З.А., та інші [5, 12, 14, 27, 41, 45].

Аналіз показує, що дослідження подрібнювачів та кормодробарок здебільшого спрямовані на вдосконалення конструктивно-технологічних схем подрібнення, встановлення конструкції та обґрунтування режимів їх роботи. В останні роки особливої значущості отримує технологія питань підвищення довговічності робочих органів зернових кормодробарок роторного типу. Реалізація енергоефективних способів роторних кормодробарок подрібнення зрізом і сколюванням забезпечують необхідну рівномірність гранулометричного складу подрібненого зерна.

Об'єкт дослідження – робочі органи роторних кормодробарок.



Предмет дослідження – закономірності зносу робочих поверхонь робочих органів роторних кормодробарок.

Методологія та методи досліджень. У роботі проведено аналіз науково-технічної літератури вітчизняних та зарубіжних авторів. Дослідження проводились у лабораторних та виробничих умовах із застосуванням загальноприйнятих методик оцінки надійності та дослідження ремонтного фонду деталей. Використані програми математичної статистики.

Мета дослідження – підвищення довговічності кормодробарок роторного типу конструкторсько-технологічними методами.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з вступу, п'яти розділів, висновки, списку літератури та додатків. Вона викладена на 77 сторінках основного машинописного тексту, містить рисунки, таблиці та список літератури, що включає 37 найменувань.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОТОРНИХ ДРОБАРОК

### 1.1 Подрібнення зерна в аграрних підприємствах

В аграрній галузі України велику нішу займають тваринницькі підприємства та фермерські господарства [1, 4, 48]. Для реалізації наявних в тваринницькій галузі переваг та нових можливостей необхідно знижувати технологічне відставання, нарощувати інвестиційну привабливість. Це допоможе подальшому енергетичному та технологічному розвитку регіонів України.

Зміцнення та розвиток тваринництва залежить від створення надійної кормової бази, а це неможливо без переробки зернових матеріалів [18, 19, 27]. Щоб забезпечити найкращу перетравлюваність кормів поживними речовинами, які входять до їх складу, корм тваринам подають у найбільш засвоєваному вигляді. Годівля складає 60–70% собівартості всієї продукції.

Удосконалення обладнання для подрібнення зерна визначає та веде за собою низку проблем, пов'язаних з перевитратою енергії, вичерпанням дорогої сировини для його виготовлення та зернових матеріалів для переробки в ньому. При цьому вимоги до якості подрібнення лише підвищуються. Відсутність некондиційних фракцій і формування якісного гранулометричного складу визначають вдосконаленість робочого процесу в машинах, що подрібнюють. Однак більшість традиційних подрібнювальних машин не може забезпечити подальше підвищення ефективності та надійності цього процесу.

Види рослинних кормових матеріалів поділяються на: грубі (сіно); соковиті (баштанні культури, силос, коренеклубнеплоди); зелені (бадилля, трави); концентровані (зерно, макуха, комбікорм та ін.). Підживлення бувають наступних видів: мінеральні (сіль, крейда та ін.), вітамінні,

спеціальні збагачувальні суміші з мікроелементами (залізо, мідь, кобальт та ін). Поряд з корисними мікроелементами у вихідній зерновій сировині присутні мінеральні домішки чи абразивні частинки, які знижують експлуатаційні властивості подрібнювачів за рахунок зносу робочих органів.

Процес подрібнення зернового матеріалу – це зниження розмірів результатів вихідних зернових матеріалів до необхідних значень за рахунок механічного впливу плуощенням, помелом, дробленням та іншими способами [27, 48]. Це обумовлюється особливостями фізіології годівлі тварин та необхідно для підвищення загальної поживності зерна (руйнування крохмалю, зміни якості білка). Концентровані комбікорми в раціоні ВРХ становлять до 60%, птиці та свиней – до 95%.

Аналіз накопиченого досвіду з годівлі тварин та птиці показує, що ефективність кормів залежить не тільки від поживності його складу, виду та віку тварин, а й від крупності помелу вихідних частинок зернофуражу. Тому розробляються різні дослідження та встановлюються міжнародні норми, що рекомендують і регулюють гранулометричний склад, поживність та інші властивості комбікормів.

У цьому зв'язку цікавими є дослідження, проведені в Канзаському державному університеті США. Вченими проводилися випробування з впливу розміру частинок корму зміню продуктивності свиней. Вони встановили, що молодняк свиней краще переживають корм, тому корми більше тонкого помелу краще давати свиням на відгодівлі. Середній добовий приріст від скорочення розміру частинок корму не змінювався, а його споживання зменшувалася. Оптимальний розмір частинок зафіксований у діапазоні 500 - 700 мікрон. Для свиней, які отримували корм, подрібнений до 500 мікрон, його ефективність зросла на 6% на відміну від групи свиней, яких годували зерном із розміром частинок 900 мікрон. При цьому якщо скорочувати розмір частинок подрібненого зернофуражу з 700 до 500 мікрон

продуктивність приготування корму знижується. Дослідники багатьох технологій приготування кормів вважають, що оптимальний розмір зернової частинки корму 700 мікрон, при якому досягається баланс між ефективністю роботи комбикормового заводу та продуктивністю свиней.

Зазначені висновки підтверджують своїми дослідженнями щодо зміни добового приросту ваги при відгодівлі свиней зерном різного помолу, результати якого представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

#### Годівля свиней зерновими кормами різної крупності

Модуль помолу	Кукурудза		Ячмінь		Кормова суміш	
	Перетравлені органічні речовини, %	Добові прирости	Перетравлені органічні речовини, %	Добові прирости	Перетравлені органічні речовини, %	Добові прирости
Цільне зерно	74.4	587	67.1	490	-	-
Крупий помол	88.4	672	79.3	556	74.3	638
Середній помол	93.8	722	81.8	599	75.4	714
Дрібний помол	94.9	755	84.6	631	77.3	759

Негативною стороною низького ступеня подрібнення є те, що вона призводить до розпорошення частинок зерна та швидкого проходу їх через травний тракт, викликаючи захворювання у сільськогосподарських тварин (в ВРХ і птиці), веде до втрат корму, і знижує загальну ефективність від його застосування.

Залежно від виду та вікової категорії тварин гранулометричний склад кормів відрізняється. Вимоги національного ДСТУ [21, 22] регулюють крупність частинок комбикормової крупи для згодовування сільськогосподарським тваринам.

Але дані досліджень не завжди відповідають чинним стандартам та зоотехнічним вимогам, що використовуються в тваринництві. Наприклад вчені зі США стверджують, що розмір частинок корму для свиней повинен бути 500 - 900 мікрон (0,5 - 0,9 мм), а за ДСТУ він не повинен вміщувати більше 18 – 20% частинок менше 1 мм [21, 22].

Таким чином, різні умови утримання тварин, вид і вік, кліматичні умови та інші фактори не дозволяють встановити загальні норми чи стандарт. Тому однорідність гранулометричного складу кормів частіше визначають індивідуально у кожному окремому випадку.

За даними Міністерства аграрної політики України до 2025 року прогнозується зростання потреби у кормах на 15%. Низька якість готових концентрованих кормів знижує ефективність використання зернового фуражу до 35%, а в умовах нестабільного ринку та високої вартості компонентів комбікорму, представлена проблема стає дедалі актуальнішою.

Процес подрібнення зернових матеріалів супроводжується утворенням пилоподібної фракції та наявністю в готовому продукті нлих, не зруйнованих, зернівок, які не відповідають зоотехнічним вимогам, що задані помолу та порушують стабільність гранулометричного складу. Великі частинки (зазвичай) піддаються повторній переробці. Але переподрібнені частинки за рахунок свого розміру можуть працювати на зноє-робочих поверхнях у середовищі абразиву і знижувати ефективність процесу подрібнення, якщо не здійснювати очистку.

Зношування робочих поверхонь знижує довговічність і надійність обладнання, що працюють в різних умовах. Абразивне зношування присутнє у дуже великій кількості подрібнювальних машин і механізмів та відрізняється найінтенсивнішим характером зношування. Довговічність деталей та робочих поверхонь подрібнювача можна підвищити з урахуванням достовірної інформації про механізм руйнування серед

абразиву.

Подрібнювальне обладнання тваринницьких підприємств морально застаріло та зношене. При цьому, щоб його замінити, необхідні великі фінансові вкладення, а іноді і переобладнання всієї переробної лінії, що є непосильним багатвом господарствам в аграрній сфері. Пошуки більш зносостійких, менш дорогих матеріалів та технологій, які забезпечать збільшення довговічності роботи деталей, що зношуються, стає першорядним науковим завданням.

Тому завдання підвищення зносостійкості робочих органів кормодробарок є актуальною проблемою, яка вимагає цілий ряд експериментальних та теоретичних досліджень.

## 1.2 Короткий огляд подрібнювачів зернових матеріалів

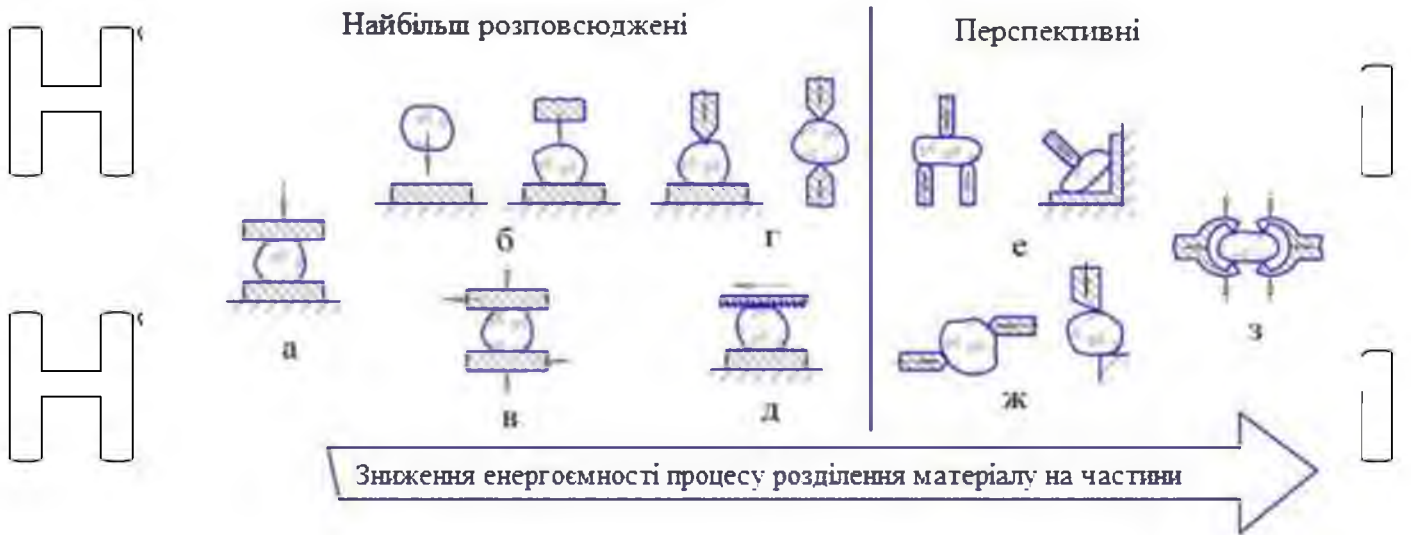
Подрібнення вихідного матеріалу на дві та більше частини відбувається різними способами впливу, які впливають на стан гранулометричного складу, якість готової продукції та на інтенсивність зносу робочих поверхонь. При цьому всі зазначені способи є похідними двох основних напруг (нормальної та дотичної) і відрізняються тим, що впливає на подрібнюваний матеріал робочих органів [5, 12, 18, 27, 41, 42, 46].

Поділ матеріалів на частини робочими органами зернових дробарок відбувається за показаними на рисунку 1.1 схемами та їх комбінаціями.

Подрібнювачі, що застосовуються в даний час, дозволяють поліпшити однорідність сумішей, підвищити глибину протикання хімічних реакцій та інтенсивності різних технологічних процесів. Ефективність зернової дробарки визначається її продуктивністю, питомою енерго- та матеріаломісткістю, а також якістю отриманого продукту. Основні види зернових дробарок, що використовуються для подрібнення (грубий і середній

помел) вихідної сировини представлено на рис. 1.2 [5, 10, 14, 27, 41, 45, 46].

# НУБІП УКРАЇНИ



а – стиск, б – удар, в - стирання, г – розкол, д – розпилювання, е –згин, ж

– скол, зріз, з – розтяг.

Рис. 1.1 Способи впливу робочих органів на матеріал при подрібненні

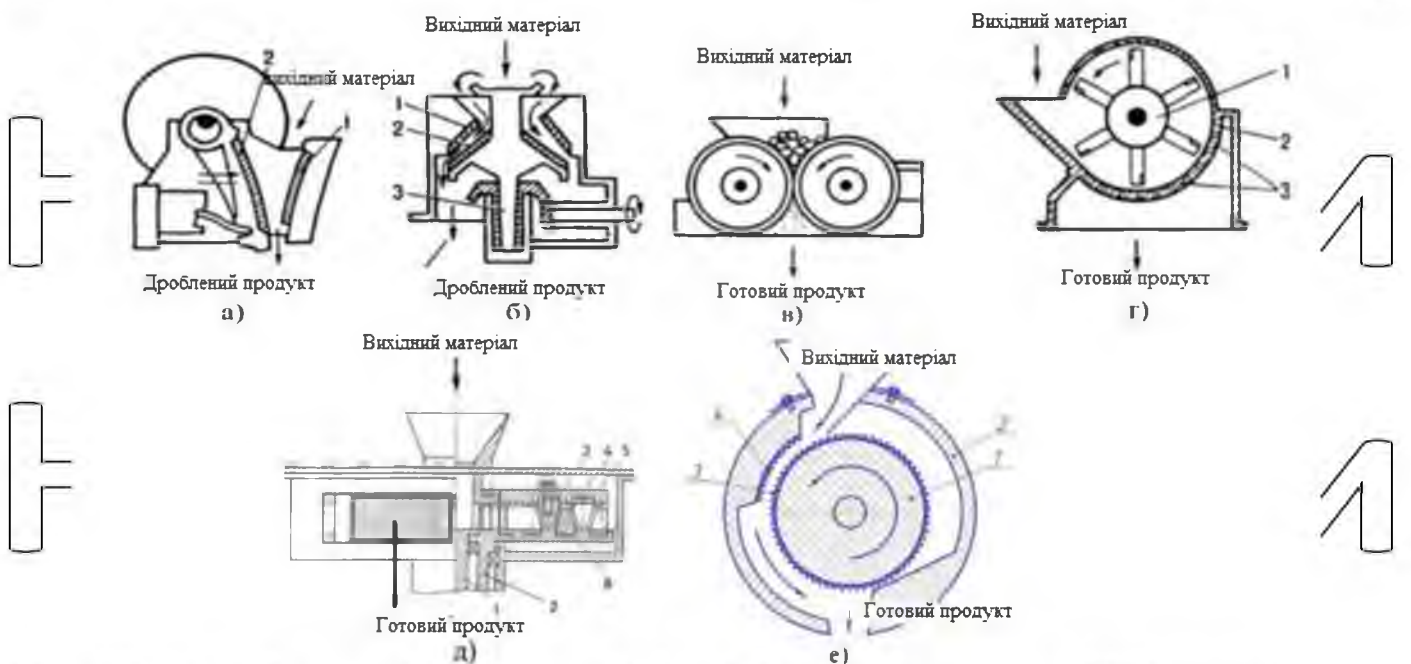


Рис. 1.2. Види дробарок: а – шокова (1, 2 – шоки); б – конусна (1, 2 – ...)

# НУБІП УКРАЇНИ

робочі конуси; 3 – приводний вал); в – вальцова; г – молоткова (1 – вал з молотками, 2 – статор, 3 – решето), д – відцентрово-роторна (1, 2 – внутрішній та зовнішній вал; 3, 4 – ріжучі елементи; 5, 6 – верхній та нижній диск-ротор), е – роторна (1 – ротор, 2 – статор, 3, 4 ріжучі поверхні (рифлі) ротора і статора).

Шокова дробарка є універсальною при подрібненні різних матеріалів. При цьому її застосування ускладнюється під час подрібнення в'язкопружних продуктів. Принцип роботи полягає в затисканні між робочими поверхнями (шоками) вихідного матеріалу, що призводить до його руйнування через виникнення напруг зсуву та стискування.

Конусна дробарка використовується в основному при середньому та дрібному дробленні. Найчастіше використовуються для подрібнення руди та корисних копалин. В основі механізму руйнування вихідного матеріалу лежать процеси стирання та розколювання.

Вальцеві дробарки найчастіше складаються з пари горизонтальних рифлених вальців, які обертаються назустріч один одному. Таким чином, вихідна сировина руйнується роздавлюванням, стисненням і стиранням його частинок у робочій зоні між двома паралельними циліндровими валками. До

недоліків вальцевих дробарок можна віднести суворі вимоги технології їх виготовлення, високу ринкову вартість, у тому числі технічного обслуговування, залишання при дробленні матеріалів вологостю вище 18%.

Ще одним недоліком вальцевих дробарок є порівняно низька питома продуктивність по відношенню до інших кормоприготувальних машин ударної дії.

Молоткові дробарки можуть подрібнювати велику різноманітність матеріалів, і застосовуються для руйнування вихідної сировини ударами молотків, які закріплені на приводному валу. Обов'язковою складовою такої конструкції є сепаратори та калібратори (решета, сита тощо). З недоліків



можна погану роботу з вологою та жирною сировиною, підвищену металомісткість і низьку вирівнюваність гранулометричного складу готового продукту, в тому числі через знос робочих органів.

Дискові дробарки складаються з одного або двох валів, що обертаються, з закріпними ріжучими дисками. Диски, зазвичай, виконуються зубчастими для роботи один щодо одного. Таким чином, вихідний продукт подрібнюється засобом сколювання та стирання. Насаджені між різальними дисками розпірні кільця захищають вали роторів дробарок від пошкоджень в процесі подрібнення, а дробарка може комплектуватися додатково парою дисків для двоступінчастого подрібнення та сепараторами для контролю крупності одержуваного комбікорму.

Щодо відцентрово-роторних дробарок, то вони, як правило, виконуються з вертикальним валом. Динаміка руху матеріалу у відцентровій дробарці повністю повторює роторну, з тією лише різницею, що завдяки вертикальному компонованню стало можливим використання самофутерування. Самофутерування окремих елементів відцентрової дробарки дозволяє з усіма перевагами роторної дробарки, таким як продуктивність та простота конструкції, додати можливість роботи з абразивними матеріалами. Також варто зазначити, що завдяки застосуванню деяких технічних рішень швидкість обертання ротора на відцентрово-ударних дробарках значно більше, ніж у будь-якій з дробарок ударного типу. Зазначене дозволяє збільшити ступінь скорочення матеріалу та швидше отримати готовий продукт.

