

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет

Механікотехнологічний

ПОГОДЖЕНО

Декан механіко-технологічного  
факультету

(назва факультету(ННІ))

Вячеслав БРАТІШКО

(підпис)

(ПІБ)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри охорони праці та  
біотехнічних систем у тваринництві

(назва кафедри)

Василь ХМЕЛЬОВСЬКИЙ

(підпис)

(ПІБ)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Обґрунтування технологічних процесів на МТФ з дослідженням  
подрібнювача рулонів

Спеціальність

208 Агроінженерія

(код і найменування)

Освітня програма Агроінженерія

(назва)

Орієнтація освітньої програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

д.т.н., проф.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Вячеслав БРАТІШКО

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., доц.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Світлана ПОТАПОВА

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Олександр ПАСТУШЕНКО

(ПІБ здобувача)

КИЇВ 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
УКРАЇНИ**

Факультет

Механікотехнологічний

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Охорони праці та  
біотехнічних систем

д.т.н., проф.

Василь ХМЕЛЬОВСЬКИЙ

(науковий ступінь вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

“ ”

2025р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Пастушенку Олександрю Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність

208 Агроінженерія

(код і найменування)

Освітня програма Агроінженерія

(назва)

Орієнтація освітньої програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Обґрунтування технологічних процесів на МТФ з дослідженням подрібнювача рулонів

Затверджена наказом від “13” листопада 2024р. № 2038 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 07 листопада 2025 р.

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи. 1. Сучасний стан машинного забезпечення процесів подрібнення кормів у тваринництві. 2. Теоретичне дослідження процесу подрібнення і роздачі подрібнених рулонних кормів. 3. Аналіз існуючих подрібнювачів з характеристиками різних марок. 4. Напрямки вдосконалення робочих органів подрібнювачів рулонних кормів на основі аналізу наукових досліджень та існуючих конструкцій подрібнювачів.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- Здійснювати огляд та аналіз існуючих досліджень з метою обґрунтування теми роботи.
- Обґрунтувати функціональну і конструктивно-технологічну схеми подрібнювача кормів в тюках, рулонах на фермах великої рогатої худоби.
- Встановити теоретичні залежності та експериментальні дані, які б характеризували процес взаємодії робочих органів подрібнювача кормових матеріалів.
- Визначити енергетичні та якісні показники роботи подрібнювача.

Дата видачі завдання “10” жовтня 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Світлана ПОТАПОВА

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Олександр ПАСТУШЕНКО

(підпис)

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота включає в себе пояснювальну записку, яка складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури. Пояснювальна записка магістерської кваліфікаційної роботи містить 71 аркушів друкованого тексту.

У першому розділі магістерської кваліфікаційної роботи розглянуто сучасний стан машинного забезпечення процесів подрібнення рулонних кормів у тваринництві.

У другому розділі магістерської кваліфікаційної роботи розглянуто теоретичне дослідження процесу подрібнення і роздачі рулонних кормів, а також розроблено функціональну і конструкційно-технологічну схеми подрібнювача з вертикально обертовим бункером

У третьому розділі наведено програму і методику експериментальних досліджень.

У четвертому розділі наведено впливи конструктивно-режимних факторів на процес подрібнення рулонних матеріалів. Залежності продуктивності від частоти обертання бункера і висоти шару матеріалу в бункері.

**Ключові слова:** рулонний подрібнювач кормів, подрібнення, роздавання, обертальний бункер, рулон, продуктивність, ротор, молотки.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОХНАЧЕНЬ.....</b>	<b>5</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН МАШИННОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ КОРМІВ У ТВАРИННИЦТВІ.....</b>	<b>9</b>
1.1. Можливі системи згодовування тварин .....	9
1.2. Вимоги, щодо подрібнювачів кормів і підстилки.....	12
1.3. Класифікація і аналіз конструкцій подрібнювачів кормів.....	14
1.4. Критерії оцінки якості та оптимізації роботи подрібнювачів.....	20
1.5. Огляд конструкцій бункерних подрібнювачів стеблових кормів.....	24
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ І РОЗДАЧІ СТЕБЛОВИХ КОРМІВ.....</b>	<b>26</b>
2.1 Розробка функціональної і конструкційно-технологічної схеми подрібнювача з вертикально обертовим бункером.....	26
2.2. Обґрунтування параметрів молоткового апарату універсального подрібнювача рулонних кормів і підстилки.....	30
2.3. Енергетична оцінка процесу подрібнення рулонних кормів.....	39
<b>РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	<b>42</b>
3.1.Програма і завдання експериментальних досліджень.....	42
3.2.Установка і обладнання для проведення теоретично-аналітичних експериментальних досліджень.....	43
3.3.Методика проведення експериментальних досліджень і визначення основних характеристик матеріалу.....	46
3.4.Методика визначення залежності продуктивності подрібнювача від частоти обертання бункера.....	49
3.5.Методика встановлення залежності продуктивності від висоти матеріалу в бункері.....	51
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ І ЇХ АНАЛІЗ.....</b>	<b>50</b>
4.1.Впливи факторів конструкції на процес подрібнення рулонних матеріалів.....	50
4.2. Залежність продуктивності від частоти обертання бункера і товщі шару рулонного матеріалу в бункер.....	57
4.3.Енергоємність процесу подрібнення стеблового матеріалу.....	59
4.4.Визначення зусилля руйнування матеріалу.....	63
<b>РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНИХ РІШЕНЬ.....</b>	<b>64</b>
5.1 Розрахунок капіталовкладень.....	64
5.2. Розрахунок експлуатаційних затрат.....	66
5.3.Розрахунок амортизаційних відрахувань та розрахунок експлуатаційних затрат.....	67
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>67</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>69</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МТФ - Молочно-товарна ферма;

ТПВ - Технологічний процес виробництва;

ОТП - Обґрунтування технологічного процесу;

ВРХ - Велика рогата худоба;

РК - Раціон годування;

ЕЕ - Економічна ефективність;

РП – Рулонний подрібнювач.

## ВСТУП

Актуальність теми дослідження - сільськогосподарський сектор, зокрема тваринництво, залишається однією з ключових стратегічних ланок економічної безпеки України, що має забезпечувати зростаючий попит населення на якісну продукцію. У цьому контексті корма є вирішальним фактором: доведено, що рівень продуктивності тварин (надоїв, приросту) на 60-80% залежить від раціональності та якості згодовування. Годівля становить найбільшу частку експлуатаційних витрат у тваринництві, тому будь-які інвестиції в оптимізацію систем кормозабезпечення забезпечують максимальну рентабельність виробництва. Більше того, процеси заготівлі, подрібнення та роздачі корму є традиційно найбільш енергоємними та найменш автоматизованими. Отже, пріоритетне зниження собівартості та підвищення енергоефективності тваринницької продукції безпосередньо залежить від технологічного прориву у системах приготування та роздачі корму. Для досягнення максимальної продуктивності ВРХ необхідне безперервне постачання високоякісних кормів, де до 80% поживної цінності припадає на грубі та стеблові корми (сіно, солома). Сучасні технології заготівлі, зокрема пресування кормів у рулони та тюки, значно знижують втрати під час зберігання. Однак, цей прогрес породжує нову технологічну проблему: висока складність і трудомісткість ефективної роздачі пресованих кормів на великих фермах через дефіцит універсальних та ефективних технічних засобів для їхнього подрібнення та дозування.

Подрібнення кормів, що заготовляються у тюках, рулонах та розсипному вигляді, є ключовою і найбільш енерговитратною операцією в усьому циклі кормозабезпечення. В умовах великих ферм (понад 500 голів), що працюють із повнораціонними сумішами, критично необхідне якісне та однорідне подрібнення. Це зумовлює нагальну потребу в розробці та обґрунтуванні параметрів високопродуктивного подрібнювача, здатного ефективно працювати з рулонами та тюками і інтегруватися в автоматизовані системи годівлі.

*Метою* магістерської кваліфікаційної роботи є теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження раціональних параметрів і режимів роботи рулонного подрібнювача кормів, що забезпечить підвищення якості

подрібнення, однорідності видачі (мінімізація нерівномірності) та широкий діапазон регулювання продуктивності незалежно від форми подачі матеріалу (тюки, рулони).

Для досягнення поставленої мети, необхідно виконати такі завдання:

- розробити та детально обґрунтувати функціональну, конструктивну і технологічну схеми інноваційного подрібнювача рулонних кормів, здатного ефективно працювати з різними формами сировини (тюки, рулони) в умовах сучасних високопродуктивних МТФ.
- провести глибокий аналіз існуючих конструкцій подрібнювальних машин та наукових досліджень для визначення критичних напрямків удосконалення робочих органів, з метою мінімізації енерговитрат і підвищення однорідності подрібнення.
- встановити теоретичні залежності та математичні моделі, що описують кінетику та динаміку процесу взаємодії робочих органів універсального подрібнювача зі стебловими матеріалами, та підтвердити їхню коректність експериментальними даними.
- визначити комплекс енергетичних показників (потужність, енергоспоживання) та критерії якості (ступінь подрібнення, нерівномірність видачі) роботи рулонного подрібнювача для подальшої оптимізації його експлуатаційних режимів.

*Об'єктом* магістерської кваліфікаційної роботи є інженерно-технологічний комплекс процесів подрібнення та дозованої видачі кормів реалізований на базі рулонного подрібнювача з вертикальним обертовим бункером і молотковим ротором.

*Предметом* магістерської кваліфікаційної роботи є закономірності впливу конструктивно-кінематичних параметрів (маса молотків, частота обертання ротора, геометрія бункера) на енергетичні та якісні показники роботи (ступінь подрібнення, енергоспоживання, нерівномірність видачі) рулонного подрібнювача кормових матеріалів.

*Методи дослідження* є теоретичні дослідження, які базувались на аналізі взаємодії робочих органів подрібнювача рулонних кормів з матеріалом із використанням методів теоретичної механіки, диференційних розрахунків,

статистичного моделювання. Експериментальні дослідження проводились аналітично і передбачали планування багатофакторних експериментів. Теоретичні розрахунки і аналіз експериментальних даних проводились з використанням спеціального програмного забезпечення.

Практична цінність виконаного дослідження полягає у створенні інженерно-технологічної основи для підвищення ефективності та зниження собівартості виробництва тваринницької продукції на сучасних молочно-товарних фермах (МТФ).

**Апробація результатів магістерської роботи.** Брав участь у всеукраїнських науково-практичних студентських конференціях «наукові здобутки студентів у дослідженнях технічних та біоенергетичних систем природокористування: конструювання та дизайн».

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаної літератури. Загальний обсяг магістерської кваліфікаційна роботи становить 73с., із них 73с., основного тексту, у тому числі 13 ілюстрацій і 9 таблиць. Список використаних джерел містить 52 найменування.

## РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН МАШИННОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ КОРМІВ У ТВАРИННИЦТВІ

### 1. 1. Можливі системи згодовування тварин

На сучасному етапі вітчизняною та зарубіжною науково-практичною спільнотою запропоновано низку прогресивних технологій годівлі тварин [21].

Технологічні схеми, проілюстровані на рисунках 1.1–1.4, демонструють варіанти організації процесів годівлі із залученням мобільних кормозмішувачів-роздавачів, стаціонарних подрібнювально-змішувальних комплексів, а також систем з почерговим згодовуванням окремих компонентів раціону. Спільною рисою зазначених схем є прагнення до мінімізації використовуваного парку машин, який зазвичай включає: універсальний навантажувач, агрегат для деструкції рулолнних кормів, мобільні або стаціонарні змішувачі-роздавачі та серійні кормороздавачі типу КТУ-10. Варто зазначити, що на фермах із поголів'ям до 400 голів (перші дві схеми) допускається відсутність спеціалізованого подрібнювача, оскільки функцію обробки невеликих обсягів стеблової маси можуть взяти на себе інші агрегати.

Технологічні лінії, що базуються на почерговій роздачі компонентів, залишаються поширеними. Проте вони характеризуються високою трудомісткістю, оскільки операції з розподілу багатьох складових (наприклад, неподрібненого сіна, коренеплодів та концентратів) часто виконуються вручну.

Удосконалена технологічна лінія (рис. 1.3) вирішує цю проблему шляхом попереднього подрібнення кормів, що дозволяє механізувати їх роздачу з використанням агрегатів КТУ-10. У такій конфігурації концентровані корми змішуються з рідкими добавками та подаються окремими роздавальниками-змішувачами (ємністю бункера 3м<sup>3</sup>), що за своїм функціоналом аналогічні моделі КУТ-3,0А, яка випускалася раніше.



Рис. 1.1. Технологія і обладнання кормових ліній з використанням мобільних подрібнювачів-роздавачів кормів

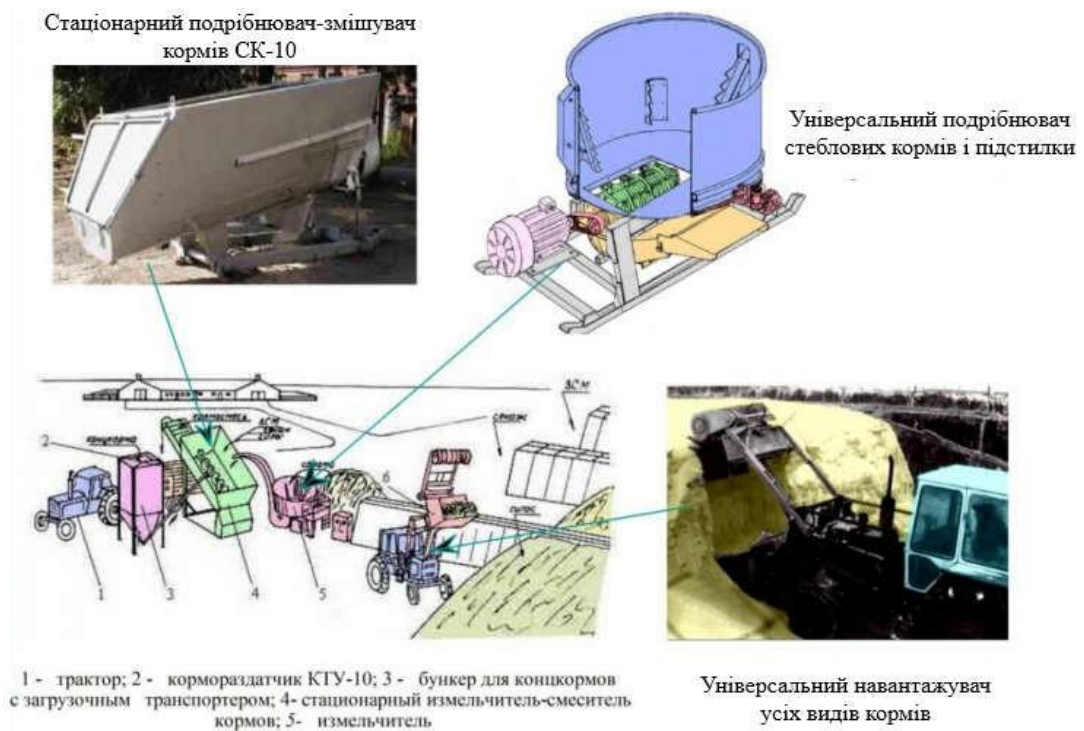


Рис. 1.2. Система машин для згодовування ВРХ з використанням стаціонарних подрібнювачів-змішувачів кормів

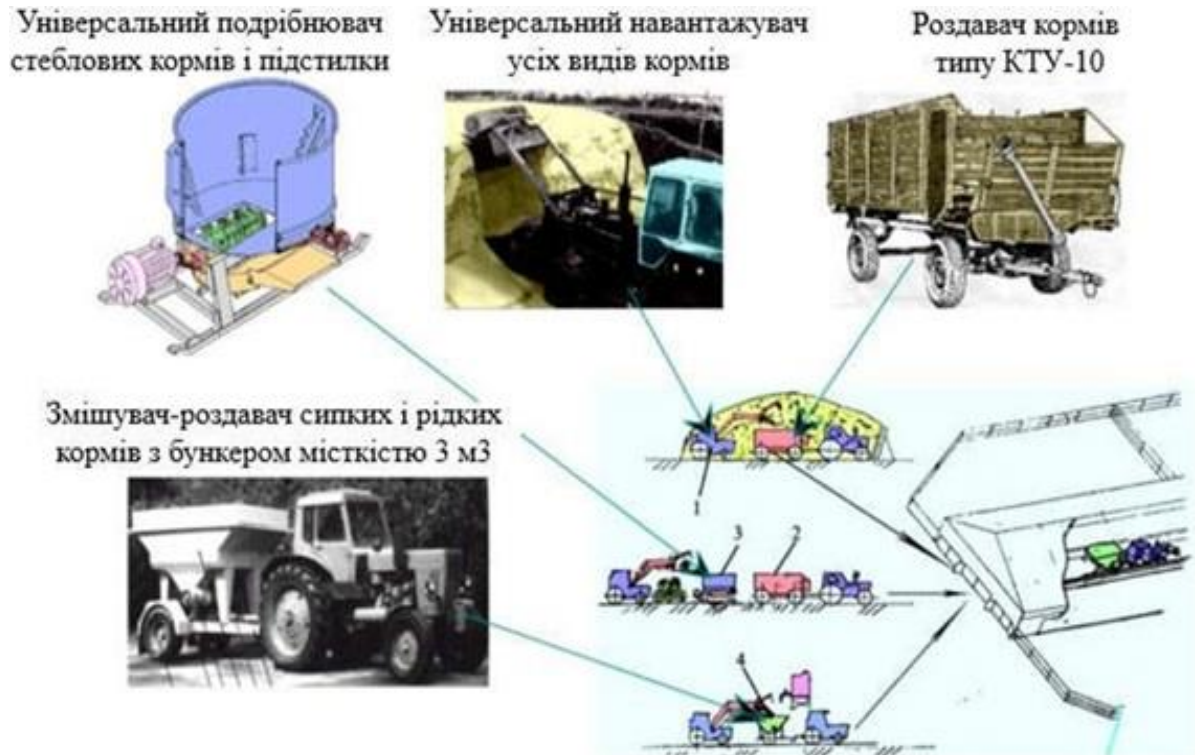


Рис. 1.3. Удосконалена технологічна лінія з почерговою роздачою кормових компонентів

Високу перспективність демонструє технологія годівлі тварин сінажем із бобових культур, заготовленим у рулонах із застосуванням плівкового покриття. Ключовою перевагою даного методу є його значна стійкість до несприятливих погодних чинників та економічна доцільність, особливо для господарств з обмеженими фінансовими ресурсами. Така технологія не вимагає суттєвих капіталовкладень у будівництво дороговартісних сховищ. При цьому, заготовлений корм здатен зберігатися протягом двох-трьох років без значних втрат поживних речовин.

Окремого розгляду вимагає технологічна схема виробництва кормів (рис. 1.4), що орієнтована на підвищення енергетичної та протеїнової поживності раціонів у межах сінажно-концентрованого типу годівлі. Дана схема передбачає, що сінаж, заготовлений у рулонах із плівковим покриттям, піддається подрібненню та подальшій роздачі безпосередньо у годівниці. Для реалізації цього процесу застосовують універсальні подрібнювачі (наприклад, ПСК-6) або спеціалізовані подрібнювачі рулонів (як-от ПКР-145 "УМАНЬФЕРМАШ"), які агрегатуються з тракторами тягового класу 1,4.

При цьому операція завантаження рулонів у подрібнювач здійснюється фронтальним навісним навантажувачем, що використовує той самий енергетичний засіб.

