

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра інжинірингу технічних систем

**Пояснювальна записка**

до дипломної роботи

рівня вищої освіти «Магістр» на тему:

**Модернізація конструкції подрібнювача концентрованих кормів**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МГАІ-1-23

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

\_\_\_\_\_ Браціло Дмитро Костянтинович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Дудін Володимир Юрійович

**Рецензент:** \_\_\_\_\_ Потеруха Борис Тарасович

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем  
Рівень вищої освіти: «Магістр»  
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«12» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Брацілу Дмитру Костянтиновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Модернізація конструкції подрібнювача концентрованих кормів

керівник роботи: Дудін Володимир Юрійович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

« 12 » листопада 2024 року № 3784

**2. Строк подання студентом роботи** 16.12.2024 р.

**3. Вихідні дані до роботи** Аналіз стану питання процесів та обладнання для подрібнення зерна. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз стану питання і завдання дослідження. 2. Теоретичне обґрунтування параметрів молоткового подрібнювача. 3. Експериментальні дослідження. 4. Охорона праці. 5. Економічна оцінка розробленого подрібнювача. Загальні висновки. Бібліографічний список

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (3 аркуші, А4). 2. Теоретичні дослідження (1 аркуші, А4). 3. Експериментальні дослідження (5 аркушів, А4). 4. Охорона праці (1 аркуш, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-5	Дудін В.Ю., доцент		
Нормоконтроль	Івлєв В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 12.11.2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	1.1.1 Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 01.10.2024 р.	
2	Теоретичний	до 20.10.2024 р.	
3	Експериментальний	до 09.11.2024р.	
4	Охорона праці	до 19.11.2024 р.	
5	Економічний	до 26.11.2024 р.	
6	Демонстраційна частина	до 30.11.2024р.	

Студент

\_\_\_\_\_

( підпис )

Браціло Д.К.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

( підпис )

Дудін В.Ю.

(прізвище та ініціали)



Браціло Д.К. Модернізація конструкції подрібнювача концентрованих кормів /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

Дипломна робота містить вступ, 6 розділів, в яких проведено удосконалення молоткової дробарки. Обґрунтована конструкція дослідного зразка малогабаритного подрібнювача з монолітними молотками. Надані рекомендаційні заходи по покращенню умов охорони праці та техніки безпеки при роботі на кормодробарці. Виконано економічне обґрунтування роботи. Зроблені висновки та складено список використаної літератури.

Ключові слова: подрібнення, корм, молоток, молоткова дробарка, продуктивність, енергія.

## ЗМІСТ

	Вступ	8
1	Аналіз стану питання і завдання дослідження	10
	1.1 Якість подрібнення зерна і її вплив на продуктивність тварин	10
	1.2 Основні способи і засоби подрібнення зерна на корм	15
	1.3 Огляд теоретичних досліджень молоткових дробарок	24
	1.4 Висновки по розділу	29
2	Теоретичне обґрунтування параметрів молоткового подрібнювача	30
	2.1 Теоретичний аналіз процесу подрібнення зерна	30
	2.2 Енергетична оцінка процесу подрібнення	36
	2.3 Висновки по розділу	45
3	Експериментальні дослідження	46
	3.1 Програма експериментальних досліджень	46
	3.2 Визначення якості та відповідності подрібненого продукту ДСТУ і зоотехнічним вимогам	46
	3.3 Опис і принцип роботи експериментальної установки	47
	3.4 Результати повного факторного експерименту. Метод крутого сходження	51
	3.5 Залежність питомої витрати енергії від колової швидкості, кількості монолітних молотків і подачі матеріалу	53
	3.6 Висновки по розділу	60
4	Охорона праці	61
	4.1 Загальні вимоги охорони праці при на комбікормових підприємствах	61

4.2 Проект інструкції з охорони праці при роботі з молотковим подрібнювачем концентрованих кормів	62
4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях	64
4.4 Висновки по розділу	66
5 Економічна оцінка розробленого подрібнювача	67
5.1 Вихідні дані	67
5.2 Розрахунок показників економічної ефективності	67
5.3 Висновки по розділу	68
Загальні висновки	69
Бібліографія	71
Додатки	75

## ВСТУП

Сільське господарство є однією з основних галузей економіки, яка забезпечує продовольчу безпеку країни та стабільний розвиток її економіки. У цьому контексті важливу роль відіграє тваринництво, ефективність якого значною мірою залежить від якісного забезпечення кормами. Концентровані корми займають центральне місце в структурі годівлі сільськогосподарських тварин завдяки високому вмісту поживних речовин, енергетичній цінності та здатності впливати на продуктивність.

Одним із ключових етапів підготовки концентрованих кормів до використання є їх подрібнення, яке забезпечує легше засвоєння поживних речовин тваринами, підвищує ефективність годівлі та знижує втрати сировини. Для цієї мети широко застосовуються молоткові подрібнювачі, які відзначаються простотою конструкції, надійністю в експлуатації та універсальністю у використанні.

Проте, з огляду на сучасні виклики, такі як підвищення вартості енергоресурсів, необхідність зменшення виробничих витрат, а також посилення вимог до якості подрібненого продукту, конструкції молоткових подрібнювачів потребують модернізації. Існуючі моделі часто мають низку недоліків, серед яких: нерівномірність подрібнення, високий рівень енергоспоживання, шумність роботи та недостатня адаптація до роботи з різними типами кормів. Це обумовлює необхідність розробки вдосконалених технічних рішень, які забезпечать не лише підвищення продуктивності обладнання, але й відповідність сучасним стандартам енергоефективності та екологічності.

Метою даної магістерської роботи є розробка вдосконаленої конструкції молоткового подрібнювача концентрованих кормів, яка дозволить підвищити ефективність його роботи, забезпечити рівномірність подрібнення та знизити енергоспоживання. Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

- провести аналіз існуючих конструкцій молоткових подрібнювачів та їх технічних характеристик;
- виявити основні недоліки та проблеми в експлуатації обладнання;
- розробити концептуальну модель модернізованого подрібнювача;



- здійснити розрахунки кінематичних та динамічних характеристик для оптимізації конструктивних параметрів;
- перевірити ефективність запропонованих рішень за допомогою експериментальних досліджень та моделювання.

Результати виконаної роботи мають вагомим практичне значення. Модернізація молоткових подрібнювачів сприятиме зменшенню виробничих витрат завдяки оптимізації енергоспоживання, покращенню якості кормів та їх переробки, а також підвищенню екологічності обладнання. Це матиме позитивний вплив як на окремі господарства, так і на галузь тваринництва загалом, сприяючи її сталому розвитку та підвищенню конкурентоспроможності продукції на ринку.

Дана магістерська робота є актуальною з огляду на потреби сільськогосподарської галузі України, орієнтованої на впровадження новітніх технологій, які забезпечують раціональне використання ресурсів і підвищення ефективності виробничих процесів.

## **1 Аналіз стану питання і завдання дослідження**

### **1.1 Якість подрібнення зерна і її вплив на продуктивність тварин**

Продуктивність тварин і птахів, тобто кількість і якість молока, м'яса, яєць, вовни та шкіри багато в чому залежить від годування.

Залежно від властивостей і хімічного складу корми діляться на грубі, соковиті і концентровані.

Корми є засобом забезпечення тварин і птахів енергією і поживними речовинами, необхідними для фізіологічних процесів і виробництва продукції тваринництва і птахівництва.

Наукою доведено, що поживні речовини містяться в кормах здебільшого у вигляді високомолекулярної форми і тому не можуть в первісному вигляді проходити через стінки клітин травного тракту. Ці речовини повинні попередньо розщепитися на прості складові частини, перейти в розчин і потім вже всмоктатися.

Справа в тому, що поживні речовини засвоюються організмом тварини тільки в розчиненому вигляді, а швидкість обробки частинок корму шлунковим соком прямо пропорційна площі їх поверхні. Тому перед згодовуванням корми, як правило, подрібнюють, що підвищує поїдання їх тваринами і сприяє кращому впливу на них травних соків.

Підготовлений для згодовування сільськогосподарським тваринам і птахам корм, повинен відповідати зоотехнічним вимогам відповідних стандартів або технічних умов на корми.

Основним джерелом кормового білка в харчуванні сільськогосподарських тварин і птахів є концентровані корми, які дають близько 50% протеїну. Тому особливе значення має підготовка їх до згодовування з метою максимального використання протеїну. За зоотехнічними нормами в кормових раціонах в середньому на 1 кормову одиницю повинно припадати 105-110 г перетравного протеїну. При його недоліку приблизно у 19% від потреби, недобір продукції становить 30-35%, а собівартість і витрата кормів зростає в 1,5 рази.

Концентровані корми (зернофуражні злаки, бобові культури, макуха і інші), які містять велику кількість поживних речовин перед згодовуванням тваринам і птахам піддають механічній обробці - подрібненню.