Роторні дробарки призначені для подрібнення продуктів середньої твердості шляхом швидкого обертання ротора. Відрізняються від дискових та відцентрово-роторних горизонтальним розташуванням вала-ротора, а від молоткових тим, що замість молотків, які використовують на руйнування вихідного матеріалу працюють рифленою поверхнею ротора та статора.

Млини виробляють зменшення розмірів частинок комплексом ударних, стираючих, роздавлюючих та інших впливів на вихідний продукт. Для подрібнення зернових матеріалів млина експлуатують в основному борошномельного виробництва, а для виробництва сировини комбікормів вони не підходять через борошністість, одержувану фракцію, готового продукту, яка не задовольняє зоотехнічним вимогам і використовується лише для подальшого гранулювання.

Основні види подрібнювачів кормів, що використовуються в аграрній і переробній галузях для тонкого помелу представлені рис. 1.3 [5, 12, 14, 27, 41, 45].

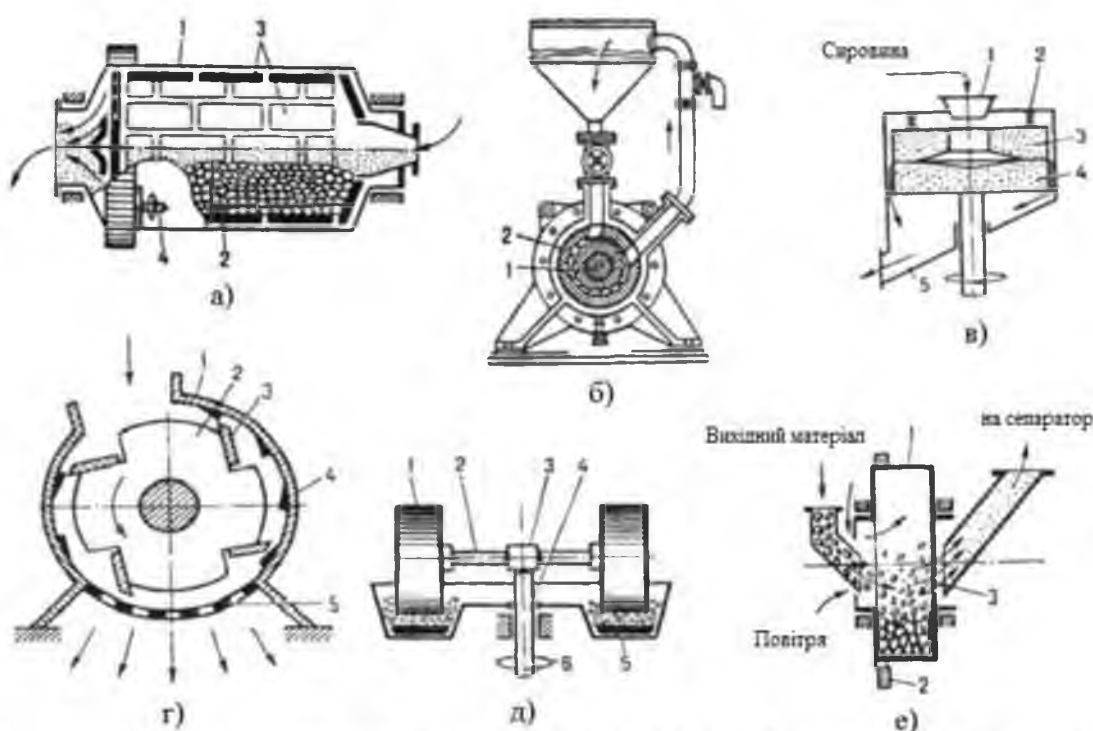


Рис. 1.3. Класифікація млинів: а - барабанно-кульбовий (1 - корпус-статор, 2 - працюючі на подрібнення тіла, 3 - футерування, 4 - шестерня приводу); б - кавітаційна (1 - ротор, 2 - корпус-статор); в - жорний млин (1 - завантаження матеріалу, 2 - притиски, 3, 4 - жорна з каменю або іншого матеріалу, 5 - вивантаження продукту); г - пожевий млин (1 - корпус з

ножами 4 по внутрішній стороні, 2 - ротор з ножами 3, 5 - калібр елемент-решето); д - млин з бігунами (1 - ковзанка з піввіссю 2, 3 - водило, 4 - вал, 5 - чаша з подрібнюваним продуктом, 6 - вал приводу); е - безшаровий барабанний млин (1 - корпус-статор, 2 - шестерня приводу, 3 - випускна діафрагма).

Плющилки дозволяють отримувати плющене зерно, яке під час годівлі підходить тільки для жуйних тварин (велика рогата худоба та коні). Але досвід вітчизняних та зарубіжних тваринників показує, що і в раціоні великої рогатої худоби таке плющене зерно необхідно поєднувати з концентрованим (дробленим). Також недоліком є те, що при змішуванні плющених частинок з рештою складових комбікорму не можна досягти рівномірності суміші понад 90%.

Аналіз літературних джерел показує, що для подрібнення фуражного зерна найчастіше використовують молоткові дробарки. Вони мають не складну конструкцію, прості в експлуатації та зручні при технічному обслуговуванні, а технологічний процес подрібнення в них добре вивчений.

При цьому хаотичність процесу подрібнення в них і висока залежність якості від зносу решіт та молотків призводять до низької вирівняності розміру частинок готового корму за наявності понад 20% переподріблених пилоподібних частинок фракції. Дослідів та розробці теорії молоткових дробарок присвятили свої роботи такі видатні вчені як Мельников С.В., Бойко А.І., Ревенко І.І., Пилипенко О.М. та багато інших вчених [1, 5, 7, 18].

Тому останнім часом конструкції дробарок молоткового типу удосконалюються науковцями та практиками, але при цьому помітна тенденція поступової їх заміни іншими типами подрібнювачів. Наприклад, конструкціями дезінтеграційного, ударно-відцентрового, відцентрово-роторного, дискового та роторних типів. У порівнянні з молотковими

дробарками вони не поступаються продуктивності при менших енерго- та металоемності та вищій якості готового продукту.

Дослідженнями встановлено, що постійно розробляються нові та удосконалені конструкції подрібнювачів, до яких можна віднести горизонтальну роторну дробарку, яка запропонована представниками наукової школи Лебедева О.Т. Горизонтальна роторна дробарка має рифлені поверхні ротора та статора що здійснюють поділ на частини вихідного продукту, при вирівняності гранулометричного складу готового подрібненого продукту до 95%.

Різноманітність конструкцій подрібнювачів (кормодробарок, млинів, плоскошлюк) кормів можна розподілити на: безрешітні (рис. 1.4, а), решітні та універсальні (рис. 1.4, б і в). Збільшення числа етапів подрібнення в одній конструкції кормодробарки підвищує вартість технологічного процесу [14, 18, 40, 48].

На рисунку показані етапи процесу подрібнення вихідного продукту, що характеризують, що застосовується в конкретному випадку, конструктивно - технологічну схему. А для доведення продукту до необхідної крупності використовуються додаткові елементи, наприклад, дві або більше камер подрібнення із сепараторами.



Рис. 1.4. Схеми типових засобів для подрібнення кормів

При виборі засобів для подрібнення кормів оцінюють загальні переваги та недоліки: продуктивність, енерго- і металемісткість, якість продукту, зносостійкість робочих органів, коефіцієнт корисної дії та інші параметри, що визначають ефективність та надійність усієї конструкції, або її окремих складових.

### 1.3 Підвищення довговічності засобів для подрібнення кормів

#### роторного типу

#### 1.3.1 Аналіз методів підвищення зносостійкості засобів для подрібнення кормів зернових матеріалів

Питанням розробки теорії та практичним дослідженням зношування робочих органів засобів для подрібнення зернових матеріалів присвятили свою наукові праці видатні вчені С.В. Мельников, В.П. Горячкін, А.Т. Бойко, І.І. Ревенко, О.М. Пилипенко А.Т. Лебедев, О.М. Моїсеєв, та інші [20, 14, 18, 27, 41, 45, 48].

Більшість із досліджень представлених вчених спрямовано вивчення зносостійкості робочих органів у мелоткових кормодробарках. Це пояснюється порівняно недавнім використанням подрібнювачів, які працюють за принципом сколювання та зрізу. Зазначена технологія дозволяє знизити кількість впливів на зерно до його зруйнування і як наслідок знижує енергоємність процесу. Однак головним її перевагою є отримання готового продукту вирівняного за гранулометричним складом з низьким вмістом пилоподібних фракцій.

Серед засобів для подрібнення кормів даного типу найбільшою ефективністю відрізняються роторні та відцентрово-роторні дробарки зерна.

При цьому ефективність конструкцій цих засобів для подрібнення кормів сильно залежить від геометричних параметрів робочих поверхонь, що взаємодіють з продуктом і нугтева до їх зносу.

Висока якість подрібнення зернових матеріалів, низький вміст пилоподібної фракції (до 10% при вирівнювання гранулометричного складу до 90%) дають можливість досягати вальцеві дробарки, що мають рифлену поверхню вальців, що нарізується в різних конфігураціях. Однак вони мають цілий ряд, недоліків, що описані вище. Саме вони не дозволяють купувати і масово їх використовувати в кормоцехах та на тваринницьких фермах.

Порівняно з вальцевою, горизонтальні роторні дробарки мають більш просту конструкцією, але дозволяють виробляти аналогічну по точності налаштування робочих характеристик та конструктивних параметрів. Це досягається за рахунок наявності всього одного рушійного елемента (ротора) і локалізованої зони поділу на частини. Руйнування зерна відбувається при взаємодії пари ротор - протиріз вихідного зернового матеріалу.

Для того щоб сформувати найбільш ефективні та перспективні методи підвищення зносостійкості в роторній дробарці потрібно звернутися до дослідження зносу робочих органів у молоткових та вальцьових дробарках.

Є деякий накопичений досвід дослідження зносостійкості цих засобів для подрібнення кормів, за рахунок широкого використання їх у різних технологічних процесах харчової промисловості та кормоприготування [6, 31, 32, 14, 27, 41, 45].

Дослідженнями встановлено, що при належному попередньому очищенні зерна, що надходить у порожнину дробарок переважатиме в них абразивний знос робочих поверхонь засобом мінеральних домішок, що знаходяться в загальній масі вихідного фуражного зерна.

Найбільше зношуються вальці, які схильні до інтенсивному нерівномірному зношуванню робочих поверхонь при обробці міцних та

абразивних матеріалів. Ремонтують їх на спеціалізованому ремонтно-технологічному обладнанні для нарізки рифлів. Після ремонту їх оцінюють, випробовують на циліндричність, а при встановленні на місце ретельно перевіряють висоту та еластичність пружин. Також перевіряють паралельність валків, зазори між ними, нагрівання підшипників, наявність вібрації, роботу пружин та всіх регульовальних гвинтів.

Технологічний процес ТО і ремонту є не тільки трудомісткою операцією, але й вимагає спеціалізованого обладнання та навченого персоналу. Навіть незначне порушення технологічних зазорів і конструктивних параметрів при нарізанні вальців може призвести до зниження ефективності або відмову дробарки.

Найбільше поширення серед засобів для подрібнення кормів, незалежно від розміру та форми аграрних підприємств при подрібненні зернових матеріалів отримали молоткові кормодробарки. Однак практика експлуатації кормодробарок показала, що існує проблема надмірного зносу робочих органів та низької якості подрібнення зернового матеріалу, яке істотно знижується при підвищенні його вологості.

З накопиченого досвіду роботи відомо, що мінімальний ресурс у молоткових дробарках мають молотки (термін їх служби становить від 72 до 300 годин).

Ресурс інших робочих органів до 2 разів вищий. Однак така тенденція приводить до необхідності проведення близько 50 технічних обслуговувань подрібнювача на рік. Ефективність використання молотків полягає у напрацюванні їх до граничного стану, тому точне прогнозування їхнього ресурсу є визначальним у разі підвищення надійності технологічного процесу.

Через зазначену невизначеність наслідків експлуатації, недоліки часто переважають позитивні сторони молоткових дробарок, такі як

універсальність, широкий діапазон дроблення, слабе нагрівання продукту).

Недостатня та неповна теоретична база, навіть, незважаючи на багаторічні дослідження, призводить до того, що навіть незначна зміна вихідної форми молотка або її зміна у процесі роботи призводить до множинних недостатньо прогнозованих факторів, які знижують ефективність дробарки та ресурс робочих органів.

Разом з тим, дослідження жорстко закріплених молотків, що проводяться Мойсеєвим О.М. та іншими вченими показали, що питомий знос молотків залежить від виду вихідного матеріалу і від властивостей матеріалу, з якого виготовляється сам молоток.

Багато українських науковців засобів для подрібнення кормів своїх дослідженнях пропонувала зміцнювати роботу кромку молотка для запобігання передчасному зносу та дестабілізації обертання ротора. При цьому глибина і необхідна твердість зміцнюваної поверхності нею була досліджена.

У рамках аналізованого питання наочним є експеримент, проведений в аграрних підприємствах під час проходження практик студентами. На молоткову дробарку ДМ-10 встановили нове решето і молотки, для приготування комбікорму великого модуля помелу.

Зі зносом робочих органів дробарки змінюватиметься і ступінь подрібнення вихідного матеріалу. Однак у розробці теорії, встановлено, що при дослідженні ефективності роботи засобів для подрібнення кормів, цей фактор не розглянуто, а віднесо до окремого експериментального дослідження.

Часто порушується питання про доцільність використання та виготовлення молоткових дробарок, та заміни їх більш сучасними конструкціями, що забезпечують найкращі питомі показники, при якісному подрібненні. Розробка нових більш сучасних та модернізація існуючих



конструкції кормодробарок, для забезпечення тварин якісними кормами та кормовими сумішами стає все більш гострим і актуальним завданням на фоні щорічного зростання цін на продовольчу сировину.

### 1.3.2 Передумови підвищення довговічності подрібнювачів роторного типу

Використання роторних засобів для подрібнення кормів при подрібненні зерна має незначний характер. Це відбувається через слабку номенклатуру процесів, що протікають під час їх роботи, в тому числі процесу зносу робочих органів та деталей [5, 12, 14, 27, 41, 45]. Так, наприклад, раніше перегляд конструкції роторної дробарки дав можливість запропонувати удосконалену конструктивно-технологічну схему засобу. У роботі була доведена ефективність використання горизонтальних роторних дробарок при подрібненні кормового зерна, а запропонована конструкція дозволила знизити кількість пилоподібних фракцій у готовому продукті до 5%. Разом з тим, зношування робочих поверхонь, цілісність і довговічність яких, впливає на надійність і ефективність подрібнення зерна в роторній дробарці.

За кінематикою процесу роторна дробарка схожа з молотковою, але розподіл в ній зерна на частини відбувається при кожній взаємодії з робочими органами. При цьому в конструкції роторної дробарки можна реалізувати енергоефективність.

Ефективний спосіб впливу на вихідний продукт зрізом (сколюванням), аналогічний використовуваному у вальцових дробарках. Представлена у роботі схема подрібнення зернового матеріалу дозволяє досягати хороших показників ефективності процесу. Але для роботи у виробничих умовах фермерських господарств необхідно вивчити питання, пов'язані з

напрацюванням робочих органів роторних дробарок до граничного зношування.

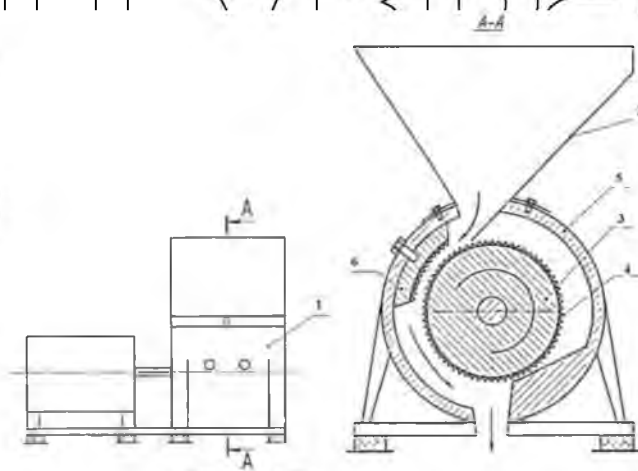


Рис. 1.6 Схема роторної дробарки

У роторній дробарці 1 (рис. 1.6) поділ матеріалу на частини відбувається за допомогою дотичної напруги зсуву, способом «Сколювання-зріз». Зернівки, із завантажувального бункера 2 через завантажувальне вікно наповнюють дробильну камеру та потрапляють у пази (рифлі) 4 ротора 3. Далі вони транспортуються до зрізних елементів (протиріз з рифлями) 6 статора 5, де і відбувається їхнє поділ на частини. Простір між ротором та статором заповнюється як вихідним продуктом, так і вже зрізаними частинами зернівок. Таким чином, отримані за один і більше зріз частинки виводяться через розвантажувальне вікно.

Розмір робочого зазору між рифами буде характеризувати що відбувається руйнація, тобто. призводити до виникнення згинальної сили та саме тут спостерігатиметься максимальний тиск на робочі поверхні.

На підсумковий результат впливають положення зерна у момент поділу, значення робочого зазору, форма, кількість і геометрія рифлів статора, і ротора, фізико-механічні властивості зерна, коефіцієнт заповнення, та заданий модуль помелу. В результаті досліджень була обґрунтована конструкція роторної дробарки з горизонтальним ротором і володіє

наступними конструктивними та робочими характеристиками: діаметр ротора повинен бути мінімум  $D = 0,1$  м; виконання нарізки рифлів (крок  $t$ , висота  $h$  і кількість  $n_p$ ) ротора та статора повинно відповідати подрібнюваному матеріалу при заданому модулі помелу, наприклад одна рифа (протиріз) на статорі для середнього та грубого помелу і т.д.

Базуючись на зафіксовані в роботі оптимальні режими при подрібнення зернових матеріалів у роторній дробарці, слід визначити вплив факторів, пов'язаних зі зносом робочих поверхонь в цих експлуатаційних умовах при встановлених робочих параметрах. А саме при лінійних швидкостях у межах  $4,5 \dots 6,5$  м/с, робочому зазорі від 0 до 0,8 мм та різних модулях помелу.

При середньому помелі зернового матеріалу, включаючи пшеницю, ячмінь, овес, кукурудзу, вирівнювання гранулометричного складу була  $91 \dots 98\%$ , що відповідає фактичній результативності процесу  $\Phi_{pe} = 9,2 \dots 61,5$ .