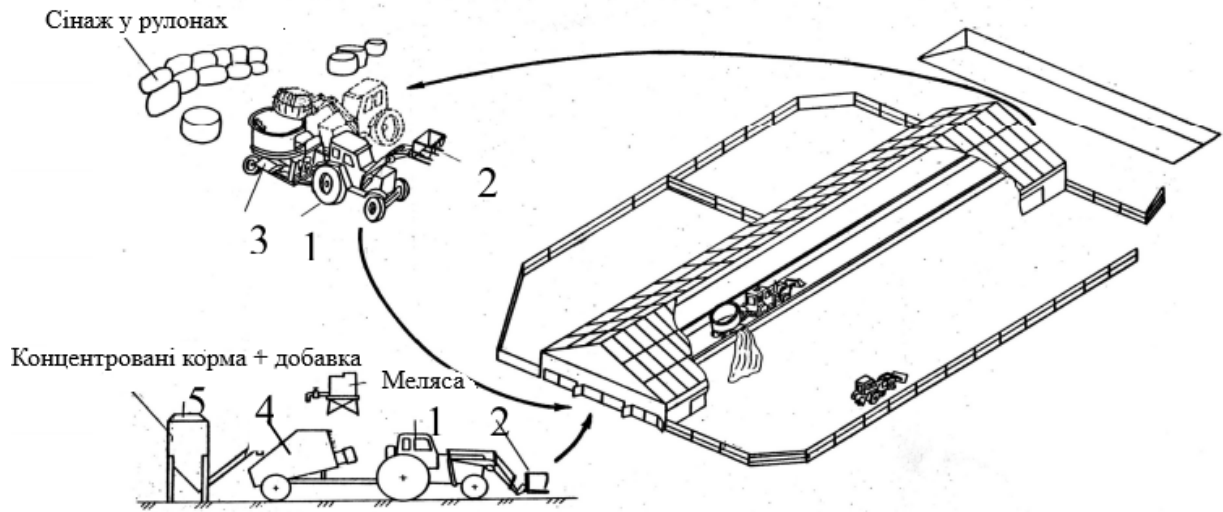


Рис. 1.4 - Технологічна схема виробництва кормів на фермах ВРХ з малокомпонентних сінажно-концентрованим типом годування тварин:

1- трактор ПМЗ-6; 2 - фронтальний навантажувач ПКУ-0,8; 3 - подрібнювач-роздавач пресованих кормів ПСК-6; 4 - змішувач-роздавач концентрованих кормів, рідких і збалансованих добавок; 5 - бункер концентрованих кормів з дозувальним шнеком

## 1.2 Вимоги, щодо подрібнювачів кормів і підстилки

Ефективність тваринництва та рівень продуктивності поголів'я прямо корелюють з якістю кормової бази та організацією повноцінної годівлі. Система годівлі повинна гарантувати забезпечення тварин раціонами, що суворо відповідають їхньому віку та продуктивному призначенню. Якість кормів, таким чином, є не лише фактором продуктивності, але й інтегральним показником економічної ефективності галузі.

Сучасна зоотехнія висуває чіткі вимоги до процесів кормоприготування. Ключовими параметрами контролю є гранулометричний склад (ступінь подрібнення), рівень механічного забруднення та відсутність шкідливих домішок. Відповідність цим стандартам є критичною, оскільки вона оптимізує

умови для хімічних та біологічних процесів у травному тракті тварин що, у свою чергу, підвищує засвоюваність поживних речовин.

Роль рулонних кормів у раціонах різних видів сільськогосподарських тварин не є однаковою. Найбільш повно вони використовуються жуйними, що зумовлено фізіологічними особливостями їхньої травної системи. Проте, корми цього типу характеризуються високим вмістом (до 40%) важкоперетравної клітковини. Внаслідок цього, без попередньої підготовки їх поїдання тваринами значно знижене. Застосування механічної обробки рулонної маси є обов'язковим заходом для підвищення її поїдання, що, в свою чергу, покращує загальну перетравність та поживну цінність раціону.

Чинні зоотехнічні нормативи регламентують наступні параметри деструкції корму для ВРХ:

- Оптимальна довжина різання соломи та сіна для корів становить 4–5 см (дрібніша фракція допускається при подальшому змішуванні із соковитими кормами).
- Допустимі втрати сировини у процесі подрібнення не повинні перевищувати 0,1%.
- При обробці соломи вологістю 25–40%, частка фракцій розміром <50 мм має становити понад 80% від загальної маси.
- Кількість дрібних частинок (менше 20 мм) обмежується 15%.

Покращення поїдання соломи жуйними тваринами також досягається за рахунок її розщеплення вздовж волокон та деструкції міжвузлів (з показником не менше 85%), при цьому довжина отриманих частинок має залишатися не меншою за 40 мм.

До систем дозування та роздачі кормів висувається окремий блок зоотехнічних вимог, що включає:

- Забезпечення високої рівномірності та точності роздачі.
- Можливість диференційованого дозування (індивідуально, наприклад, концентрати відповідно до надоїв, або групового – для силосу, сінажу та інших рулонних кормів).
- Запобігання забрудненню кормової суміші та її сепарації (розшарування) за фракціями.

- Гарантування безпеки тварин та унеможливлення їх травмування під час роздачі.

Допустиме відхилення від встановленої норми видачі на одну голову для рулонних кормів становить  $\pm 15\%$ , тоді як для концентратів цей показник значно жорсткіший – до  $\pm 5\%$ . Загальні втрати корму обмежуються 1%, при цьому незворотні втрати є неприпустимими. Регламентується також тривалість операції роздачі в межах одного тваринницького приміщення: до 30 хвилин для мобільних роздавачів та до 20 хвилин для стаціонарних ліній.

### **1.3 Класифікація і аналіз конструкцій подрібнювачів кормів**

Сучасний ринок сільськогосподарської техніки пропонує широкий асортимент подрібнювальних агрегатів вітчизняного та зарубіжного виробництва, призначених для задоволення потреб аграріїв. Для забезпечення високої ефективності та відповідності сучасним вимогам, технологічні схеми подрібнювачів рулонних кормів і підстилки мають бути багатofункціональними та забезпечувати виконання повного комплексу операцій, передбачених технологічними лініями на МТФ.

Значне різноманіття наявних технологічних схем та конструктивних рішень машин, призначених для деструкції рулонних кормів і підстилки, зумовлює необхідність їхньої системної класифікації. Класифікацію зазначених агрегатів, розроблену на основі аналізу фахових літературних джерел, наведено на рисунку 1.5.

Аналізуючи конструктивні особливості подрібнювачів, варто відзначити, що всі вони мають схожу, хоча й складну, організаційно-технологічну схему процесу обробки матеріалу. Ця схема включає три основні етапи: завантаження та подачу вихідної сировини до робочих органів, безпосередньо процес подрібнення, та подальше виведення готового продукту з робочої камери.

В одноступеневих подрібнювачах відкритого типу технологічний процес реалізується наступним чином: сировина, що підлягає обробці, подається навантажувачем до завантажувального механізму. Останній, у свою чергу, транспортує матеріал до камери подрібнення, де розташовані робочі органи.

Після обробки готовий продукт оперативно вивантажується. Такий принцип роботи є типовим для більшості подрібнювачів рулонних кормів та характерний для агрегатів з ножовими, штифтовими або молотковими робочими органами. Деструкція матеріалу в машинах цього типу відбувається за рахунок комбінованого механічного впливу: різання, злому, зминання та розщеплення стебел.

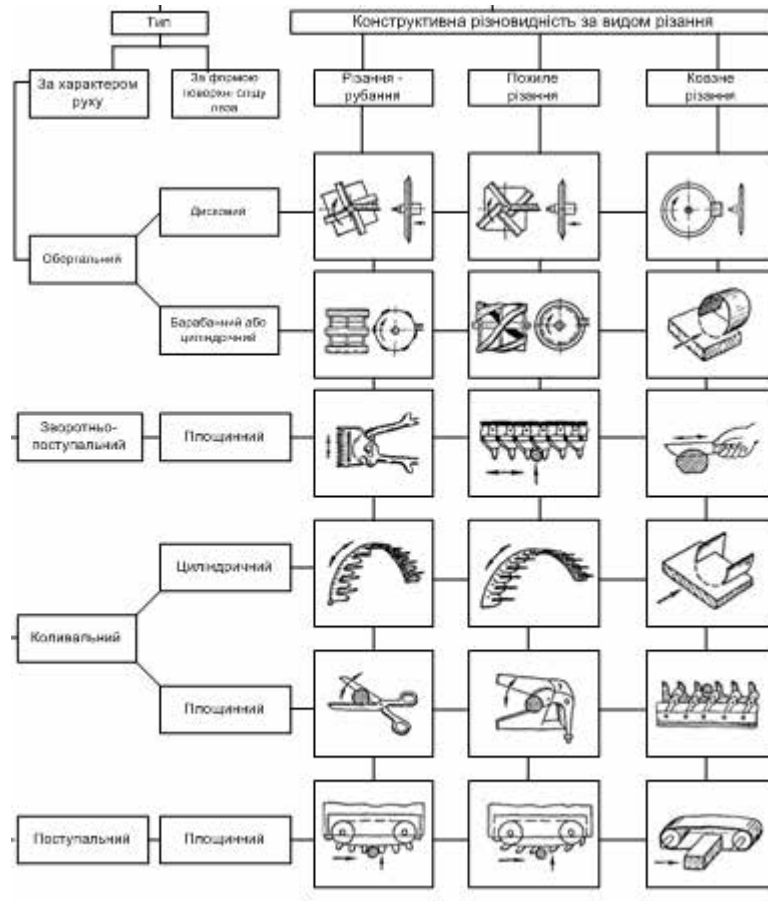


Рис. 1.5. Класифікаційна схема подрібнювачів рулонних кормів

Агрегати закритого типу мають схожий початковий етап завантаження: сировина подається навантажувачем до живильного механізму, який транспортує її до камери подрібнення. Однак ключова відмінність полягає в тому, що матеріал усередині камери здійснює багаторазові кругові рухи. Таким чином, деструкція сировини в подрібнювачах цього типу відбувається переважно за рахунок багаторазового ударного впливу робочих органів. До суттєвих недоліків такої конструкції належить висока питома енергоємність процесу та критичне зниження або повна втрата працездатності при обробці кормів із підвищеним рівнем вологості.

У процесі розробки та проектування нових, більш ефективних та досконалих моделей подрібнювачів стеблових кормів, необхідно застосовувати системний підхід. Цей підхід передбачає вдосконалення кожного конструктивного елемента агрегата. При цьому кожен елемент повинен розглядатися не лише з точки зору виконання своєї прямої функції в загальній технологічній схемі, але й з позиції його впливу на оптимізацію умов функціонування наступного елемента в технологічному ланцюгу.

Аналіз конструкцій живильних пристроїв (рис. 1.6), що застосовуються у подрібнювачах рулонних кормів, свідчить, що більшість з них вимагає інтеграції допоміжних вузлів. Йдеться про пресувальні органи, функція яких – забезпечення надійного захоплення, ущільнення та подачі кормової маси до подрібнювального апарату. Для реалізації цих функцій застосовують лопаті, шнекові механізми, вальці, похилі ланцюгово-планчасті транспортери або бітери. Таке конструктивне рішення призводить до суттєвого ускладнення конструкції агрегата та, як наслідок, до зростання енергоємності живильних механізмів (до 50% від загальних енерговитрат на процес подрібнення).

Бункерно-лопатеві живильні пристрої вигідно відрізняються відсутністю зазначених недоліків. Конструкції цього типу дозволяють організувати подачу рулонних кормів до робочого барабана незалежно від форми їх заготівлі (розсипом, у рулонах чи тюках). Це, у свою чергу, створює передумови для повної механізації операцій прийому та подачі сировини. Таким чином, бункерно-лопатеві живильники краще адаптовані до сучасних технологій заготівлі кормів та забезпечують вищу продуктивність праці.

Процес обробки стеблових кормів класифікують за принципом механічного впливу: різання, удар, злам, розрив, перетирання або комбінація цих методів. Для реалізації зазначених способів сучасні подрібнювальні апарати оснащуються відповідними робочими органами: ножами, сегментами, штифтами, молотками або їх поєднанням.

Метод різання (із застосуванням лез) дозволяє ефективно обробляти матеріал у широкому діапазоні вологості. Разом з тим, суттєвим обмеженням цього способу є відсутність деструкції (розщеплення) готових частинок уздовж волоконних структур, що може зумовлювати необхідність подальшої дообробки

продукту.

Застосування ударного принципу деструкції дає змогу формувати кінцевий продукт, гранулометричний склад якого повною мірою відповідає зоотехнічним вимогам. Основним недоліком цього методу є значне пилоутворення (формування дрібнодисперсної фракції) при обробці сировини з низькою вологістю.

Аналіз наявних конструктивно-технологічних схем свідчить про поширення двох основних типів подрібнювальних апаратів: барабанних та дискових. Група барабанних апаратів включає ножові (рис. 1.7, д, е), молоткові (рис. 1.7, г, д) та комбіновані (рис. 1.7, в, е) конструкції.

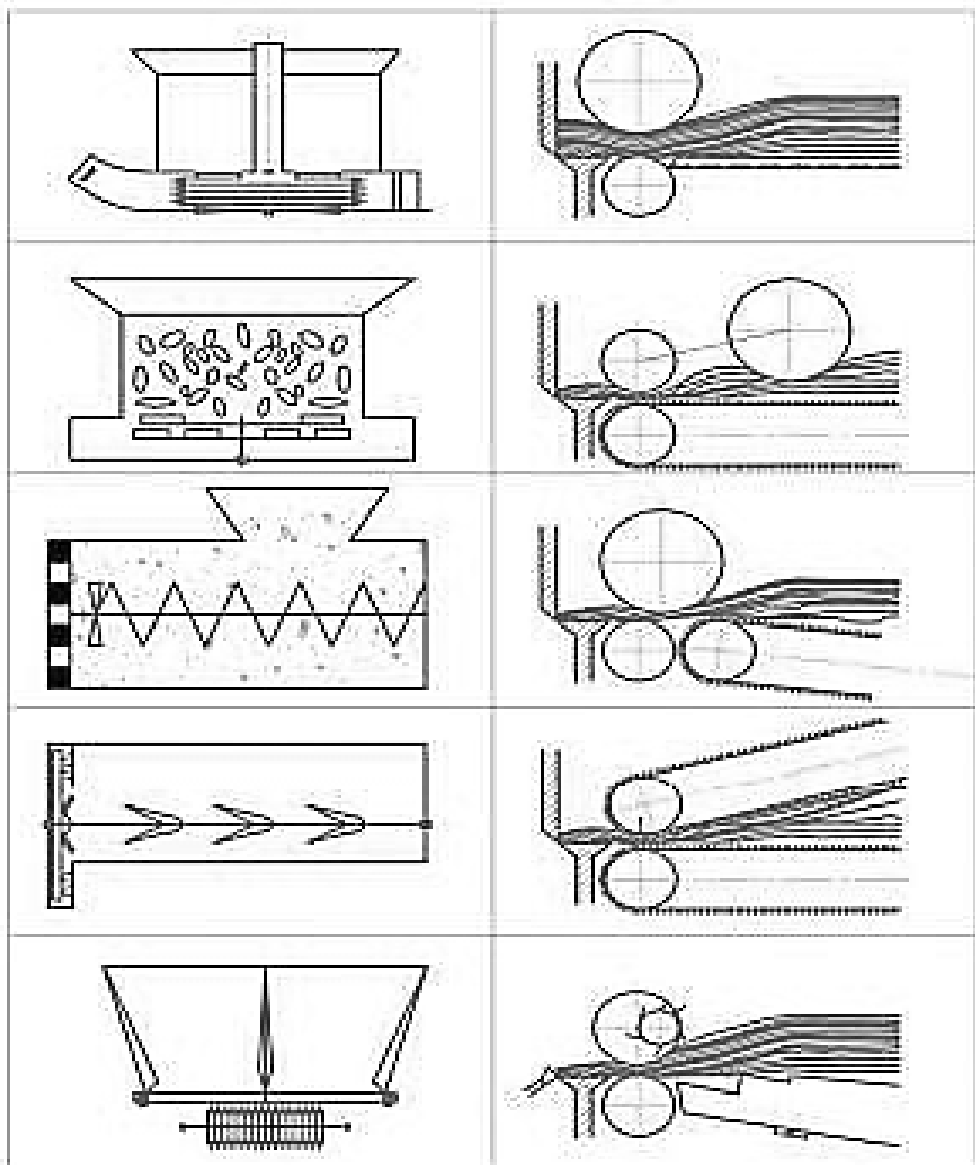


Рис. 1.6. Живильні механізми подрібнювачів ролонних кормів

До групи дискових апаратів належать ножові (рис. 1.8, а) та штифтові (рис. 1.8, б). Існує пряма залежність між принципом дії та робочою швидкістю: машини, що реалізують принцип різання (ножові), функціонують на низьких швидкостях, тоді як агрегати, що використовують ударно-втираючий принцип (молоткові або штифтові), є високошвидкісними.

Процес обробки рулонної сировини дисковими подрібнювачами, оснащеними прямолінійними лезами, має суттєве експлуатаційне обмеження. Функціонування таких агрегатів характеризується значною нерівномірністю динамічних навантажень на робочий вал, уникнення якої є технологічно неможливим [13, 25]. Водночас, перевагами конструкцій такого типу є простота форми робочих органів, легкість їх обслуговування (зокрема, заточування) та загальна простота експлуатації.

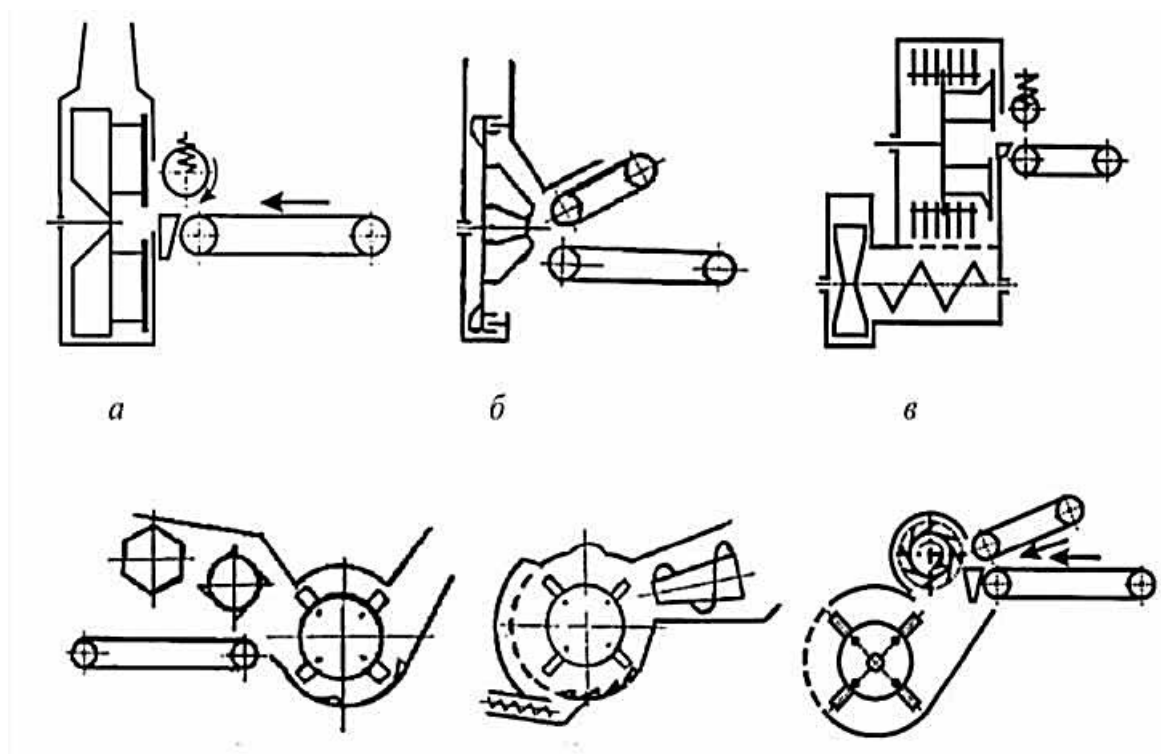


Рис. 1.7. Схеми основних типів подрібнювальних апаратів

Подрібнювачі, оснащені шарнірним кріпленням молоткових робочих органів, характеризуються низкою переваг: високим ступенем деструкції (розщеплення) частинок продукту вздовж волокон, конструктивною простотою, експлуатаційною надійністю та універсальністю щодо обробки кормів з різними фізико-механічними властивостями [17, 28]. Водночас, попри зазначені переваги, агрегати такого конструкційного виконання мають низку суттєвих

обмежень. До них належать: підвищена питома енергоємність процесу, недостатня однорідність (висока нерівномірність) гранулометричного складу кінцевого продукту, а також надмірне утворення дрібної фракції. Останнє провокує циркуляційні навантаження в робочій камері, що додатково збільшує загальні енерговитрати. Крім того, високі коллові швидкості робочих органів спричиняють їх інтенсивне абразивне спрацювання.

Наявні на сьогодні класифікаційні системи подрібнювачів рулонних кормів демонструють широке розповсюдження машин, які класифікують за принципом організації технологічного процесу в подрібнювальній камері, виділяючи агрегати відкритого та закритого циклів [7, 29].

До ключових робочих органів, що визначають якість кінцевого продукту, належать активні елементи (сегменти, ножі, молотки, штифти), а також пасивні елементи, як-от решета та деки (оснащені контр-молотками або протирізами). У сучасних дробарках застосовуються молотки різноманітних конфігурацій, які умовно поділяють на пластинчасті та об'ємні. Найбільш поширені типи молотків проілюстровано на рисунку 1.8.