Подрібнення - найпоширеніший і абсолютно обов'язковий спосіб підготовки зернових кормів. При розмелі, дробленні і плющенні руйнується тверда оболонка зерна, полегшується розжовування, поживні речовини робляться доступнішими травним сокам, так як подрібнені частинки мають високорозвинену поверхню. Це сприяє прискоренню процесів травлення і підвищенню засвоюваності поживних речовин, і вони найбільш повно і без втрат можуть бути використані. Зерновий матеріал, що підлягає подрібненню не повинен містити в собі сторонніх домішок. З цією метою його очищають від металевих домішок на магнітних сепараторах, а від мінеральних, органічних домішок, насіння бур'янів і землі на зерноочисних машинах. Наявність цих домішок в кількостях, що перевищують встановлені норми, не тільки погіршує якість подрібненого зернового матеріалу, але і може бути причиною захворювання тварин і птахів. Крім цього, погано підготовлена до подрібнення зернова сировина порушує нормальну роботу машин і обладнання кормоприготувальних цехів. Пил, шматочки ґрунту або соломи затримують вихід зернового вихідного продукту з бункерів, а металеві предмети, що потрапили в подрібнювач, знижують експлуатаційні показники дробарок, вентиляторів, ковшів, норій і витків шнеків, при цьому виникають іскри, які можуть стати джерелом пожежі.

Вміст металевих домішок розміром до 2 мм допускається на 1 кг зернового корму не більше:

10% - для відлучених поросят;

15% - для вирощування і відгодівлі великої рогатої худоби (ДСТУ 9268-90);

20% - для курчат, молодняку курей і бройлерів (ДСТУ 18221-72);

25% - ремонтного молодняку свиней;

30% - для курей-несучок та свиней.

Наявність металевих частинок з ДСТУ рими краями розміром понад 2 мм не допускається.

Зміст мінеральних домішок (пісок) в комбікормах допускається не більше:

0,3% - для курчат;

0,5% - для молодняка, свиноматок, свиней беконного і м'ясного відгодовування;

0,7% - для відгодівлі свиней до жирних кондицій і маток, підготовлених до парування (ДСТУ 9267-68).

Вміст золи, нерозчинної в соляній кислоті в комбікормах допускається не більше:

0,3% - для курчат;

0,5% - для молодняка курей і бройлерів (ДСТУ 18221-72);

0,6% - для вирощування і відгодівлі великої рогатої худоби (ДСТУ 9268-90);

0,7% - для свиней (ДСТУ 9267-68);

1,0% - для курей-несучок.

Вологість зернового матеріалу, що підлягає тривалому зберіганню не повинно перевищувати 15-17%.

Зернові корми з високим вмістом жиру (овес, кукурудза, рис) не можна зберігати в подрібненому вигляді більше 10 днів.

Зернофураж, що містить насіння бур'янів для всіх видів і вікових груп тварин і птахів треба подрібнювати більш дрібно, щоб насіння разом з гноєм не поверталися на поля.

Багато дослідників присвятили свої роботи вивченню питання впливу подрібненого і неподрібненого зернового матеріалу на перетравність, засвоюваність і поїдання корму тваринами та птицею.

Вплив ступеня подрібнення зерна на добові прирости відгодовуваних свиней наведено в таблиці 1.1.

З таблиці 1.1 видно, що при дрібному розмелі перетравність і добові прирости значно вище, ніж при великому і неподрібненому.

По фізіології, свині мають однокамерний шлунок, крім цього свині зазвичай проковтують їжу без пережовування. В цьому випадку неповне використання корму набагато більше. Однак, як видно з таблиці 1.2, цього можна уникнути.

У таблиці 1.2 наведені дані про засвоєння свинями ячменю різного ступеня подрібнення.

Перетравність корму чітко зростає в міру того, як помел стає тоншим.

Таблиця 1.1 – Ефективність годівлі свиней кормами різної тонкості помелу

Вид помелу	Кукурудза		Ячмінь		Кормова суміш	
	Переварювані органічні речовини, %	Добові прирости, г	Переварювані органічні речовини, %	Добові прирости, г	Переварювані органічні речовини, %	Добові прирости, г
Великий	88,4	672	79,3	490	74,3	638
Середній	93,8	722	81,8	556	75,4	714
Мілкий	94,9	755	84,6	631	77,3	759
Цільне зерно	74,4	587	67,1	490	-	-

Досліди, проведені І.М. Захарченко показали, що згодовування телятам у віці від 1 до 6 місяців комбікорму з модулем дисперсності від 0,7 до 0,9 мм забезпечило їх інтенсивне зростання: середньодобові прирости склали 931 г до шестимісячного віку. Жива маса телят склала в середньому 205 кг. При годівлі телят комбікормами з модулем дисперсності від 0,4 до 0,6 мм їх середньодобовий приріст склав 672 г, тобто був на 17% нижчим. До шестимісячного віку, жива маса таких телят склала 176,9 кг - на 16,8% нижче.

Підвищений вміст дрібної фракції негативно позначається і при вирощуванні птахів.

Таблиця 1.2 – Коефіцієнти перетравності

Вид помелу (ячмінь)	Органічна речовина	Сирий протеїн	Сирий жир	Сира клітковина	Безазотисті екстрактивні речовини
Цільне зерно	67,1	60,3	36,7	11,8	75,1
Середній помел	80,6	80,6	54,6	13,3	87,7
Тонкий помел	84,6	84,4	75,5	30,0	89,6

А. А. Чемодуров встановив, що вирощування бройлерів на комбікормах у вигляді крупки (середній помел) дає значний економічний ефект, у порівнянні з вирощуванням на комбікормах (дрібного помелу): прирости були вищими на 6,6 %, а витрати на 1 ц приросту ваги були на 16,8 % нижче.

А. А. Складов зазначає, що включення в раціон відгодовуваних баранців розмеленого зерна ячменю замість цільного, сприяло збільшенню середньодобових приростів на 20,4 % і зниження витрати кормів на 1,6 корм. од. на 1 кг приросту.

Досліди, проведені К. Нерінгом при згодовуванні вівса коням, так само показали, що перетравність подрібненого вівса вище на 12,5%, ніж при згодовуванні неподрібненого.

З наведених досліджень можна зробити висновок: дроблення зернового матеріалу до необхідного ступеня подрібнення дозволяє збільшити поживну цінність, поліпшити поїдання і засвоюваність подрібненого корму тваринами та птицею. Це в кінцевому підсумку дає можливість зменшити витрати кормів, скоротити терміни відгодівлі, знизити собівартість випускаємої продукції тваринництва і птахівництва.

Однак до теперішнього часу питання про вибір ступеня подрібнення зернового матеріалу не вирішене повністю.

Професор І. С. Попов пише, що «ступінь подрібнення повинна бути різною в залежності від властивості корму, виду і віку тварини і птиці. Як загальне правило, зерно потрібно подрібнювати настільки, щоб тварина і птиця не ковтали його цілком без пережовування і засвоєння».

І. В. Макаров вважає, що якщо виходити з процесів травлення, то величина часток помелу цього корму може бути визначена як «фізіологічно необхідна».

Г. М. Кукта стверджує, що критерієм ступеня подрібнення служить модуль крупності помелу. Для кожного виду тварин і птахів є свої допустимі межі ступеня подрібнення, порушення яких веде до перевитрати кормів.

Зоотехнічні вимоги до подрібненого концентрованого корму, передбачають наступні вимоги. Для великої рогатої худоби розміри частинок не вище 3 мм; для підсисних порослят - 0,7...0,8 мм; відлучених порослят - 0,9...1,1 мм; свиней беконної

відгодівлі 1,2...1,6 мм; для птиці - до 1 мм, якщо годування виробляють вологими мішанками і 2...3 мм - при сухому годуванні.

Таким чином, до подрібнення концентрованих кормів, так само прийнятний принцип «не подрібнювати нічого зайвого».

## 1.2 Основні способи і засоби подрібнення зерна на корм

Залежно від способу впливу робочого органу на матеріал і виду викликаної в ньому деформації розрізняють такі схеми способів подрібнення (рисунок 1.1).