Поділ зерна у конструкції дробарки розглядався в зоні найбільшого зближення робочих поверхонь ротора та статора, а саме горизонтальної осі ротора. Певний інтерес може мати перенос зони подрібнення в порожнині дробарки ближче до зони виведення продукту, що має додатково знизити вплив сил інерції, що порушують «спокійний» прохід матеріалу від завантаження до зрізу.

Також у роботі було запропоновано формулу продуктивності горизонтальної роторної дробарки, що враховує ступінь подрібнення та коефіцієнт заповнення, але ігнорує показник зносу робочих поверхонь:

$$Q = l \cdot \frac{D_q}{\lambda} \cdot v_p \cdot \rho \cdot n_p \cdot k_{з}, \quad (1.1)$$

де  $l$  - довжина ротора, м;

$D_q$  - вихідний розмір частки, наприклад  $D_e$ , м;

$v_p$  - лінійна швидкість у зоні зрізу, м/с;

$\rho$  - густина зернового матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;

$n_p$  - пази на роторі, шт.;

$k_3$  - коефіцієнт заповнення порожнини дроблення.

Значення коефіцієнта заповнення також вимагає додаткового обґрунтування, оскільки становить порядку  $k_3 = 0,06...0,1$ , що менше значення  $k_3 = 0,2$  цього ж коефіцієнта у вальцьових верстатах, взятих як приклад для конструктивно-технологічної схеми. При цьому, проведений у параграфі, аналіз показав, що в робочій порожнині роторної дробарки буде переважати абразивний знос. Як абразив будуть виступати не тільки мінеральні домішки, а й найдрібніші частинки вихідного продукту.

Абразивне зношування згубно впливає на металеві робочі поверхні. Його особливість полягає у прямому руйнуванні поверхневого шару, який у кожний момент часу становить незначну частину від кількості загальних контактів абразивних частинок з поверхнею. Абразив у порожнині роторної дробарки формується в основному за рахунок наявності в загальній масі зерна мінеральних домішок. Вивчення причин та наслідків інтенсивності зношування робочих поверхонь цими частинками дозволить збільшити довговічність робочих поверхонь та передбачити заходи щодо його часткового або повного усунення.

ДСТУ регламентує вміст у кормовій суміші різних емітєвих домішок. До бур'янів відносять і мінеральну (комки землі, гальку, частинки шлаку, руди). Мінеральні домішки згідно державному стандарту не повинні перевищувати 1% загальної маси. Складові мінеральної домішки мають фізико-механічні властивості, що значно відрізняються від зернових, що тягне за собою проблеми при транспортуванні, зберіганні та переробці перенасиченої ними маси зернових матеріалів.

Як і будь-який інший абразивний матеріал, мінеральні домішки створюватимуть додаткове навантаження на робочі поверхні подрібнювача,

викликаючи порушення технологічних зазорів та їх підвищений знос.

До найбільш ефективних способів підвищення зносостійкості робочих поверхонь роторної дробарки можна віднести: зміна геометрії (товщина, форма і т.п.); підбір оптимальної кількості робочих елементів, їх швидкості та частоти взаємодії з вихідним продуктом; підбір оптимального матеріалу, для виготовлення робочих органів, виходячи з виду переробленого продукту; зміцнення частини чи всієї робочої поверхні; забезпечення точного та своєчасного прогнозування ресурсу деталей; використання технологічного обладнання для ремонту та ТО.

На основі аналізу матеріалів глави та досліджень необхідно провести ряд заходів, спрямованих на підвищення довговічності конструкції роторної дробарки.

#### 1.4 Висновки і задачі досліджень

За результатами проведеного аналізу були сформовані основні напрями досліджень, які необхідно провести під час досягнення поставленої в роботі мети щодо підвищення довговічності подрібнювачів роторного типу.

Роторна дробарка з підвищеною надійністю роботи підвищить тривалість ефективного, довговічного процесу подрібнення зерна, за рахунок розробки оптимальної з точки зору зносостійкості та якості конструктивної схеми поділу вихідних частинок на задану кількість частин відповідно до зоотехнічних вимог для різних видів та віку сільськогосподарських тварин та птахів. При цьому необхідно знижувати питомі енерговитрати на здійснення процесу при отриманні однорідного фракційного складу готового продукту за рахунок використання зносостійких робочих органів, що дозволяють тривалий час зберігати встановлений режим роботи.

При виконанні магістерської кваліфікаційної роботи необхідно

вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз конструкцій, технічних характеристик, умов експлуатації та характерних відмов кормодробарок.

2. Встановити основні напрямки підвищення довговічності роторних кормодробарок зернових матеріалів.

3. Отримати аналітичні залежності продуктивності та енергоємності процесу кормодробарки та оцінки ефективності її роботи.

4. Провести дослідження показників надійності кормодробарок, із врахуванням зносу робочих органів та якості подрібнення зернових матеріалів.

3. Експериментально уточнити властивості зернових матеріалів та дослідити вплив зносостійкості протирізу на показники роботи роторної кормодробарки.

4. Провести техніко-економічну оцінку ефективності роботи та підвищення довговічності роторної кормодробарки.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

## РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОТОРНИХ ДРОБАРОК

### 2.1 Розробка ієрархічної схеми роторної дробарки

НУБІП України

Ключові конструктивні та технологічні елементи роторної дробарки за патентами були обґрунтовані за методиками системного аналізу складних технічних систем та комплексів машин та обладнання [9, 12, 28, 31, 32].

Відповідно цій методикі для вдосконалення самого процесу подрібнення і розробки основ збільшення довговічності машин, роторна дробарка розглядається як самостійна складна технічна система (рис. 2.1).

#### Технічна система

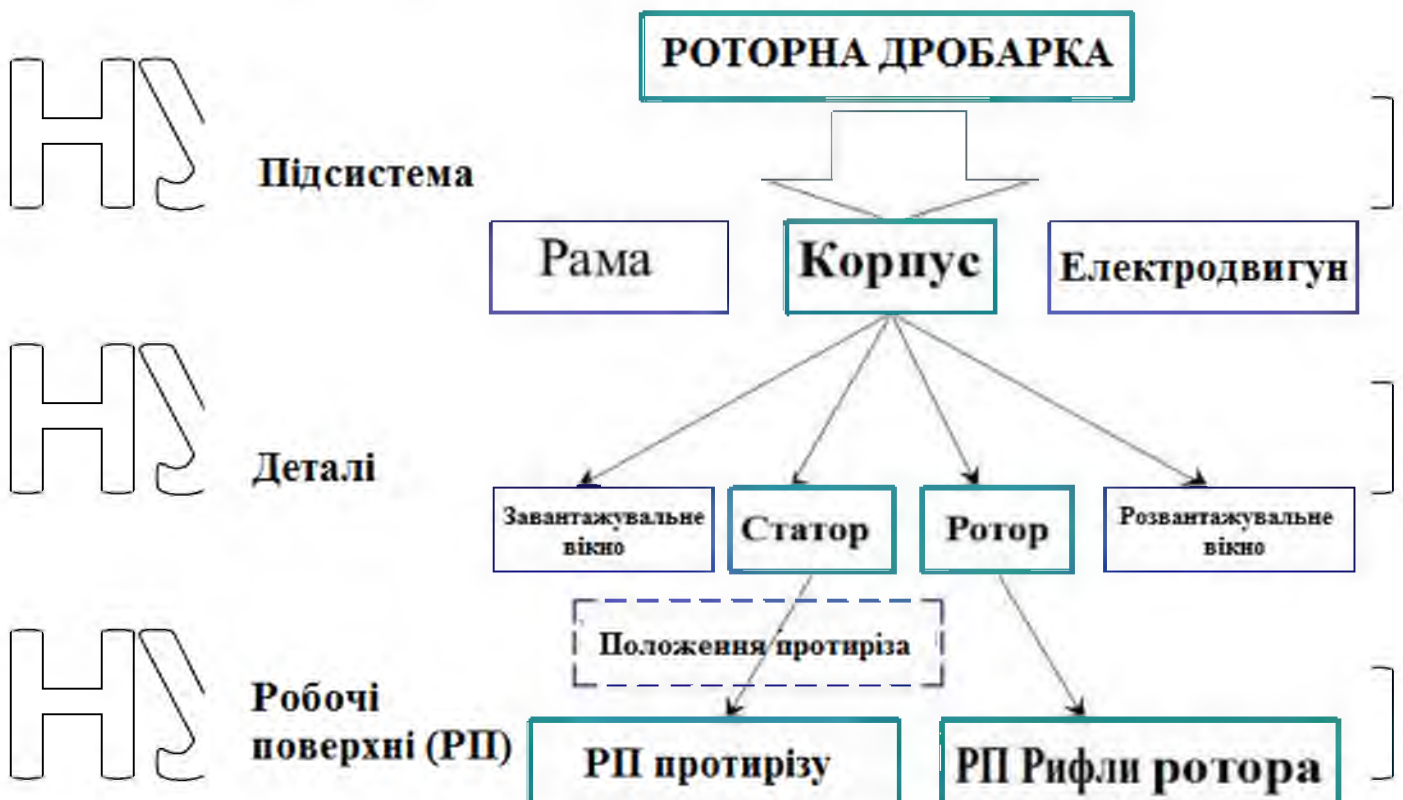


Рис. 2.1. Ієрархічна схема дробарки

Представлена схема роторної дробарки складається з підсистем, деталей та робочих поверхонь. Найбільший вплив на надійність та ефективність роботи роторної дробарки надають нижчі елементи ієрархічної схеми рифів протиризу та ротора. Виходячи з [9, 12, 32] їх відносять до робочих поверхонь, які контактують з матеріалом та беруть участь у виконанні технологічного процесу - подрібнення зернових матеріалів. Цільове призначення рифів робочих поверхонь ротора та статора, що є нижчим елементом технічної системи «роторна дробарка» - забезпечити умови, коли поділ вихідних зернових матеріалів проводиться на задану кількість частинок до досягнення ними необхідного модуля помелу та ступеня подрібнення зернофуражу.

Інші робочі поверхні, що входять до ієрархічної схеми, надають менший вплив на результативність процесу, ніж рифлі на роторі та статорі. У процесі подрібнення зернового матеріалу відбувається зношування робочих поверхонь рифлів, це обумовлено різними фізико-механічними властивостями подрібнюваного матеріалу.

Технічний результат зводиться до підвищення зносостійкості, надійності роботи та ефективності процесу подрібнення, шляхом зниження зносу взаємодіючого з вихідним продуктом поверхонь (рифів) ротора та рифленого руйнівного елемента, закріпленого на статорі.

У робочій порожнині подрібнювача знаходяться нерухомий руйнівний елемент з рифами, закріплений на статорі, і ротор, що обертається з  $n$ -им числом рифлів на його поверхні, кожна з яких взаємодіє з рифленим руйнівним елементом за одного обороту. Таким чином, знос рифлів ротора буде в  $n$  разів менше зносу нерухомого руйнівного елемента, за один оборот. Отже, найбільше навантаження зазнають рифлі на статорі та найшвидше зношуються саме вони.

Необхідно знайти умови, що дозволяють збільшити ресурс робочої



поверхні на статорі і легко адаптувати кормодробарку до різних вихідних продуктів подрібнення, варіюючи при необхідності робочий зазор між робочими органами кормодробарок.

Для забезпечення надійного та ефективного процесу розділення зернового матеріалу на частини необхідно обґрунтувати форму рифів та розташування протирізу (рис. 2.1) при взаємодії з подрібнюваним матеріалом у порожнині дробарки. Тому рифи нижчих елементів ієрархічної схеми або робочих поверхонь повинні мати раціональні геометричні параметри та бути зносостійкими, залежно від фізико-механічних властивостей матеріалу та інтенсивності їх застосування в експлуатації.

Для формування стабільності реалізації процесу подрібнення, слід обґрунтувати підвищення зносостійкості рифів статора. Для забезпечення надійності роботи роторної дробарки, за рахунок підвищення довговічності її робочих поверхонь протягом заданого періоду необхідно сформувати зносостійкість робочої поверхні протирізу основним параметром якого є властивості поверхневого шару.

Стосовно роботи роторної дробарки розглянуті робочі поверхні повинні забезпечувати технологічно рекомендований зазор у зоні контактування з матеріалом, що подрібнюється.

Для підвищення надійності роторної дробарки необхідно визначити фактори, що впливають на зносостійкість робочої поверхні (рифів) на статорі, є нижчим елементом технічної системи - «роторна дробарка».

## 2.2/ Способи підвищення зносостійкості деталей роторної дробарки

Зносостійкість робочих поверхонь роторної дробарки залежить від виду зернового матеріалу та кількості (концентрації) абразиву у вигляді мінеральних домішок що у ньому. Заходи боротьби зі зносом робочих

органів роторної дробарки можна зобразити схематично, виходячи з проведеного раніше в розділі 1 (рис. 2.2).

Таким чином можна виділити способи підвищення зносостійкості роторної дробарки: додаткова обробка продуктів подрібнення, очищення порожнини дроблення та створення в ній сприятливих умов для експлуатації робочих поверхонь, зміцнення робочих органів, своєчасний їх ремонт чи заміна, використання спеціалізованих матеріалів.



Рис. 2.2. Підходи до підвищення зносостійкості у роторній дробарці

Виконаний аналіз дозволив розробити способи підвищення зносостійкості робочих поверхонь ротора і статора, характеристики яких є визначальними при отриманні готового продукту, відповідно Зоотехнічних вимог (рис. 2.3).



Рис. 2.3 - Способи підвищення зносостійкості ротора та статора

Ефективність застосування представлених способів визначається на підставі теоретичних та експериментальних досліджень та залежить від виду та властивостей матеріалу, що подрібнюється.

### 2.3 Обґрунтування процесу подрібнення у роторній дробарці

В дослідженнях по магістерській роботі представлено процес подрібнення в роторній дробарці з горизонтальним розташуванням ротора з кінетичного погляду. Використовуючи метод, який запропонував професор В.І. Сироватка, було прийнято наступне припущення у межах теоретичного аналізу: до уваги береться лише плоский рух зернівки, зернівка овальної форми, зернівка рухається тільки у поперечному перерізі дробарки.

Руйнування одиничного зернового матеріалу масою  $m_z$  при першому його зрізі характеризується результуючою силою  $F_p$ . При дії зусилля зрізу  $F_{zp}$  на частину зернівки, що знаходиться в пазі ротора, тобто в момент досягнення критичної напруги  $\tau_c$ , вона починає переміщатися і виникає

інерційна сила  $F_i$ , а також сила тертя  $F_{тр}$  маси цієї зернівки  $m_z$  (рис. 2.4).

$F_p$  можна розраховувати за наступною формулою:

$$F_p = F_{зр} + F_i + F_{тр} \quad (2.1)$$

Як показано на рис. найбільше навантаження та знос за рахунок постійного тертя про масу подрібнюваного продукту сприймають кромки рифлів статора і ротора. При цьому, як говорилося раніше, робочі кромки (рифлі) протирізу сприймають у десятки разів більше впливів, ніж рифлі ротора, що значно знижує їх ресурс.

Найбільшу значущість на процесі і типи згинальних, що виникають, стираючих та інших напруг у зоні зрізу надає зазор між кромками рифлів ротора і статора  $\delta$ , який збільшується в процесі їхнього зносу силами тертя про саму зернівку та абразивним матеріалом.

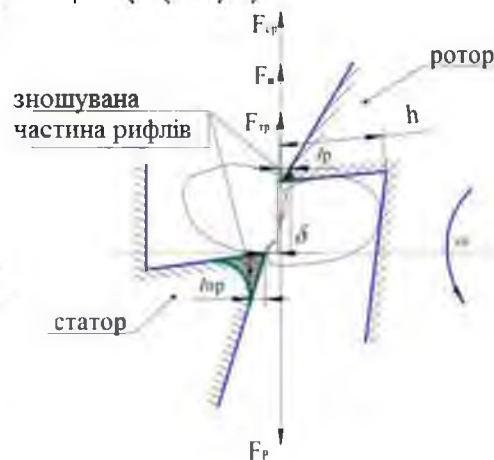


Рис. 2.4. Схема зрізу зернівки робочими органами дробарки та зони крайок рифлів, схильних до найбільшого зносу

Геометричні параметри робочих органів поряд із частотою обертання ротора, робочим зазором та іншими параметрами характеризують ефективність роботи роторної дробарки. Теоретично обґрунтовано та експериментально стверджується, що прямокутний паз не дозволяє

ефективно утримати зернівку в ньому до її зрізу, виходячи з цього, найбільш перспективною нарізкою рифлів буде трикутна, тобто кінець попереднього паза буде початком наступного.

Для забезпечення надійного та якісного процесу подрібнення зернового матеріалу рифлі статора повинні бути виконані ідентично рифлям на роторі за геометричними параметрами і мати достатню міцність для зберігання створеної геометрії у процесі експлуатації. Інакше вони не повинні призводити до порушення схеми взаємодії.

При розгляді робочих поверхонь нижчих ієрархічних елементів схеми можна сказати, що пази ротора виконують функцію транспортування зернового матеріалу в зону руйнування, та забезпечують необхідну умову для захоплення зернового матеріалу.

Найбільші навантаження при подрібненні вихідного продукту на собі сприймає протиріз і відповідно його знос відбувається інтенсивніше.

При цьому зношування його робочої кромки (рифлі) додатково збільшує робочий зазор, знижує ефективність руйнування з допомогою її затуплення. На рис. 2.5 видно, що загострення, що утворюється, здійснюється за рахунок рифлів роторної дробарки, що мають дві нерівних бічних граней вістря – вузької та широкої. Де кут різання  $\gamma_f$  становить  $90^\circ$ . Він утворений кутом вістря  $\beta$ , кутом нахилу нижньої грані паза  $\beta_1$  та кутом нахилу верхньої грані паза  $\beta_2$ . Їх значення визначається індивідуально у кожній конструкції подрібнювача.