Найбільшого розповсюдження набули пластинчасті молотки. Вони виготовляються як прямокутної форми (рис. 1.9, а, в), так і з фігурними та ступінчастими робочими крайками (рис. 1.9, б, г). Таке конструктивне різноманіття зумовлене потребою у формуванні гострих сходящих крайок на кінцях робочого органа, що є критично важливим для підвищення ефективності деструкції продукту. Об'ємні молотки, у свою чергу, класифікують на суцільні та складені.

У процесах обробки стеблової сировини найчастіше застосовують пластинчасті молотки прямокутної форми. Їхня ключова перевага порівняно з іншими типами полягає у простоті виготовлення, що поєднується із забезпеченням задовільної якості подрібнення. Завдяки симетричній конструкції, такі молотки є чотиристоронніми: при спрацюванні однієї робочої крайки, молоток можна послідовно повертати іншою стороною або перевертати іншим кінцем. Це дозволяє чотириразове використання одного виробу за умови належної експлуатації. Для деструкції матеріалу, що подається великими фракціями (наприклад, макуха, кукурудзяні качани тощо), доведено високу

продуктивність молотків товщиною 6–12 мм та довжиною 200 мм [36].

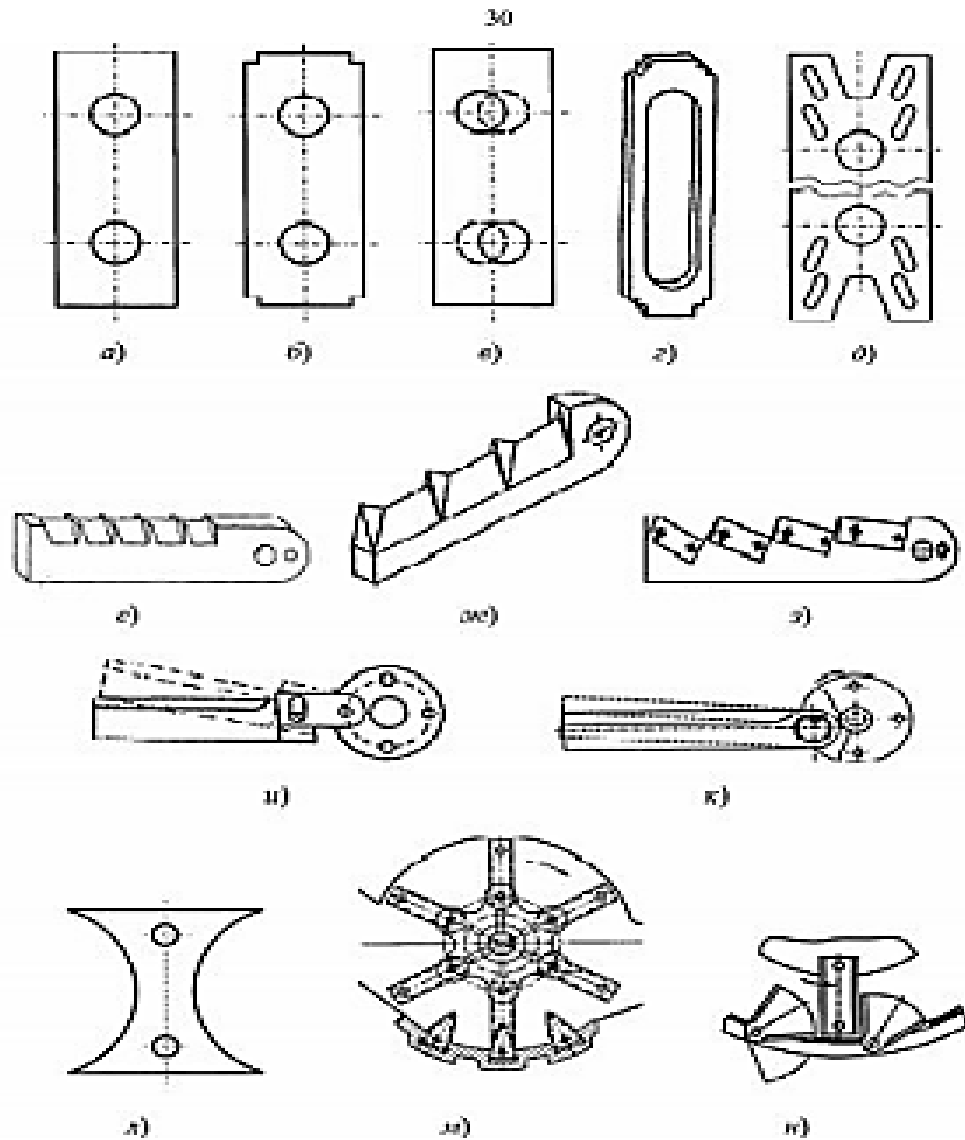


Рис. 1.8. Робочі органи подрібнювачів стеблових кормів

#### 1.4 Критерії оцінки якості та оптимізації роботи подрібнювачів

Ключовою метою вдосконалення конструктивно-технологічних схем подрібнювачів рулонної сировини є досягнення відповідності якості кінцевого продукту чинним зоотехнічним нормативам за умови мінімізації приведених витрат. Це зумовлює наукову задачу, що полягає в обґрунтуванні об'єктивного показника для оцінки якості готового продукту. Варто зазначити, що на сучасному етапі не досягнуто консенсусу щодо єдиного уніфікованого критерію для визначення якості деструкції сировини [48].

Для кількісної оцінки ступеня подрібнення стеблових кормів у ході численних наукових досліджень було запропоновано значну кількість

різноманітних формул та методик. Наприклад, своїй наукових працях запропоновано формулу для визначення ступеня подрібнення соломи при обробці соломорізкою:

$$\lambda = \frac{L_{ст}}{L_{різ}}, \quad (1.1)$$

де  $L_{ст}$  - середня довжина вихідного матеріалу, м;

$L_{різ}$  - середня довжина частинок подрібненого матеріалу, м.

Дослідниками було представлено вираз ступеня подрібнення як:

$$\lambda = \frac{S_k}{S_n}, \quad (1.2)$$

де  $S_n$  і  $S_k$  - питома поверхня частин матеріалу до і після подрібнення.

Вчені пропонують проводити оцінку якості одержаного продукту з потрійного числа і середньозваженому квадратичному відхиленню. Для використання таких оцінок подрібнений матеріал слід розділяти по фракціям і обчислювати за такими виразами:

а) потрійне число

$$\sum_0^{l_{max}} G_i = \sum_0^{l_1} G_i + \sum_{l_1}^{l_2} G_i + \sum_{l_2}^{l_{max}} G_i, \quad (1.3)$$

б) середньозважений розмір

$$l_{cp} = \frac{\sum G_i l_i}{\sum G_i}, \quad (1.4)$$

в) середньоквадратичне відхилення

$$S = \sqrt{\frac{\sum (l_i - l_{cp})^2 G_i}{\sum G_i}}, \quad (1.5)$$

де  $l_{max}$  – максимальний розмір частинок, мм;

$l_i$  – розмір частинок, мм.

Дослідники для визначення якості подрібнення рулонних матеріалів, пропонують безрозмірний показник  $K$ :

$$K = \frac{S_D \sum l_1^2 G_i}{S \sum G_i} \quad (1.6)$$

де  $S_D$  – допустиме середньоквадратичне відхилення.

На сучасному етапі, під час проведення експериментальних досліджень та випробувань технічних засобів для кормоприготування, найбільш поширеним залишається метод ручного фракціонування матеріалу. Цей метод передбачає ручний розподіл проби за довжиною частинок з наступним зважуванням кожної фракції та розрахунком середньозваженого розміру.

Для коректної оцінки та оптимізації параметрів різних конструкцій подрібнювальних агрегатів необхідно використовувати інтегральний (узагальнюючий) показник. Такий критерій повинен комплексно враховувати спожиту енергію, продуктивність машини та досягнуту якість подрібнення. У цьому напрямку вже проведені певні наукові дослідження.

Випробування машин та обладнання, призначених для подрібнення рулонних кормів, а також визначення показників якості їх роботи, регламентуються стандартом ДСТУ EN ISO/IEC 17025. Цей стандарт передбачає проведення порівняльного аналізу ефективності машин для кормоприготування на основі питомих енерговитрат, розрахованих на одиницю новоутвореної поверхні.

Цей показник визначається з наступного виразу:

$$q = \frac{N}{Q \Delta S}, \quad (1.7)$$

де  $N$  – потужність подрібнювача, кВт;

$Q$  – продуктивність, т/год;

$\Delta S$  – площа щойно утвореної поверхні, м<sup>2</sup>.

Дослідниками запропоновано спосіб побудови узагальненого критерію фізичний зміст якого зводиться до визначення міри близькості даного об'єкта до умовного "ідеалу", або "еталону".

Узагальнений критерій  $A_u$  визначають з виразу:

$$A_u = \sum_{i=1}^n a_i \left( \frac{y_{ui} - y_{uo}}{y_{uo}} \right)^2, \quad (1.8)$$

де  $y_{ui}$  – значення  $i$ -го критерію в  $u$ -ій машині;

$y_{uo}$  - найкраще, або "ідеальне", значення  $i$ -го критерію;

$a_i$  - нормована вага  $i$ -го показника.

Проведений аналіз існуючих критеріїв, що застосовуються для оцінки якості деструкції матеріалу та оптимізації технологічного процесу подрібнення, дає змогу сформулювати наступний висновок: існує нагальна науково-технічна потреба у подальшому вдосконаленні наявних або розробці нових, більш досконалих методик. Ці методики мають бути спрямовані на об'єктивну порівняльну оцінку показників ефективності як існуючих, так і перспективних технологічних схем подрібнювальних агрегатів.

### 1.5 Огляд конструкцій бункерних подрібнювачів стеблових кормів

У галузі розробки машин для подрібнення і роздачі рулонних кормів провідні позиції займають такі країни, як Німеччина, США, Франція, Велика Британія, Нідерланди, Канада, Фінляндія, Китай і Індія.

Для умов експлуатації в Україні найбільший практичний інтерес становлять агрегати, здатні обробляти кормову сировину, заготовлену в різних формах (тюки, рулони, розсип) та в широкому діапазоні вологості. Встановлено, що агрегати, оснащені живильними пристроями бункерного типу, найкраще відповідають цим специфічним вимогам.

У сегменті бункерних подрібнювачів домінують машини, конструкція яких передбачає використання подрібнювального ротора з молотковими робочими органами [24, 31]. Використання альтернативних рішень, таких як комбіновані або сегментні робочі органи, є менш поширеною практикою.

Серед іноземних компаній-виробників, що спеціалізуються на розробці та створенні бункерних машин для деструкції стеблових матеріалів, варто виділити таких лідерів ринку, як «New Holland», «Burrovs», «Audureau», «Farmhand», «Vermeer», «Kidd», «Krone».

Агрегати виробництва «New Holland» функціонують за принципом дробарки закритого типу. Процес деструкції матеріалу базується на комбінації

багаторазових ударних впливів (від молоткових органів) та інтенсивного перетирання сировини при її проходженні крізь отвори решета. Експлуатаційним недоліком такої схеми є значне зростання енергоємності при обробці кормів, вологість яких перевищує 25%. При вологості понад 31% відбувається забивання (налипання) отворів решета, що призводить до повної втрати працездатності агрегата.

Моделі «Roto Grind» характеризуються вертикальним розташуванням бункера та оптимізовані для агрегування з грейферним навантажувачем. Подача сировини до робочих органів реалізована за допомогою спеціальних лопатей, закріплених на внутрішніх стінках обертового бункера, та спіралеподібної смуги, що змонтована на нерухомому днищі. Агрегат оснащений дробаркою відкритого типу, що дозволяє працювати з матеріалами вологістю до 35%. Принцип руйнування сировини полягає в розщепленні частинок внаслідок ударів молотків, а також їх тертя об грані робочих органів та об протирізальні пластини. До ключових недоліків цієї конструкції відносять організацію подачі сировини в осьовому напрямку, що суттєво обмежує максимальну продуктивність.

Агрегат «Feeder-100» є машиною, що складається з бункера, всередині якого інтегрований подавальний ланцюгово-планчастий транспортер. Для попереднього розпушування рулонів застосовуються два бітери, оснащені сегментними та дисковими ножами.

Причипний комбайн-розкидач підстилки від фірми «Kidd» має конструкцію з вертикально-обертовим бункером. На нерухомому днищі агрегата змонтований основний робочий орган — диск із ножами. У нижній частині цього диска розташовані лопатки, що виконують функцію видачі готового продукту.

Аналогічно до світових тенденцій, в Україні було налагоджено виробництво подрібнювачів стеблових матеріалів бункерного типу, здатних обробляти сировину в тюках, рулонах та розсипом.

Моделі ПРТ-Ф-80 та ПРТ-Ф-80-1 являють собою конструкцію, що поєднує бункер-живильник з вертикальною віссю обертання та осьовою подачею сировини до безрешітної молоткової дробарки. Система вивантаження реалізована у вигляді відбивного дефлектора.

Технологічний процес виглядає наступним чином: неподрібнена маса подається грейферним навантажувачем у бункер-живильник. Там, під дією лопатей, вона перемішується та спрямовується до подрібнювального ротора. Деструкція матеріалу відбувається внаслідок комбінованого впливу молотків, дек та контр-молотків, після чого продукт виводиться через вивантажувальний пристрій. Експлуатаційні показники (при вологості соломи 14%) становлять до 6 т/год при обробці пресованих кормів та до 5 т/год при роботі з розсипною масою.

Модифікація ПРТ-165 відрізняється від зазначених моделей використанням більш потужного привода, що забезпечує вищу пропускну здатність.

Процес експлуатації подрібнювачів серії ПРТ (ПРТ-80 та ПРТ-165) виявив низку експлуатаційних обмежень, аналогічних до недоліків, притаманних закордонним зразкам техніки. Зокрема, модель ПРТ-165 демонструє критичне зниження ефективності при обробці сировини з підвищеною вологістю (понад 25%), тоді як агрегати ПРТ-Ф-80 характеризуються недостатньою технологічною універсальністю.

Для моделі ПРТ-80 характерною проблемою є забивання вивантажувального дефлектора при вологості матеріалу вище 40%. Це зумовлено конструктивним недоліком – відсутністю механізму для відокремлення нерухомого ротора від завантаженої маси на етапі запуску агрегата. Модель ПРТ-165, у свою чергу, демонструє низькі показники експлуатаційної надійності. Це є наслідком систематичного забивання дробильної камери та частих відмов окремих вузлів, що призводить до значного зростання трудовитрат на технічне обслуговування [42].

Ключовим недоліком обох агрегатів (ПРТ-80 та ПРТ-165) є їхня технологічна нездатність обробляти рулонні корми, заготовлені у формі рулонів. Крім того, ці машини не можуть виконувати функції кормороздавача, а їхня конструкція характеризується високою метало- та енергоємністю.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що розробка ефективних універсальних подрібнювачів має базуватися на комбінації трьох ключових конструктивних рішень: застосуванні вертикального завантажувального бункера, молоткового ротора та прохідної деки, оснащеної протирізами.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ І РОЗДАЧІ СТЕБЛОВИХ КОРМІВ

### 2.1 Розробка функціональної і конструкційно-технологічної схеми подрібнювача з вертикально обертовим бункером

Проведений аналіз наукових досліджень засвідчив високу технологічну доцільність інтеграції універсальних подрібнювачів у лінії кормоприготування на тваринницьких комплексах МТФ з поголів'ям понад 500 голів. Це зумовлено здатністю таких агрегатів ефективно обробляти рулонну сировину незалежно від форми її заготівлі (тюки, рулони) та в широкому діапазоні вологості.

З огляду на зазначене, було розроблено принципові конструктивно-технологічні схеми для двох виконань агрегата: універсального стаціонарного подрібнювача та мобільного подрібнювача-роздавача. Ключовою особливістю обох схем є застосування горизонтально-розташованого молоткового ротора та вертикального бункера-живильника.

Конструктивно, обидва варіанти машин базуються на рамі, на якій змонтовано бункер-живильник, що спирається на блоки підтримувальних роликів. Нерухоме днище має технологічне вікно, під яким розміщено подрібнювальний апарат (ротор молоткового типу). По всій довжині ротора встановлено ніж та ряд підтримувальних елементів. Під ротором інтегровано підбарабання, оснащене вивантажувальним пристроєм, напрямним козирком та планкою з протирізами. Внутрішній об'єм бункера обладнаний підпружиненими та допоміжними захоплювачами.

Процес завантаження рулону передбачає його орієнтацію в бункері-живильнику таким чином, щоб вісь рулону розташовувалася перпендикулярно до осі обертання подрібнювального апарата. Застосування вертикального бункера, оснащеного пружними та допоміжними захоплювачами, унеможливує проковзування (відставання) кормової маси відносно обертання бункера. Таке надійне зчеплення матеріалу зі стінками живильника гарантує рівномірність його подачі до ротора. Стабілізація завантаження подрібнювального апарата, у свою чергу, запобігає неконтрольованому

захопленню надмірно великих (або малих) порцій сировини та унеможливлює її недостатнє подрібнення.

У стаціонарному виконанні привід бункера-живильника реалізовано через чотириступінчасту коробку передач, що також передбачає наявність реверсивного ходу для екстреного вилучення сторонніх предметів. Можливість варіювання частоти обертання бункера дозволяє оперативно регулювати продуктивність агрегата. Це рішення також позитивно впливає на загальну експлуатаційну надійність машини та якісні показники кінцевого продукту.

Подрібнювальний апарат (ротор) оснащений молотками із шарнірним типом кріплення. Таке інженерне рішення мінімізує ризик серйозних поломок та аварійних ситуацій у разі потрапляння сторонніх предметів у робочу зону. Додатково, для підвищення надійності, підбарабання обладнане прохідною декою. Ця конструкція забезпечує вищу пропускну здатність та унеможливлює акумуляцію (зависання) подрібненої маси на виході. Наявність регульованої планки з протирізами під ротором надає можливість оперативно змінювати ступінь деструкції матеріалу.

Привід робочих органів може бути реалізований двома шляхами: від електродвигуна (для стаціонарного варіанта) або від вала відбору потужності (ВВП) та гідросистеми енергетичного засобу (для мобільного виконання у якості подрібнювача-роздавача).

Технологічний процес роботи агрегата відбувається наступним чином. Вихідна сировина (сіно, солома, сінаж у будь-якій формі – тюки, рулони) завантажується за допомогою навантажувачів (ПКУ-0,8, СНУ-550, ПЕ-0,8) у завантажувальний бункер. Бункер оснащений двома діаметрально протилежними пружними захоплювачами. Обертаючись, бункер-живильник переміщує матеріал по нерухомому днищу, забезпечуючи його дозовану та рівномірну подачу до подрібнювального ротора. Маса, що надходить на ротор, зазнає інтенсивного ударного впливу від молотків, які захоплюють її та спрямовують у підбарабання. Деструкція (подрібнення та розщеплення) матеріалу відбувається внаслідок комбінованої дії: прямих ударів молотків та їх взаємодії з протирізальними елементами (відсікаючим ножом 3 та

протиризами). Після обробки готовий продукт через вивантажувальний пристрій видаляється у бурт.

Регулювання продуктивності агрегата здійснюється двома способами: варіюванням частоти обертання бункера-живильника та зміною величини робочої зони (впровадження) молотків, що досягається підйомом або опусканням ліфтерів. Ступінь деструкції продукту контролюється шляхом активації (введення) або деактивації (виведення) планки протиризів.

Виходячи з технологічних вимог, конструкція подрібнювача повинна передбачати опцію регулювання ступеня подрібнення. Це необхідно для забезпечення середньозваженого розміру кінцевої фракції в діапазоні від 30 до 100 мм.

Показник продуктивності подрібнювальних агрегатів також значною мірою детермінується специфікою умов їхнього застосування. Наприклад, у випадку, коли вони експлуатуються в мобільному виконанні у якості подрібнювача-роздавальника, їхня продуктивність розраховується за допомогою виразу:

$$Q = 3,6 \frac{V \cdot q}{a_1 \cdot K}, \quad (2.1)$$

де  $V$  - робоча швидкість агрегату при видачі в годівницю, м/с. Для трактора МТЗ-80  $V = 0,5 \dots 1$  м/с;

$q$  - добова норма видачі корму на 1 голову, кг. Зазвичай для сіна –  $q = 4$  кг, для сінажу  $q = 18$  кг;

$a_1$  – фронт годування, який припадає на 1 голову. Для молодняка ВРХ  $a_1 = 0,4 \dots 0,7$ ; для корів -  $0,6 \dots 1,2$  м;

$K$  - кратність годування на добу. Зазвичай  $K = 2 \dots 3$ . Тоді при подрібненні і видачу сіна

$$Q = 3,6 \frac{0,5 \cdot 4}{1 \cdot 2} = 3,6 \text{ т/ч.}$$

При подрібненні і видачі сінажу в рулонах:

$$Q = 3,6 \frac{0,5 \cdot 18}{1 \cdot 3} = 10,8 \text{ т/ч.}$$

Діаметр бункера рівний 2200 мм вибирається з умови вільного завантаження в нього рулонів сіна та соломи з максимально можливим діаметром 1800 мм, а також можливості перевезення його автомобільним транспортом. Висота бункера приймається рівною 1300 мм з умови розміщення в ньому рулонів довжиною 1200 мм.