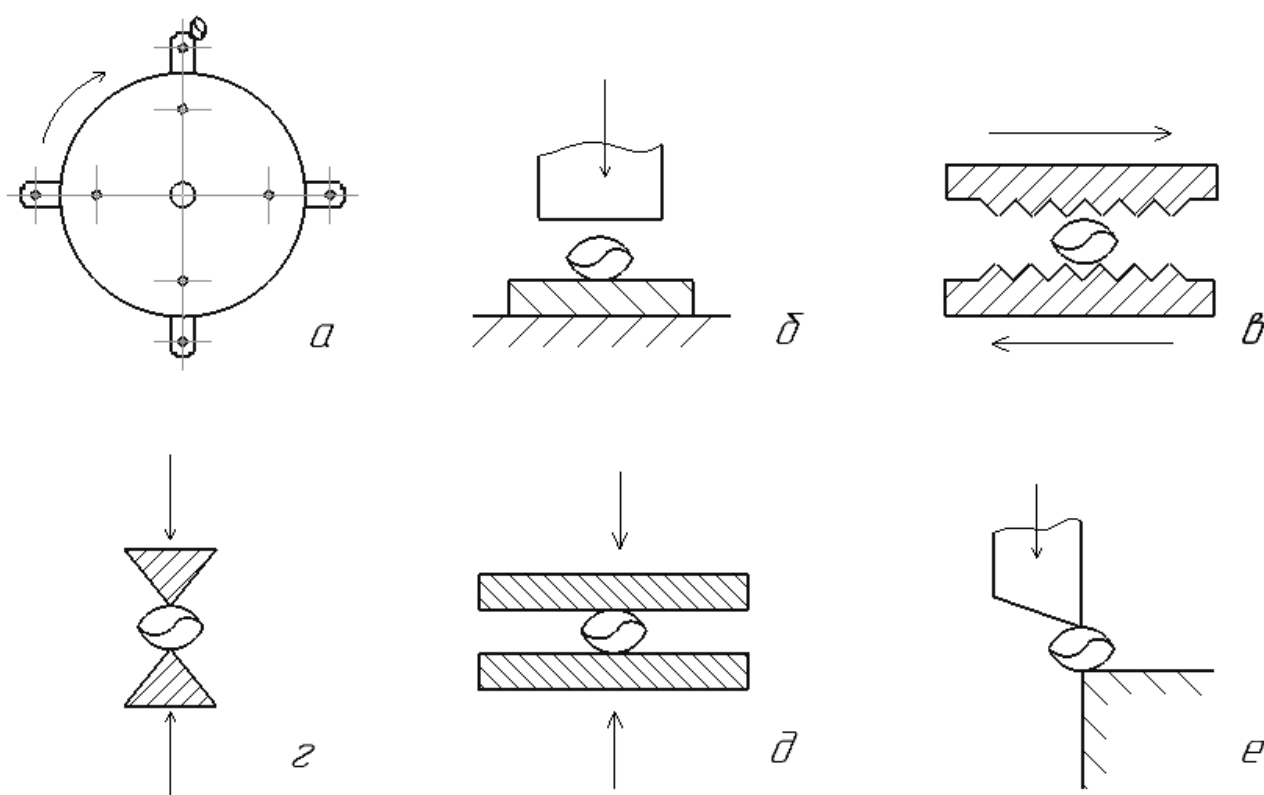


Рисунок 1.1 - Схеми способів подрібнення фуражного зерна

- а) Вільний удар; б) Обмежений удар; в) Стирання; г) Сколювання;  
д) Роздавлювання; е) Різання

Удар. Найбільш поширений спосіб подрібнення. Розрізняють руйнування матеріалів вільним (рисунок 1.1 а) і обмеженим (рисунок 1.1 б) ударом. При вільному ударі руйнування матеріалу настає в результаті зіткнення його з робочим органом або з іншими тілами в польоті. Ефект такого руйнування визначається

швидкістю зіткнення. При обмеженому ударі матеріал руйнується між двома робочими органами подрібнювача. Ефект такого руйнування залежить від кінетичної енергії ударного тіла.

Стирання (рисунок 1.1 в). Найдавніший спосіб подрібнення. При стиранні матеріал подрібнюється під дією стискаючих, що розтягують і зрізують сил.

Сколювання (рисунок 1.1 г). При сколюванні матеріал руйнується на частини в місцях концентрації найбільших навантажень.

Роздавлювання (рисунок 1.1 д). При роздавлюванні матеріал руйнується під дією навантажень у всьому обсязі. Руйнування відбувається тоді, коли внутрішні напруження в ньому перевищують межу міцності стиснення.

Різання (рисунок 1.1 е). При різанні матеріал ділиться на частини заздалегідь заданих розмірів і форм. Процес повністю керований.

Доцільність застосування того чи іншого способу подрібнення визначається, як фізико-механічними властивостями матеріалу, так і метою подрібнення. Однак це не відноситься до концентрованих кормів. Застосовувані для цієї мети подрібнювачі не застосовують в чистому вигляді у будь-якому зі згаданих способів. Як правило, в кожному подрібнювачі вони проявляються комбіновано при переважанні будь-якого з них. Розглянемо класифікацію подрібнюючих машин, які в даний час застосовуються для подрібнення зернового матеріалу (рисунок 1.2).

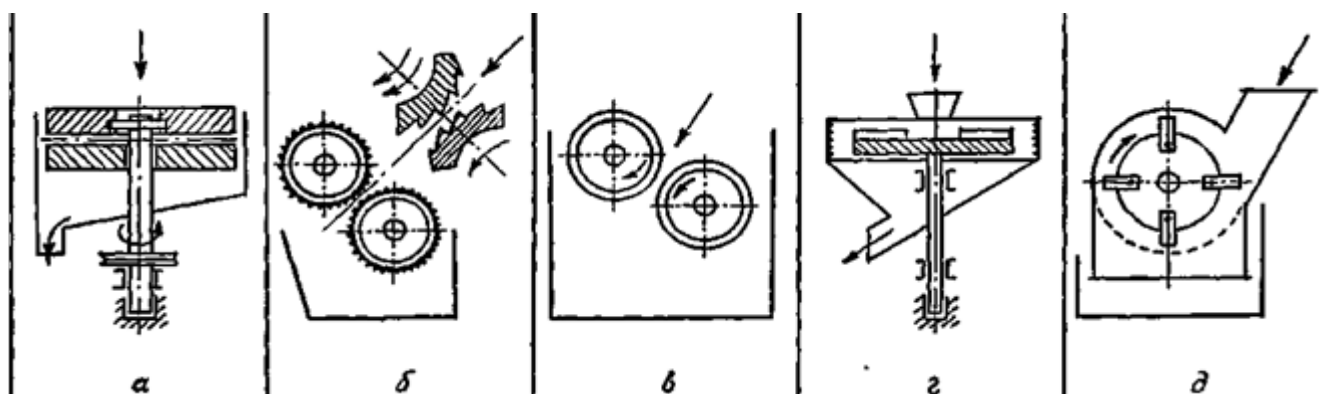


Рисунок 1.2 - Класифікація подрібнюючих машин використовуваних для подрібнення фуражного зерна в сільському господарстві

Спосіб стиснення і зсуву (рисунок 1.2 а) покладено в основу роботи жорнових млинів. Він прийнятний тільки для подрібнення сухих, не олійних



культур. Робочі органи - два плоских диска, виготовлених з гострозернистих штучних каменів, оборотного і нерухомого. Під дією відцентрової сили і сил тертя, зерна переміщуються від центру до периферії і при цьому описують значний шлях по спіралі.

Спосіб сколювання і зсуву (рисунок 1.2 б) покладено в основу роботи вальцевих верстатів. Робочі органи - два циліндричних валки, що обертаються з різними коловими швидкостями на зустріч один одному. Руйнування зерна відбувається в клиновидному просторі, утвореному циліндричними поверхнями з рифлями.

Способи стиснення і роздавлювання (рисунок 1.2 в) покладено в основу роботи плющильних верстатів. Робочі органи - два гладких циліндричних валки. Подрібнення зерна здійснюється між двома гладкими вальцями, що обертаються з однаковими коловими швидкостями. Причому один з вальців має притискний пристрій, який регулює зазор між валками.

Спосіб вільного удару і стирання (рисунок 1.2 г) покладено в основу роботи відцентрових дробарок. Робочий орган - розгінний диск з лопатками, що обертається з великою швидкістю й надає зерну прискорення. Зерно з великою швидкістю вдаряється об нерухому рифлену поверхню і зазнає руйнування.

Спосіб руйнування ударом в поєднанні зі стиранням (рисунок 1.2 д) покладено в основу роботи молоткових дробарок. Робочий орган - молотковий барабан. Подрібнення відбувається за допомогою швидко обертових, вільно підвішених на осях сталевих молотків, з якими продукт, що вводиться в дробарку, вдаряється і частково руйнується (відколюється). Потім стирається об молотки і нерухомі частини машини (решето, деки), а також від взаємного тертя частинок між собою.

Жорнові млини, працюючи за принципом стирання, придатні для розмелювання зернових кормів в борошно або дерть. Принцип стирання придатний тільки для сухих немаслоподібних зернових культур.

В якості робочих органів використовуються два плоских диска, (жорна) виготовлених з природних гірських порід. Але частіше, з штучно зцементованих порід кварцу, граніту і наждаку, що добуваються дрібними шматками. Сполучною

речовиною для них є хлористий магній ( $MgCl_2$ ) і магнезит ( $MgO$ ). Один з них зміцнюється нерухомо, а другий приводиться в обертання з коловою швидкістю 10...18 м/с. Готові жорна, задля уникнення їх розриву від дії відцентрової сили, обов'язково окувають сталевими обручами, насаджуючи останні в гарячому стані.

Робоча поверхня кожного жорна ретельно обробляється і ділиться на три пояси (рисунок 1.3).

На робочій поверхні жорен насічені борозни, що відходять від центру до периферії. Вони сприяють швидкому виходу подрібненого продукту, служать каналами для вентиляції (охолодження) робочих поверхонь і своїми гострими крайками частково беруть участь в подрібненні зерна шляхом його сколювання. Борозни в поперечному перерізі зазвичай мають трикутну форму (рисунок 1.4). Подрібненню зерна сприяє наявність ріжучої кромки 1, а потрапляння подрібнених частинок в борозну і їх переміщенню на вихід - тупий кут  $\beta$ . Кількість і розміри борозенок залежать від діаметра жорна і вибираються шириною  $a = 20...40$  мм, глибиною  $b = 4...8$  мм.