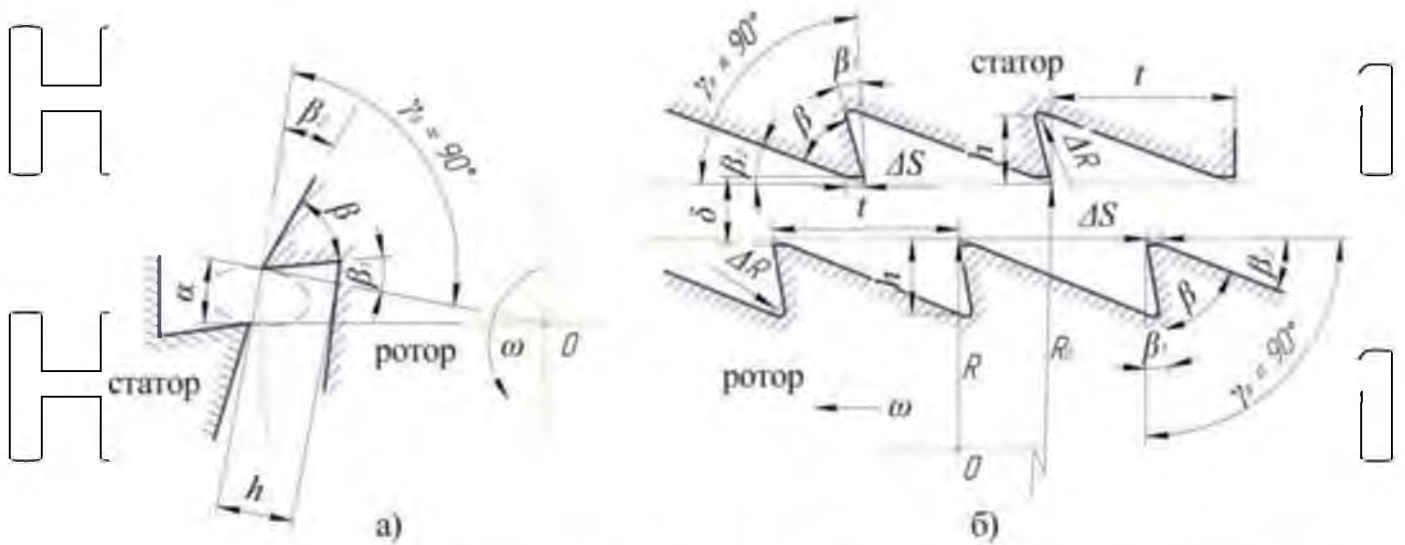


Рис. 2.5. Геометрія рифлів ротора та статора: а) поперечний вигляд, де  $\alpha$  - кут заклинювання вернівки перед зрізом; б) розгорнутий вигляд

Геометричні параметри рифлів визначаються кроком  $t$  між сусідніми вершинами рифлів та його висотою  $h$ . Менш контрольовані та не задані правилами величини, такі як майданчик  $\Delta S$  та радіус закруглення  $\Delta R$  рифлів, зазвичай не враховують.

Скористаємося, розрахованими у роботі значеннями  $t$  та  $h$ . Наприклад, при подрібненні пшениці, що відповідає середньому значенню модуля помелу ( $M = 1.2$ ) (1.8 мм) при мінімальному робочому зазорі ( $\delta \approx 0$  мм) між ржучими кромками рифлів та кутами  $\beta_1 = 15^\circ$ ,  $\beta_2 = 15^\circ$  та  $\beta = 60^\circ$ . За результати його розрахунків  $t = 7.6$  мм,  $h = 1.2$  мм. Діаметр статора приймемо по аналогії з  $D = 0,1$  м для пшениці, ячменю, вівса та кукурудзи.

Також, використовуючи представлені в роботі етапи руху зернівок порожнини роторної дробарки, було визначено, що найбільший інтерес в рамках даного дослідження має подальший теоретичний опис взаємодії рифлених поверхонь ротора, статора та зернового вихідного продукту, які представлені на рисунках 2.6 г та ін.

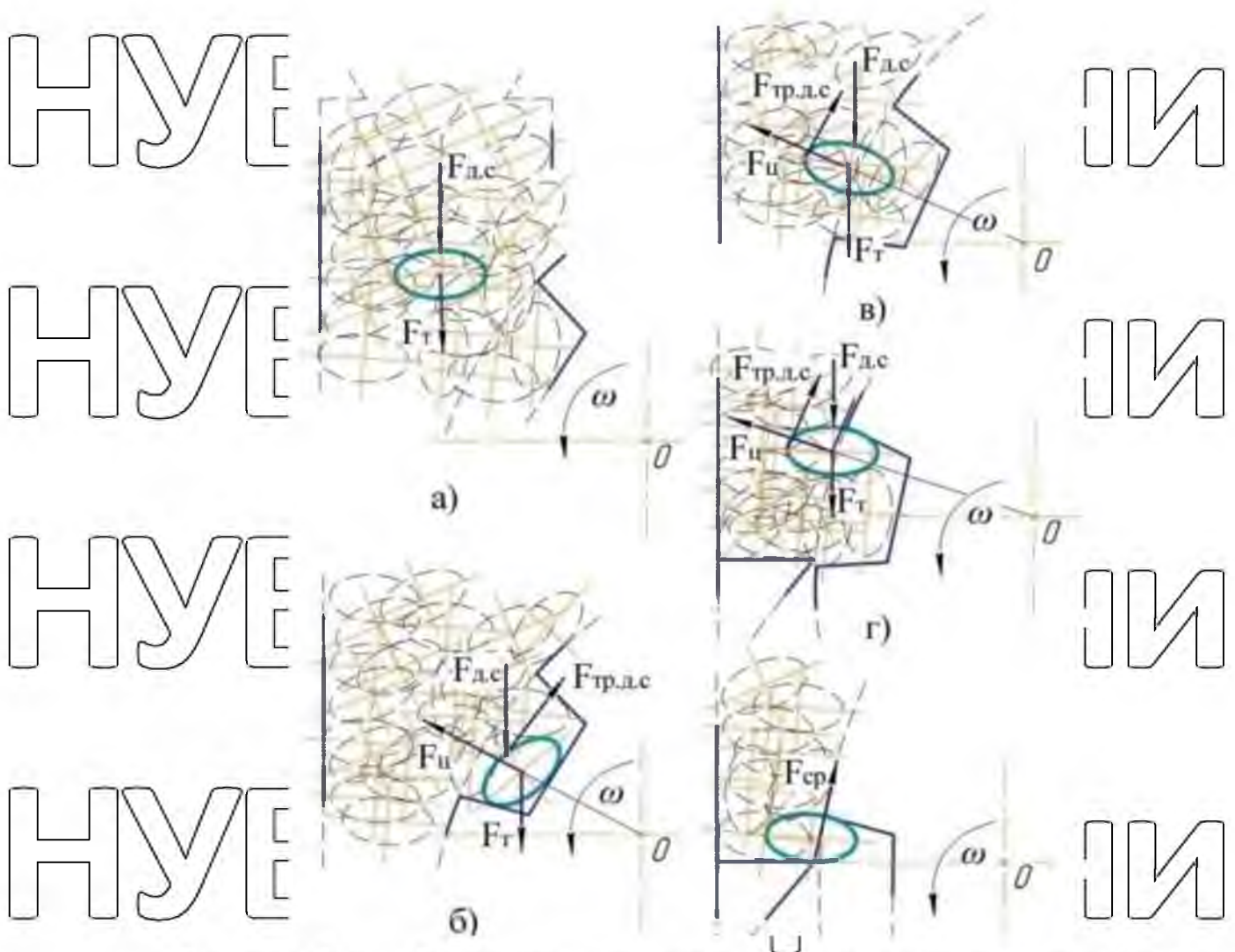


Рисунок 2.6 - Схема сил, що впливають на зерновий матеріал в дробарці: а) в масі зерна, б), в), г) - рух по дробильній камері, д) - у момент фіксації до з'їзу

У подрібнювальній порожнині працюють численні сили тертя, як зерновок про зернівки, а також шару матеріалу про робочі органи роторної дробарки.

Вони залежать від властивостей зернових частинок, щільності їх структури (наявність мікротріщин) та виду руйнівних зусиль (кут атаки, загострення рифлі, швидкість дії і т.д.).

## 2.4 Модель підвищення ресурсу та прогнозування напрацювання до відмови роторної дробарки

Для аналізу роботи робочих поверхонь роторної дробарки необхідно побудувати модель формування відмов, яка відобразить процеси, що впливають на вихідні параметри.

На рис. 2.8 представлена модель формування ресурсу роторної дробарки. Раптова відмова обумовлена попаданням в зону контакту рифлів сторонніх твердих елементів. Підвищення довговічності роторної дробарки буде обумовлено підвищенням зносостійкості робочих поверхонь ротора і протирізу. Одним із ефективних способів підвищення ресурсу є застосування різних конструкційних матеріалів, що мають різні міцнісні та зносостійкі властивості, для виготовлення ротора та протирізу.

Як очевидно з таблиці 2.1 різні марки стали ставляться до відповідним груп міцності залежно від межі плинності. Metalli, що входять до звичайну групу міцності, мають межу плинності в 2 рази менше порівняно з високою групою міцності. При виготовленні машин з матеріалів високої групи міцності дозволяє підвищити довговічність та надійність, але при цьому збільшується вартість їх виготовлення за рахунок високої вартості матеріалу, а також використання та підбору необхідного обладнання та інструменту.



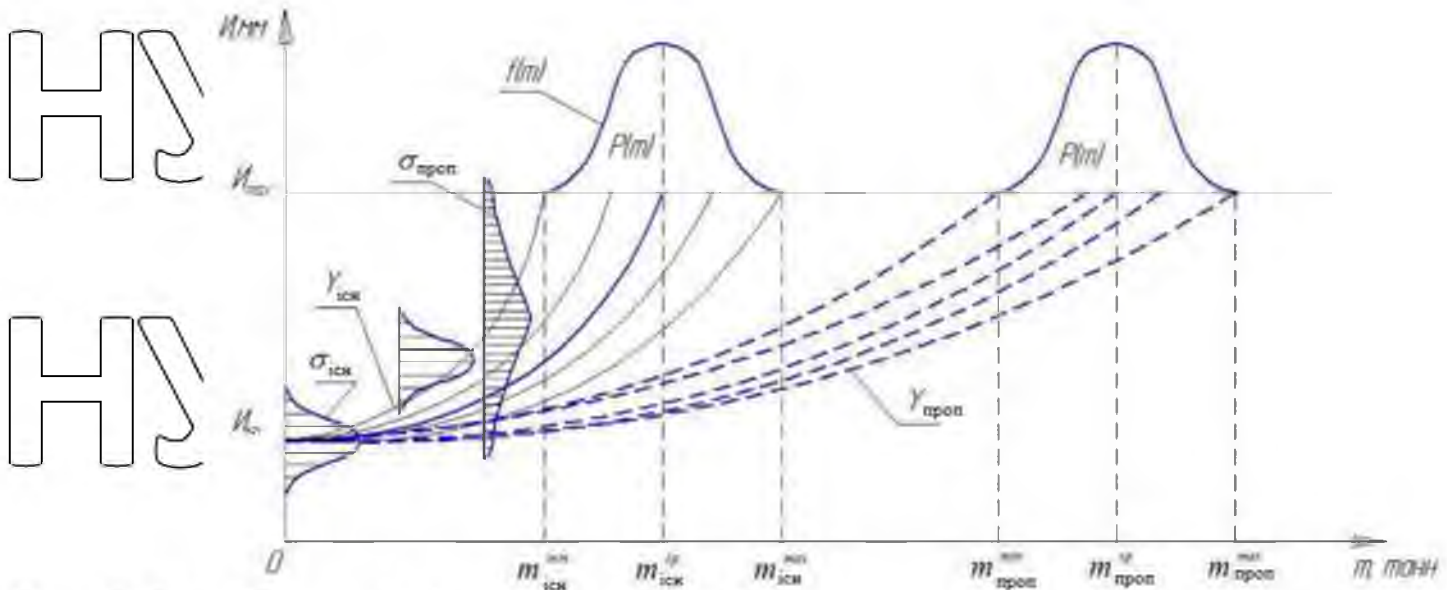


Рис. 2.7 – Модель формування ресурсу кормодробарки:  $H_{г}$  – гранично допустиме зношування рифл;  $\gamma_{иск}$  і  $\gamma_{проп}$  – існуюча та пропонувана швидкість зношування, відповідно;  $\sigma_{ср}$  і  $\sigma_{г}$  – середнє квадратичне відхилення існуючої та пропонованої швидкості зношування, відповідно.

Таблиця 2.1

Групи міцності сталі

Група міцності	Марка сталі	Межа плинності, МПа	Тимчасове опір, МПа	Відносне подовження
Звичайна	ВСт3кп, ВСт3пс, ВСт3Гпс, ВСт3сп	185-285	365-390	25-27
Підвищена	ВСтГпс, 09Г2, 09Г2С, 14Г2, 10Г2С1, 15ХСНД, 14Г2АФ, 10ХСНД, 10ХНДП	295-390	430-540	19-20
Висока	16Г2АФ, 18Г2АФпс, 15Г2СФ т. о., 12Г2СМФ т. о., 12ГН2МФА т. о.	Понад 440	Понад 590	14-20

При використанні будь-якого із запропонованих варіантів, процес зношування робочих поверхонь теоретично можна розглянути в такий спосіб

Позначивши через  $I(m)$  величину зношування робочої поверхні, яка відповідають кількості подрібненого зернового матеріалу  $m$ . Зміни  $S(m)$  у часі або реалізації, обумовлені навантаженням, швидкістю та ходом фізичних процесів під час тертя. Швидкість зношування  $Y$  матеріалів протирізу є змінюється величини.

Характер та вид зносу  $I(m)$  залежить від стартових умов експлуатації, наприклад від технології, та якості виготовлення робочої поверхні.

Припустимо, що зміни  $I(m)$  носить лінійний характер

$$I(m) = I(m = 0) + Y \quad (2.2)$$

Тоді величини  $I(m=0)$  та  $Y$  є випадковими, а час безвідмовної роботи до досягнення граничного зносу  $I_{max}$  дорівнює

$$I(m) = \frac{I_{max} - I(m=0)}{Y} \quad (2.3)$$

Імовірність того, що за напрацювання  $m$  роторної дробарки, реалізація зносу не перетне кордон  $I_{max}$  визначається рівнянням  $\Phi(m)$  – функція

Лапласа (рисунок 2.8):

$$\Phi(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{m^2}{2}\right) \cdot dt \quad (2.4)$$

Функція Лапласа табульована та дозволяє розрахувати ймовірність безвідмовної роботи.

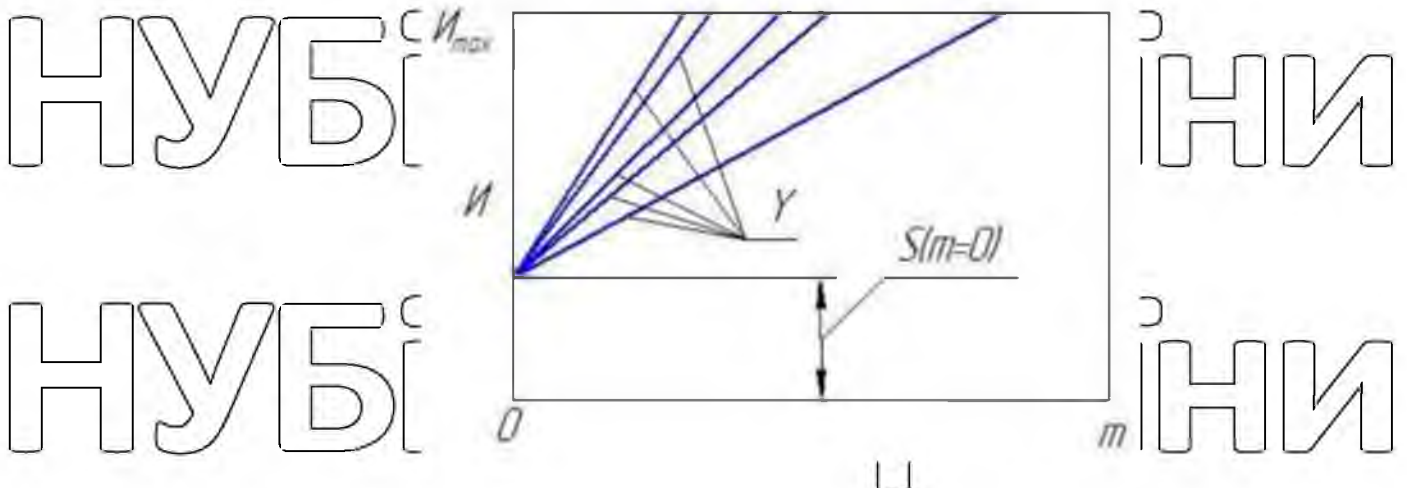


Рис. 2.8. Графік залежності лінійного зносу від маси подрібненого матеріалу

Раніше було розглянуто ще один напрямок для підвищення довговічності роторної дробарки, це нанесення зносостійких покриттів робочі поверхні рифлів ротора та протирізу. Формування ресурсу буде визначатися в такий спосіб.

Для підвищення надійності широко використовується та застосовується ряд технологій, заснованих на нанесенні зносостійких покриттів на робітничі поверхні деталей. Розглянемо вище представлену модель щодо застосування зносостійких покриттів. У цьому випадку швидкість зношування зносостійкого покриття  $\alpha$  буде випадковою величиною із щільністю розподілу  $f(\alpha)$ , інші параметри моделі не змінюються. З урахуванням зносостійкого покриття рисунку 2.9 представлена модель формування параметричної відмови.

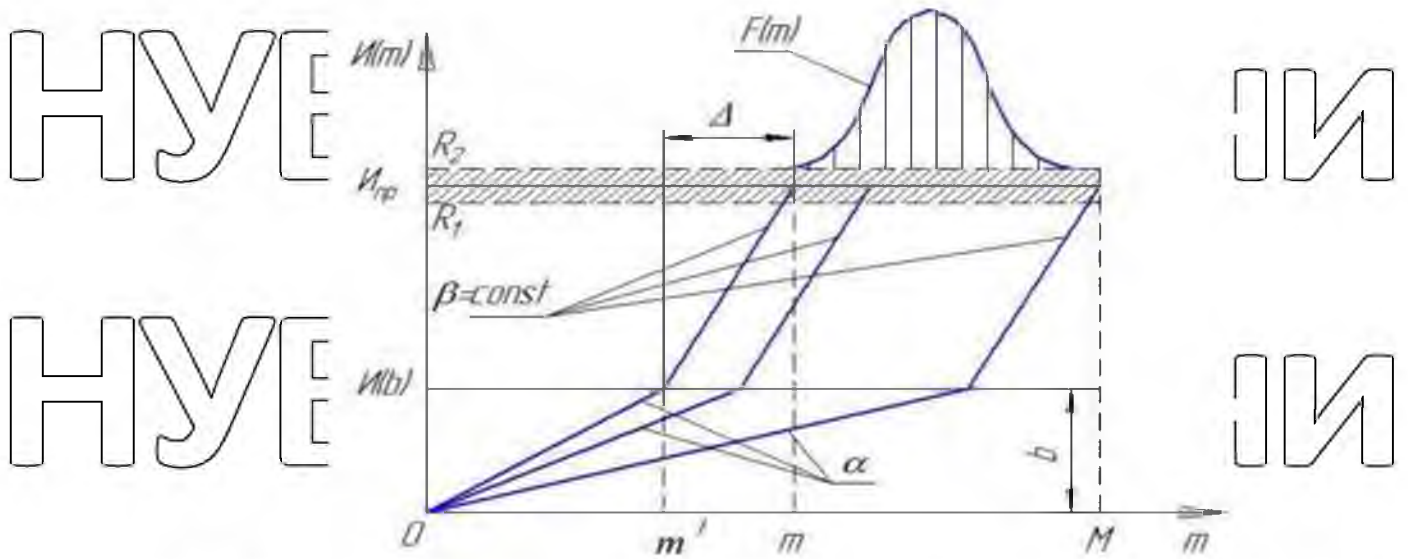


Рис. 2.9. Модель формування ресурсу деталей із зносостійким покриттям.