Довжину ротора  $L_p$  приймаємо з умови зрізання молотками матеріалу на половині діаметра днища, тобто приблизно 1100 мм. З конструктивних міркувань приймаємо  $L_p = 1020$  мм. За аналогією з раніше розробленими дробарками діаметр ротора по кінцях молотків приймемо рівним  $d_p = 530$  мм.

## 2.2. Обґрунтування параметрів молоткового апарату універсального подрібнювача рулонних кормів і підстилки

Відповідно до робочого процесу (рис. 2.1) молотки за один оберт бункера відокремлюють від шару матеріалу порцію об'ємом:

$$V = \pi r_6^2 H_1, \quad (2.2)$$

де  $r_6$  – радіус бункера, м;

$H_1$  – висота виходу молотків над днищем бункера (величини впродження молотків в матеріал або товщина шару, що зрізається), м.

У режимі холостого ходу (без навантаження) молоток, завдяки дії відцентрової сили, стабільно утримує радіальне положення без коливань. У момент взаємодії з матеріалом (перший удар по стеблу) робочий орган (молоток) відхиляється від радіалі на певний кут  $\alpha$ . Після проходження зони контакту відцентрова сила повертає його у вихідне положення відносно осі підвісу до наступного оберту. З метою спрощення подальшого теоретичного аналізу було запроваджено наступні припущення: Тривалість подачі матеріалу, що забезпечується бункером-живильником, є значно меншою за часовий інтервал

між послідовними проходженнями молотків.

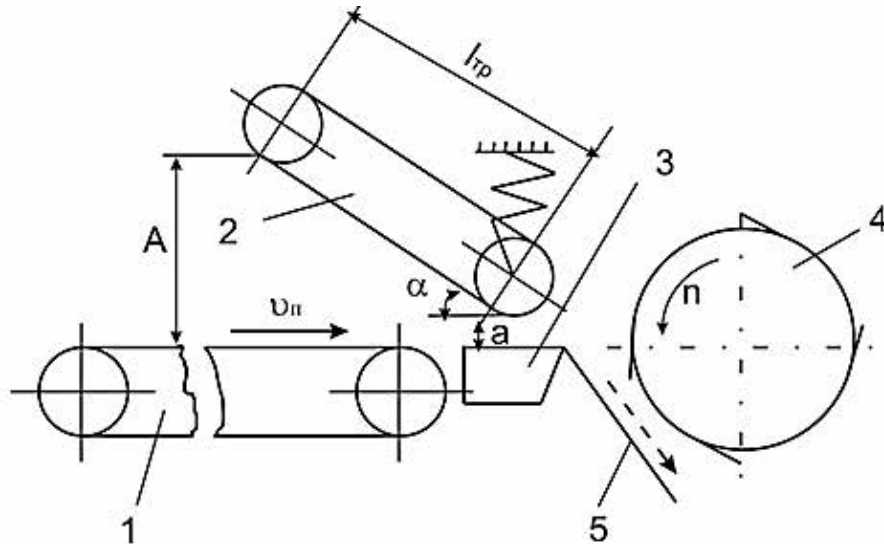


Рис. 2.1. Технологічна схема процесу подрібнення стеблових матеріалів запропонованим подрібнювачем: 1 – захоплювачі підпружинені; 2 – молоток; 3 – ліфтер; 4 – протириз; 5 – ніж

Тоді продуктивність подрібнювача складе:

$$Q = 60\pi r_0^2 N_1 \rho k_6 T_1 T_2, \quad (2.3)$$

де  $k_6$  - частота обертання бункера,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $\rho$  - щільність матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $T_1$  - коефіцієнт відставання швидкості матеріалу від швидкості бункера;  
 $T_2$  - коефіцієнт нерівномірності щільності маси, що подрібнюється.

Це дозволяє припустити, що абсолютна траєкторія кожного окремого молотка відносно масиву матеріалу є коловою. Процес подачі сировини до робочого органу характеризується як рівномірний. При цьому від загального масиву матеріалу відділяються однакові за об'ємом порції (товщиною шару  $H_1$ ) без утворення залишку. Теоретично доведено, що між величиною технологічного зазору  $H$  (між декою та кінцями молотків), довжиною молотка  $l_1$  (від осі підвісу) та кутом його відхилення  $\alpha$  від радіального положення існує пряма залежність. З певним рівнем допущення (наближення) можна вважати, що:

$$H = l_1(1 - \cos\alpha), \quad (2.4)$$

З формули (2.4) видно, що збільшення зазору між декою и молотками залежить від довжина молотка до осі підвіски и кута нахил молотків. Графічна залежність.

Збільшення зазору между декою и молотками, наведена на рисунку 2.2.

Розглянемо взаємодію вільно підвішеного молотка з початковим матеріалом, який подається обертовим бункером. Якщо на точку діє одночасно кілька сил, то вони, як це впливає з законом паралелограма сил, будуть еквівалентні одній силі, тобто рівнодіюча  $R$ , рівній геометричній сумі даних сил.

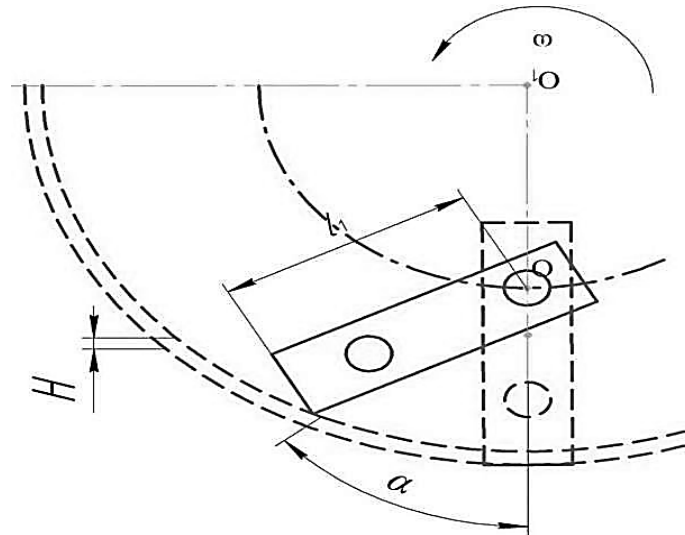


Рис. 2.2. Схема до визначення величини зазору між декою і молотками

Рівняння, що виражає основний закон динаміки, приймає в цьому випадку вигляд:

$$\bar{m}\alpha = \bar{R} \quad \text{або} \quad \bar{m}\alpha = \sum F_k \quad (2.5)$$

У разі переносно-обертального руху абсолютне прискорення матеріальної точки дорівнює геометричній сумі переносного, відносного і Кориолісового прискорень.

$$\bar{a} = \bar{a}^e + \bar{a}^r + \bar{a}^k, \quad (2.6)$$

де  $\bar{a}^e$  - переносне прискорення,  $\text{м/с}^2$ ;

$\bar{a}^r$  - відносне прискорення,  $\text{м/с}^2$ ;

$\bar{a}^k$  - кориолісове прискорення точки,  $\text{м/с}^2$ .

$$m(\bar{a}^e + \bar{a}^r + \bar{a}^k) = \sum F_k, \quad (2.7)$$

$$m\bar{a}^r = \sum \bar{F}_k - \bar{F}_e^{\text{ін}} - \bar{F}_k^{\text{ін}}, \quad (2.8)$$

де  $\bar{F}_e^{\text{ін}}$  - переносна сила інерції, Н;

$\bar{F}_k^{\text{ін}} = F_1$  - відцентрова сила інерції, Н;

$$\bar{F}_k^{in} = -m\bar{a}^k \quad (2.9)$$

де  $\bar{a}^k = 2(\bar{\omega}_e \times \bar{V}_r)$ .

Модуль Коріолісового прискорення визначали як модуль векторної множини:

$$|\bar{a}_k| = 2\omega_e V_r \sin(\bar{\omega}_e, V_r). \quad (2.10)$$

Напрямок Коріолісового прискорення визначається за правилом векторного добутку. Напрямки дії Коріолісової сили і прискорення показані на рис. 2.3.

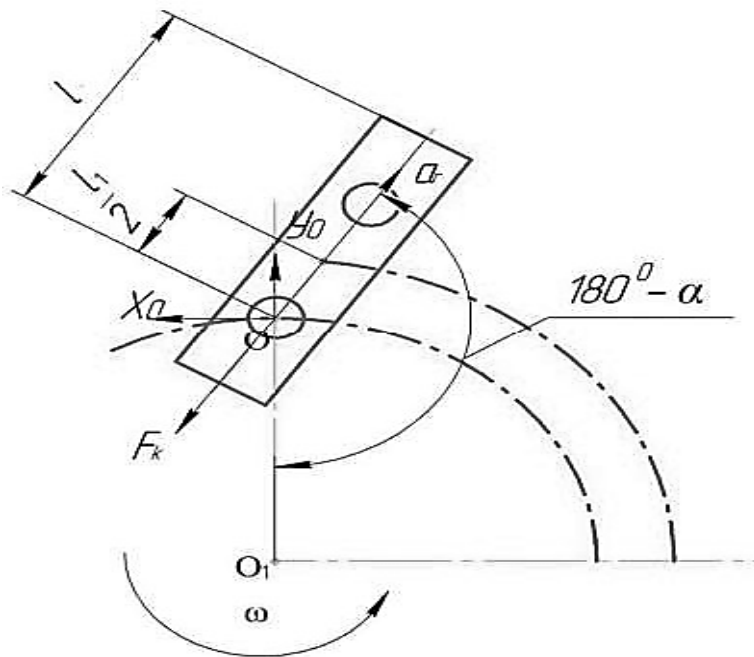


Рис. 2.3. Схема до визначення моменту від Коріолісової сили

На молоток діє реакція молотка в шарнірі кріплення  $(x_0, y_0)$ , сила тяжіння  $P$ , відцентрова сила інерції  $F_1$  і Коріолісова сила  $\bar{F}_k$ .

Виберемо центр приводу в т. О. Складові реакції зв'язку  $(x_0, y_0)$ , і Коріолісова сила не мають моментів щодо осей координат і не входять в рівняння моментів.

На молоток діють також сила тяжіння  $P$ , відцентрова сила  $F_1$  і сила руйнування  $P_1$  матеріалу. Сила опору повітря і сила тертя в шарнірі молотка не враховувалися. Молоток буде в рівновазі, коли виконується рівність:

$$M_{P_1} + M_P = M_{F_1}, \quad (2.11)$$

де  $M_{P_1}$ ,  $M_P$  та  $M_{F_1}$  – моменти відповідно від сили руйнування матеріалу, сили тяжіння молотка і відцентрової сили.

Визначимо момент від сили тяжіння молотка. При цьому приймаємо

припущення, що сила тяжіння  $P$  прикладена до центра частини молотка, розташованої вище осі підвіски (рис. 2.4). Силою ваги нижньої частини молотка, розташованої до осі підвіски, нехтуємо.

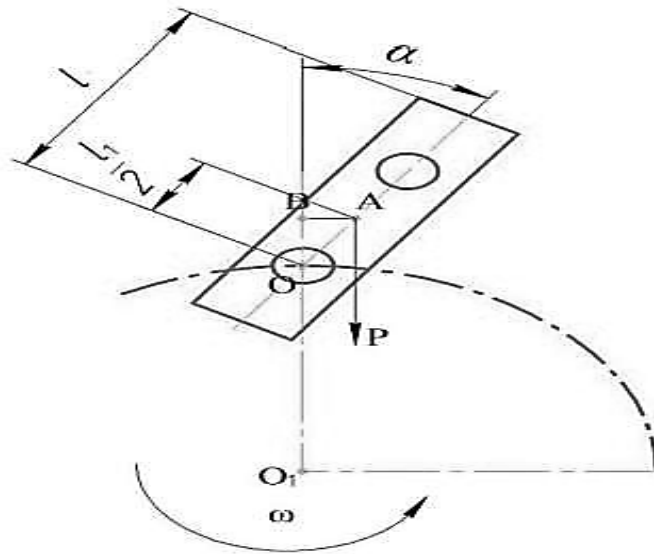


Рис. 2.4. Схема до визначення моменту від сили тяжіння

Плече дії сили тяжіння молотка  $P$  визначимо з  $\triangle OAB$ :

$$BA = \frac{l_1}{2} \sin \alpha. \quad (2.12)$$

Момент  $M_P$  сили  $P$  складе:

$$M_P = b a l_1 \rho \frac{l_1}{2} \sin \alpha = b a \rho \frac{l_1^2}{2} \sin \alpha. \quad (2.13)$$

де  $b, a$  - відповідно ширина і товщина молотка, м;

$l_1$  - довжина молотка від осі підвіски, м;

$\alpha$  - кут нахилу молотка відносно радіус-вектора, що проходить через осі підвіски молотка і обертання ротора, град.

Відцентрова сила  $F_I$  прикладена до центру тяжіння частини молотка, що розміщена вище осі підвіски молотка (точка А), і спрямована по радіус-вектору, що проходить через центр ваги молотка і центр обертання ротора.

Радіус-вектор, по якому діє відцентрова сила, розташований під кутом  $\alpha_2$  до радіус-вектора, що проходить через центри повороту молотка і обертання ротора. З  $\triangle O_1OA$  визначимо кут  $\alpha_2$ . У цьому трикутнику дано дві сторони  $r_1, l_1/2$  і кут  $O_1OA$  рівний  $180^\circ - \alpha^\circ$ .

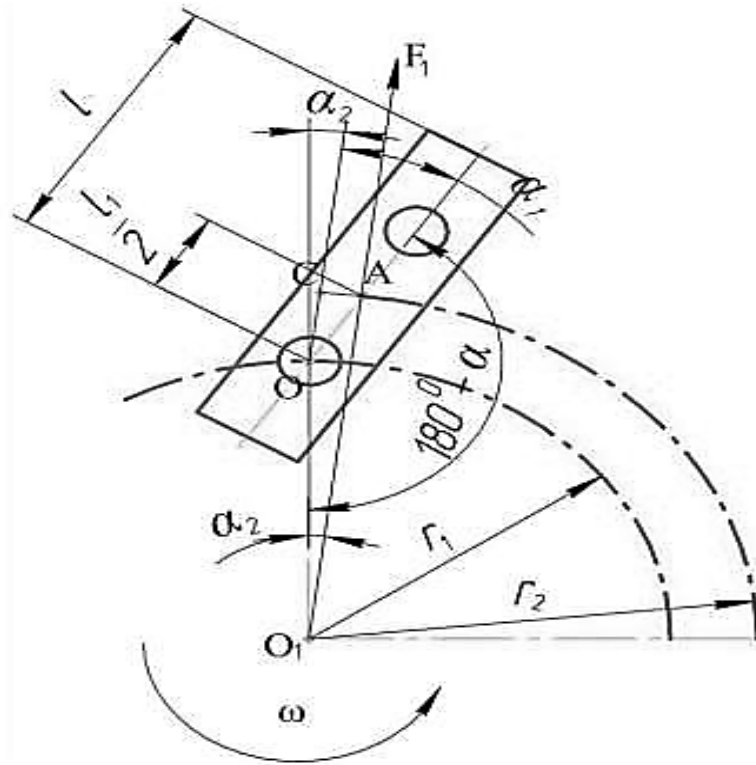


Рис. 2.5. Схема до визначення моменту від відцентрової сили

Знаходимо спочатку сторону  $r_2$  (радіус, що описаний центром тяжіння молока) за теоремою косинусів:

$$r_2^2 = \frac{l_1^2}{4} + r_1^2 - 2 \frac{l_1}{2} r_1 \cos (180 - \alpha), \quad (2.14)$$

Звідки

$$r_2 = \sqrt{\frac{l_1^2}{4} + r_1^2 - 2 \frac{l_1}{2} r_1 \cos (180 - \alpha)}, \quad (2.15)$$

Потім за теоремою синусів знаходимо:

$$\sin \alpha_2 = \frac{\frac{l_1}{2} \sin (180 - \alpha)}{\sqrt{\frac{l_1^2}{4} + r_1^2 - 2 \frac{l_1}{2} r_1 \cos (180 - \alpha)}}, \quad (2.16)$$

Звідки

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{l_1 \sin (180 - \alpha)}{2 \sqrt{\frac{l_1^2}{4} + r_1^2 - 2 \frac{l_1}{2} r_1 \cos (180 - \alpha)}}, \quad (2.17)$$

З  $\Delta OCA$  плече дії сили  $F_1$  рівне:

$$AC = \frac{l_1}{2} \sin (\alpha - \alpha_2) = \frac{l_1}{2} \sin \left[ \alpha - \arcsin \frac{l_1 \sin (180 - \alpha)}{2 \sqrt{\frac{l_1^2}{4} + r_1^2 - 2 \frac{l_1}{2} r_1 \cos (180 - \alpha)}} \right], \quad (2.18)$$

Так як  $F_1 = m \frac{V_M^2}{r_2}$ ,  $V = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi r^2}{30}$  і  $m = \frac{ab l_1 \rho}{g}$

де  $V_M$  – лінійна швидкість центра ваги молотка, м/с;  $m$  – маса молотка,



З  $\Delta$  ODE плече дії сили  $P_1$ :

$$OE = l_1 \cos \alpha_4 = l_1 \cos(\alpha - \alpha_3), \quad (2.21)$$

З  $\Delta$  O<sub>1</sub>OD визначим  $\alpha_3$ . У ньому дано дві сторони  $r$ ,  $l_1$  і кут O<sub>1</sub>OD = 180° -  $\alpha$ .

Знаходимо спочатку сторону  $r_3$  за теоремою косинусів:

$$r_3^2 = l_1^2 + r_1^2 - 2l_1r_1 \cos(180 - \alpha), \quad (2.22)$$

Звідки

$$r_3 = \sqrt{l_1^2 + r_1^2 - 2l_1r_1 \cos(180 - \alpha)}, \quad (2.23)$$

Потім за теоремою синусів знаходимо

$$\sin \alpha_3 = \frac{l_1 \sin(180 - \alpha)}{\sqrt{l_1^2 + r_1^2 - 2l_1r_1 \cos(180 - \alpha)}}, \dots \dots \dots (2.24)$$

Звідки

$$\alpha_3 = \arcsin \frac{l_1 \sin(180 - \alpha)}{\sqrt{l_1^2 + r_1^2 - 2l_1r_1 \cos(180 - \alpha)}}, \quad (2.25)$$

Підставляючи  $\alpha_3$  з виразу (2.25) в формулу (2.21) отримаємо:

$$OE = l_1 \cos(\alpha - \alpha_3) = l_1 \cos \left[ \arcsin \frac{l_1 \sin(180 - \alpha)}{\sqrt{l_1^2 + r_1^2 - 2l_1r_1 \cos(180 - \alpha)}} \right], \quad (2.26)$$

Тоді,

$$M_{P_1} = P_1 l_1 \cos(\alpha - \alpha_3) = l_1 \cos \left[ \arcsin \frac{l_1 \sin(180 - \alpha)}{\sqrt{l_1^2 + r_1^2 - 2l_1r_1 \cos(180 - \alpha)}} \right], \quad (2.27)$$

Підставляючи значення  $M_{P_1}$ ,  $M_p$  і  $M_{F_1}$  з виразів (2.27), (2.13) і (2.20) в вираз (2.10) отримаємо:

$$P_1 l_1 \cos \left[ \arcsin \frac{l_1 \sin(180 - \alpha)}{\sqrt{l_1^2 + r_1^2 - 2l_1r_1 \cos(180 - \alpha)}} \right] + bap \frac{l_1^2}{2} \sin \alpha = \frac{bal_1 \rho \pi^2 r_2 n^2}{30^2 g} \sin \left[ \alpha - \arcsin \frac{l_1 \sin(180 - \alpha)}{2 \sqrt{\frac{l_1^2}{4} + r_1^2 - 2 \frac{l_1}{2} r_1 \cos(180 - \alpha)}} \right], \quad (2.28)$$

Замінюючи значення  $r_2$  з виразу отримаємо:

$$P_1 l_1 \cos \left[ \arcsin \frac{l_1 \sin(180 - \alpha)}{\sqrt{l_1^2 + r_1^2 - 2l_1r_1 \cos(180 - \alpha)}} \right] + bap \frac{l_1^2}{2} \sin \alpha =$$

$$= \frac{bal_1\rho\pi^2r_2n^2\sqrt{\frac{l_1^2}{4}+r_1^2-2\frac{l_1}{2}r_1\cos(180-\alpha)}}{30^2g\cdot 2} \cdot \sin\left[\arcsin\frac{l_1\sin(180-\alpha)}{\sqrt{\frac{l_1^2}{4}+r_1^2-2\frac{l_1}{2}r_1\cos(180-\alpha)}}\right], \quad (2.29)$$

або

$$n = \sqrt{\frac{30^2g\cdot 2\left\{P_1l_1\cos\left[\arcsin\frac{l_1\sin(180-\alpha)}{\sqrt{\frac{l_1^2}{4}+r_1^2-2l_1r_1\cos(180-\alpha)}}\right]+bap\frac{l_1^2}{2}\sin\alpha\right\}}{bal_1\rho\pi^2r_2n^2\sqrt{\frac{l_1^2}{4}+r_1^2-2\frac{l_1}{2}r_1\cos(180-\alpha)}\sin\left[\arcsin\frac{l_1\sin(180-\alpha)}{\sqrt{\frac{l_1^2}{4}+r_1^2-2\frac{l_1}{2}r_1\cos(180-\alpha)}}\right]}}, \quad (2.30)$$

З виразів (2.29) і (2.30) видно, що всі параметри подрібнювального пристрою: геометричні розміри і радіус підвіски молотків, кут відхилення молотків, частота обертання ротора знаходяться в складному взаємозв'язку між собою і руйнуючою силою матеріалу.