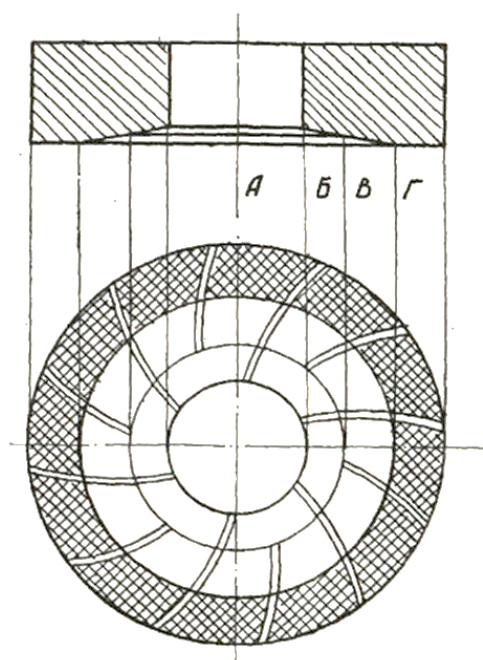


Рисунок 1.3 - Схема розподілу робочої поверхні жорна на пояси: А - отвір (ковток); В - підвідний пояс; Г- перемелюючий пояс

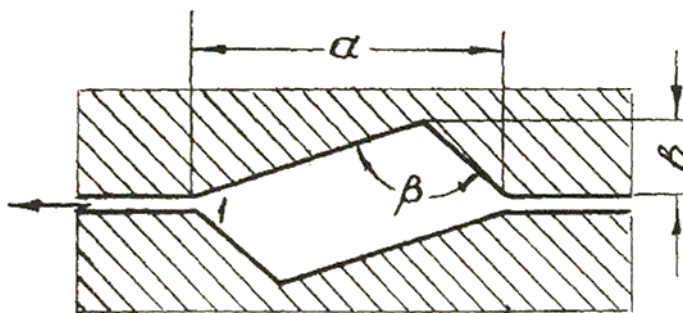


Рисунок 1.4 - Форма перетину борозенок у жорнах великого діаметру

Розрізняють головні борозенки і проміжні (короткі), а в малих жорнах обмежуються тільки головними борознами.

Поверхню жорен у перемелюючому просторі між борознами піддають насічці спеціальними молотками-насічками до отримання гострих шорсткостей, необхідних для більш інтенсивної розтираючої дії жорен. Глибина насічки повинна бути в межах 0,7...1,0 мм, а крок насічки 2,5...3 мм. У міру стирання насічку відновлюють, а борозни поглиблюють.

Продуктивність і потужність, потрібна на привід жорнових млинів, коливається у великих межах залежно від виду зерна, його вологості і ступеня розмелювання.

До недоліків жорнових млинів можна віднести:

- забивання борозенок подрібненим продуктом (особливо олійних культур);
- велика трудомісткість при поновленні насічки перемелюючого простору;
- порушення технологічного процесу при великій вологості матеріалу продукту, що подрібнюється.

На відміну від молоткових дробарок вальцеві млини відносять до групи подрібнювачів, в яких рухомі і нерухомі поверхні робочих органів стикаються один з одним, утворюючи через подрібнене зерно жорсткий контакт.

Вальцеві млини (верстати) найбільшого поширення набули в борошномельній і комбікормовій промисловості для розмелювання зерна в борошно.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики вальцевих млинів

Показники	ЗМ 25×1000	ЗМ 30×60	ВМП
Розміри вальців, мм	25×1000	300×600	185×400
Продуктивність однієї пари вальців, кг/год	2500	1500	1650
Гранично допустима потужність на одну пару вальців, кВт	18	10	10
Частота обертання швидкообертового вальця, хв <sup>-1</sup>	430	380	960
Нарізного	350	320	-
Гладкого			
Витрата повітря на аспірацію, м/с	0,17	0,3	-
Маса, кг	3450	3050	1000

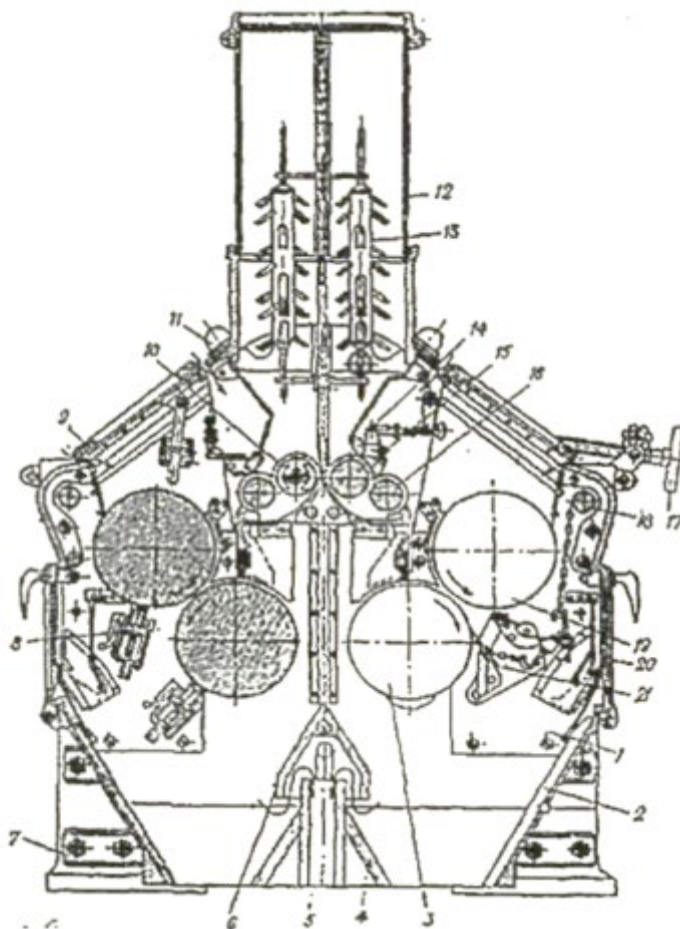


Рисунок 1.5 Схема верстата типу ЗМ

В існуючих конструкціях млинів діаметр вальців приймають в межах 250-350 мм. До недоліків вальцевих млинів можна віднести:

- підвищені вимоги до чистоти і вологості зернового матеріалу;
- необхідність періодичного поновлення рифленої поверхні;
- велика метало- та енергоємність.

Плющене зерно, попередньо зволожено водою або паром, або консервоване, широко застосовується в США, Канаді, Швеції та інших країнах, особливо на відгодівлі молодняку ВРХ. Для цих цілей використовують плющилки з гладкими вальцями однакового діаметра 200...700 мм і шириною 100...1000 мм, що обертаються з однаковою коловою швидкістю, з продуктивністю 0,2...10 т/год.

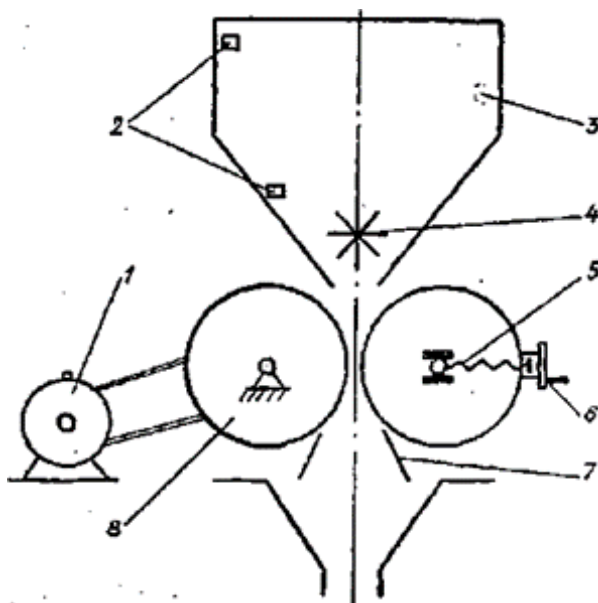


Рисунок 1.6 - Схема зерноплющилки ПЗ-3,0

Складається ПЗ-3,0 з електродвигуна 1, датчиків рівня зерна 2, бункера 3, барабанного дозатора 4, натискної пружини 5, пристрою для стиснення пружини 6, чистки 7, привідного вала 8.

Дослідами встановлено, що продуктивність з гладкими вальцями зростає зі збільшенням колової швидкості тільки до 8,5...9,0 м/с, а при подальшому збільшенні швидкості вальців погіршується захоплення зерна.

На основі результатів експериментальних досліджень рекомендовані такі параметри плющилки, продуктивністю 3...5 т/год для зерна з вологістю 25%:

- діаметр вальців 350...450 мм;
- довжина 500...600 мм;
- тиск пружин на валець 4,2...5,0 т;
- колова швидкість вальців 8,0...8,5 м/с;
- встановлена потужність електродвигуна 20...22 кВт.

На рисунку 1.7 представлена вальцева плющилка, яка містить камеру 8 з вмонтованими в ній на осях вальцями 9 і 10. Камера 8 через точку 3 з'єднана з подаючим шнеком 1, укладеним в кожух. У вивантажній горловині шнека 1 змонтовано решето 2, під котрим в точці 3 встановлена розширена до низу пластина 4. Нижня кромка 5 пластини 4 утворює зі стінкою 6 точки 3 щілинний прохід для прокидання зерна. Безпосередньо під кромкою 5 на стінці 6 закріплений відокремлювач 7.