Обмежуючи область зміни параметра  $S(m)$  діапазоном значень  $[R_1, R_2]$  була отримана залежність ймовірності  $F(m)$  виходу цього параметра, що змінюється у часі, при товщині покриття  $b$ , у наступному вигляді

$$F(m) = \frac{b}{bm} \cdot \int_{R_1}^{R_2} f_1\left(\frac{l}{m}\right) \cdot bl, \quad (2.5)$$

де  $f_1(l/m)$  – щільність розподілу зносу протирізу, що припадає на масу подрібненого матеріалу.

Якщо швидкість зношування постійна будемо мати

$$f_1\left(\frac{l}{m}\right) = f\left(\frac{l}{m}\right) \cdot 1/m. \quad (2.6)$$

Щільність розподілу ймовірності повного зношування покриття дорівнює:

$$F(m) = -\frac{b}{bm} \int_0^a f\left(\frac{l}{m}\right) \cdot dm = -\frac{b}{bm} \int_0^a f(\alpha) \cdot d\alpha = \frac{a}{(m)^2} \cdot \Phi\left(\frac{a}{m}\right). \quad (2.7)$$

Якщо робочі поверхні деталей дробарки виконані з однорідних матеріалів, то використовується вираз (2.5). Для деталей, що мають покриття,

або виконаних багатшаровими, це рівняння необхідне визначення повного зносу елемента, що контактує з середовищем, що зношується.

Приймаючи для основного матеріалу швидкість зношування розглядаємо у разі величиною постійної, ймовірність відмови із щільністю розподілу при поступовій зносовій відмові  $F(m)$ , буде відповідати ймовірності відмови із щільністю  $F(m')$ , яка враховує зсув тимчасового аргументу (кількості подрібненого матеріалу).

$$m' = m - \Delta, \quad (2.8)$$

$$\text{де } \Delta = \frac{(I_{\max} - b)}{\beta};$$

$I_{\max} [I(m)]$  - граничний знос;

$b$  - товщина зносостійкого покриття;

$\beta$  - швидкість зносу основного матеріалу.

Звідси отримаємо:

$$F(m) = -\frac{b}{bm} \int_0^{m-\Delta} f(\alpha) \cdot m\alpha = \frac{a}{(m-\Delta)^2} \cdot f\left(\frac{a}{m-\Delta}\right). \quad (2.9)$$

А ймовірність безвідмовної роботи для виконання заданого обсягу подрібненої маси, визначиться як:

$$P(M) = 1 - \int_0^M b(m) \cdot bm. \quad (2.10)$$

При нормальному законі розподілу швидкості зношування покриття  $f(a)$  ймовірність безвідмовної роботи визначається:

$$P(M) = 0.5 + \Phi\left(\frac{m - \Delta - m_a}{\sigma_a}\right), \quad (2.11)$$

де  $m_a$  – математичне очікування швидкості зношування.

У реальних виробничих умовах довговічність роботи роторної дробарки залежить від великої кількості факторів, які умовно розділені на кілька груп. Група параметрів А враховує конструктивні та геометричні параметри протирізу і ротора дробарки. До параметрів групи В відносяться технологічні вимоги до готової продукції та основні режимні параметри дробарки. Зношуюча здатність та основні фізико-механічні властивості подрібнюваних матеріалів віднесені до групи С.

Щоб визначити найбільш значущі та такі, що впливають на критерій оптимізації фактори, представимо основні параметри кожної групи для їх кількісної оцінки у вигляді узагальненої функції:

$$K = \frac{f(A, B, C)}{A}, \quad (2.12)$$

де  $B_M$  – вид та властивості матеріалу ротора та статора;

$\tau$  – критичне напруження при руйнуванні;

$W$  – вологість подрібнюваного матеріалу;

$k_{тр}$  – коефіцієнт тертя;

$D_e$  – еквівалентний діаметр зернівки, що дорівнює  $D_q$ ;

$C_{абр}$  – концентрація абразиву в матеріалі, що подрібнюється.

На підставі вивчення та проведеного вище теоретичного аналізу визначили фактори, що мають найбільший вплив на довговічність роботи роторної дробарки. Серед конструктивних параметрів (А) найбільш значущим виявився  $B_m$  та швидкість їх зношування  $Y$ . Серед параметрів групи (Б) виділили кут місце розташування протирізу  $\gamma$  та лінійну швидкість ротора  $v_p$ , із групи С найбільше впливає зношуюча здатність зернового матеріалу, що визначається концентрацією  $C_{абр}$  вільних мінеральних домішок та абразивних частинок, закріплених на зернівках застосовуваного зернофуражу.

Таким чином, у загальному вигляді ресурс роторної дробарки  $T$  при подрібненні зернових виглядає як функція від наступних факторів:

$$T = f(C_{абр}, \gamma, v_p, B_m, Y). \quad (2.13)$$

Ця залежність представляє узагальнений функціонал ресурсу модернізованої роторної дробарки за кількістю подрібненого зернового матеріалу до досягнення граничного зносу протирізів

## 2.5 Висновки

1. Представляючи роторну дробарку як складну технічну систему, вихідними елементами якої є робочі поверхні протирізу і ротора.
2. Встановлено впливом протирізу і ротора на підвищення довговічності.
2. Розроблена конструктивно-технологічна схема роторної кормодробарки, дає можливість покращити якість подрібнення та продуктивність.
3. Отримано теоретичні залежності продуктивності та енергоємності процесу подрібнення зернових матеріалів у роторній кормодробарці, в яких

враховується знос робочих поверхонь протирізу та ротора.

4. Розроблено моделі формування ресурсу роторної дробарки.

5. Теоретично визначено основні параметри та режими роботи удосконаленої роторної кормодробарки та отримана залежність її ресурсу по при досягненні граничного зносу протирізів.

6. Запропоновано техніко-економічного залежність критерію процесу подрібнення зернових матеріалів до граничного зносу роторної дробарки.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України



### 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Мета та програма експериментальних досліджень

В результаті виконаних теоретичних досліджень встановлено, що, незважаючи на переваги роторної дробарки, якість її роботи залежить від величини робочого зазору між ротором і статором дробарки, який визначається інтенсивністю зношування та ресурсом робочих поверхонь рифлів ротора та протирізу.

Метою експериментального дослідження є організація надійного та якісного процесу подрібнення в роторній дробарці при раціональному розташування протирізу на статорі та додатковому підвищенні його зносостійкості з найкращими показниками продуктивності.

Для цього необхідно провести ряд експериментів, пов'язаних з випробуванням зернових матеріалів, визначенням ресурсу протирізу, виготовленого з різних конструкційних матеріалів та визначенням оптимальних режимів напрацювання до граничного зносу робочих поверхонь ході багатофакторного експериментального дослідження.

Експериментальні дослідження проводились за програмою, яка включала:

- дослідження макро- та мікротравмованості зерновок, наявності мінеральних домішок у зерні при уточненні фізико-механічних властивостей зернових матеріалів, що подрібнюються;

- експериментальні дослідження інтенсивності зносу та довговічності деталей роторної дробарки;

- аналіз експериментальних даних та їх порівняння з теоретичними даними;

- техніко-економічна оцінка (порівняння запропонованих варіантів у

різних виробничих умов).

На рисунку 3.1 зображено програму досліджень.

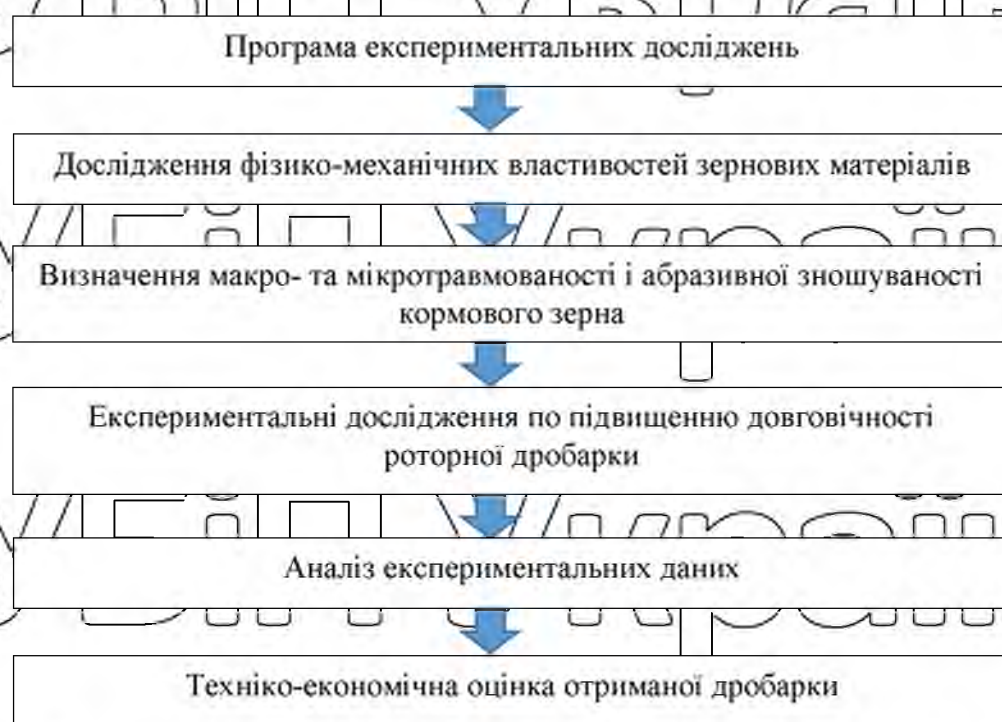


Рис. 3.1 – Блок-схема експериментальних досліджень

Таким чином, першорядним завданням даного дослідження є підвищення довговічності робочих поверхонь ротора та протирізу роторних дробарок кормового зерна найбільш оптимальним способом. За результатами аналізу експериментального дослідження визначаються оптимальна геометрія порожнини роторної дробарки та режими її роботи.

Досліди проводилися в лабораторних та виробничих умовах з застосуванням загальноприйнятих та приватних методик на відомому та спеціально розробленому обладнанні відповідно до ГОСТу та загальновизнаних методами проведення багатofакторних експериментів. Обробка досвідчених даних проводилася на ЕОМ в Microsoft Excel, ZetLab, JMicrovision та ін. розробленим у їхньому середовищі програмам математичного аналізу, розрахунку та статистики.

### 3.2. Методика експериментальних досліджень щодо підвищення довговічності роторної дробарки

Експерименти з подрібнення всіх видів зернових матеріалів проводилися за допомогою горизонтальної роторної кормодробарки. Роторна кормодробарка дає можливість виконувати:

- зміну кута місце розташування протирізу його переміщенням вздовж утворює ротора та фіксації у 3 положеннях на статорі;

- зміну зазору між рифлями ротора і робочою кромкою (рифлів) протиріза прокладками між статором та протирізом;

- заміну протирізу (зношеного на новий, або міцнішого на менше міцний протирізу);

- заміну поверхні ротора на аналогічну у разі зносу або пошкодження вихідної;

- спостереження через виконану з оргекла прозору стінку корпусу за процесами дроблення та переміщенням вихідного та подрібненого зернового матеріалу у робочій камері роторної кормодробарки.

З'ясування раціональних параметрів та режимів роботи для досягнення найбільшої довговічності робочих органів здійснювалося шляхом варіювання положення протирізу на статорі та шляхом виконання протирізу з різних конструкційних матеріалів.

Для проведення експериментів щодо визначення напрацювання до граничного зносу протирізу було виготовлено 3 вихідних елементи довжиною 0,06 м.

Кожен з трьох елементів складався з 4 протирізів по 0,015 м, одягнених на основу у вигляді стрижня, які виготовлялися з різних видів сталі із застосуванням зміцнення або загартування. Протирізи, як показано на рисунку 3.2, були промарковані на тильній (номер експериментальної групи

від 1 до 3) та бічній стороні (номер виду технології виготовлення від 1 до 4).

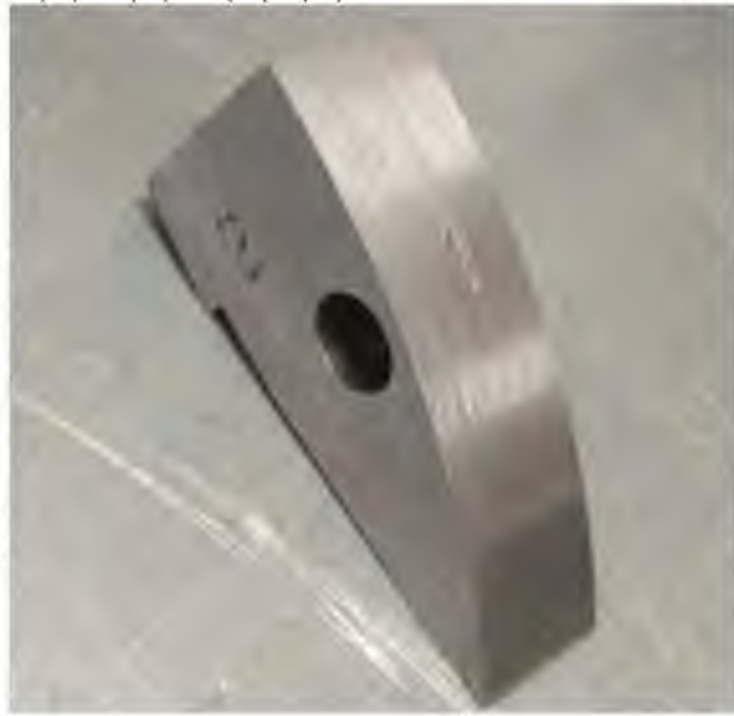


Рис. 3.2. Маркування робочого органу роторної кормодробарки -

протиризу

Технології виготовлення протиризу поділяються на варіант No1 - Ст3 (HRC 10...12), варіант No2 - Ст45 (HRC 15...17), варіант No3 - Ст45 загартована (HRC 45...50), варіант No4 - Ст45 загартована і має тонкоплівкове покриття ФПУ (фінішне плазмове зміцнення), мікротвердість 13 ГПа та показані на рисунку 3.3.



а) б) в) г)

Рис. 3.3. Виготовлені за різною технологією протиризи: а) - Ст3; б) -

Ст45; в) - Ст45 із загартуванням; г) - Ст45 із загартуванням та ФНУ

Змінні поверхні ротора дослідного зразка дробарки виконувались з Ст45 загартована, твердістю HRC 45...50 їх діаметр був  $D=0,1$  м, а довжина  $l=0,06$  м.

Геометричні параметри рифлів ротора, на підставі досліджень були прийняті такими:

- для подрібнення пшениці кількість пазів та рифлів на роторі прийнято 38 штук, з кроком  $t=8$  і висотою рифлі  $h=1,2$ ;

- для подрібнення ячменю кількість пазів та рифлів на роторі прийнято 32 штук, з кроком  $t=10$  і висотою рифлі  $h=1,5$ ;

- для подрібнення вівса кількість пазів та рифлів на роторі прийнято 34, з кроком  $t=13$  і висоті рифлі  $h=1,4$ ;

- для подрібнення кукурудзи кількість пазів та рифлів на роторі прийнято 20 штук, з кроком  $t=15,5$  і висотою рифлі  $h=2,4$ ;

- для подрібнення кормосуміші з кількох зернових культур (Універсальний ротор) кількість пазів і рифлів на роторі прийнято 28 штук, з кроком  $t=11,5$  і висоті рифлі  $h=1,6$ .

Для всіх варіантів знімних поверхонь ротора кут вістря прийнятий  $60^\circ$ , а кут нахилу стінки паза  $\beta_1=15^\circ$ .

Схема експериментальної роторної дробарки представлена рисунку 3.4.

НУБ

НИ

НУБ

НИ

НУБ

НИ

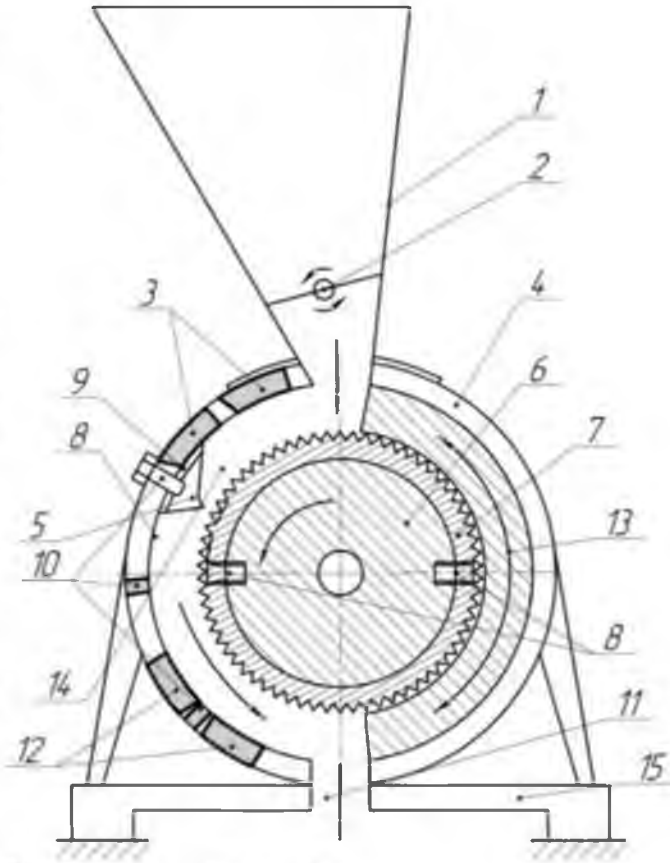


Рис. 3.4. Схема дослідного зразка роторної дробарки: 1 – приймальний бункер, 2 – заслінка, 3 – заглушки в дод. місцях завантажувального вікна, 4 – статор, 5 – зуб, 6 – ротор, 7 – знімна поверхня ротора, 8 – кріплення поверхні ротора, 9 – прокладка для варіювання зазору, 10 – кріплення та заглушки в дод. місцях розташування протирізу, 11 – розвантажувальний бункер, 12 – заглушки в дод. місцях розвантаження, 13 – обмежувальна губа, 14 – дробильна камера, 15 – рама

Схема ключових елементів експериментальної установки представлена на рисунку 3.5.