Виразити зусилля руйнування матеріалу молотком  $P_1$  аналітичним шляхом в даний момент складно. Тому його значення визначали експериментальним шляхом. Досліди показали, що на подрібнювачі з радіусом, описуваних кілець молотків 265 мм, і довжиною молотків від осі підвісу 130 мм при продуктивності 6,4 т/год на соломі потужність, що необхідна на привід ротора без холостого ходу (15 кВт), склала 33,6 кВт. При частоті обертання  $n = 2100 \text{ хв}^{-1}$  крутний момент на валу ротора становить  $M = 973,8 \cdot N/n = 973,8 \cdot 33,6/210$

Подрібнювач обладнаний 40 молотками, які торкаються з матеріалом тільки на половині кола, які вони описують. Тому можна вважати, що крутний момент створюється тільки 20 молотками. Припустимо, що зусилля руйнування матеріалу прикладено до кінців молотків. Тоді на кожен молоток діє зусилля руйнування матеріалу, яке рівне:

$$P_1 = \frac{M}{20(r_1 + l_1)} = 2,94\text{кг} \cdot 10\text{Н} = 29,4\text{Н}$$

На вищезазначеному подрібнювачі при зміні подачі матеріалу шляхом зміни частоти обертання завантажувального бункера була отримана також

продуктивність, яка рівна 2,8 т/год при вживаній потужності разом з потужністю холостого ходу  $N = 27,9$  кВт і 9,4 т/год при  $N = 90$  кВт . Застосовуючи вищеописану методику, було визначено, що в першому випадку зусилля руйнування матеріалу  $P_1$  становить 11,1 Н в другому випадку  $P_1 = 65$  Н. Тому межі варіювання зусилля руйнування матеріалу  $P_1$  приймаємо від 10 до 80 Н. Отримане значення  $P_1$  трохи вище значень, визначених раніше іншими авторами з обертовими ножами. Це викликано тим, що в нашому випадку сила  $P_1$  включає в себе не тільки сили відокремлення матеріалу від масиву, але і сили руйнування його на протирізах, прискорення відокремлених частинок корму і сили тертя матеріалу про деку з протирізів.

Рівняння (2.4), (2.29) і (2.30) проаналізують кількісний зв'язок між параметрами подрібнювального ротора молоткового типу і вибирають його раціональні значення, які можна застосувати при конкретних умовах експлуатації.

### 2.3 Енергетична оцінка процесу подрібнення рулонних кормів

Потужність, що витрачається на привід подрібнювача, складається з потужності на привід ротора та обертового бункера. Потужність, витрачена на привід ротора, складається з потужності холостого ходу ротора і потужності на подрібнення матеріалу.

Тоді,

$$N_{\text{сум}} = N_{\text{ХХ}} + N_{\text{под}} + N_{\text{б}}, \quad (2.31)$$

де  $N_{\text{сум}}$  - сумарна потужність, витрачена на привід подрібнювача, кВт;

$N_{\text{ХХ}}$  - потужність холостого ходу ротора, кВт

$N_{\text{под}}$  - потужність, витрачена на подрібнення матеріалу, кВт;

$N_{\text{б}}$  - потужність, витрачена на привід обертання бункера подрібнювача,

У свою чергу, потужність, що безпосередньо витрачається на процес деструкції сировини, формується з трьох ключових складових. До них належать енерговитрати на відділення порції матеріалу від загального масиву, енерговитрати на його подальше руйнування при взаємодії з протирізами, а також енерговитрати, необхідні для подолання сил тертя матеріалу об поверхню

деки. Слід зазначити, що аналітичне моделювання (виведення формул) кожної з цих компонент потужності є задачею високої складності. Це зумовлено суттєвою варіативністю та нестабільністю ключових вхідних параметрів процесу, таких як продуктивність (подача) та комплекс фізико-механічних властивостей сировини (вологість, структурний стан, розмірні характеристики тощо). Тому  $N_{\text{под}}$  виразимо через сумарне зусилля  $P_1$  руйнування матеріалу молотком. Якщо подрібнювач обладнаний  $z$  молотками, які входять з матеріалом тільки на половині кола, які вони описують, то можна вважати, що крутний момент створений лише  $\frac{z}{2}$  молотками. Врахувавши минулі дослідження зусилля на кожен молоток матиме вид:

$$P_1 = \frac{973.8N_{\text{под}}^2}{nz(r_1+l_1)}, \quad (2.32)$$

де  $z$  – кількість молотків, шт.

Звідки

$$N_{\text{под}} = \frac{P_1nz(r_1+l_1)}{1947.6}, \quad (2.36)$$

Експериментальними дослідженнями встановлено, що в разі подрібнення матеріалу до частинок розміром 20-50 мм зусилля  $P_1$  з продуктивністю  $Q$  пов'язана залежністю:

$$P_1 = 0,799Q - 1,554, \quad (2.34)$$

Підставляючи (2.33) у вираз (2.32), отримаємо:

$$N_{\text{под}} = \frac{nz(r_1+l_1)(0,799Q - 1,554)}{1947.6}, \quad (2.35)$$

Аналіз рівняння (2.35) демонструє, що потужність, яка споживається процесом деструкції матеріалу, має пряму пропорційну залежність від низки факторів. До них належать: частота обертання ротора, загальна кількість молотків, геометричні параметри молоткового апарату та показник продуктивності.

Загальна потужність, необхідна для привода бункера, є сукупністю декількох складових. Вона включає потужність для подолання сил тертя сировини об нерухоме днище, потужність для компенсації сил опору, що чинять молотки матеріалу, який подається, а також потужність на подолання сил опору коченню опорних роликів по напрямних та втрати у передавальному механізмі привода.

Розрахунок потужності, що витрачається на подолання сил тертя матеріалу об днище, базується на наступних теоретичних міркуваннях. Вводиться припущення, що бічні стінки бункера практично не зазнають бічного тиску з боку сировини. За такої умови приймається, що вертикальний тиск, який матеріал чинить на днище, є рівним:

$$P_{\epsilon} = \rho H_p, \quad (2.36)$$

Загальна сила тиску матеріалу на днище складе:

$$P = \pi r_0^2 \rho H_p, \quad (2.37)$$

Для подолання сили тертя матеріалу по днищу необхідний момент, який рівний:

$$M_{TP} = \frac{\pi r_0^2 \rho H_p f}{2}, \quad (2.38)$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя матеріалу про днищу.

Витрати потужності на подолання цього моменту складуть:

$$N = \frac{\pi r_0^2 \rho H_p f n_0}{1947,6}, \quad (2.39)$$

Розрахунок за формулою (2.39) показав, що при частоті обертання  $n_0 = 7 \text{ хв}^{-1}$  потужність  $N$  не перевищує 1,1 кВт. Спостереження показали, що крім сил тертя матеріалу про днищу, мають місце сили, які викликані защемленням матеріалу між стінками бункера і днищем. Так як це явище носить випадковий характер, то визначити зазначену додаткову силу обертання бункера як і силу протидії молотків матеріалу, що подається, аналітичним шляхом досить складно.

Тому в інженерних розрахунках сумарну потужність, яка витрачається на привід бункера, більш доцільно визначити по емпіричній залежності:

$$N_0 = 0,047n_0^2 - 0,033n_0 + 0,718, \quad (2.40)$$

Тоді сумарна потужність на привід подрібнювача складе:

$$N_{\text{сум}} = N_{\text{ХХ}} + \frac{nz(r_1+l_1)(0,799Q-1,554)}{1947,6} + 0,047n_0^2 - 0,33n_0 + 0,718, \quad (2.41)$$

Потужність холостого ходу  $N_{\text{ХХ}}$  ротора подрібнювача, виходячи з теорії молотильного барабана визначимо як:

$$N_{\text{ХХ}} = (R' f r_{\text{ц}} + \tau_m S_i) \omega_p + \rho_B F_i \epsilon r_0^3 \omega_p^3, \quad (2.42)$$

де  $R'$  - сумарна реакція на опорах ротора, Н;

$f$  - коефіцієнт тертя. Для роликів підшипників - 0,008;

$r_{\text{ц}}$  - радіус цапфи, м;

$\tau_m$ - момент інерції, віднесений до одиниці бічній поверхні, Н/см<sup>2</sup>;

$S_i$ - сумарна бокова поверхня обертових частин ротора, см<sup>2</sup>;

$\omega_p$  - кутова швидкість ротора, рад/с;

$\rho_e$  - щільність повітря,  $\rho_e = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>;

$F_i$ - площа лобовій поверхні обертових частин ротора (молотки), м<sup>2</sup>;

$\varepsilon$  - коефіцієнт пропорційності,  $\varepsilon = 0,56 \dots 0,58$ ;

$r_0$  - відстань центру лобовій поверхні від осі обертання ротора, м.

Отримані вирази (2.33), (2.34), (2.35), (2.39), (2.40), (2.41) справедливі тільки для подрібнювача з прохідною декою, що забезпечує подрібнення матеріалу до частинок розміром 30-100 мм. При обладнанні подрібнювача з коловою решітчастою декою з метою отримання більш дрібної фракції матеріалу (борошна) зазначені вирази приймуть інший вид.

## **РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **3.1 Програма і завдання експериментальних досліджень**

Ключовою метою експериментальної частини роботи була верифікація теоретичних положень, розроблених у другому розділі. Окрім цього, завдання включали визначення емпіричних коефіцієнтів для отриманих аналітичних залежностей та експериментальне обґрунтування тих раціональних параметрів рулонного подрібнювача, які було складно встановити виключно аналітичними методами.

Відповідно до поставлених завдань було сформовано програму теоретично-аналітичних експериментальних досліджень та виготовлено лабораторний зразок подрібнювального агрегата.

Програма теоретично-аналітичних експериментальних досліджень передбачала:

- Моделювання та налагодження експериментального зразка подрібнювача.
- Визначення та аналіз енергетичних характеристик агрегата за різних експлуатаційних режимів роботи.
- Вивчення ступеня впливу конструктивних та кінематичних факторів на вихідні характеристики процесу подрібнення рулонної сировини.
- Ідентифікацію раціональних параметрів функціонування подрібнювача, що забезпечують прийнятний рівень енергетичних витрат.

### **3.2. Установка і обладнання для проведення теоретично-аналітичних експериментальних досліджень**

Реалізація експериментальної частини роботи стала можливою завдяки лабораторному зразку подрібнювального агрегата. Цей зразок призначений для деструкції рулонних кормів і підстилки, незалежно від форми їхньої заготівлі (тюки, рулони довільних габаритів).

Конструктивно зразок включає наступні основні вузли: вертикальний ротаційний бункер (що виконує функцію живильника), молотковий подрібнювальний ротор, підбарабання (оснащене відрізним ножем, гребінкою та одним рядом регульованих протирізів), а також приводи ротора та бункера.

Конструкція вертикального бункера, що має два пружних захоплювачі, забезпечує стабільну та рівномірну подачу сировини по нерухомому днищу до зони подрібнення, незалежно від її початкової форми (тюки, рулони). Виведення готового (подрібненого) продукту з робочої зони здійснюється активним впливом ротора.

Технологічний процес деструкції сировини відбувається в такій послідовності. Вихідна сировина (сіно, солома, сінаж) завантажується за допомогою технічних засобів (ПКУ-0,8, СНУ-550, ПЕ-0,8) у завантажувальний бункер, оснащений двома діаметрально розміщеними пружними захоплювачами. Ротація бункера забезпечує переміщення матеріалу по нерухомому днищу та його дозовану подачу до подрібнювального ротора. Сировина, що надходить у робочу зону, зазнає інтенсивного ударного впливу молотків, які захоплюють її та спрямовують у простір підбарабання. Деструкція (подрібнення та розщеплення) матеріалу є наслідком комбінованого впливу: ударів молотків та їх взаємодії з пасивними елементами – відсікаючим ножем, зубами гребінки та протирізами. Після обробки готовий продукт виводиться через вивантажувальний пристрій у зону накопичення (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Технічна характеристика подрібнювача кормів

Продуктивність, т / год	до 5
Потужність, потрібна на привід, кВт	до 80
Діаметр бункера, мм	2400
Діаметр кола, що описується молотками, мм	550
Частота обертання бункера, хв	1,5-10
Частота обертання ротора, хв	2200
Висота завантаження корму, мм	2370
Висота вивантаження корму, мм	450-800
Габаритні розміри, мм	4000x2310x2170x2170
Загальна маса, кг	2750

Регулювання продуктивності агрегата досягається двома шляхами: варіюванням частоти обертання бункера та зміною робочої зони (величини виступу) молотків у завантажувальний бункер. Контроль над ступенем деструкції сировини реалізовано шляхом активації (введення) або деактивації (виведення) блоку протиризів.

Оцінка ключових енергетичних параметрів технологічного процесу на стаціонарному зразку проводилася із застосуванням спеціалізованого вимірювального комплексу. Цей комплекс включав трифазний лічильник електроенергії ЦЕ 685, обладнаний трьома трансформаторами струму, та прилад К505, що забезпечував підсумовування показників потужності по кожній фазі (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Вимірювальна апаратура

Докладний перелік приладів і вимірювального обладнання для проведення експериментів представлений в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Прилади та обладнання

№ п/п	Найменування	Позначення	Призначення
1	2	3	4
2	Трактор	ПМЗ-6	Навантаження рулонів в бункер подрібнювача

Продовження таблиці 3.2

3	2	3	4
4	Стаціонарний подрібнювач		Досліджуваний об'єкт
5	Секундомір		Визначення тривалості досліджень
6	Солома в рулонах	Озима пшениця	Подрібнювальний матеріал
7	Сіно в рулонах	Люцерна	
8	Тахометр	ТЧ10-Р	Вимірювання частоти обертання ротора подрібнювача
9	Динамометр	ДПУ-2-2	Визначення пропускної здатності, вага рулонів
10	Лінійка метрова		Визначення висоти шару матеріалу в бункері
11	Лінійка 50 см		Визначення довжини початкового і подрібненого продукту
12	Шафа сушильна	СЕСШ-3М	Визначення вологості
13	Вага лабораторна (електрона)		Визначення маси проб матеріалу
14	Вимірювальний комплекс	К505	Вимірювання загальної потужності на кожній фазі
15	Трьохфазний лічильник з трьома трансформаторами струму	ЦЕ685	Вимірювання електричної енергії

### 3.3 Методика проведення експериментальних досліджень і визначення основних характеристик матеріалу

Верифікація працездатності розробленої конструкції та експериментальні дослідження проводились із використанням сировини, заготовленої у рулонах, а саме соломи озимої пшениці та сіна люцерни.

Попередній візуальний огляд підтвердив відповідність якості вихідного матеріалу встановленим вимогам.

Процедура відбору проб для аналізу вологості сировини проводилася відповідно до стандартизованої методики. Для кожної повторності дослідження вологість визначали термогравіметричним методом. Це передбачало висушування наважок масою 3–5 г у сушильній шафі за температурного режиму 105–110°C протягом 45–55 хвилин. Після завершення процесу висушування, бюкси з пробами охолоджували та проводили контрольне зважування.

Розміри рулонів сіна та соломи відповідно дорівнювали: діаметр 1,6 і 1,8 м, висота 1,2 і 1,2 м. Вологість сіна становила 10 %, соломи 10-45 %. Середній розмір неподрібненого сіна становив 220 мм, соломи 284 мм. Об'ємна маса сіна в рулоні дорівнювала 83 кг/м<sup>3</sup>, соломи 110 кг/м<sup>3</sup>.

Оцінка фізико-механічних властивостей кормової сировини проводилася відповідно до чинних стандартних методик. Зокрема, аналіз гранулометричного складу здійснювався згідно з державними стандартами.

Для визначення фракційного складу вихідного (неподрібненого) матеріалу формувалася загальна проба масою не менше 4 кг. Відбір проб для цього проводився методом Квінкенса (з п'яти різних місць). Згодом, із загальної проби виділялася середня проба масою 0,2–0,5 кг, призначена для безпосереднього лабораторного аналізу, яка маркувалася відповідною етикеткою.

В середній пробі вимірювали всі частинки і розподіляли по класах: до 10, 11-20, 21-50, 51-75 і понад 75 мм. Частинки зважувалися по класах і розраховувалися в відсотковому співвідношенні.

Насипну масу сіна, соломи визначали шляхом заповнення ящика розмірами 50 × 50 × 40 см при вільному падінні корму з висоти 20 см від його верхнього краю. Зважену масу корму перераховували на 1 м<sup>3</sup>. Повторність виконували триразовою.

Ємність з продуктом і без нього зважували на вагах РП-150Ш13 з точністю 10 г і розраховували вихідну величину.

$$\gamma = \frac{G_1 - G_o}{W_m 10^3}, \quad (3.1)$$

де  $G_1, G_o$  - відповідно маса мірної ємності з продуктом і без нього, г;

$W_m$  - корисна місткість мірної ємності, м<sup>3</sup>.

По закінченню вимірів і розподілу часток по фракціям, встановлювали середньозважений розмір частинок.

За зміненою довжиною частинок різання визначали ступінь подрібнення грубих стеблових кормів:

$$\lambda_{\text{под}} = \frac{a_{\text{ср}}}{l_{\text{ср.зв}}}, \quad (3,2)$$

де  $a_{\text{ср}}$  – середньозважений розмір початкового продукту подрібнювання, мм;

$l_{\text{ср.зв.}}$  - середньозважений розмір кінцевого продукту подрібнювання, мм;

Середньозважений розмір кінцевого продукту подрібнювання визначемо за формулою:

$$l_{\text{ср.зв}} = \frac{\frac{1}{2}G_1 + \dots + \frac{l_{n-1} + l_n}{2}G_n}{G_o}, \quad (3,3)$$

де  $l_1, l_2 \dots l_n$  - довжина частинок по фракціям, мм;

$G_1, G_2 \dots G_n$  - маса кожної фракції, г;

$G_o$  - маса проби, г.

Для визначення ступеня розщеплення стебел кормів з проби виділяли розщеплені і нерозщеплені частки із загальної маси і розраховуючи відсоток розщеплених решток.

### **3.4 Методика визначення залежності продуктивності подрібнювача від частоти обертання бункера**

Під час експериментальної частини роботи, спрямованої на визначення кореляції між продуктивністю агрегата та частотою обертання бункера, в якості вихідної сировини використовувалися рулони сіна люцерни та соломи озимої пшениці. Процедура досліду передбачала попереднє завантаження рулону в бункер. Для забезпечення чистоти експерименту, всі побічні фактори, здатні вплинути на процес подачі матеріалу, були стабілізовані на константних рівнях. Зокрема, висота шару матеріалу в бункері підтримувалася на рівні  $h_m = 1,2$  м, а

підпружинені захоплювачі були зафіксовані у максимально розгорнутому положенні.

Змінною величиною в дослідах була частота обертання бункера, яка перебувала в межах варіювання від 1,79 до 6,8 об/хв.

Реалізація експериментальних досліджень відбувалася за наступним алгоритмом: після подачі звукового сигналу активували привід подрібнювального ротора. Після стабілізації його обертання (досягнення стійкого робочого режиму), важіль приводу бункера встановлювали у положення, що відповідає частоті 1,5 об/хв. Одночасно з початком обертання бункера здійснювали запуск секундоміра для фіксації часу досліду.