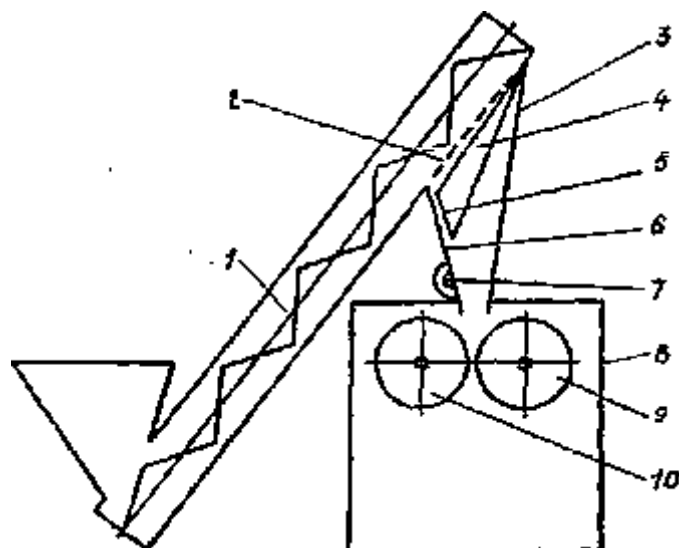


Рисунок 1.7 Схема вальцевої плющилки

До недоліків плющильних верстатів можна віднести наступні пункти:

- перед плющенням виникає необхідність зволоження матеріалу, зерна, що подрібнюється паром або водою;
- одержуваний при плющенні продукт погано піддається змішуванню з іншими компонентами, що входять до складу комбікормів і кормових сумішей;
- межі варіювання модуля помелу після плющення не дозволяють використовувати плющене зерно для згодовування всім видам тварин і птахів.

Відцентрові дробарки. Розгін вихідного матеріалу лопатями ротора за допомогою відцентрової сили з подальшим руйнуванням по відбійним плитам, встановленим по колу на корпусі подрібнювача, відомий з позаминулого століття.

З усього різноманіття запропонованих конструкцій молоткових дробарок на тваринницьких фермах і комплексах для подрібнення концентрованих кормів широко застосовуються молоткові дробарки із замкнутим повітряним циклом типу ДКУ, КДУ, КДМ, ДБ.

Основним робочим органом всіх молоткових дробарок є молотковий барабан (рисунок 1.11), що складається з шести дисків 6, закріплених на шпонці 10 і зафіксованих розпірними втулками 9.

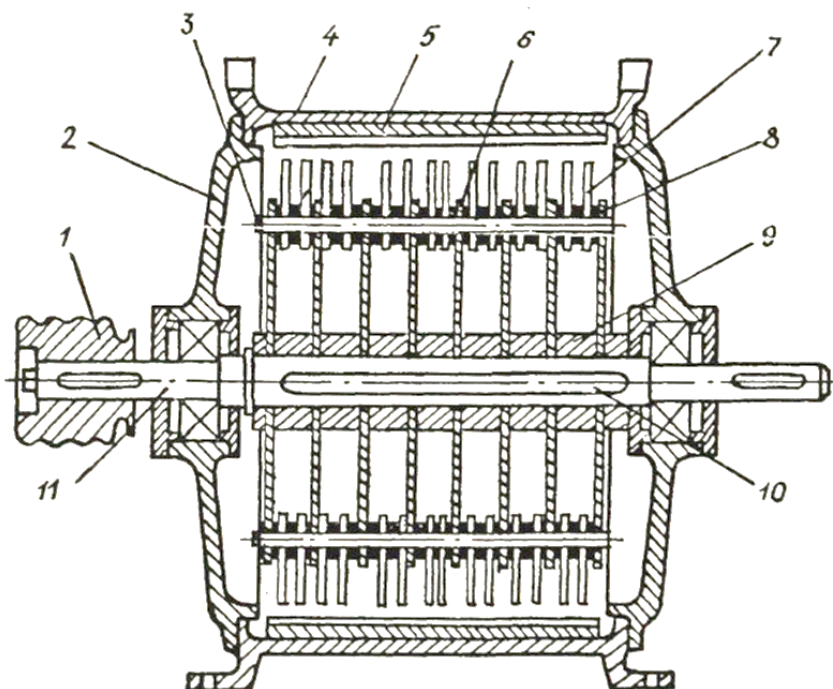


Рисунок 1.11 Молотковий барабан

Через отвори у периферійній частині дисків проходять шість пальців 3, зашпінтовані в середній частині. На пальцях шарнірно підвішені пакети молотків 7 (по 15 штук в кожному пакеті). Строго задана відстань між молотками фіксується розпірними втулками 8. У верхній і нижній частинах корпусу 4 встановлена дека 5. З торців корпусу встановлені боковини 2, в яких на підшипниках встановлюється головний вал 11, привід якого здійснюється через шків 1.

Недоліками даного молоткового барабана є динамічна невірноваженість при нерівномірному зносі молотків, що призводить до швидкого зносу підшипників головного вала, а також сама заміна молотків при зносі має велику трудомісткість, через необхідність розбирання зашплінтованих пальців.

Перевага молоткових дробарок у відносній простоті конструкції, невеликих габаритних розмірах, невеликій масі і високому ступені здрібнювання.

### **1.3 Огляд теоретичних досліджень молоткових дробарок**

До основних подрібнюючих робочих органів сучасних молоткових дробарок, що змінюють якісний стан перероблюваного фуражного зерна, відносяться молотки, решета і деки.

Відомо, що ступінь розмелювання значно знижується при зносі робочих граней молотків. За даними термін служби молотків, в залежності від переробленого продукту, становить від 72 до 300 годин. Ресурс інших робочих органів на 1...2 порядки вище. Таким чином, найслабшою ланкою в дробарці є молоток.

Аналіз робіт, присвячених дослідженням молоткових дробарок, показав, що питаннями взаємодії молотка і зерна не приділялося належної уваги. Тому проектування молотків навіть в даний час ведеться емпірично, звідси спостерігається велика різноманітність їх форм та розмірів.

Вирішальним фактором для обґрунтування тієї чи іншої форми молотка, їх кількості, конструктивних розмірів, маси, є простота і економічність виготовлення, а також критерій якості одержуваного готового продукту.

Найбільш широкого поширення набули пластинчасті молотки (прямокутні або зі східчастими кінцями), у таких молотків з двома осями підвісу використовуються чотири робочі межі.

В. А. Єлісеєвим і А. М. Тарасенко було встановлено, що для молоткового барабана діаметром 0,5 м оптимальним є число пакетів молотків рівне 9...10 шт., А збільшення їх кількості призводить до зростання питомої витрати енергії.



В. В. Воронін наводить дані досліджень А. Т. Імерса і А. А. Зеленева в яких рекомендується виготовлення молотків товщиною 1,5...2,5 мм. Б. Д. Рабінович провівши дослідження щодо впливу товщини молотків на процес подрібнення, встановлював молотки товщиною 2...3 мм. Досліди показали зниження продуктивності при зменшенні товщини із 3 до 2 мм на 3...4 %, а якість розмелювання при цьому зменшилася.

На підставі вищевикладеного можна відзначити:

- збільшення кількості молотків призводить до зростання питомої витрати енергії на подрібнення;
- пластинчасті пакети молотків встановлені на молотковому барабані створюють в подрібнювальній камері великі кругові повітряні потоки, які погіршують якісний процес подрібнення;
- спостерігається підвищений знос тонких пластинчастих молотків в процесі подрібнення, що призводить до розбалансування молоткового барабана.

Таким чином, при конструюванні робочих органів для малогабаритного подрібнювача доцільно замінити пакети пластинчастих молотків на монолітні в кількості від 2 до 4 штук.

Важливе значення в роботі молоткових дробарках має зазор між кінцями молотків і декою. Від його величини залежить ефективність роботи дробарок і якість готового продукту.

Вплив зазору між молотком і поверхнею камери дроблення досліджував І. І. Ревенко. Для підвищення ефективності роботи дробарки автор рекомендує встановити мінімальну величину зазору і пропонує формулу для її визначення:

$$\Delta R_{\min} = \sqrt{l^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} - l + \delta \quad (1.1)$$

де  $l$  - відстань від осі підвісу молотка до його осі, м;

$b$  - ширина молотка, м;

$\delta$  - допуск на неточність розмірів.

Ф. Г. Плохов рекомендує для підвищення продуктивності збільшити зазор до 15...25 мм. Але при цьому збільшується модуль помелу більш ніж в два рази і знижується питома витрата енергії на 17...22 %.

Однак В. А. Єлісеєв зазначає, що для дробарки з оптимальною і недостатньою потужністю електродвигуна зменшення зазору з 25 до 5 мм сприяє підвищенню продуктивності в 6...10 разів, при цьому готовий продукт має вирівняний гранулометричний склад і спостерігається незначне збільшення питомих витрат енергії.

Аналогічної думки дотримується і В. І. Сироватка. Він вважає, що зменшення зазору підвищує ефективність процесу подрібнення і пропонує встановлювати зазор в межах 1,5... 2,0 мм.

У своїй роботі І. А. Уланов стверджує, що ефективність ударів частинок подрібненого корму о деку в значній мірі залежить від кута падіння зерна і буде найбільшою при  $\alpha = 0$ , тобто у разі прямих ударів. З цією метою лобову грань рифлів дек слід виготовляти під кутом  $\alpha_1 = 40...45^\circ$  до радіусу дробильної камери, а кут нахилу тильної межі рифлів під кутом  $\beta_1 = 55...60^\circ$ .

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок:

- зменшення зазору сприяє підвищенню продуктивності, і дає більш рівномірний гранулометричний склад одержуваного продукту;
- ефективність процесу руйнування спостерігається при прямому ударі зерна о деку, тобто кут падіння зерна на деку  $\alpha = 0$ .