НУБІП України

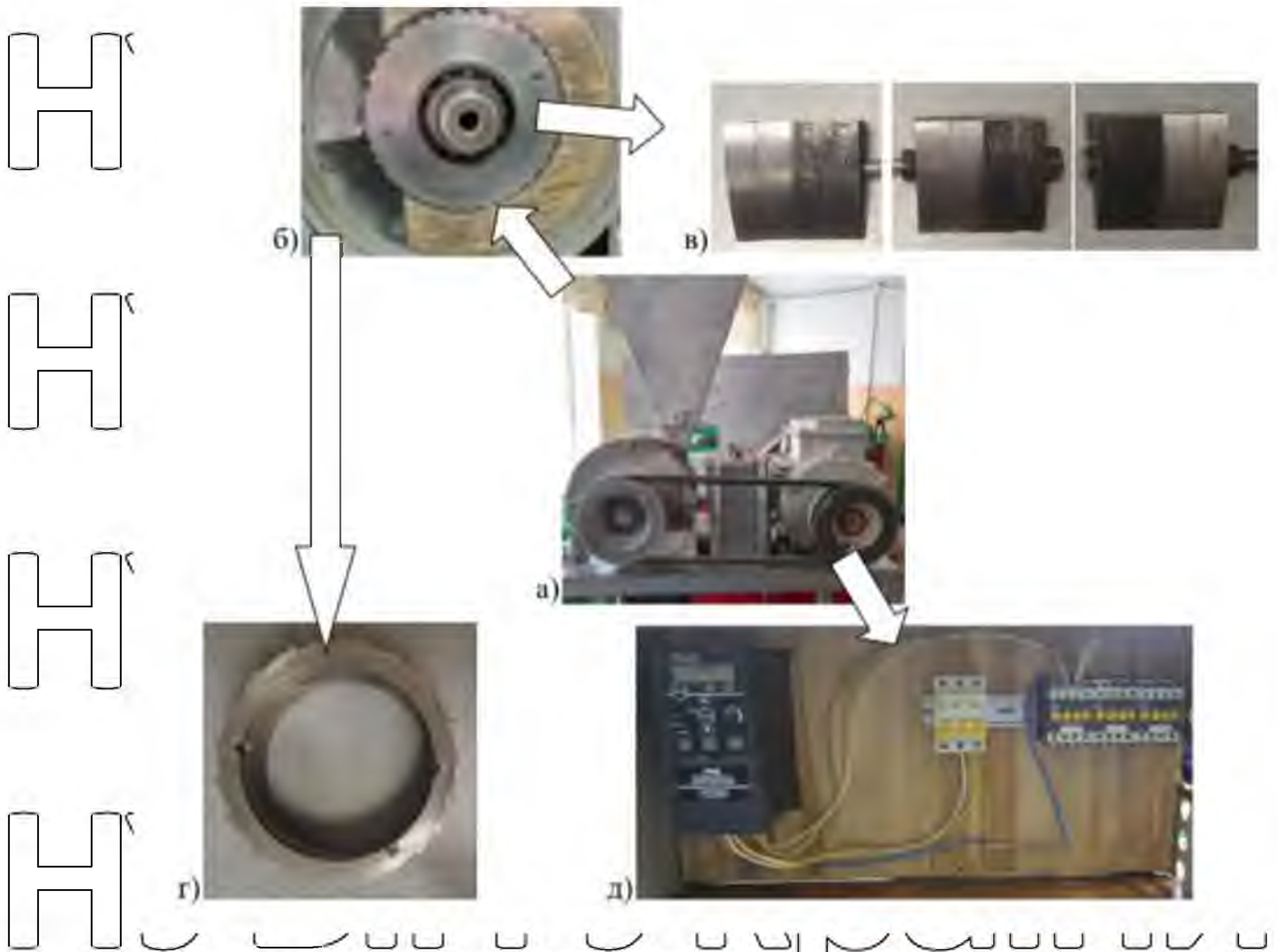


Рис. 3.5. Загальний вигляд: а - експериментальної роторної дробарки, б - дробильної камери, в - експериментальних зразків протирізу, г - схеми приєднання ПДР.

Експериментальна дробарка змонтована на загальній рамі установки. Її привід здійснювався електродвигуном АІР ГОСТ 2479, максимальна потужність якого дорівнює 1,5 кВт, через ремінну передачу. Потужність електродвигуна відповідає теоретично необхідній для подрібнення  $P = 460$  Вт, урахуванням ККД та результатів експериментів з визначення критичного навантаження  $\tau$  зерна на зріз.

## 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1. Оцінки надійності процесу подрібнення роторної дробарки з обліком зносу протирізу

З урахуванням даних про залежність величини зазору між робітниками поверх ротора і протирізу роторної дробарки виконували статистичну обробку результатів за якістю подрібнення, отриманих зразків під час проведення експериментів (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1  
Результати експерименту щодо визначення величини зносу протирізу роторної дробарки

Інтервал	0,855- 0,946	0,946- 1,037	1,037- 1,128	1,128- 1,219	1,219- 1,31	1,31- 1,401	1,401- 1,492
Середина інтервалу	0,901	0,992	1,083	1,174	1,265	1,356	1,447
Частота	2	2	4	9	11	12	10
Досвідчена ймовірність	0,04	0,04	0,08	0,18	0,22	0,24	0,2
$\Sigma P_i$	0,04	0,08	0,16	0,34	0,56	0,8	1
$f(u)$	0,006	0,034	0,097	0,1824	0,228	0,1824	0,097
$F(u)$	0,01	0,05	0,16	0,37	0,63	0,83	0,95
$P_u=1-F(u)$	0,99	0,95	0,84	0,63	0,37	0,17	0,05

За отриманими відповідними експериментальними даними побудовано гістограму розподілу та полігон зносу протирізу дробарки в залежності від частоти відмов. Використовуючи відомі методики встановлені теоретичні закони розподілу диференціальної та інтегральної функції, а також залежність надійності процесу подрібнення від зазору між робочими поверхнями ротора та протирізу роторної дробарки (рис. 4.1 - 4.2).



Обробка даних дозволила встановити, що надійність процесу подрібнення підпорядковується нормальному закону розподілу. Інтегральна функція  $F(I_{ki})$ , що характеризує ймовірність відмови системи, представлена наступним виразом:

$$F(I_{ki}) = F_0(7,14 I_{ki} - 9,04) \quad (4.1)$$

За виразом (4.5) отримано залежність надійності процесу подрібнення від зносу висоти зуба (рифлі) протирізу, що представляє вірогідність безвідмовної роботи роторної дробарки (рисунок 4.6).

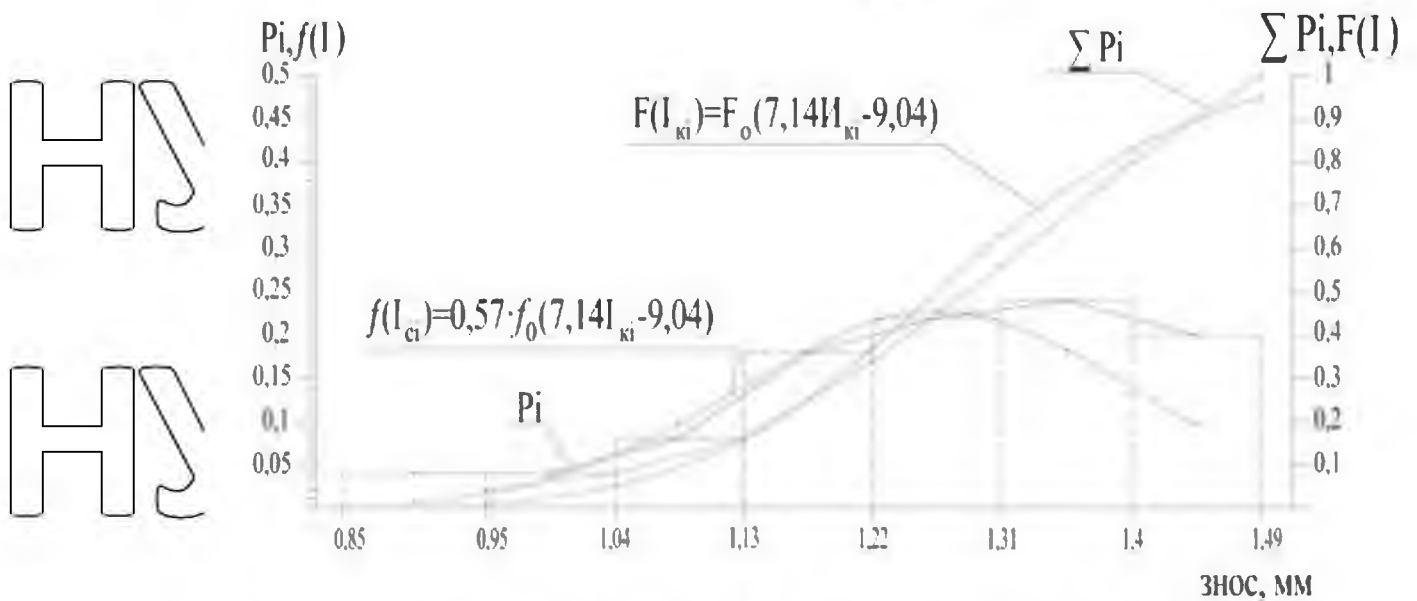


Рис. 4.1 Експериментальні та теоретичні залежності зміни якості подрібнення від зносу зуба протирізу

Аналіз отриманих результатів (рис. 4.2) експерименту показав, що знос різальної кромки протирізу при напрацюванні до його граничного значення (ресурсу), середньому становив  $I_r = 1,3 \dots 1,5$  мм. Представлені дані відповідають значенням зносу, які визначені в реальних умовах експлуатації. Під час оцінки ефективності процесу помелу за наведеною методологією, показник надійності становить  $P(I) = 10 \dots 25\%$ , а показник фактичної результативності вкрай —  $F_{pr} = 0,1 \dots 0,3$ .

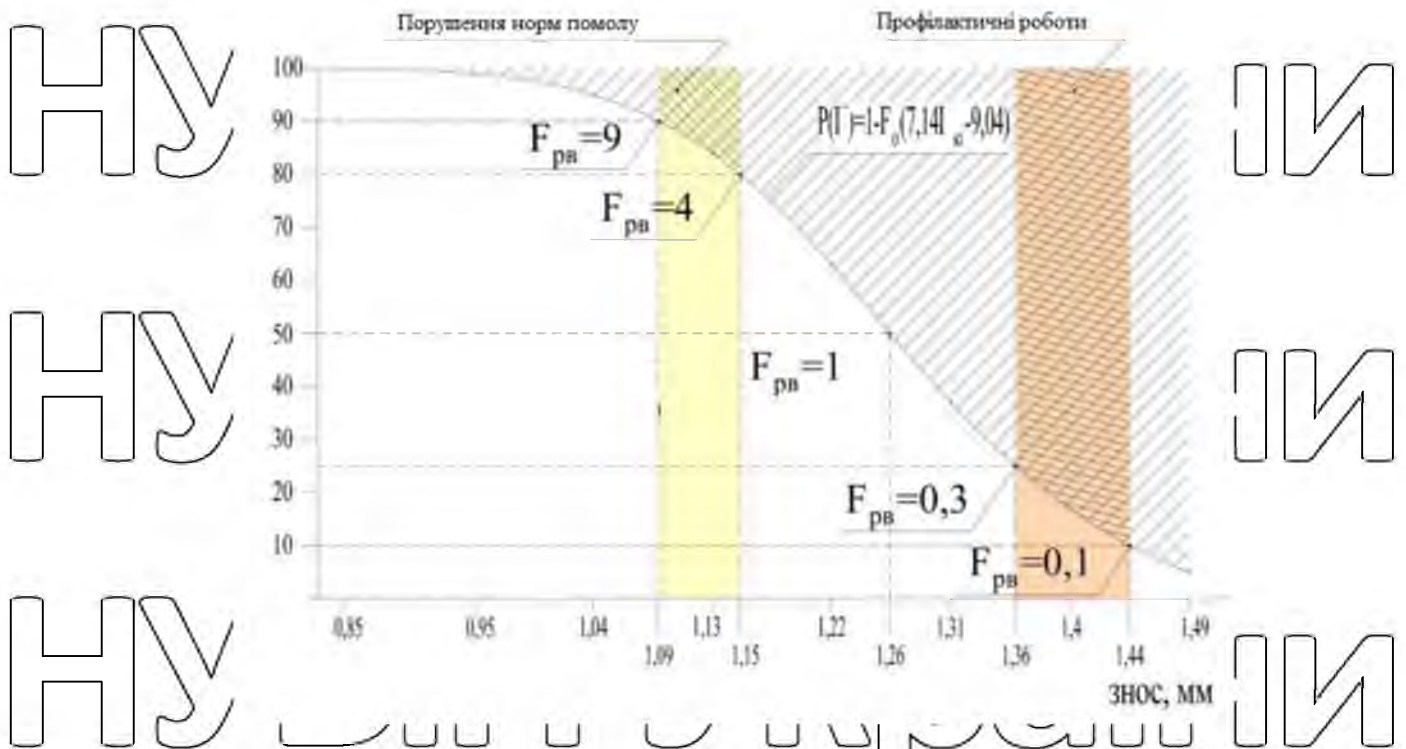


Рис. 4.2 Залежність ймовірності безвідмовної роботи процесу подрібнення зернових матеріалів від зносу рифи протирізу

Зазначені залежності використовуються отримання величини зносу ріжучої крайки (рифи протирізу, за рівнем надійності зазначеного процесу.

Встановлено, що для надійності  $P(t) = 80 \dots 90\%$  максимально допустимий зазор не повинен перевищувати меж  $1,09 \dots 1,15$  мм у заданих умовах експлуатації.

Отримані залежності забезпечення гарантованого процесу подрібнення від величини допуску на знос рифи протирізу, що формує зазор роторної кормодробарки між робочими поверхнями ротора та рифами протирізу.

Було встановлено, що при підвищенні зазору понад  $0,9$  мм/т відбувається відмова від втрати працездатності роторної дробарки, що полягають у відхиленні норми помелу. Виходячи із зазначеного, задаючись

надійністю процесу помелу в  $90\%$  і для запобігання порушенням в роботі кормодробарки, вноситься пропозиція проводити заміну або регулювальні роботи протирізу при зазорі в  $1,09$  мм.

#### 4.2 Прогнозування довговічності робочих органів роторної кормодробарки

При проведенні експериментальних досліджень властивостей протирізу після досягнення граничного зносу 1,5 мм кожен зазначений робочий орган відновлювався до форми шляхом фрезерувальних робіт, або іншим способом для запобігання зазначеного зносу та відновлення форми протирізу, що відповідає орієнтовно трьом періодам експлуатації.

В умовах використання багатofакторного експерименту встановлено інтенсивності зношування різних варіантів протирізу в умовах взаємодії з пшеницею при наявній концентрації мінеральних домішок рівних 0,3-0,5%. Це дало можливість встановити форму зношування зуба протирізу в залежності від напрацювання.

Нами було використано 4 варіанти для визначення залежності величини зазору між робочими поверхнями ротора та протирізу роторної дробарки від напрацювання:

- перший варіант - зі сталі Ст 3;
- другий варіант - зі сталі 45;
- третій варіант виготовлений зі сталі 45 з гартуванням;
- четвертий варіант зі сталі 45 і зміщений за допомогою ФПУ.

Кожний комплект містить 4 протирізи довжиною кожного 0,015 м, що з'єднані на одній осі. Стан комплектів контролювався через кожні 10 кг подрібненого зерна по всій ширині. Гострота крайки леза всіх комплектів протирізів контролювався при змінній концентрації абразиву. Для кожного з чотирьох запропонованих варіантів при максимальній висоті зуба протирізу 10 мм при досягненні граничного зносу та закругленні кінчика зуба протирізу рівного 1,5 мм передбачене два відновлення поверхні, що перейшла до граничного стану вихідної геометричної форми зуба.

Для 1-го варіанта швидкості зношування до досягнення профілактичних робіт буде дорівнювати :

$$\delta_1^1 = 0,389 \cdot B_1^1, \quad (4.2)$$

Після зрізання та вирівнювання зношеної поверхні протирізу, швидкість зношування можна знайти з наступної залежності:

$$\delta_2^1 = 0,4427(B_2^1 - B_1^1), \quad (4.3)$$

де  $B_2^1$  – об'єм подрібненої фракції після фрезерування та вирівнювання зуба протирізу виготовленого зі сталі Ст3, т.

Після повторного фрезерування та вирівнювання зуба протирізу швидкість зношування буде дорівнювати:

$$\delta_3^1 = 0,5208(B_3^1 - B_2^1), \quad (4.4)$$

де  $B_3^1$  – об'єм подрібненої фракції після повторного фрезерування для зуба протирізу, виготовленого зі сталі Ст3, т. Із урахуванням зазначеного, швидкість зношування зуба до переходу в граничний знос при проведенні двох профілактичних заходів прийняття для першого варіанта складе (рис.