Матеріал, що подавався внаслідок ротації бункера, захоплювався робочими органами ротора та через вивантажувальне вікно спрямовувався на контрольний полігон. По завершенню кожного досліду, тривалість якого була суворо регламентована (30 с), проводили замір зміни висоти рулону в бункері, фіксуючи показник у робочому журналі. Маса обробленого (подрібненого) матеріалу визначалася розрахунковим шляхом за формулою:

$$m = \rho \pi \frac{D^2}{4} (h_2 - h_1), \quad (3,4)$$

де  $h_1$  і  $h_2$  – відповідно початкова і кінцева висота рулону, м.

Подібний порядок проведення експериментальних досліджень дотримувався для всіх рівнів частоти обертання бункера. На кожному із зазначених рівнів частоти обертання бункера повторність досвіду дорівнювала трьом. Величину подачі визначали за формулою:

$$Q = \frac{3600m}{t}, \quad (3,5)$$

де  $m$  - маса готового продукту, кг;

$t$  - час проходження досліду, с.

За результатами експериментальних досліджень були побудовані графіки залежностей:  $Q = f(n_0)$ .

### 3.5 Методика встановлення залежності продуктивності від висоти матеріалу в бункері

Для встановлення цієї залежності, аналогічно до попереднього випадку, в якості вихідної сировини використовувалися солома озимої пшениці та сіно люцерни. Усі побічні фактори, здатні вплинути на величину подачі, були стабілізовані на константних рівнях: підпружинені захоплювачі зафіксовано в максимальному робочому положенні, а частота обертання бункера підтримувалася на рівні 4,5 об/хв.

Єдиним керованим (змінним) фактором у даній серії дослідів виступала висота (товщина) шару матеріалу в бункері, яка варіювалася на чотирьох фіксованих рівнях: 0,2 м, 0,4 м, 0,6 м та 1,2 м.

Методика проведення експерименту, включно з кількістю повторностей для кожного з визначених рівнів висоти матеріалу, повністю відповідала протоколу, описаному в попередніх дослідженнях.

За результатами експериментальних досліджень були побудовані графіки залежностей  $Q = f(h_m)$ .

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ І ЇХ АНАЛІЗ

### 4.1 Впливи факторів конструкції на процес подрібнення рулонних матеріалів

За результатами, отриманих дослідниками, виділено наступні фактори, які впливають на якість подрібнення рулонного матеріалу:

- величина подачі матеріалу до робочого органу;
- вологість початкового матеріалу;
- колова швидкість робочих органів;
- величина зазору між кінцями молотків і декою;
- тип і конструкція молотків;
- тип деки;
- кількість молотків ротора;
- число осей підвісу молотків;
- діаметр ротора;
- число молотків в пакеті.

Кількість варійованих факторів в експерименті була обмеженою, оскільки технічні характеристики досліджуваного зразка пристрою для подрібнення мають фіксовані параметри, які неможливо оперативно змінювати. Незважаючи на ці конструктивні обмеження, кінцевий матеріал, що отримується, відповідає зоотехнічним вимогам щодо відсоткового вмісту різних фракцій (тобто ступеня подрібнення). З огляду на це, критерієм оптимізації обрано середньозважену довжину частинок готового продукту.

Експериментальна частина досліджень проводилася за відомими методикам. Реалізація композиційного ортогонального плану експерименту представлена в таблиці 4.1. Ортогональність даному експерименту дає спеціальне перетворення квадратичних змінних  $x_i^2$ .

Перетворення має вигляд:

$$x'_{iu} = x_{iu}^2 - \overline{x_i^2} = x_{iu}^2 - \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2, \quad (4.1)$$

де  $u$  - номер дослідів,  $u = 1, 2 \dots N$ ;

$x_{iu}$  - значення факторів в  $u$ -му досліді  $i$ -й повторності.

Отже, вираз коефіцієнта квадратичних ефектів буде розраховуватися за формулою:

$$b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N x'_{iu} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^N (x'_{iu})^2}, \quad (4,2)$$

де  $i$  - порядковий номер стовпчика матриці експериментів,  $i = 0, 1, 2 \dots$ ;  $y_u$  - середньоарифметичне значення параметра оптимізації в  $u$ -му досліді.

Таблиця 4.1. Матриця планування і результати експерименту з визначення середньозваженої довжини подрібненого матеріалу

№ досліді	Фактор						Середньозважена довжина подрібнення матеріалу, мм			
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	(X' <sub>1</sub> ) <sup>2</sup>	(X' <sub>2</sub> ) <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>ср</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	+	-	-	+0,33	+0,33	+	31,8	32,5	34,1	32,8
2	+	+	-	+0,33	+0,33	-	74	73,4	74,9	74,1
3	+	-	+	+0,33	+0,33	-	25,2	27	26,4	26,2
4	+	+	+	+0,33	+0,33	+	62,6	63,1	64,2	63,3
5	+	0	0	-0,67	-0,67	0	41,2	43	43,3	42,5
6	+	+	0	+0,33	-0,67	0	68,1	69,3	68,7	68,7
7	+	-	0	+0,33	-0,67	0	28,9	30,6	29	29,5
8	+	0	+	-0,67	+0,33	0	35,2	37,2	38	36,8
9	+	0	-	-0,67	+0,33	0	47,1	48,6	48,6	48,1
Σ	9	6	6	2	2	4				

Обробка дослідних даних проводилася за допомогою обчислювального пакета MathCad for Windows. Утворені результати дозволили отримати математичну модель процесу у вигляді полінома другого ступеня:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} (x'_1)^2 + b_{22} (x'_2)^2$$

Наступна обробка експериментальної частини являла собою вираз: однорідності оцінок дисперсії за допомогою критерію Кохрена, довірчої помилки за допомогою критерію Стьюдента і перевірки на адекватність отриманої математичної моделі за критерієм Фішера.

Всі вище перераховані критерії перевірялися на однаковому рівні значущості 0,05.

В ході визначення значення G - критерію використано формулу:

$$G = \frac{S^2(y_{uk})_{max}}{\sum_{u=1}^N S^2(y_{uk})}, \quad (4,3)$$

де  $S^2(y_{uk})$  - максимальна порядкова дисперсія помилки дослідження;

$\sum_{u=1}^N S^2(y_{uk})$  - сума порядкової дисперсії помилки дослідження.

Розрахунки показують, значення  $G_{розр.} = 0,235$  менше табличного значення  $G_{табл.} = 0,4775$ . Отже, робимо висновок, що точність вимірів і прийняті в дослідженні інтервали варіювання цілком достовірні. Таким чином, гіпотеза однорідності дисперсії приймається.

Для визначення значущості коефіцієнтів рівняння регресії довірчий інтервал розраховували при табличному значенні  $t$  – критерію рівним:

$$\pm \Delta b_i = \pm t \cdot (S_{bi}^2), \quad (4,4)$$

де  $\Delta b$  - довірчий інтервал для коефіцієнтів регресії;

$t$  - табличне значення критерію Стьюдента;

$S_{bi}$  - квадратична помилка коефіцієнтів рівняння регресії.

Розрахункові значення коефіцієнтів рівняння регресії і їх дисперсії представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Коефіцієнти регресії і значення дисперсії

Коефіцієнт регресії	Середньозважена довжина подрібнювального матеріалу	
	Значення коефіцієнта регресії	Значення дисперсії
$b_0$	42,456	0,328
$b_1$	19,6	0,493
$b_2$	-4,783	0,493
$b_{12}$	-1,05	0,738
$b_{11}$	6,633	1,477
$b_{22}$	-0,017	1,477

Табличне значення  $t_{табл.} = 1,734$ .

Відповідно за розрахунків, що були виконані за вище представленими формулами довірчі інтервали для кожних коефіцієнтів рівняння регресії будуть мати наступні значення:

$$\pm b_0 = 1,2; \pm b_{1,2} = 1,471; \pm b_{12} = 1,8; \pm b_{11,22} = 2,546$$

Аналізуючи отримані розрахункові значення таблиці, робимо висновок, що не значущими будуть коефіцієнти  $b_{12}$  і  $b_{22}$ , тому що чисельне їх значення менше абсолютного значення довірчого інтервалу.

Таким чином, математична модель в закодованій формі, що одержана в результаті застосування композиційного ортогонального плану другого порядку, має вигляд:

$$y = 42.456 + 19.6x_1 + 4.783x_2 + 6.633x_1^2, \quad (4,5)$$

Для наочного уявлення виду отриманого рівняння, представимо рівняння у вигляді тривимірної поверхні (рис. 4.1).

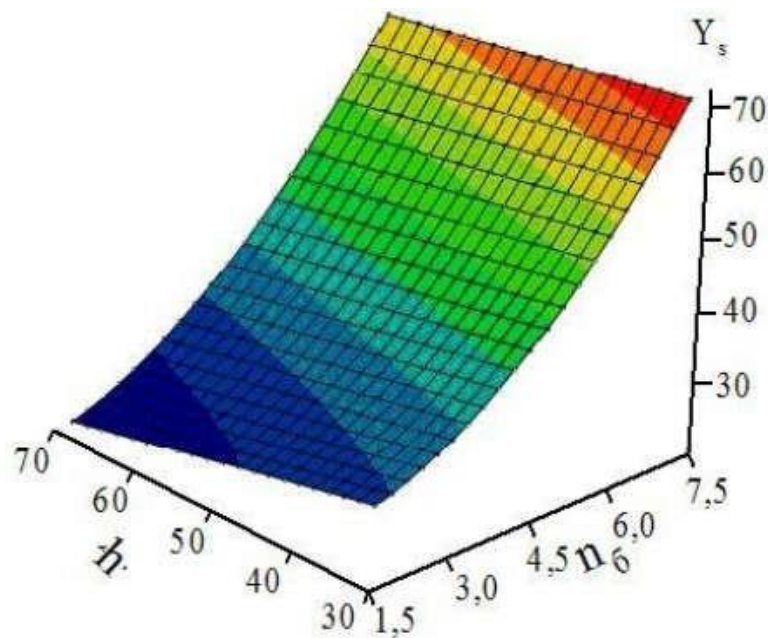


Рис. 4.1 - Поверхня відгуку середньозваженої довжини різання

Перевірка адекватності отриманої моделі показала, що  $F_{розр.} = 1,994$ ,  $F_{таб} = 2,8$ . Звідси виходить, що гіпотеза адекватності моделі приймається. Тоді в розкодованому виді формула приймає вид:

$$L_{ср} = 40,2 - 0,07n_6 - 0,24\tau + 0,73n_6^2, \quad (4,6)$$

Щоб визначити оптимальні значення розглянутих факторів, скористалися методом «ладж-аналіз», який базується на методі невизначених множників Лагранжа. Для вибору оптимального режиму з рівняння регресії (4.5) становили наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} (b_{11} - \lambda) + 0.5b_{12}x_2 + 0.5b_1 = 0; \\ 0.5b_{21}x_1 + (b_{22} - \lambda)x_2 + 0.5b_2 = 0. \end{cases}$$

На величину  $\lambda$  накладали обмеження, яке визначається параметром Хорли. У нашому випадку можливі значення  $\lambda$  лежали в межах:

$$\text{для середньозваженої довжини різання:} \\ -13 < \lambda < 13, \quad (4,7)$$

Задаючись значеннями  $\lambda$  з інтервалі (4.7) за рівнянням (4.5) був розрахований оптимальний режим процесу подрібнення стеблових кормів для середньозваженої довжини різання. Результат розрахунку показав, що при значеннях  $x_1 = -3,657$ ,  $x_2 = 13,334$  і  $\lambda = 0$  розрахункове значення  $Y_{розр} = 45,2$  повністю задовольняє протікання процесу подрібнення.

Оцінюючи характер впливу факторів на даному двовимірному перетині на середньозважену довжину подрібненого матеріалу, зазначимо таке: частота обертання бункера має більший вплив на показник якості готового продукту, ніж глибина впровадження протирізів в простір між молотками. Розглянуті якісні показники процесу, повністю відповідають вимогам зоотехніки, які були отримані при частоті обертання бункера  $n_6 = 4,5$  об/хв і глибині впровадження протирізу в міжмолотковий простір  $h = 50$  мм. Ці величини і рекомендуються як раціональні значення.

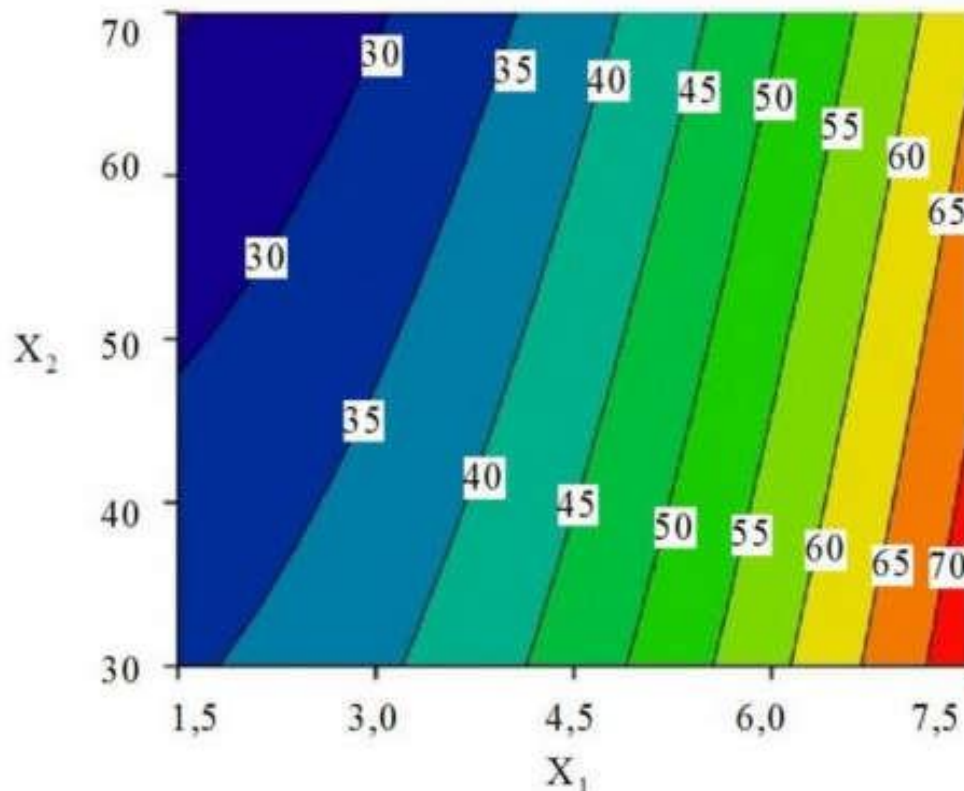


Рис. 4.2 Двовимірний перетин поверхні відгуку

## 4.2 Залежність продуктивності від частоти обертання бункера і товщі шару рулонного матеріалу в бункер

Для уточнення деяких значень залежностей  $Q = f(n_0)$  і  $Q = f(h_{cl})$  були проведені однофакторні експерименти. За отриманими результатами  $Q = f(h_{cl})$  були розраховані середні, дисперсії (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 Дисперсія значень продуктивності подрібнювача при різній висоті шару матеріалу в бункері-живильнику

	$h_{cl} = 0,2$	$h_{cl} = 0,4$	$h_{cl} = 0,6$	$h_{cl} = 1,2$
Сіно із різнотрав'я	0,76	0,26	0,37	0,56
Солома озимої пшениці	0,15	0,17	0,38	0,66

Перевірка на однорідність оцінок (проводилася при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ ) показала, що: на сіні з різнотрав'я  $G(0,629)$  менше  $G_{kp}(0,7679)$ , на соломі озимої пшениці  $G(0,395)$  менше  $G_{kp}(0,7679)$ , отже, вибіркові дисперсії можна вважати однорідними, а експеримент - відтворюваним.

Для визначення значущості отриманих коефіцієнтів математичної моделі були отримані розрахункові значення критерію Стюдента: на сіні з різнотрав'я  $t_o = 74,592$ ,  $t_l = 2,798$ , на соломі озимої пшениці  $t_o = 114,184$ ,  $t_l = 4,207$ . Всі розрахункові значення  $t$  - критерію більше табличного  $t_{kp} = 2,306$ , отже - коефіцієнти значимі для математичної моделі.

Перевірка адекватності отриманих математичних моделей показала, що: на сіні з різнотрав'я  $F_{розр}(0,049)$  і на соломі озимої пшениці  $F_{розр}(0,11)$  менше табличного значення  $F_{табл}(4,459)$ . Моделі визнаються адекватними експериментальними даними.

Графік залежності продуктивності подрібнювача від висоти шару матеріалу в бункері представлений на рис. 4.3.

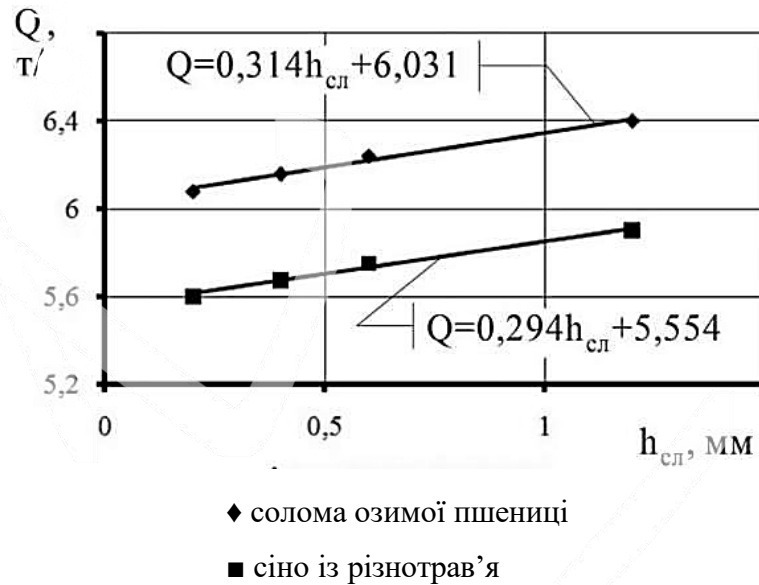


Рис. 4.3. Залежність продуктивності  $Q$  від висоти шару матеріалу в бункері  $h_{сл}$

Аналіз графічних даних, представлених на рисунку 4.3, дозволяє констатувати відсутність суттєвого впливу висоти шару матеріалу в бункері на загальну продуктивність. Встановлено, що варіювання цим параметром (висотою шару) спричиняло коливання показника продуктивності в межах, що не перевищували 5%. За отриманими результатами  $Q = f(n_0)$  були розраховані середні, дис- персії (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4. Дисперсія значень продуктивності подрібнювача при різній частоті обертання бункера,  $хв^{-1}$

	$n_{0-n} = 1,79$	$n_{0-n} = 3$	$n_{0-n} = 4,14$	$n_{0-n} = 5,5$	$n_{0-n} = 6,82$
Сіно із різнотрав'я	0,26	0,72	0,24	0,122	0,63
Солома озимої пшениці	0,24	0,35	0,31	0,38	0,78

Перевірка на однорідність оцінок (проводилася при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ ) показала, що: на сіні з різнотрав'я  $G(0,657)$  менше  $G_{кр}(0,6838)$ , на соломі озимої пшениці  $G(0,427)$  менше  $G_{кр}(0,6838)$ , отже вибіркові дисперсії можна вважати однорідними, а експеримент - відтворюваним.

Для визначення значущості отриманих коефіцієнтів математичної моделі були отримані розрахункові значення критерію Стюдента: на сіні з різнотрав'я  $t_0 = 5,91$ ,  $t_l = 41,756$ , на соломі озимої пшениці  $t_0 = 5,467$ ,  $t_l = 46,463$ . Всі розрахункові значення  $t$  - критерію більше табличного  $t_{кр} = 2,228$ , отже -

коефіцієнти значимі для математичної моделі.

Перевірка адекватності отриманих математичних моделей показала, що: на сні з різнотрав'я  $F_{розр}$  (2,786) і на соломі озимої пшениці  $F_{розр}$  (3,543) менше табличного значення  $F_{табл}$  (3,708). Моделі визнаються адекватними експериментальними даними.

Графік залежності продуктивності подрібнювача від частоти обертання бункера-живильника представлений на рисунку 4.4.