Таким чином, при розробці конструкції мологабаритного подрібнювача, необхідно передбачити установку деки з зазором 1,5...2,0 мм, при чому ребра граней рифлів повинні здійснювати защемлення зерна між ріжучими кромками монолітного молотка, тим самим, забезпечуючи здійснення способу подрібнення «сколювання-зріз».

Питання про вплив робочої швидкості молотків на ефективність роботи молоткових дробарок може бути правильно вирішено тільки при одночасному вивченні впливу на ефективність і ряд інших факторів, таких, як кількість ударів (молотків, пакетів), їх інтенсивність (робота деформації), час перебування матеріалу в камері (кінетика подрібнення), конструктивні параметри дробарок. При

виборі робочої швидкості молотків повинна враховуватися не тільки технічна доцільність, а й економічна ефективність, так як з підвищенням частоти обертання, молоткового барабана витрати енергії на холостий хід виростають в третю ступінь. Поряд з цим, підвищення швидкості молотків надає найбільш сильний вплив на інтенсифікацію диспергування, викликаючи при цьому переподрібнення частинок матеріалу.

С. В. Мельников наводить дані з подрібнення сухої січки на дробарці агрегату АВМ-0,4. З яких видно, що зі збільшенням швидкості молотків від 54 до 115 м/с питома витрата енергії знизилась на 21 %, ступінь подрібнення зросла на 110 %, потужність холостого ходу збільшилася на 75 %.

Деякі дослідники вважають, що зі збільшенням швидкості питома енергоємність процесу дроблення повинна зменшатися. Інші дотримуються думки про підвищення енергоємності динамічного способу руйнування, оскільки із збільшенням швидкості зростає опір матеріалу руйнуванню.

На думку А. А. Зеленева, збільшення швидкості молотків підвищує ефективність руйнування за рахунок збільшення імпульсу ударів, викликає підвищення продуктивності і зниження питомої витрати енергії, але супроводжується збільшенням шкідливих опорів.

W. S. Kruger при вивченні швидкісного режиму прийшов до наступних висновків:

- зі збільшенням коллової швидкості молотків продуктивність дробарки падає, а дисперсність продукту збільшується;
- з підвищенням коллової швидкості молотків ефективність дробарки знижується.

Я. М. Купріц стверджує, що при збільшенні швидкості молотків ступінь подрібнення і питома витрата енергії зростають. До таких же висновків дійшов і Г. І. Шуб.

При проведенні експериментів дослідники прагнули виявити критичну швидкість руйнування зернового матеріалу.

Провівши статичні випробування на міцність властивостей зерен ячменю

С. В. Мельников] визначив, що максимальна швидкість при поздовжньому ударі стрижня по зерну становить 6,7 м/с, що в 8...15 разів менше значень робочих швидкостей молотків в дробарках.

Критична швидкість руйнування зерна, за даними А. М. Гудкова становить 30...35 м/с.

На думку А. Амелянца в дробарках, де подрібнення фуражного зерна відбувається за допомогою вільного удару, ефективність процесу залежить, перш за все, від швидкості робочих органів. Значення цього параметра, необхідне для руйнування ячменю становить 50 м/с, оптимальна швидкість руйнування 56...62 м/с.

За даними Я. С. Гівіна значення критичних швидкостей руйнування зерна різних культур становить: для ячменю в межах 25,05...37,6 м/с; для твердої пшениці 21,69...30,6 м/с; для м'якої пшениці 17,7...35,4 м/с.

В. І. Сироватка вважає, що в існуючих кормодробарках швидкість молотків, рівна 42...70 м/с, цілком достатня для того, щоб забезпечити первинне руйнування зерна. При цьому досягається економна робота.

І. І. Ревенко експериментально встановив, що найбільш вигідний робочий режим дробарки спостерігається при швидкостях від 55...75 м/с. Подальше збільшення швидкості призводить до зайвого перетирання продукту і підвищеного виділення пилоподібних фракцій.

Проблемою оптимізації швидкісного режиму молоткових дробарок займалися і ряд зарубіжних дослідників.

Е. А. Silver експериментальним шляхом встановив оптимальну колову швидкість робочих органів дробарки в межах 40...45 м/с, відзначаючи при цьому вирівняний гранулометричний склад готового продукту.

А. Т. Hendrix рекомендує приймати значення колової швидкості молотків рівній 50 м/с.

На підставі вищевикладеного можна сказати, що колова швидкість молотків є одним з основних факторів, що впливають на ефективність роботи молоткових дробарок. Але як показують проведені дослідження, в цьому питанні немає єдиної думки серед дослідників. Суперечливість отриманих результатів по енергоємності

процесу і по робочим швидкостям молотків можна пояснити тим, що дослідження проводилися на дробарках різних конструкцій, отже, технологічні процеси подрібнення зерна протікали по-різному.

Таким чином, при конструюванні малогабаритних подрібнювачів призначених для подрібнення фуражного зерна на корм худобі і птиці в особисто-підсобних, фермерських та селянських господарствах з технічних і економічних міркувань слід приймати колову швидкість молотків в межах від 25...35 м/с, з урахуванням досягнутого ступеня подрібнення для різних видів тварин і птахів.

#### **1.4 Висновки по розділу**

Провівши аналіз теоретичних даних, було сформульовано мету і задачі дипломної роботи:

Мета дипломної роботи: підвищення ефективності робочого процесу подрібнювача концентрованих кормів шляхом оптимізації основних конструкційно-технологічних параметрів.

Відповідно до мети поставлені задачі, які необхідно вирішити на етапах дослідження:

- провести огляд існуючих конструкцій подрібнювачів кормового зерна та аналіз останніх досліджень процесу подрібнення;
- провести теоретичне обґрунтування конструктивно-режимних параметрів малогабаритного молоткового подрібнювача фуражного зерна;
- розробити та реалізувати дослідний зразок подрібнювача та провести його експериментальні випробування на предмет пошуку оптимальних значень конструкційно-технологічних параметрів;
- експериментально дослідити показники якості процесу подрібнення, а саме: питомої витрати енергії від колової швидкості, кількості монолітних молотків і подачі матеріалу;
- провести розробку заходів при експлуатації та прогнозування інженерної обстановки при виникненні надзвичайної ситуації;
- провести техніко-економічне обґрунтування удосконаленого подрібнювача зерна.

## **2 Теоретичне обґрунтування параметрів молоткового подрібнювача**

### **2.1 Теоретичний аналіз процесу подрібнення зерна**

Процес подрібнення, як показує практика, дуже складний і залежить від цілого ряду чинників, так, наприклад, від фізико-механічних властивостей матеріалів, від стану і форми робочих органів, режиму роботи, конструкції і обраного технологічного процесу агрегату. Як було показано вище, молоткові дробарки також застосовуються для подрібнення фуражного зерна, тому необхідно детально розглянути процеси, що відбуваються в камері подрібнювача.

В результаті складності явищ, що мають місце в робочій камері подрібнювача до теперішнього часу немає єдиної думки про схему робочого процесу в камері молоткових кормоподрібнювачів.

Найбільш цінні теоретичні дослідження по динаміці молоткової дробарки провели С. В. Мельников, В. А. Єлісеєв, А. П. Макаров, В. І. Сироватко та ін. Серед численних теоретичних досліджень В. П. Горячкіна є роботи по теорії удару і ексцентричній дії сили. Процес подрібнення вкрай складний і різноманітний за своїм характером. Він складається, перш за все, з подолання пружних і пластичних деформацій, тіла що подрібнюється, утворення нових поверхонь, подолання зовнішнього і внутрішнього тертя, а також подолання всіляких втрат. Провести точний вимір корисно-витраченої енергії при подрібненні вельми важко. Енергія витрачається на тертя в механізмах машини, на подолання інерції обертових частин подрібнювача, на виробництво деформації без подрібнення, навіть на виробництво шуму і т. д. Існуючі нині дві теорії дроблення твердих тіл (поверхнева і об'ємна), що наводяться Г. Г. Єгоровим і професором Л. Б. Левенсоном при розгляді процесу дроблення корисних копалин, в якійсь мірі (приблизно) знаходять застосування в розрахунках дробильних установок і кормо-приготувальних процесів.

В основу поверхневої теорії покладена гіпотеза: що робота подрібнення прямо пропорційна поверхні подрібнених тіл.

Щоб довести цю гіпотезу, береться куб зі сторонами, рівними 1 см і ділиться на більш дрібні кубики з урахуванням витраченої роботи. При поділі куба навпіл, витрачена робота буде дорівнювати -  $A$  кг/см, а при поділі куба на кубики зі стороною,  $a=0,5$  см, потрібно розділити його за трьома площинами. Тобто, витрачена робота буде дорівнювати  $3 A$  кг/см, а число кубиків буде  $2^3=8$ . Якщо ж кубики зі сторонами 1 см розділити на кубики зі сторонами  $1/3$  см, то вже буде шість розділяючих площин, а витрачена робота буде дорівнювати  $6 A$  кг/см число кубиків при цьому буде  $3^3=27$ .