4.3):

$$\Delta\delta^1 = \delta_1^1 + \delta_2^1 + \delta_3^1, \quad (4.5)$$

НУБІП УКРАЇНИ

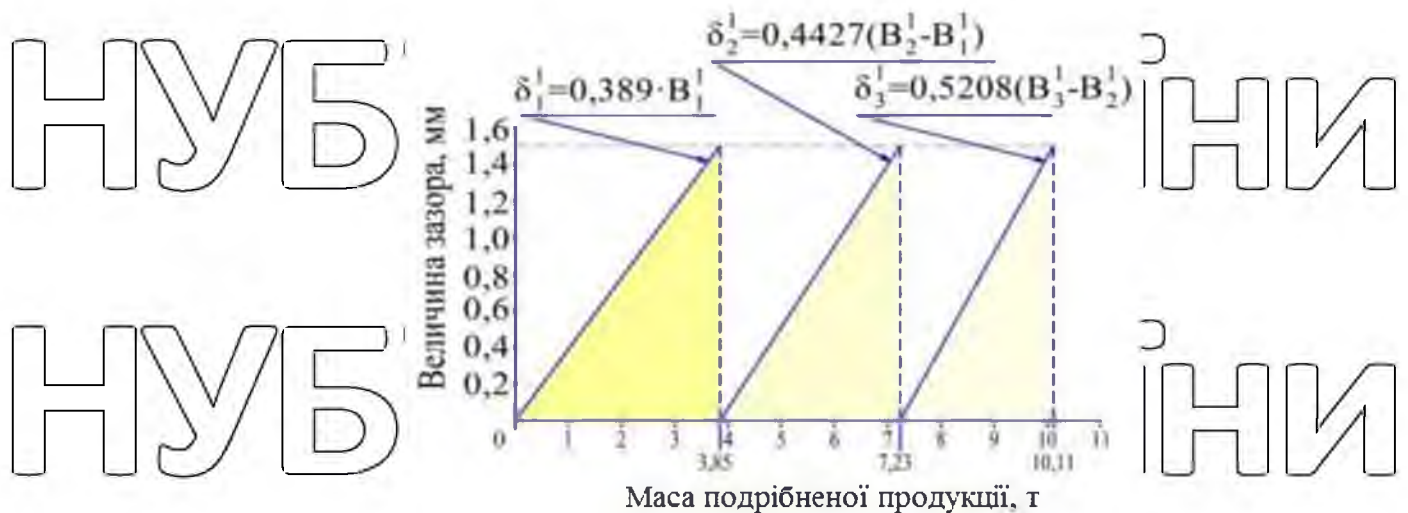


Рис. 4.3 Графічна залежність величини подрібненої фракції зерна пшениці від величини зносу протирізу зі сталі Ст 3

Темп наростання зазору при концентрації абразиву 0,4% всіх ділянках коливається від 0,38 до 0,52 мм/т що при ширині = 0,015 мм визначається інтенсивністю зношування зуба протирізу виготовленого зі сталі Ст3.

Як показують досліді при проведенні першої та другої профілактики відновлення вихідної геометрії зуба на робочій поверхні зуба з'являються дефекти в будові матеріалу, що виникають при роботі дробарки, що підтверджується деяким зниженням твердості по глибині зуба.

Інтенсивність зносу матеріалу збільшується пропорційно резиду значень твердості до 12...15%

Для другого варіанта швидкість зношування складе

$$\delta_1^2 = 0,529 \cdot B_1^2, \quad (4.6)$$

де  $B_1^2$  - об'єм подрібненої фракції роторної дробарки при виготовленні зуба протирізу із сталі 45, т.

Після зрізу і вирівнювання зношеної поверхні, швидкість зношування можна визначити з рівняння

НУБІП України

$$\delta_2^2 = 0,3795(B_2^2 - B_1^2), \quad (4.7)$$

де  $B_2^2$  – обсяг подрібненої фракції після фрезерування та вирівнювання зуба протирізу виготовленого із сталі 45, т.

НУБІП України

Після повторного фрезерування та вирівнювання зуба протирізу швидкість зношування складе (рисунок 4.4):

$$\delta_3^2 = 0,4312(B_3^2 - B_2^2), \quad (4.8)$$

НУБІП України

де  $B_3^2$  – обсяг подрібненої фракції після повторного фрезерування для зуба протирізу виготовленого із сталі 45, т.

Для третього варіанта швидкість зношування буде становити:

НУБІП України

$$\delta_1^3 = 0,1961 \cdot B_1^3, \quad (4.9)$$

де  $B_1^3$  – об'єм подрібненої фракції роторної кормодробарки при загартуванні зуба протирізу зі сталі 45 т.

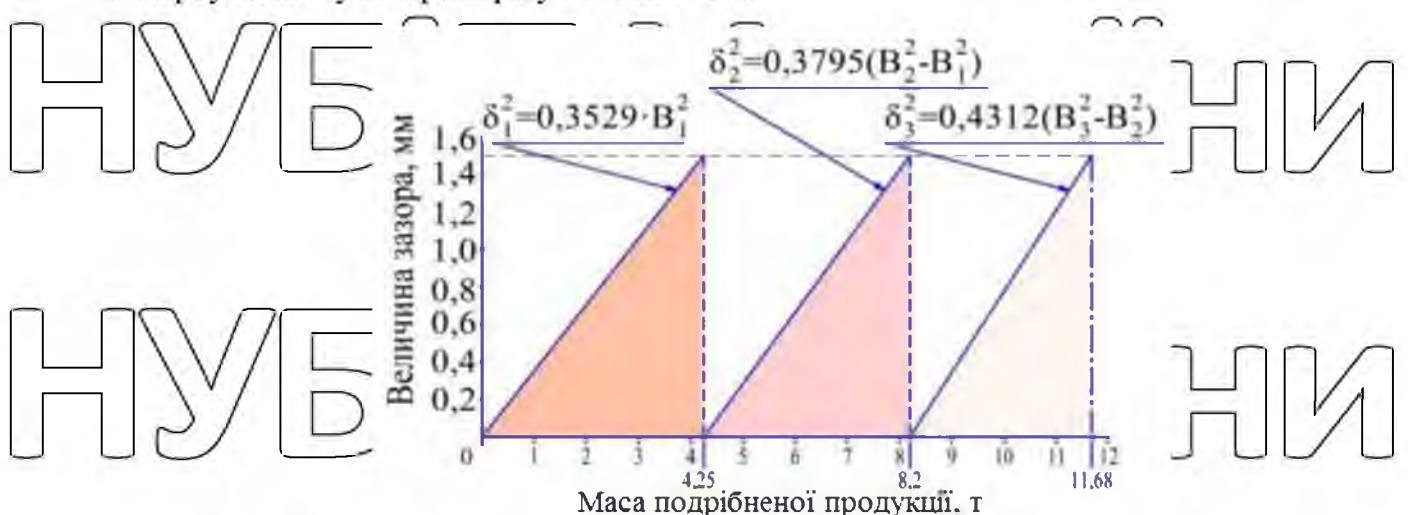


Рис. 4.4. Залежність об'єму подрібненої фракції пшениці від величини зносу протирізу, який виготовлено зі сталі 45

НУБІП України

НУБІП УКРАЇНИ

Після зрізу та вирівнювання зношеної поверхні, швидкість зношування можна визначити з наступної аналітичної залежності:

$$\delta_2^3 = 0,2334(B_2^3 - B_1^3) \quad (4.10)$$

НУБІП УКРАЇНИ

де  $B_2^3$  – обсяг подрібненої фракції після фрезерування та вирівнювання загартованого зуба протирізу, виготовленого зі сталі 45 т.

Після повторного фрезерування та вирівнювання загартованого зуба

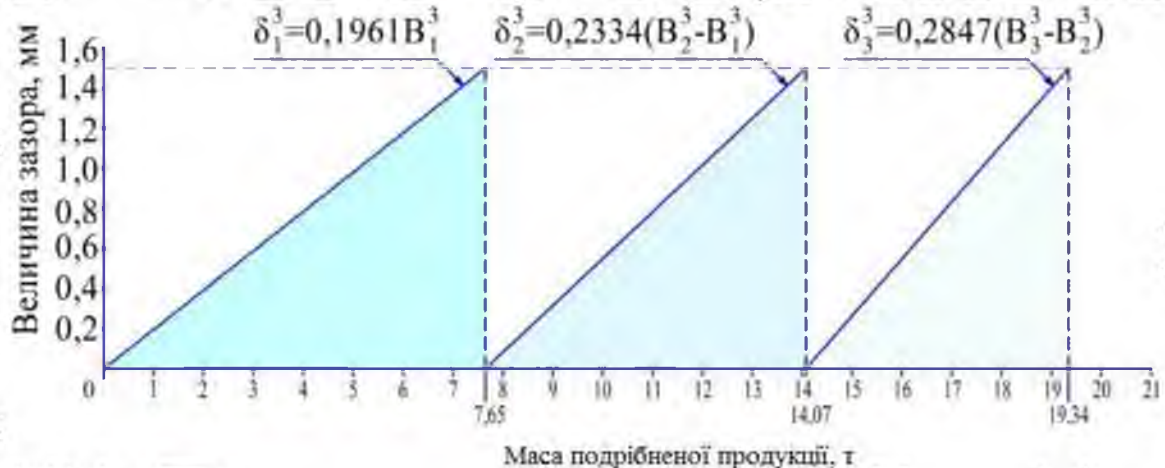
протирізу швидкість зношування складе (рис. 4.5):

НУБІП УКРАЇНИ

$$\delta_3^3 = 0,2847(B_3^3 - B_2^3) \quad (4.11)$$

де  $B_3^3$  – об'єм подрібненої фракції після повторного фрезерування для загартованого зуба протирізу, виготовленого зі сталі 45 т.

НУБІП УКРАЇНИ



НУБІП УКРАЇНИ

Рис. 4.5 - Залежність об'єму подрібненої фракції пшениці від величини

зносу протирізу, виготовленого зі сталі 45 підданого зміцненню

НУБІП УКРАЇНИ

Для четвертого варіанта швидкість зношування складе:

$$\delta_1^4 = 0,0711(B_1^4 - B_0^4), \quad (4.12)$$

де  $B_1^4$  - об'єм подрібненої фракції роторної кормодробарки при змищенні зуба протирізу із сталі 45 за допомогою ФПУ, т.

Після зрізу та вирівнювання зношеної поверхні, швидкість зношування можна визначити з рівняння

$$\delta_2^4 = 0,1268(B_2^4 - B_1^4), \quad (4.13)$$

де  $B_2^4$  - обсяг подрібненої фракції після фрезерування та вирівнювання зміщеного зуба протирізу, виготовленого зі сталі 45 т.

Після повторного фрезерування та вирівнювання зміщеного зуба протирізу швидкість зношування складе (рис. 4.6).

$$\delta_3^4 = 0,1509(B_3^4 - B_2^4), \quad (4.14)$$

де  $B_3^4$  - обсяг подрібненої фракції після повторного фрезерування для зміщеного зуба протирізу, виготовленого зі сталі 45, т.



Рис. 4.6 - Залежність об'єму подрібненої фракції пшениці від

величини зносу протирізу, виготовленого із сталі 45 підданого ФПУ

НУБІП УКРАЇНИ



Задавшись гранично допустимим зносом зуба протирізу роторної дробарки рівним 1,5 мм, при перевищенні якого більше 15% всього намолота не відповідає ступеню помелу, і підставивши його в залежності 4 і 4 – 4 для кожного із зубів, отримали значення їх ресурсів (рисунк 4.7).

Експеримент показав, що напрацювання на відмову роторної кормодробарки під час виготовлення зуба протирізу зі сталі Ст3 в середньому становив 3,85 т, для сталі 45 4,25 т, для сталі 45 попередньо загартованої склав 7,65 т і для зуба виготовленого з сталі 45 підданого фінішно-плазмовому зміцненню становила 13,6 т. Це відповідає даним, отриманим в експлуатаційних умовах.

## РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

### 5.1. Розрахунок витрат на збільшення ресурсу роторної дробарки

При виконанні процесу подрібнення зернових матеріалів до граничного зносу роторної дробарки вартість виконання заданого обсягу робіт складатиметься з витрат на виготовлення роторної дробарки та процента витрат на оплату праці при подрібненні а також на витрачену електроенергію під час подрібнення. При цьому виникає обсяг робіт не відповідає заданим нормам помелу та додаткова сума витрат пов'язана із витратами на додаткове подрібнення.

Вартість виконання заданого обсягу робіт можна визначити за формулою:

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{в}} + V_{\text{оп}} + V_{\text{е}}, \quad (5.1)$$

де:  $V_{\text{в}}$  - витрати на виготовлення;

$V_{\text{оп}}$  - витрати на оплату праці при подрібненні маси  $M$  зерна;

$V_{\text{е}}$  - витрати на витрачається електроенергію при подрібненні маси  $M$  зерна.

Техніко-економічний критерій ефективності подрібнення можна визначити за формулою:

$$E_{\text{п}} = \frac{z_{\text{заг}}}{M}. \quad (5.2)$$

Вартість виконання заданого обсягу робіт за заданої надійності процесу подрібнення можна визначити за формулою:

$$z_{\text{заг}} = z_{\text{п}} + (z_{\text{оп}} \cdot k) + (z_{\text{пр}} \cdot k) + (\Delta z_i \cdot k), \quad (5.3)$$

де:  $\Delta Z_i$  - витрати на додаткове подрібнення.

$Z_{пр}$  - витрати на профілактичні роботи;

$k$  - кількість профілактичних робіт.

Задаючись показником якісно виконаного подрібнення з'являються додаткові витрати пов'язані з усуненням відхилень від технологічного процесу

Критерій ефективності подрібнення з урахуванням надійності процесу дрібніння визначатиметься за формулою:

$$E_{п} = \sqrt{\frac{Z_{заг}}{M - \Delta M} + \frac{\Delta Z}{\Delta M}} \quad (5.4)$$

Техніко-економічну оцінку збільшення ресурсу роторної дробарки розглянемо стосовно чотирьох аналізованих варіантів, котрим зроблено досліди із зерном (пшениця сорту Юла яка має мікротравмування 27% при вмісті мінеральних домішок ( $C=0,4\%$ )).

Досліди проводилися при однакових режимах приводної потужності електродвигуна, з діаметром ротора протирізу рівним 100 мм при довжині, що дорівнює 60 мм враховуючи продуктивність рівну 300 кг/год:

1 Варіант – роторна дробарка виготовлена зі сталі Ст3, що працює до вибракувального зносу з подальшою профілактикою та відновленням поверхні зуба протирізу до вихідних геометричних параметрів

2 Варіант – роторна дробарка виготовлена із сталі 45 працююча до вибракувального зносу з подальшою профілактикою та відновленням поверхні зуба протирізу до вихідних геометричних параметрів

3 Варіант – роторна дробарка, виготовлена із сталі 45 піддана загартуванню та працююча до вибракувального зносу з подальшою профілактикою та відновленням поверхні зуба протирізу до вихідних геометричних параметрів з наступним загартуванням на кожному етапі.

4 Варіант роторна дробарка, виготовлена із сталі 45 піддана зміцненню за допомогою фінішно-плазмової установки та працююча до вибракувального зносу з подальшою профілактикою і відновленням робочої поверхні зуба протирізу, що стикається з виступами статора до вихідних геометричних параметрів, з наступним зміцненням на кожному етапі.

Використовуючи методику, представлену в розділі 2 і 4 отримуємо, що для практичних цілей можна використовувати дані, отримані під час проведення експерименту з інтенсивності зношування при різних режимах і концентрації абразиву.

Таблиця 4.2  
Результати економічної ефективності від виводження пропонуваніх роторних дробарок

		1	2	3	4
	T	40,4	46,8	77,2	171,2
V80%	T	29,6	34	56,8	140
$\Delta V80\%$	T	10,8	12,8	20,4	31,2
V50%	T	34	39,2	65	152,8
$\Delta V50\%$	T	6,4	7,6	12,2	18,4
T	Година	134	156	257	570
Z <sub>виг</sub>	грн	6500	6800	9000	15000
Z <sub>ел</sub>	грн	480	559	921	2042
Z <sub>оп</sub>	грн	16750	19 500	32 125	71 250
Z <sub>пр</sub>	грн	300	1 000	1 400	1 950
Z <sub>заг</sub>	грн/т	24030	27859	43446	90242
E <sub>i</sub>	грн/т	594	595	562	527
$\Delta Z80\%$	грн	6423	7619	11480	16445
C <sub>80%</sub>	грн/т	1405	1414	1326	1171
$\Delta Z50\%$	грн	3801	4522	6856	9696
E <sub>50%</sub>	грн/т	1299	1305	1229	1116

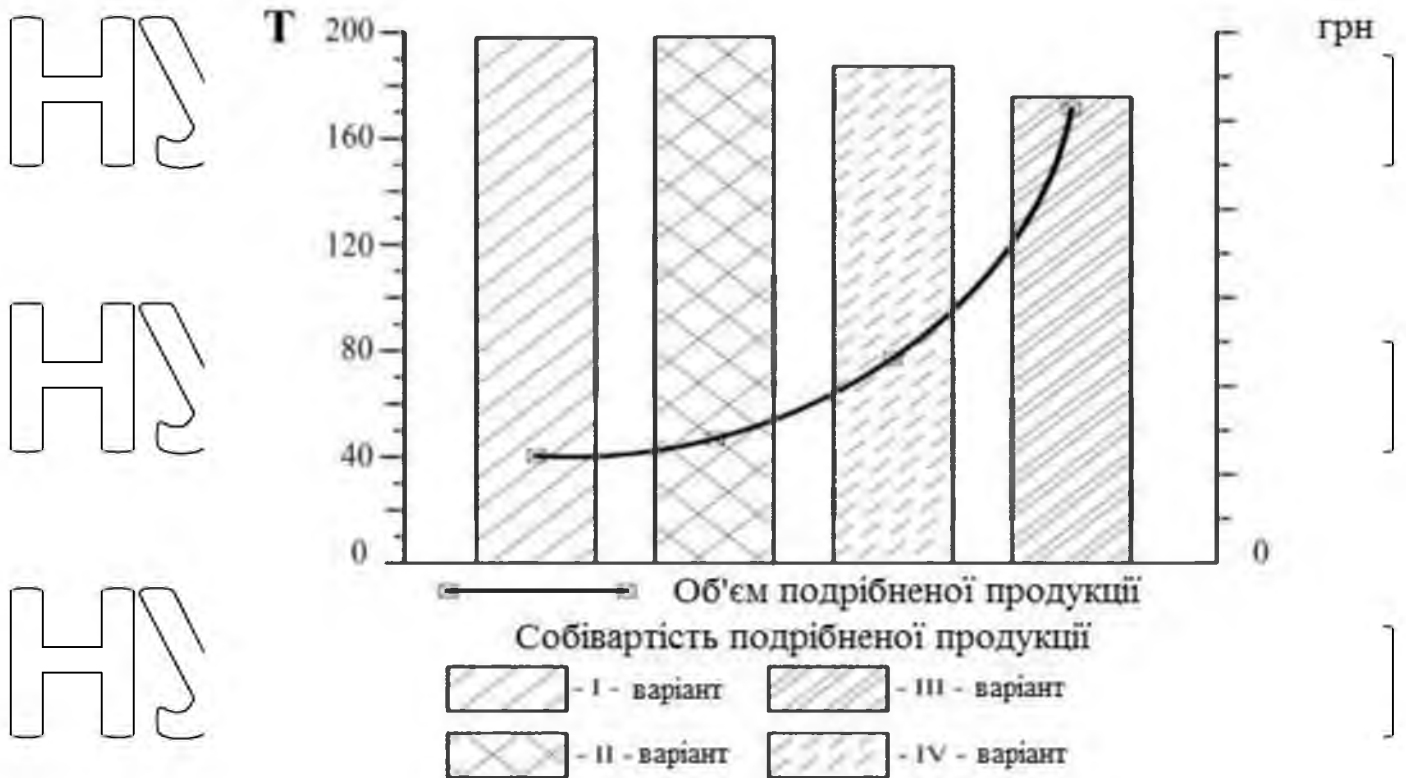


Рис. 4.11. Порівняння обсягу подрібненої продукції та критерію ефективності при використанні різних варіантів роторних дробарок до граничного зносу

Виконуваний обсяг роботи дробаркою за 4 варіантом становить 171 т, що в 4,2 рази більше, ніж обсяг роботи, що виконується першим варіантом дробарки, в 3,6 рази більше ніж у другого варіанта дробарки, і в 2,2 рази по третьому варіанту.