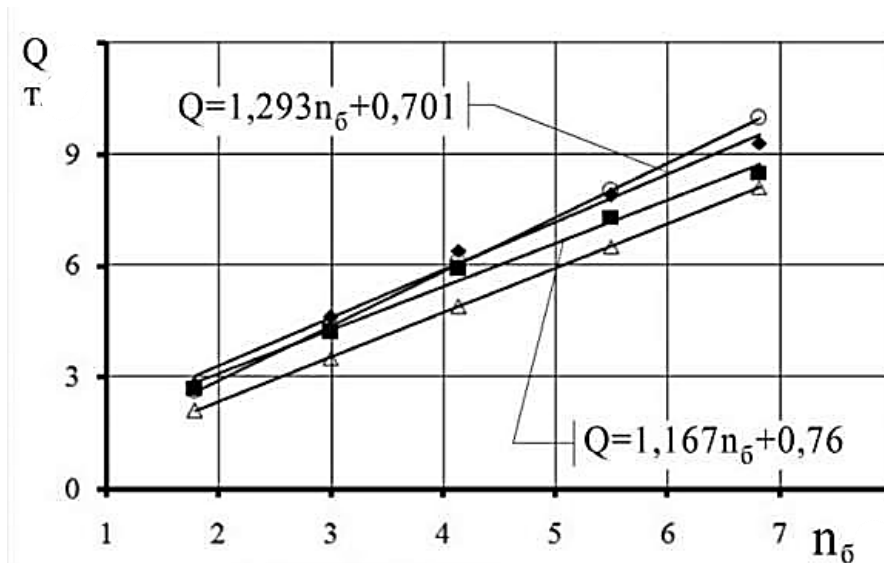


Рис. 4.4. Залежність продуктивності  $Q$  від висоти шару матеріалу в бункері  $h_{сл}$

Аналізуючи графік залежності продуктивності від частоти обертання бункера, представлений на рис. 4.4, можна побачити практичну лінійну залежність. Це пояснюється тим, що при збільшенні частоти обертання бункера пропорційно зростає подача матеріалу в ротор.

З графіка видно також, що теоретичні криві добре співпадають з експериментальними (розбіжність до 7 %).

### 4.3 Енергоємність процесу подрібнення стеблового матеріалу

Для уточнення значень залежностей  $N = f(n_б)$ ,  $L_{ср} = f(n_б)$ ,  $E = f(n_б)$  були сплановані однофакторні експерименти. За отриманими результатами  $N = f(n_б)$  були розраховані середні, дисперсії (таблиця 4.5).

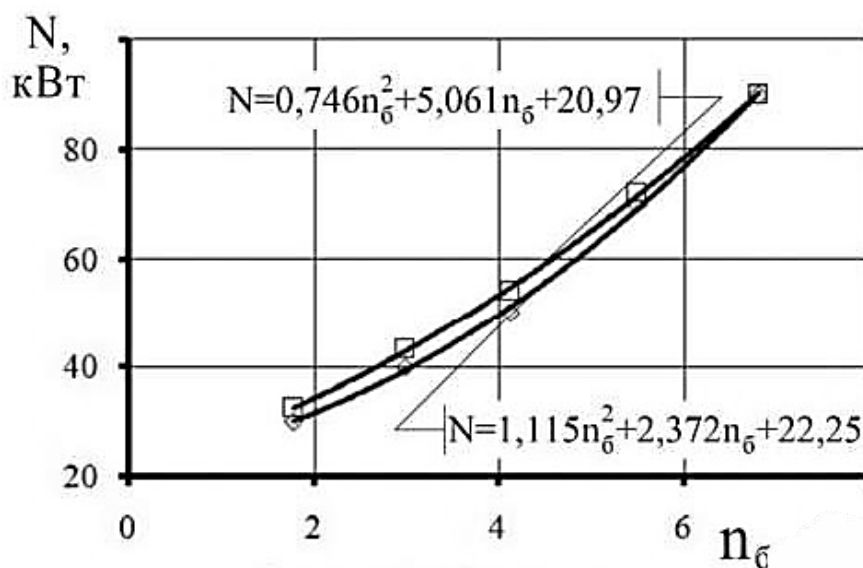
Таблиця 4.5 Дисперсія значень потужності, що витрачається на привід ротора при різній частоті обертання бункера,  $хв^{-1}$

	$n_{\delta-n} = 1,79$	$n_{\delta-n} = 3$	$n_{\delta-n} = 4,14$	$n_{\delta-n} = 5,5$	$n_{\delta-n} = 6,82$
Сіно із різнотрав'я	0,19	0,43	0,16	0,523	0
Солома озимої пшениці	0,48	0,28	0,73	0,73	0

Перевірка на однорідність оцінок (проводилася при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ ) показала, що: на сіні з різнотрав'я  $G (0,405)$  менше  $G_{кр} (0,6838)$ , на соломі озимої пшениці  $G (0,291)$  менше  $G_{кр} (0,6838)$ , отже вибіркові дисперсії можна вважати однорідними, а експеримент - відтворюваним.

Для визначення значущості отриманих коефіцієнтів математичної моделі були отримані розрахункові значення критерію Стюдента: на сіні з різнотрав'я  $t_o = 13,141$ ,  $t_1 = 6,124$ ,  $t_2 = 7,906$ ; на соломі озимої пшениці  $t_o = 15,026$ ,  $t_1 = 3,093$ ,  $t_2 = 12,738$ . Всі розрахункові значення  $t$  - критерію більше табличного  $t_{кр} = 2,228$ , отже - коефіцієнти значимі для зазначеної математичної моделі.

Перевірка адекватності отриманих математичних моделей показала, що на сіні з різнотрав'я  $F_{розр}(1,115)$  і на соломі озимої пшениці  $F_{розр}(3,472)$  менше табличного значення  $F_{табл}(4,103)$ . моделі визнаються адекватними експериментальними даними. Графік залежності потужності, потрібної на привід ротора, від частоти обертання бункера представлений на рисунку 4.5.



- ◇ солома озимої пшениці
- сіно із різнотрав'я

Рис. 4.5. Залежність зміни потужності  $N$ , що витрачається на привід ротора, від частоти обертання бункера  $n_{\delta}$

Розглядаючи рисунок 4.5 залежності потужності  $N$ , що витрачається на привід ротора, від частоти обертання бункера  $n_{\delta}$ , бачимо, що збільшення потужності при збільшенні частоти обертання бункера. Це пояснюється тим, що при підвищенні частоти обертання бункера збільшується обсяг матеріалу, що подрібнюється і на його подрібнення потрібно більше витратити енергії.

За отриманими результатами  $L_{cp} = f(n_{\delta})$  були визначені середні, дисперсії (таблиця 4.6)

Таблиця 4.6 Дисперсія значень середньої довжини частинок готового продукту при різній частоті обертання бункера,  $\text{хв}^{-1}$

	$n_{\delta-n} = 1,79$	$n_{\delta-n} = 3$	$n_{\delta-n} = 4,14$	$n_{\delta-n} = 5,5$	$n_{\delta-n} = 6,82$
Сіно із різнотрав'я	0,43	0,38	0,27	0,27	0,35
Солома озимої пшениці	0,18	0,42	0,52	0,72	0,75

Перевірка на однорідність оцінок (проводилася при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ ) показала, що на сіні з різнотрав'я  $G(0,288)$  менше  $G_{kp}(0,6838)$ , на соломі озимої пшениці  $G(0,308)$  менше  $G_{kp}(0,6838)$ . Вибіркові дисперсії можна вважати однорідними, а експеримент - відтворюваним.

Для визначення значущості отриманих коефіцієнтів математичної моделі були отримані розрахункові значення критерію Стьюдента: на сіні з різнотрав'я  $t_0 = 9,302$ ,  $t_1 = 6,287$ ,  $t_2 = 10,846$ ; на соломі озимої пшениці  $t_0 = 25,78$ ,  $t_1 = 3,87$ ,  $t_2 = 11,758$ . Всі розрахункові значення  $t$  - критерію більше табличного  $t_{kp} = 2,228$ , отже - коефіцієнти значимі для математичної моделі.

Перевірка адекватності отриманих математичних моделей показала, що на сіні з різнотрав'я  $F_{розр}(6,236)$  і на соломі озимої пшениці  $F_{розр}(7,269)$  менше табличного значення  $F_{табл}(3,478)$ . Моделі визнаються адекватними експериментальними даними.

Графік залежності середньої довжини частинок готового продукту від частоти обертання бункера-живильника представлений на рисунку 4.6. Середній розмір частинок матеріалу  $L_{cp}$  з підвищенням частоти обертання бункера збільшується  $n_{\delta}$  (рис. 4.6). Це пояснюється тим, що із підвищення частоти обертання бункера зменшується кількість ударів молотків по порції відокремлюваних часток корму.

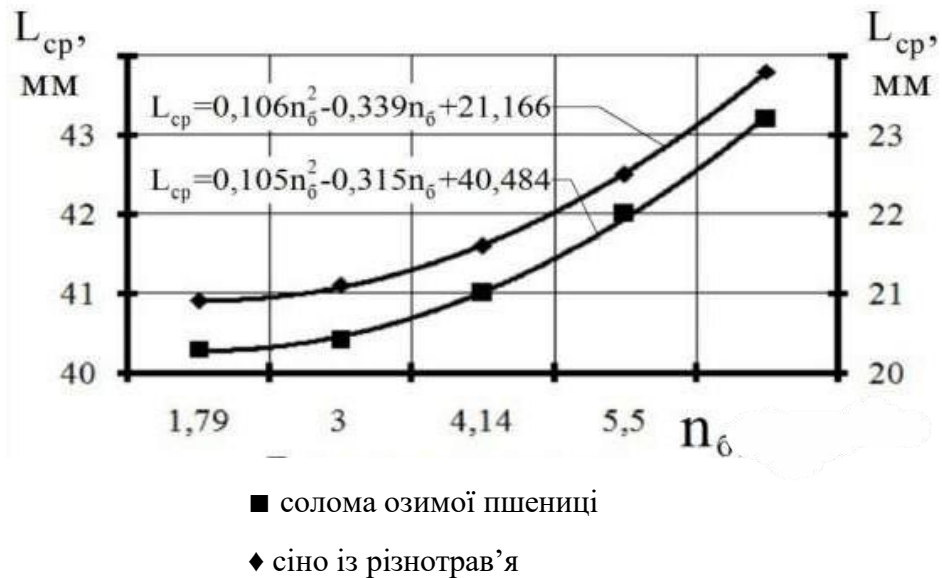


Рис. 4.6. Залежність середнього розміру  $L_{cp}$  частинок від частоти обертання бункера  $n_{\delta}$

За отриманими результатами питомої енергоємності  $E = f(n_{\delta})$  були розраховані середні, дисперсії (таблиця 4.7).

Таблиця 4.7 Дисперсія значень питомої енергоємності процесу подрібнення при різній частоті обертання бункера,  $xv^{-1}$

	$n_{\delta-n} = 1,79$	$n_{\delta-n} = 3$	$n_{\delta-n} = 4,14$	$n_{\delta-n} = 5,5$	$n_{\delta-n} = 6,82$
Сіно із різнотрав'я	0,249	0,63	0,68	0,121	0,56
Солома озимої пшениці	0,101	0,49	0,19	0,7	0,88

Перевірка на однорідність оцінок (проводилася при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ ) показала, що на сіні з різнотрав'я  $G(0,488)$  менше  $G_{kp}(0,6838)$ , на солі озимої пшениці  $G(0,308)$  менше  $G_{kp}(0,6838)$ , отже, вибіркові дисперсії можна вважати однорідними, а експеримент - відтворюваним.

Для визначення значущості отриманих коефіцієнтів математичної моделі були отримані розрахункові значення критерію Стюдента: на сіні з різнотрав'я  $t_0 = 30,642$ ,  $t_1 = 10,603$ ,  $t_2 = 9,849$ ; на солі озимої пшениці  $t_0 = 35,653$ ,  $t_1 = 14,142$ ,  $t_2 = 13,693$ . Всі розрахункові значення  $t$  - критерію більше табличного  $t_{kp} = 2,228$ , отже - коефіцієнти значимі для математичної моделі.

Перевірка адекватності отриманих математичних моделей показала, що на сіні з різнотрав'я  $F_{розр}(2,119)$  і на солі озимої пшениці  $F_{розр}(3,65)$  менше

табличного значення  $F_{табл}(4,103)$ . Моделі визнаються адекватними експериментальним даними.

Графік залежності питомої енергоємності процесу подрібнення різних матеріалів від частоти обертання бункера представлений на рисунку 4.7.

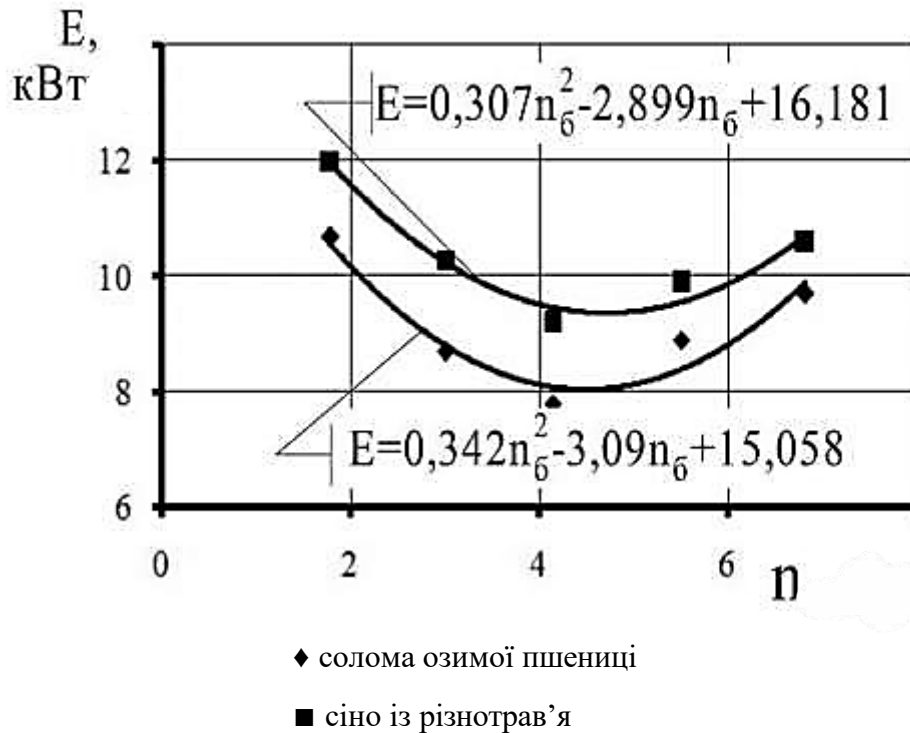


Рис 4.7. Залежність питомої енергоємності процесу подрібнення  $E$  від частоти обертання бункера  $n_b$

Аналізуючи графічну залежність 4.7 зміни питомої енергоємності процесу подрібнення від частоти обертання бункера, можна помітити в межах частоти обертання бункера від 1,79 до 6,8  $\text{хв}^{-1}$  параболічну залежність і точку оптимуму на 4,14  $\text{хв}^{-1}$ .

#### 4.4 Визначення зусилля руйнування матеріалу

Для визначення залежностей  $P_l = f(Q)$ ,  $N_b = f(n_b)$  були проведені однофакторні експерименти. За отриманими результатами  $N = f(n_b)$  були розраховані середні дисперсії (таблиця 4.8).

Таблиця 4.8. Дисперсія значень сумарного зусилля руйнування матеріалу при різній продуктивності подрібнювача, т/год

	$Q = 2,8$	$Q = 4,6$	$Q = 6,4$	$Q = 7,9$	$Q = 9,3$
Солома озимої пшениці	0,36	0,55	0,27	0,24	0,48

Перевірка на однорідність оцінок (проводилася при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ ) показала, що на соломі озимої пшениці  $G(0,496)$  менше  $G_{кр}(0,7679)$ , вибіркові дисперсії можна вважати однорідними, а експеримент відтворюваним.

Для визначення значущості отриманих коефіцієнтів математичної моделі були отримані розрахункові значення критерію Стюдента на соломі озимої пшениці  $t_o = 96,568$ ,  $t_l = 8,207$ . Всі розрахункові значення  $t$  - критерію більше табличного  $t_{кр} = 2,306$ , отже - коефіцієнти значимі для одержаної математичної моделі.

Перевірка адекватності отриманої математичної моделі показала, що на соломі озимої пшениці  $F_{розра}(0,15)$  менше табличного значення  $F_{табл}(4,459)$ . Модель вважається адекватною експериментальним даним.

Графік залежності зусилля руйнування від продуктивності подрібнювача представлена на рисунку 4.8.

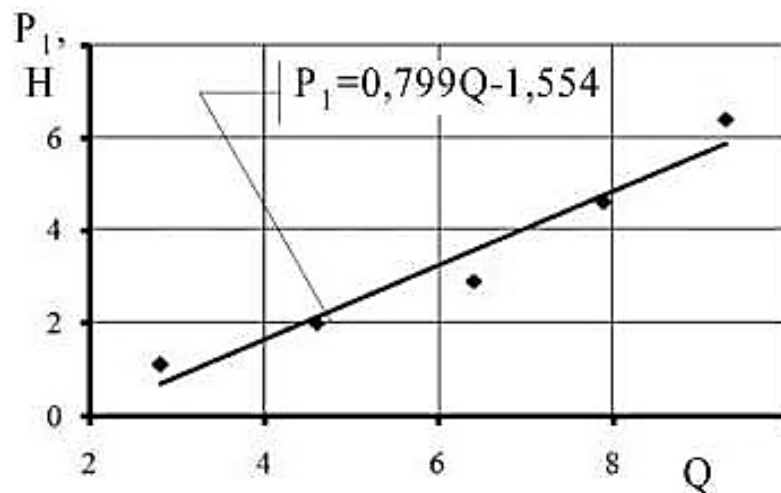


Рис. 4.8. Залежність зусилля руйнування матеріалу  $P_1$  від продуктивності  $Q$

З графіка 4.8 видно, що зусилля руйнування матеріалу  $P_1$  зростає з підвищенням продуктивності подрібнювача  $Q$  по лінійної залежності. За отриманими результатами  $N_{\sigma} = f(n_{\sigma})$  були розраховані середні, дисперсії (таблиця 4.9).

Таблиця 4.9 Дисперсія значень потужності, потрібної на привід бункера-живильника при різній частоті обертання бункера,  $\text{хв}^{-1}$

	$n_{\bar{\sigma}} = 1,79$	$n_{\bar{\sigma}} = 3$	$n_{\bar{\sigma}} = 4,14$	$n_{\bar{\sigma}} = 5,5$	$n_{\bar{\sigma}} = 6,82$
Солома озимої пшениці	0,83	0,45	0,86	0,26	0,93

Перевірка на однорідність оцінок (проводилася при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ ) показала, що на соломі озимої пшениці  $G(0,486)$  менше  $G_{кр}(0,6838)$ , вибірккові дисперсії можна вважати однорідними, експеримент відтворюємо.

Для визначення значущості отриманих коефіцієнтів математичної моделі були отримані розрахункові значення критерію Стюдента на соломі озимої пшениці  $t_0 = 4,032$ ,  $t_1 = 6,326$ ,  $t_2 = 4,497$ . Всі розрахункові значення  $t$  - критерію більше табличного  $t_{кр} = 2,228$ , отже – коефіцієнти значимі вказаних математичних моделей.

Перевірка адекватності отриманої математичної моделі показала, що на соломі озимої пшениці  $F_{розр}(2,036)$  менше табличного значення  $F_{табл}(3,708)$ . Моделі визнаються адекватними експериментальними даними.

Графік залежності потужності, що витрачається на привод бункера  $N_{\bar{\sigma}}$  від його частоти обертання  $n_{\bar{\sigma}}$  представлений на рисунку 4.9.

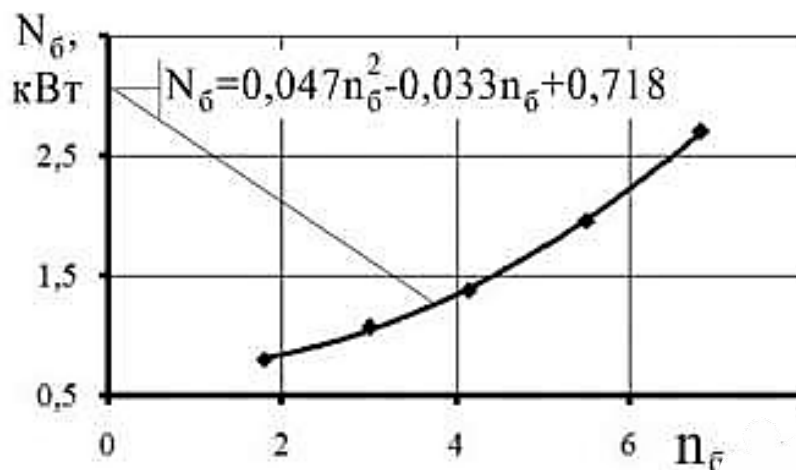


Рис. 4.9. Залежність потужності, що витрачається на привід бункера  $N_{\bar{\sigma}}$ , від його частоти обертання  $n_{\bar{\sigma}}$

Як бачимо з графічної залежності (рис. 4.9) потужність, що витрачається на на привід бункера  $N_{\bar{\sigma}}$ , підвищується із зростанням частоти обертання  $n_{\bar{\sigma}}$ . Це пояснюється тим, що чим більшою буде частота обертання бункера, тим і більшими будуть витрати потужності на його привод.

## РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНИХ РІШЕНЬ

Оптимізація витрат ресурсів особливо актуальна зараз оскільки більшість видів продукції сільськогосподарських підприємств України неконкурентоспроможна, в зв'язку з тим, що ресурсомісткість її у 2 - 3, а то й більше, рази вища, ніж у розвинених країнах Заходу [1,2]. У загальних енергетичних витратах на виробництво продукції тваринництва найбільшу частину (54 - 60 %) складає енергія, що витрачається на виробництво і приготування кормів, тому зниження ресурсовитрат на їх виробництво дасть вагомі результати в ресурсозбереженні.

### 5.1 Розрахунок капіталовкладень

Виходячи з металомісткості порівнюваних роздавачів та питомої вартості металоконструкції розраховуємо капіталовкладення по обох варіанта (базовому  $K_6$  та розроблюваному  $K_p$ ) які становлять:

$$K_6 = 1500 \cdot 4,3 = 6450 \text{ грн.}$$

$$K_p = 1086 \cdot 4,3 = 4669,8 \text{ грн.}$$

Балансова вартість дорівнює:

$$B = K \cdot \alpha, \quad (4.1)$$

де  $B$  - балансова вартість, грн;

$\alpha$  - коефіцієнт переведення в балансову вартість,  $\alpha = 1,2$ .

Відрахування на технічне обслуговування та ремонт:

$$P = \frac{B \cdot \varepsilon}{100}; \quad (4.2)$$

де  $\varepsilon$  - відсоток відрахувань на технічне обслуговування та ремонт,  $\varepsilon = 13\%$ .

### 5.2 Розрахунок експлуатаційних затрат

Експлуатаційні затрати включають в себе витрати на заробітну плату, амортизаційні та ремонтні відрахування, витрати на електроенергію. Для

визначення річних експлуатаційних затрат необхідно знати річний обсяг робіт. Приймаючи до уваги розрахунки, річний обсяг виробництва комбікормів складає:

$$Q_p = Q_d \cdot 365 = 1148 \cdot 365 = 419020 \text{ кг} = 419,02 \text{ т.}$$

Розрахунок фонду оплати праці

Витрати на оплату праці з врахуванням вихідних днів та відпусток визначається за формулою:

$$Z_{пр} = T \cdot m \cdot b \cdot t \cdot 1,9 \quad (4.3)$$

Де  $T$  – кількість днів роботи на рік;

$t$  — час виконання роботи, год;

$m$ - кількість операторів (приймаємо 1 оператор),

$b$  - годинна тарифна ставка оператора ( $b = 34$  грн/год);

1,9 - коефіцієнт, що враховує нарахування.

Річна тривалість роботи агрегату:

$$T_p = T \cdot t \quad (4.3)$$

### 5.3. Розрахунок амортизаційних відрахувань та розрахунок експлуатаційних затрат

Амортизаційні відрахування розраховуються за формулою:

$$A = \frac{B \cdot \beta}{100}, \quad (4.4)$$

де  $\beta$  - відсоток амортизаційних відрахувань,  $\beta = 15,2 \%$ .

Витрати на електроенергію визначають

$$B = N \cdot T_p \cdot Z_e, \quad (4.5)$$

де  $Z_e$  – вартість кВт · год електроенергії, грн.

Експлуатаційні затрати на роздавання кормосумішок розраховуються за формулою:

$$C_{с.б.} = Z_{пр.} + P + A + B \quad (4.6)$$

Річна економія експлуатаційних затрат розраховується за формулою:

$$\Delta C_P = (C_{п.б.} - C_{п.р.}) \cdot Q_p; \quad (4.7)$$

Річні приведені затрати розраховуємо за формулою:

$$\Pi_{\text{пр.}} = Z_{\text{заг}} + c_{\text{к}} \cdot K, \quad (4.8)$$

де  $\Pi_{\text{пр}}$  - приведені затрати, грн.;

$Z_{\text{заг}}$  - загальні затрати, грн.;

$c_{\text{к}}$  - коефіцієнт ефективності приведених затрат,  $c_{\text{к}} = 0,15$ ;

$K$  - капіталовкладення, грн;

Приведені затрати на одиницю продукції розраховуємо за формулою:

$$\Pi_{\text{пр.од}} = \frac{\Pi_{\text{пр}}}{O_p}, \quad (4.9)$$

Річний економічний ефект становить

$$P_{\text{ек}} = (\Pi_{\text{пр.од.б.}} - \Pi_{\text{пр.од.р.}}) \cdot O_p; \quad (4.10)$$

Термін окупності капітальних вкладень складає:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_p}{P_{\text{ек}}} \quad (4.11)$$

Обчислення показників економічної ефективності згідної приведеної методики здійснювалася за допомогою програми Excel Microsoft. Отриманні результати були занесені в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1. Економічні показники

Назва показника	Існуючий комплект	Розроблений комплект
Капіталовкладення, грн;	24500	110690,8
- експлуатаційні затрати, грн.;	209050,7	110080,3
- приведені затрати, грн.	218730,2	117080,8
- питомі затрати праці, люд-год/т;	0,68	0,55
Економія експлуатаційних затрат,	-	65490,4
Річний економічний ефект, грн.	-	105121,7
Термін окупності, років	-	1,03

Отже в результаті впровадження запропонованої технології буде отримано річний економічний ефект 105121,7 грн.

Період окупності капіталовкладень буде становити 1,03 роки.

## ВИСНОВКИ

Проведені дослідження доводять, що для тваринницьких комплексів ВРХ (з поголів'ям понад 500 голів) в рамках існуючих та перспективних технологій годівлі, стеблову сировину доцільно піддавати деструкції. Цей процес має відбуватися перед змішуванням або безпосередньою видачею. Рекомендовано використовувати для цього спеціалізовані універсальні агрегати, що оснащені вертикальним бункером та ротором молоткового типу, оскільки вони демонструють універсальність при обробці різних видів матеріалів.

Отримані аналітичні залежності дозволили провести аналіз кількісних кореляцій. Ці зв'язки встановлені між: частотою обертання ротора, масо-геометричними характеристиками молотків, силою опору відділення матеріалу від масиву, та величиною вильоту молотків у робочу зону (з урахуванням їх відхилення від радіального положення). На основі цього аналізу було ідентифіковано раціональні значення зазначених параметрів для застосування в конкретних експлуатаційних умовах.

Доведено, що для агрегатів, призначених для деструкції ущільненої стеблової маси (рулонів) у системах з вертикальним ротаційним бункером, є конструктивно доцільним виготовлення секційного молоткового ротора (з двох частин). Перша секція (довжиною  $\sim 1/3$  від загальної) має функціонувати на частоті обертання не менше  $1600 \text{ хв}^{-1}$ . Друга секція ротора повинна працювати на зниженій частоті, до  $1000 \text{ хв}^{-1}$ . Рекомендовано оснащувати першу (високошвидкісну) секцію потовщеними молотками для мінімізації кута їх відхилення під навантаженням та пролонгації терміну експлуатації.

Моделювання, проведене з використанням аналітичних виразів та верифіковане експериментальними даними (зокрема, середнім сумарним зусиллям руйнування при продуктивності 6 т/год), продемонструвало, що допускається збільшення технологічного зазору (молоток-дека/решето) до 5 мм. Це можливо за умов: діаметр ротора 0,53 м, частота обертання  $580\text{--}600 \text{ хв}^{-1}$ , та кут відхилення молотків у межах  $5\text{--}10^\circ$ . Вплив геометричних розмірів молотків на частоту обертання ротора є незначним (за умови фіксованого радіуса кола, що описується, 0,265 м). Для ротора з таким діаметром мінімальна частота обертання досягається при довжині молотка від осі підвісу 0,13 м. При переході

до режимів високої продуктивності (до 9 т/год), що супроводжується зростанням сумарного зусилля руйнування понад 80 Н, потрібне форсування режимів: перша секція ротора має працювати на частоті  $> 2500 \text{ хв}^{-1}$ , друга – до  $1500 \text{ хв}^{-1}$ . Для отримання крупної фракції (до 150 мм) для прямої видачі в годівниці (при зусиллі руйнування  $< 30 \text{ Н}$ ), рекомендована частота обертання для обох секцій ротора становить  $1000 \text{ хв}^{-1}$ .

Розроблено теоретичні моделі, що описують залежність ключових показників (продуктивності та необхідної потужності привода) від комплексу факторів. До цих факторів належать: частота обертання бункера, щільність сировини, глибина робочої зони молотків (їх вихід над днищем або товщина шару, що зрізається), коефіцієнт проковзування (відставання) матеріалу відносно бункера та коефіцієнт нерівномірності щільності маси.

Комплекс теоретичних та експериментальних даних підтверджує, що підвищення частоти обертання бункера призводить до одночасного зростання середнього розміру фракції, продуктивності та споживаної потужності привода. Встановлено, що точка мінімальної питомої енергоємності процесу деструкції знаходиться при частоті обертання бункера  $4 \text{ хв}^{-1}$ . Цей режим забезпечує досягнення оптимальних експлуатаційних показників: продуктивність 6 т/год (при потужності привода ротора 50 кВт та привода бункера 1,5 кВт) та середньозважений розмір частинок 41 мм.

**ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Адамов Є. В., Бурлай В. В., Ясенецький В. А. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача стеблових кормів. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2021. Вип. 214. С. 45–56.
2. Бойко І. Г., Куцериб М. В. Аналіз конструкцій та визначення параметрів молоткових подрібнювачів кормів. Інженерія природокористування. 2022. № 3. С. 28–35.
3. Волхонов М. С., Абаліхін А. М., Барабанов Д. В., Муханов Н. В. Визначення оптимальних режимів роботи відцентрового подрібнювача фуражного зерна. Вісник НГСХА. 2023. № 2. С. 67–74.
4. Дідур В. В., Овчар Р. Л. Обґрунтування конструктивних параметрів експериментального зразка подрібнювача кормів. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2021. Вип. 119. С. 92–99.
5. Іванов В. П. Підвищення ефективності процесу подрібнення кормів шляхом вдосконалення конструкції молоткової дробарки. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2022. Вип. 22, т. 1. С. 138–147.
6. Коваленко В. В., Коваленко О. В. Дослідження енергоспоживання процесу подрібнення фуражного зерна молотковим подрібнювачем. Науковий вісник "Інженерія та технології АПК". 2023. № 4. С. 55–63.
7. Литвиненко А. М., Сироватка В. І. Модернізація подрібнювача грубих кормів ИРТ-165 шляхом встановлення сепаруючого пристрою. Вісник Центральноукраїнського національного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2020. Вип. 3. С. 112–118.
8. Пат. 145028 Україна, МПК А01F 29/00. Подрібнювач стеблових кормів. Ольшевський С. П., Ольшевський В. С.; заявник і патентовласник Одеський державний аграрний університет. № u202005891; заявл. 10.09.2020; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22.
9. Рошин П. М. Аналітичне обґрунтування параметрів та режимів роботи універсального подрібнювача кормів. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2022. Вип. 15 (114). С. 44–53.
10. Хмельовський В. С., Потапова С. Є. Обґрунтування параметрів

шнека кормоприготувального агрегату та розміщення на ньому ножів. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2021. Вип. 14. С. 132–141.

11. Abilzhanuly T., Iskakov R., Nurgozhayev S., Abilzhanov D. Mathematical Modeling of the Processes of Mowing, Oriented Feeding, and Chopping of Stalk Forage by a Forage Harvester. *AgriEngineering*. 2024. Vol. 6(4). P. 273–289. DOI: 10.3390/agriengineering6040173.

12. Chen M., Xu G., Wei M., Li X. Optimization Design and Experiment on Feeding and Chopping Device of Silage Maize Harvester. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2023. Vol. 16(3). P. 64–77. DOI: 10.25165/j.ijabe.20231603.7922.

13. Dalmis S., Tan F., Gunes M. S., Gunes E., Erdogan D. Development and evaluation of a chopping machine for forage crops. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2024. Vol. 69. P. 21–25. DOI: 10.35923/jtug.2024.69.21-25.

14. Hegazy A. E., Aboamera M. A. Development and Performance Evaluation of a Modified Star Forage Chopper Machine to Reduce Energy Consumption. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 13(10). P. 509–515. DOI: 10.21608/jssae.2022.164344.1105.

15. Pratiwi D. K., Gunawan, Arifin A., Barlin. Design modification of locally manufactured forage chopper. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2689. Art. 130011. DOI: 10.1063/5.0115849.

16. Volkhonov M. S., Abalikhin A. M., Barabanov D. V. Determining the Energy Consumption of the Process of Grinding by Cutting in a Feed Grinder. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1152. Art. 012044. DOI: 10.1088/1755-1315/1152/1/012044.

17. Yang A., Xiang W., Yan B., Duan Y., Lv J., Wu M. Optimization and Test of Structural Parameters of Flat Hob Chopper. *Agriculture*. 2022. Vol. 12(6). Art. 824. DOI: 10.3390/agriculture12060824.

18. Zhang H., Qian Y., Tian H. Design and Experimental Optimization of V-Shaped Hammer for Hammer Mill. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(14). Art. 5988. DOI: 10.3390/app14145988.

19. Zhang L., Liu Z., Li F., Zhao Z. Parameter Optimization and Experiment

of Hammer Mill for Corn Straw Grinding Based on DEM-CFD Coupling. Processes. 2023. Vol. 11(5). Art. 1533. DOI: 10.3390/pr11051533.

20. Зборовський О. А., Куценко Ю. П. Аналіз конструкцій подрібнювачів рулонів грубих кормів [Текст] // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. — 2020. — Вип. 241. — С. 88–94.

21. Павлюк В. Ю. Дослідження ефективності роботи подрібнювача рулонів ІРК-145 [Текст] // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. — 2023. — Вип. 220. — С. 51–60.

22. Тітаренко Є. А. Роздавач-подрібнювач рулонів і тюків РПК-1: конструкція та дослідження [Текст] // Механізація та електрифікація сільського господарства. — 2019. — № 3. — С. 23–29.

23. Парієв А. О., Дробишев О. О., Коротченко Т. М. Сучасні подрібнювачі-видувачі тюків і рулонів: аналіз застосування [Текст] // Техніка і технології АПК. — 2022. — № 5. — С. 17–22.

24. Коваль С. П., Куліш М. І. Удосконалення технологічних процесів при заготівлі та переробці рулонів сінажу [Текст] // Вісник аграрної науки. — 2021. — № 11. — С. 70–75.

25. Черненко П. М., Лисенко О. І. Порівняльна оцінка подрібнювачів рулонів для великотоварних ферм [Текст] // Техніка і технології тваринництва. — 2020. — № 2. — С. 33–38.

26. Григоренко І. Л., Яковенко Д. А. Механізація процесів заготівлі та подрібнення рулонів на МТФ [Текст] // Сільськогосподарські машини. — 2022. — Вип. 56. — С. 45–52.

27. Баран В. І., Мельник Р. В. Енергетична оцінка подрібнювачів грубих кормів різних типів [Текст] // Вісник Львівського національного аграрного університету: Агрономія. — 2021. — № 25. — С. 58–63.

28. Мельничук І. М., Хоменко П. Г. Вплив якості подрібнення рулонів сіна на поїдання корму великою рогатою худобою [Текст] // Науковий журнал «Тваринництво та кормовиробництво». — 2020. — № 78. — С. 92–98.

29. Івашко О. М., Кобзар Ю. В. Обґрунтування енергетичних параметрів подрібнювачів кормів на МТФ [Текст] // Вісник Сумського національного

аграрного університету. — 2019. — Вип. 4. — С. 37–42.

30. Козак Л. Г., Дяченко С. Ю. Підвищення ефективності процесу подрібнення рулонів соломи в умовах ферми [Текст] // Наукові праці Полтавської державної аграрної академії. — 2022. — Т. 3. — С. 15–22.

31. Нечай О. В., Таран І. А. Оптимізація параметрів ножового барабана подрібнювача рулонів [Текст] // Техніка і енергетика АПК. — 2023. — № 2. — С. 61–68.

32. Омельчук М. В. Механізація процесів роздачі та подрібнення грубих кормів [Текст] // Механізація та електрифікація сільського господарства. — 2020. — № 1. — С. 29–34.

33. Власенко О. М., Степаненко А. І. Обґрунтування технологічних процесів при підготовці рулонованих кормів до згодовування [Текст] // Вісник ХНТУСГ імені П. Василенка. — 2022. — Вип. 219. — С. 41–48.

34. Smith J., Taylor R. Design and performance evaluation of a round-bale forage shredder [Text] // Journal of Agricultural Engineering Research. — 2019. — Vol. 173. — P. 24–31.

35. Müller H., Kruk P. Optimization of rotary choppers for bale processing [Text] // Biosystems Engineering. — 2020. — Vol. 194. — P. 88–96.

36. Pottinger Maschinenfabrik GmbH. Bale processing systems and choppers: Technical catalogue [Text]. — Grieskirchen (Austria), 2022. — 36 p.

37. Johnson L. M., Hellevang K. J. Influence of chopping length on forage utilization in dairy cattle [Text] // Animal Feed Science and Technology. — 2021. — Vol. 274. — P. 105–114.

38. SIPMA S.A. Round-bale shredders and distributors: Technical documentation [Text]. — Lublin (Poland), 2023. — 28 p.

39. Гончарук В. О., Кіріченко С. М. Дослідження процесу подрібнення рулонів сінажу на молочнотоварній фермі [Текст] // Вісник аграрної науки Причорномор'я. — 2021. — № 5. — С. 22–28.

40. Коваленко А. С., Гайдай І. В. Підвищення ефективності технології підготовки грубих кормів до згодовування [Текст] // Науково-технічний журнал «Техніка і енергетика АПК». — 2022. — № 1. — С. 47–52.

41. Поліщук Д. В., Мазур В. П. Механізація процесів

кормоприготування на сучасних тваринницьких фермах [Текст] // Механізація та електрифікація сільського господарства. — 2020. — № 4. — С. 14–19.

42. Кузьменко О. І., Шевченко Т. О. Дослідження впливу геометрії ножів подрібнювача рулонів на якість корму [Текст] // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені П. Василенка. — 2022. — Вип. 218. — С. 56–63.

43. Федоренко І. П., Андрійчук П. І. Аналіз існуючих технологій подрібнення стеблових кормів [Текст] // Аграрна наука і техніка. — 2021. — № 2. — С. 31–37.

44. Романенко Д. С., Топольський Ю. В. Розробка експериментальної установки для дослідження подрібнювача рулонів [Текст] // Сільськогосподарські машини. — 2023. — Вип. 57. — С. 24–30.

45. Мазуренко О. О., Костенко І. В. Аналіз технологічних схем підготовки рулонів сіна до подрібнення [Текст] // Техніка і технології АПК. — 2020. — № 6. — С. 18–24.

46. Семенюк В. Г., Книш М. В. Підвищення надійності подрібнювачів рулонів при експлуатації в умовах МТФ [Текст] // Науковий вісник НУБіП України. — 2021. — Вип. 244. — С. 73–80.

47. Ткаченко А. С., Герасименко Д. В. Енергоефективність процесу подрібнення сіна на прикладі дослідної установки [Текст] // Вісник Сумського національного аграрного університету. — 2022. — Вип. 5. — С. 41–47.

48. Дяченко С. М., Руденко О. І. Визначення оптимальних параметрів подачі рулонів до подрібнювального барабана [Текст] // Техніка і енергетика АПК. — 2021. — № 3. — С. 27–34.

49. Мороз В. С., Карпенко І. М. Обґрунтування технологічної схеми подрібнювання кормів із рулонів соломи [Текст] // Механізація сільськогосподарського виробництва. — 2020. — № 2. — С. 59–65.

50. Трофименко О. О., Мартинюк Є. П. Вплив вологості корму на процес подрібнення рулонів [Текст] // Науково-технічний журнал «Механізація аграрного виробництва». — 2021. — № 3. — С. 33–40.

51. Швець Р. І., Кондратенко В. І. Обґрунтування параметрів подрібнювального механізму з ротором комбінованої дії [Текст] // Вісник

Полтавської державної аграрної академії. — 2022. — № 1. — С. 49–56.

52. Бугайчук М. О., Олійник Ю. А. Аналіз технічних засобів для подрібнення рулонів на фермах України [Текст] // Вісник аграрної техніки і технологій. — 2023. — № 2. — С. 12–18.