У загальному випадку при дробленні куба зі сторонами 1 см на кубики сторонами  $1/n$  см або  $1/m$  см, в першому випадку буде потрібно ділити куб по  $3(n-1)$  площини, а в другому по  $3(m-1)$  площинах. Витрачена робота при цьому відповідно буде дорівнює:

$$A_n = 3 \cdot A(n-1)$$

$$A_m = 3 \cdot A(m-1) \quad (2.1)$$

Відношення робіт, витрачених, при дробленні на  $n$  частин буде:

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{3 \cdot A(n-1)}{3 \cdot A(m-1)} = \frac{(n-1)}{(m-1)}$$

При великих значеннях  $n$  і  $m$ , одиницею можна знехтувати, тоді:

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{n}{m} \quad (2.2)$$

Ця формула показує, що при досить великій мірі подрібнення робота дроблення прямо-пропорційна ступеню подрібнення.

За об'ємною гіпотезою Кирпичева-Кіка передбачається, що основна частина енергії, що витрачається на дроблення йде на деформацію в межах пружності. Але,

тому що деформація в межах пружності пропорційна обсягу (Гук), то і «Енергія, необхідна, для виробництва аналогічних змін в контурі геометрично подібних тіл однакового технологічного складу змінюється, пропорційно обсягам або масам цих тіл» (2.2).

Математичне вираження закону:

$$A = c \cdot F \cdot L \quad (2.3)$$

де  $c$  - постійна;

$F$  - площа поперечного перерізу тіла;

$L$  - довжина тіла.

А для куба з ребром:

$$\frac{D}{A} = c \cdot D^3 \quad (2.4)$$

У цьому виразі немає основного показника - ступеня подрібнення [6], який саме є характеристикою дроблення. Цей показник вперше був введений в рівняння Стеблером.

Нехай  $D$  - ребро роздріблюваного шматка,  $d$  - ребро отриманого куба, то  $\frac{D^3}{d^3} = n$  - це кількість отриманих кубиків з ребром  $d$  за один прийом дроблення.

За  $X$  прийомів:

$$\frac{D^3}{d^3} = n^x, \text{ звідки } x = \frac{\lg D^3 - \lg d^3}{\lg n} \quad (2.5)$$

Робота ж, витрачена на дроблення за  $n$  прийомів:

$$A = x \cdot c \cdot D^3 = \frac{cD^3}{\lg n} \cdot \lg \frac{D^3}{d^3}$$



$$\frac{c \cdot D^3}{\lg n} = \text{Const} = k, \text{ то } A = k \cdot \lg \frac{D^3}{d^3} \quad (2.6)$$

Тоді відповідно до закону Кирпичева-Кіка співвідношення витрати енергії будуть:

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{\lg \frac{D^3}{d_n^3}}{\lg \frac{D^3}{d_m^3}} \quad (2.7)$$

Безсумнівно, що об'ємна гіпотеза Кирпичева є найбільш обґрунтованою, бо вона ґрунтується на відомій формулі теорії пружності Гука, що дає абсолютну величину деформації:

$$A = \frac{\delta^2 \cdot V}{2 \cdot E} \quad (2.8)$$

де  $A$  - робота деформації, тобто робота внутрішніх сил пружності, рівна за відсутності втрат, роботі зовнішніх сил, що викликали дану пружну деформацію тіла;

$\delta$  - напруга стиснення, що виникає при деформації, в кг/см<sup>2</sup>;

$V$  - обсяг тіла, що деформується, см<sup>3</sup>;

$E$  - модуль пружності, кг/см.

Неважко помітити, що об'ємна гіпотеза враховує тільки витрату енергії на деформацію тіла до межі пружності. Тому, якщо межа міцності матеріалу близька до межі пружності, то ця теорія досить точно характеризує процес руйнування. Якщо межа міцності далеко від межі пружності, то ця гіпотеза характеризує тільки першу частину процесу подрібнення, а друга частина процесу відбувається в поверхневій теорії руйнування.

В даний час існує думка, що ці гіпотези не суперечать, а швидше доповнюють один одну, причому теорія об'ємного руйнування відноситься до грубого попереднього дроблення, а теорія поверхневого руйнування до подальшого, більш тонкого подрібнення.

З питання руйнування продукту в молотковій дробарці А. П. Макаров пропонує чотири можливих випадки впливу робочих органів дробарки на продукт:

1. Руйнування від удару молотком вліт.
2. Руйнування від удару об нерухому масу машини.
3. Руйнування від удару при зіткненні частинок корму, що рухається з великою швидкістю.
4. Руйнування від удару молотком по нерухомій масі корму, розташованій на решеті.

При цьому домінуюча дія того чи іншого випадку удару залежить в основному від волоДСТУ і кормів і їх пружності.

Погоджуючись з І. В. Макаровим в питанні оцінки технологічних процесів дробарок, М. Б. Фабрикант розглядає механічну сторону кожного з трьох випадків ударів, що відбуваються в дробильній камері. Аналізуючи вище наведені дослідження при розробці малогабаритного подрібнювача слід розглянути два перші випадки як основні в технологічному процесі.

$$\text{Тоді: } R_1 = r \cdot b \cdot \sin(180^\circ - \alpha) = r \cdot b \cdot \sin \alpha ;$$

$$\text{Або } F_t \cdot h = m \cdot g \cdot b \cdot \sin \alpha + m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot b \cdot \sin \alpha + f \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R_1 \cdot r .$$

При встановленому русі, тобто при  $\alpha = 0$ ;

$$F_t \cdot h = f \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R_1 \cdot r \quad (2.9)$$

Таким чином,  $F_t \cdot h > f \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R_1 \cdot r$ , якщо молоток буде відхилятися. З цього рівняння знаходимо мінімальну масу молотка  $m_{\min} > \frac{F_t \cdot h}{f \cdot \omega^2 \cdot R_1 \cdot r}$ , яка забезпечує його радіальне положення при сталому русі.

Відцентрова сила інерції молотка:

$$F_y^4 = m \cdot a_c = m \cdot \omega^2 \cdot R \quad (2.10)$$

де  $m$  - маса молотка, кг;

$\omega$  - кутова швидкість,  $\text{c}^{-1}$ ;

$R$  - відстань від осі обертання барабана до центру мас молотка, м.

Із трикутника  $OO_1C$ :  $R_1 \cdot \alpha = 2 \cdot S$  трикутника, де  $S = \frac{1}{2} \cdot r \cdot b \cdot \sin(180^\circ - \alpha)$ .

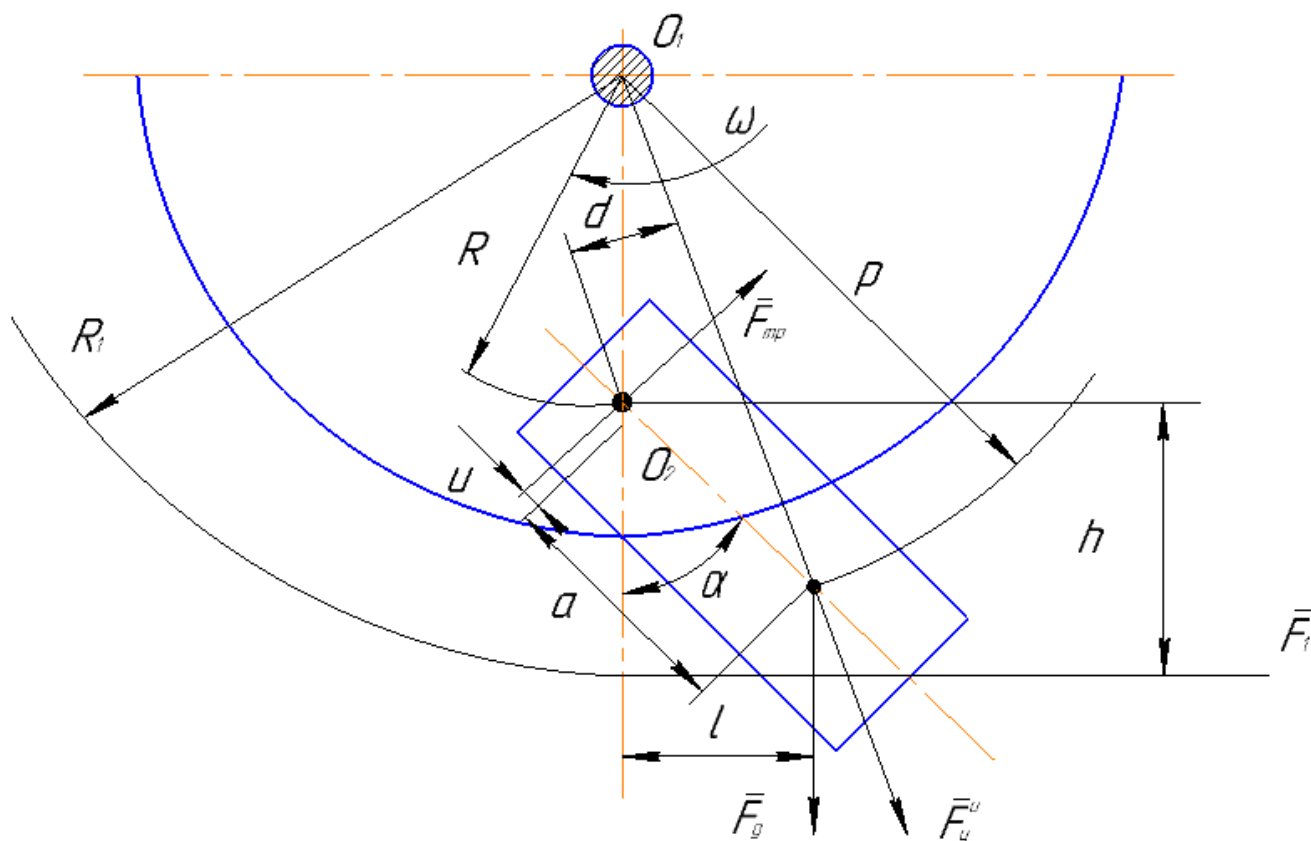


Рисунок 2.1 - Схема діючих сил на молоток при русі

Мінімальний діаметр осі підвісу молотка визначається з умови міцності на зріз і стискання:

$$\tau_{cp} \frac{F_y^4}{A_{cp}} \leq [\tau_{cp}] \quad (2.11)$$

де  $A_{cp} = \frac{\pi \cdot d_0}{4} \cdot k$  - площа зрізу осі молотка;