Критерій ефективності подрібнення продукції складатиме:

За першим варіантом 594 грн/т.

За другим варіантом 595 грн /т.

За третім варіантом 562 грн /т.

За четвертим варіантом 527 грн /т.

У таблиці 4.2 та рисунку 4.11 проведено розрахунок ефективності роботи та ресурсу дробарок, виконаних за різними варіантами та за різного

ступеня оцінки якості виконаної роботи.

Так, наприклад, при надійності процесу подрібнення рівного 50% показники ефективності склали:

За першим варіантом 34 т.

За другим варіантом 39 т.

За третім варіантом 65 т.

За четвертим варіантом 152 т.

Техніко-економічний критерій продукції складатиме:

За першим варіантом 1299 грн /т.

За другим варіантом 1305 грн /т.

За третім варіантом 1229 грн /т.

За четвертим варіантом 1116 грн /т.

Збільшення якості операцій за рахунок збільшення надійності до 80%

За першим варіантом 30 т.

За другим варіантом 34 т.

За третім варіантом 56 т.

За четвертим варіантом 140 т.

Найвищий виробіток до досягнення граничного зносу мають дробарки.

За четвертим варіантом виготовлення, що склала 140 т з урахуванням надійності процесу подрібнення рівного 80%, що в 4,2 рази більше, ніж у дробарки, виготовленої за першим варіантом, у 4,1 по 2 варіанти та у 2,5 рази за третім варіантом.

При цьому зі зменшенням обсягу подрібненої продукції відбувається збільшення визначення критерію ефективності робіт у кожному варіанті:

За першим варіантом 1405 грн /т.

За другим варіантом 1414 грн /т.

За третім варіантом 1326 грн /т.

За четвертим варіантом 1171 грн /т.

Підвищення якості продукції оцінювали показником надійності процесу подрібнення рівного 80%, при цьому, незважаючи на високу виробність та ресурс до досягнення граничного зносу за четвертим варіантом критерій ефективності становив 1171 грн /т, що у 16% нижче, ніж у першому варіанті виготовлення роторної дробарки. У якої це значення становило 1405 грн /т. Ці дані дозволяють стверджувати гіпотезу про правомочність використання всіх запропонованих варіантів для різних форм власності сільськогосподарських підприємств.

Граничний ресурс дробарки при першому та другому варіанті виготовлення з точки зору зменшення їх економічних витрат можна рекомендувати для особистих підсобних господарств (ЛПД) та селянських фермерських господарств (КФГ), у яких обсяг переробки та споживання комбікормів становить від 30 до 35 т на рік. При середній собівартості робіт, що дорівнює 1410 гривень на тонну подрібнення.

**ВИСНОВКИ**

1. Проведений аналіз теоретичних та експериментальних досліджень дозволив встановити, що найбільший вплив на підвищення довговічності роторної дробарки, як складної технічної системи, надають властивості робочих поверхонь рифлів статора і ротора, які є нижчими елементами його ієрархічної схеми.

2. Для підвищення довговічності подрібнювачів зернових матеріалів роторного типу, його продуктивності та зниження енергоємності запропоновано нову конструктивно-технологічну схему подрібнення, що враховує підбір конструкційних матеріалів робочих органів кормодробарок залежно від умов їх застосування та місця розташування протирізу.

3. Отримано аналітичні залежності продуктивності та енергоємності процесу подрібнення зерна в роторній кормодробарці, в яких враховується знос рифлів протирізу та статора. Експериментальна залежність продуктивності кормодробарки добре узгоджується з теоретичною залежністю  $Q_T$ . При куті розташування протирізу  $\gamma = 35^\circ$  та кутової швидкості ротора  $v = 4,5 \dots 5,5$  м/с коефіцієнт заповнення становив  $k_z = 0,11 \dots 0,16$ , що забезпечує її збільшення продуктивності на 15..25%.

4. Оцінка ефективності подрібнення зернових матеріалів за запропонованою методикою, що враховує довговічність робочих органів дробарки і якість подрібнення для аналізованих варіантів, при продуктивності дробарки 0,3 т/год, що відповідає довжині робочої частини  $l = 0,06$  м та діаметру ротора 0,1 м.

5. Результати техніко-економічного розрахунку показали, що впровадження запропонованої роторної кормодробарки середнім обсягом переробки 334 т/рік дозволяє знизити енергоємність на 7%, підвищити продуктивність на 25%, отримати річний економічний ефект 68 127 руб., При терміні окупності 0,1 року.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ



1. Amaya-Toral, R.M., Piña-Morales, M.R., Reyes-Martínez, R.M., de la Riva-Rodríguez, J., Poblano-Ojinaga, E.R., Sánchez-Leal, J., & Arredondo-Soto, K.C. (2022). Human-machine systems reliability: A series-parallel approach for evaluation and improvement in the field of machine tools. *Applied Sciences*, 12(3), article number 1681. doi: [10.3390/app12031681](https://doi.org/10.3390/app12031681).

2. Astanakulov, K.D., Gapparov, Sh., Karshiev, F., Makhsumkhonova, A., & Khudaynazarov, D. (2020). [Study on preparation and distribution of forage by chopping coarse feed](#). In *IOP Conference Series: Earth and environmental science 1st international conference on energetics, civil and agricultural engineering* (vol. 614, article number 012158). Tashkent: IOP.

3. Novitskiy, A., Banniy, O., & Novitskiy, Yu. (2023). Logical-probabilistic model of the reliability of means for preparing and distributing fodder. *Machinery & Energetics*, 14(1). <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-14-1-2023/logiko-ino-vimisna-modyel-otsinki-nadivnosti-zasobiv-dlya-prigotuvannya-i-rozdavannya-kormiv>

4. Novitskiy A.V., Kharkovskiy I.S., Novitskiy Yu.A. (2021). Monitoring of the technical condition of agricultural machinery according to guidelines for its operation. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv, Ukraine. 2021. Vol. 12, No 4. 85–93. <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-12-4-2021/monitoring-tyekhnichnogo-stanu-silskogospodarskoyi-tyekhniki-za-kyerivnimi-matyerialami-na-vivi-vekspluatatsiyu>.

5. Revenko Ivan, Khmelovskiy Vasy, Revenko Yulii, Rebenko Victor, Potapova Svitlana (2023). Justification of parameters affecting increase of hammer crusher productivity. *Engineering for rural development*. 24-26.05.2023 Jelgava. 714-720.

6. Ruzhylo, Z., Novitskii, A., Milko, D., Bulgakov, V., Beloev, I., & Rucins, A. (2022). [Mathematical model for reliability assessment of device for preparation and distribution of animal feed as “Man-Machine”](#). In *Engineering for rural development* (pp. 911-917). Jelgava, Latvia.

7. Tihanov D., Binchiciu E., Florea C., Geanta V., Binchiciu H. Research regarding wear protection in sever exploitation condition of crusher jaws. *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1128, p. 390–393.

8. Pylypaka, S., & Klendii, M. (2022). Transportation of a material particle by the operating mechanism of an agricultural machine in the form of a vertical screw confined by a coaxial stationary cylinder. *Machinery & Energetics*, 13(3), 73-80. [doi: 10.31548/machenergy.13.3i.2022.73-80](https://doi.org/10.31548/machenergy.13.3i.2022.73-80).

9. Chornovil M.I., Cherkun V.Yu., Avlin V.V. etc. (2010) In general ed. E. Chornovola. Reliability of agricultural machinery: a textbook. Kirovohrad:

CODE. 320 p.  
[https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u/32/nadivnist\\_silskogospodarskovi\\_tehniki\\_pidruchnik.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u/32/nadivnist_silskogospodarskovi_tehniki_pidruchnik.pdf).

10. Fuyang, T., Yuhua, C., Zhanhua, S., & Yinfa, Y. (2020). Finite element simulation and performance test of loading and mixing characteristics of self-propelled total mixed ration mixer. *Journal of Engineering*, 12, 1-15. [doi: 10.1155/2020/6875816](https://doi.org/10.1155/2020/6875816).

11. Балабуха О. В. Підвищення довговічності і ефективності роботи ріжучих елементів ґрунтообробних машин шляхом управління 160 спрацюванням при дискретному зміцненні: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11 / Олександр Валерійович Балабуха, Кіровоградський державний технічний університет. Кіровоград, 2001. 17 с.

12. Бойко А. І., Новицький А. В. Підвищення надійності кормодробарок та подрібнювачів. *Механізація сільськогосподарського виробництва. К.: НАУ, 1997. Т. III. С. 6–8.*

13. Бойко А. І., Морозовська З. А. Стан проблеми і шляхи підвищення довговічності решіт дробарок. Вісник Житомирського національного агротехнічного університету. Житомир: ЖНАЕУ, 2014. Вип. № 2 (45), Т. 4, Ч. 1. С. 153 – 157.

14. Бойко А. І., Новицький А. В., Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Аналіз конструктивних рішень решіт зернодробарок, направлених на підвищення їх довговічності. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. К.: НУБіП України, 2014. Вип. 196, Ч. 2. С. 212 – 215.

15. Бойко А. І., Морозовська З. А. Математичне моделювання зношування елементарної ділянки отворів решіт. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. Харків, 2016. № 6. С. 138 – 146.

16. Бойко А. І., Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Обґрунтування нової форми отворів сепаруючих решіт. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: механізація та автоматизація виробничих процесів. Суми, 2016. Вип. 10/2 (30). С. 111 – 114.

17. Бойко А. І., Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Забезпечення працездатності машин для приготування та роздавання кормів. Інноваційні розробки студентів та молодих науковців в галузі технічного сервісу машин. Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція. м. Харків, 1-2 грудня 2016 р.: тези доповідей / Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2017. С. 30.

18. Брагинець С.В. Принципи створення внутрішньогосподарських комбикормових підприємств та їх практична реалізація / С.В. Брагинець, В.І. Пахомов, О.М. Бахчовників // Вісник Всеросійського науково-дослідного інституту механізації тваринництва. 2015. №4(20). С. 48-52

19. Василенко П.М. Елементи методики математичної обробки

результатів експериментальних досліджень/П.М Василенко. М.: ВІМ, 1958.

20. Горячкін, В. П. Склад творів у трьох томах [Текст]. М.: Колос, 1968. Т. I. - 508 с.

21. ДСТУ 4508: 2005. Комбікорми-концентрати для свиней. Технічні умови. Чинний від 01.01. 2008. К. : Держспоживстандарт України, 2005. 15 с. (Інформація та документація).

22. ДСТУ 4120-2002. Комбікорми повнораціонні для сільськогосподарської птиці. Технічні умови. Чинний від 01.04.2003. К. : Держспоживстандарт України, 2003. 16 с. (Національний стандарт України).

23. Драйгор, Д.А. Зносостійкість і втомна міцність сталі в залежно від умов обробки та процесу тертя. Київ: Вид-во АН УРСР, 1959. 142 с.

24. Єгоров Б. В., Давиденко Т. М. Здосконалення підготовки концентрованих кормів при виробництві повноцінних комбікормів для сільськогосподарських тварин. Корми і кормовиробництво: міжвідомчий тематичний науковий збірник Ін-ту кормів УААН. Вінниця, 2008. Вип. 61. С. 135 – 140.

25. Коруняк П. С. Обґрунтування схем і параметрів устаткування ударного подрібнення зерна: автореф. канд. техн. наук: 05.05.11 / Петро Степанович Коруняк ; Львівський державний аграрний університет. Львів, 2000. 20 с. 109. Рожківський М. Ф. Нове покоління молоткових дробарок. Техніка АПК. 2000. №1. С. 12 – 14.

26. Машини та обладнання переробних виробництв: Навчальний посібник / Дацишин О. В., Ткачук А. І., Чубов Д. С. та ін. ; за ред. О. В. Дацишин. К.: Вища освіта, 2005. 159 с.

27. Механізація виробництва продукції тваринництва / Ревенко І. І., Кукта Г. М., Манько В.М. та ін. ; за ред. І. І. Ревенка. К.: Урожай, 1994. 264 с.

28. Новицький А. В. Підвищення безвідказності кормодробарок конструкторсько-технологічними методами на основі структурного аналізу їх

надійності: дис. ... кандидата технічних наук : 05.05.11 / Новицький Андрій Валентинович ; Національний аграрний університет, Київ, 2001. 190 с.

29. Новицький А. В. Оцінка надійності засобів для приготування і роздавання кормів в залежності від умов і режимів експлуатації. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. К. : НУБіП України, 2015. Вип. 253. С. 141 – 148.

30. Новицький А.В., Харьковський І.С., Бовкун Я.В. Передумови підвищення надійності зернових кормодробарок роторного типу. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 116-ї річниці від дня народження Крамарова В.С. (1906-1987) 23-24 лют. 2023 р., м. Київ // МОН України, НУБіП України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2023. С. 46-48.

31. Новицький А. В. Аналіз досліджень надійного функціонування складних технічних систем у тваринництві. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 116-ї річниці від дня народження Крамарова В.С. (1906-1987) 23-24 лют. 2023 р., м. Київ / МОН України, НУБіП України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2023. С. 48-51.

32. Новицький А. В., Ружилюк З. В. Аналіз відмов засобів для приготування і роздавання кормів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. К. : НУБіП України, 2015. Вип. 253. С. 253 – 259.

33. Осьмак В. Сучасний стан та перспективи розвитку машин для кормо виробництва. Збірник наукових праць УкрІНДІВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке, 2009. Вип. 13. С. 259 – 261.

34. Олексієнко В. О. Підвищення ефективності роботи малогабаритних зернових молоткових кормодробарок: дис. ... кандидата технічних наук : 05.05.11 / Олексієнко Вадим Олександрович, Таврійська

державна агротехнічна академія Мелітополь, 2006. 173 с.

35. Подпрятюв Г. І. Технологія обробки, переробки зерна та виготовлення хлібопекарської продукції. К.: НАУ, 2000. 126 с.

36. Пат. 95435 Україна, МПК А23N 5/00, В02С 13/00. Пристрій для лушення та подрібнення зерна / Т. О. Шпиганович, О. В. Ялпачик; заявник і патентовласник Таврійський державний агротехнологічний університет. №200910980, заявл. 6.04.2010; опубл. 25.07.2011, Бюл. №14.

37. Пат. 82751 Україна, МПК В02С 9/00, В02С 12/284, В02С 13/14. Дробарка / М. І. Карпенко; заявник і патентовласник Карпенко Микола Іванович. №200607961, заявл. 14.07.2006; опубл. 12.05.2008, Бюл. №9.

38. Пат. 44123 Україна, МПК В02С 13/06. Дробарка зернових матеріалів / Я. А. Кузьміч, В. І. Деико, В. В. Ткач, І. Я. Добрянський, І. В. Абрамов; заявник і патентовласник Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» Української академії аграрних наук. №2001053195; заявл. 14.05.2001; опубл. 15.01.2002, Бюл. №1.

39. Пат. 61505 Україна, МПК В 02В3/02. Спосіб лушення зерна та пристрій для його здійснення / Ф. Ю. Ялпачик, Н. О. Фучаджи, О. В. Гвоздев; заявник і патентовласник Таврійський державний агротехнологічний університет. №200910980, заявл. 17.02.2003; опубл. 17.11.2003, Бюл. №11.

40. Ревенко І. І., Брагінець М. В., Заболотько О. О. Машини та обладнання для тваринництва. К.: Кондор, 2011. 396 с.

41. Ревенко Ю. І. Удосконалення технологічного процесу і агрегату для приготування комбікормів в умовах господарств: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11 / Юлій Іванович Ревенко; Національний аграрний університет. К., 2007. 22 с.

42. Рожківський М. Ф. Розробка наукових основ, створення і впровадження прогресивних технологій та комплексу машин нового покоління. Механізація та електрифікація сільського господарства. – Глеваха:

ННЦ «ІМЕТГ», 2006. Вип. 90. С. 324 – 338.

43. Савченко В. М. Розробка молотків кормодробарок з локальним зносостійким покриттям: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.05.11 / Василь Миколайович Савченко ; Кіровоградський національний технічний університет. Кіровоград, 2008. 20 с.

44. Саїнсус О. Д. Підвищення довговічності лоп культиваторів композиційними покриттями перемінного складу: автореф. дис... канд. техн. наук. 05.05.11 / Олександр Дмитрович Саїнсус ; Кіровоградський національний технічний університет. Кіровоград, 2008. 20 с.

45. Соломка О. В. Аналіз процесу подрібнення зернових матеріалів. Вісник Харківського національного технічного університету ім. Петра Василенка. Харків, 2009. Вип. 78. С. 132 – 140.

46. Соломка О. В. Обґрунтування параметрів та режимів роботи ротаційного подрібнювача зерна: дис. ... кандидата технічних наук: 05.05.11 / Соломка Олександр Валерійович ; Національний університет біоресурсів і природокористування України. К., 2013. 206 с.

47. Сухенко Ю. Г., Сухенко В. Ю., Хоменко С. В. Підвищення довговічності робочих органів дробарок для зерна. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. К. : НУБІМ України, 2010. Вип. 144. Ч.5. С. 260 – 267. 93.

48. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: Навч. посібник / Дацишин О. В., Ткачук А. І., Гвоздев О. В., Ялпачик Ф. Ю, Гвоздев В. О. ; за ред. О. В. Дацишина. Вінниця: Нова Книга, 2009. 488 с.

49. Харьковський І. С. Розробка зміцнених наральникових сошників сівалок для технологій мінімального обробітку ґрунту: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Ігор Сергійович Харьковський ; Національний аграрний університет. Київ, 2007. 20 с.

50. Шпиганович Т. О., Ялпачик О. В. Дробарка прямого удару з системою сепарування зерна та продуктів подрібнення. Техніка і технологія АПК: науково-виробничий журнал. К., 2011. №12 (27). С. 7 – 10.

51. Ялпачик О. В., Самойчук К. О., Буденко С. Ф. Моделювання процесів у робочій камері пальцевої зернової дробарки. Процеси і апарати харчових виробництв. К.: Наукові праці НУХТ, 2015. Т.1. С. 134 – 141.

52. Ялпачик Ф. Ю., Олексієнко В. О. Кормодробарка для сімейної ферми. АПК: наука, техніка, практика. К., 1989. №3. С. 22 – 23.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України