$k = 2 \cdot z$  - число площин зрізу, яке визначається кількістю молотків.

$$\tau_{cp} = \frac{4 \cdot A_y^4}{\pi \cdot d_0^2 \cdot 2 \cdot z} \leq [\tau_{cp}], \text{ тоді}$$

$$d_0 \geq \sqrt{\frac{2 \cdot F_y^4}{\pi \cdot [\tau] \cdot z}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R}{\pi \cdot [\tau] \cdot z}}$$

Площа стискання осі молотка  $A_{cm} = d_0 \cdot S \cdot n$ ,

де  $S$  - товщина диска;

$n$  - число дисків.

$$\sigma_{cm} = \frac{F_y^4}{A_{cm}} \leq [\sigma_{cm}]$$

$$\sigma_{cm} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot R}{d_0 \cdot S \cdot n} \leq [\sigma_{cm}]$$

Товщина диска визначається виразом:

$$S \geq \frac{m \cdot \omega^2 \cdot R}{d_0 \cdot [\sigma_{cm}] \cdot n} \quad (2.12)$$

## 2.2 Енергетична оцінка процесу подрібнення

В якості теоретичної основи для вивчення технологічного процесу і виявлення енергетичних показників подрібнення прийнята раціональна формула В. П. Горячкіна, яка найбільш повно відображає процеси, що відбуваються в кормоподрібноючих машинах.

$$P = f \cdot G + k \cdot \alpha \cdot b + E \cdot \alpha \cdot b \cdot v^2 \quad (2.13)$$

В. П. Горячкін спочатку запропонував формулу для визначення сили тяги плуга. Однак, виявилось, що вона може бути застосовна і для визначення сили опору різання металу і дерева різцем, а також сільськогосподарських матеріалів ножем, опору води переміщенню пароплава, опору повітря польоту аероплана і т. д. Формулу (2.26) можна представити у вигляді:

$$F = F_0 + k \cdot \alpha \cdot b + E \cdot \alpha \cdot b \cdot v^2 \quad (2.14)$$

де  $F_0$  - опір на протягування робочого органу в середовищі, де ще не піддаються деформації матеріали цього середовища.

Формулу (2.14) можна виразити як потужність (кВт):

$$P = F_0 \cdot V + k \cdot \alpha \cdot b \cdot V + E \cdot \alpha \cdot b \cdot v^3 \quad (2.15)$$

За аналогією з формулою (2.28), можна отримати і таку формулу:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 \quad (2.16)$$

Використовується машинами для подрібнення матеріалу.

$A$  - загальна робота машини;

$A_1$  - робота, що витрачається на холостий хід робочих органів, тобто енергія, що витрачається на подолання шкідливих опорів;

$A_2$  - робота, що витрачається на процес подрібнення матеріалу при взаємодії робочих органів;

$A_3$  - робота, що витрачається на переміщення і відкидання матеріалу в процесі подрібнення.

Щоб підтвердити придатність цієї формули до кормоподрібноючих машин, проведемо попередній аналіз тричленного рівняння (2.16).

Перший член  $A_1$  рівняння (2.16) стосовно малогабаритного подрібнювача, висловлює роботу на подолання шкідливих опорів (холостий хід) робочих органів. Шкідливі опори викликаються двома причинами: тертям в підшипниках і опором повітря.

За теорією молотильного барабана, розробленої В. П. Горячкіним, потужність холостого ходу малогабаритного подрібнювача, тобто потужність на подолання шкідливих опорів дорівнює:

$$P_{xx} = A_0 \cdot \omega + B_0 \cdot \omega^3$$

$$P_{xx} = R_{on} \cdot f_n \cdot r \cdot \omega + \frac{\gamma_e \cdot S_n \cdot i \cdot r_n^3 \cdot \omega^3}{2} \quad (2.17)$$

де  $R_{on}$  - сумарна реакція в опорах;

$f_n$  - коефіцієнт тертя в підшипниках;

$r$  - радіус цапфи;

$i$  - число кронштейнів з підвішеними на них молотками;

$\omega$  - кутова швидкість,  $c^{-1}$ ;

$\gamma_e$  - щільність повітря, зазвичай приймається рівним 1,2 кг/м<sup>3</sup>;

$S_n$  - лобова площа одного комплекту кронштейнів з молотками, розташована поперек напрямку руху, м<sup>2</sup>;

$r_n$  - відстань центру лобової поверхні від осі обертання барабана, м;

$A_0$  і  $B_0$  - коефіцієнти, які виражають опір тертя і опір повітря при його витісненні;

$P_{xx}$  - потужність холостого ходу при різних частотах обертання ротора.

Другий член  $A_2$  формули (2.17) виражає роботу, затрачену на процес подрібнення зернового матеріалу.

Основна витрата роботи, в процесі подрібнення йде на утворення нових поверхонь і деформацію матеріалу, тобто використовується на способи подрібнення «удар вліт» і «сколювання-зріз».

Перша частина витрати енергії залежить від властивостей матеріалу, що подрібнюється (міцності зерна). Ця частина роботи при подрібненні однорідного матеріалу постійна і підкоряється закону пропорційності витраченої роботи на утворення мікротріщин на поверхні зерна в результаті його подрібнення.

Друга частина витрат енергії витрачається на деформацію матеріалу, і залежить від способу подрібнюючих зусиль і від виду деформації «сколювання-зріз».

З теоретичної механіки відомо, що робота, яка використовується для руйнування матеріалу при ударі, пропорційна квадрату швидкості зіткнення:

$$A_m = \frac{m \cdot v_{\text{сод}}^2 \cdot n_{\text{уд}}}{2} \quad (2.18)$$

де  $m$  - маса зерна, яке перебувало в технологічному процесі за одну секунду;

$n_{\text{уд}}$  - число ударів завданих монолітними молотками по зерну в одну секунду.

$v_{\text{сод}}$  - швидкість зіткнення молотка з часткою зерна (м/с), дорівнює:

$$v_{\text{сод}} = v_p - v_c \quad (2.19)$$

Для визначення кількості ударів  $n_{\text{уд}}$  в секунду необхідно знати:

1) Частоту обертання ротора ( $\text{с}^{-1}$ ):

$$n_p^1 = \frac{n_p}{60} \quad (2.20)$$

2) Частоту обертання матеріалу, що подрібнюється за цей же час ( $\text{с}^{-1}$ ):

$$n_c = \frac{1}{t_{\Pi}} = \frac{v_c}{S_c} \quad (2.21)$$

3) Кількість ударів за секунду визначається за формулою:

$$\frac{n_p^1}{n_c} \cdot n_{\Pi} = n_{y\partial} \quad (2.22)$$

Підставляючи значення  $n_p^1$  з виразів (2.33) і (2.34) в (2.35), отримаємо:

$$n_{y\partial} = \frac{n_p \cdot S_c}{60 \cdot v_c} \cdot n_{\Pi} \quad (2.23)$$

де  $S_c$  - довжина подрібнювальної камери, мм;

$n_{\Pi}$  - число монолітних молотків на роторі.

Замінивши значення  $m$ ,  $v_{coy\partial}$ ,  $n_{y\partial}$  отримуваними формулами у формулі (2.18)

і перетворюючи, отримаємо:

$$Q_T = \frac{(v_p - v_c)^2 \cdot n_p \cdot S_c \cdot n_{\Pi}}{2 \cdot 3600 \cdot 60 \cdot v_c} = \frac{Q_T \cdot (v_p - f_c - v_p)^2 \cdot n_p \cdot S_c \cdot n_{\Pi}}{2 \cdot 3600 \cdot 60 \cdot f_c \cdot v_r} \quad (2.24)$$

Позначивши постійні величини формули через  $\frac{S_c \cdot n_{\Pi}}{2 \cdot 60 \cdot 3600} = K_M$  отримаємо:

$$P_2 = Q_T \cdot n_p \cdot v_p \left( \frac{1}{f_c} - 2 + f_c \right) \cdot K_M \quad (2.25)$$

Оскільки робота подрібнювача витрачається на створення нових поверхонь, то продуктивність буде залежати від ступеня подрібнення, яка визначається площею знову утворених поверхонь (кг/год):



$$Q_T = \frac{S}{S_1} \quad (2.26)$$

де  $S$  - поверхня, яку може утворити подрібнюючий апарат, м<sup>2</sup>/год, визначається кінематикою і конструктивними особливостями подрібнювача;

$S_1$  - величина поверхні, яку необхідно отримати в подрібненому матеріалі, м<sup>2</sup>/кг визначається розміром частинок, які обумовлюються зоотехнічними вимогами.

На підставі вищевикладеного, формулу (2.38) можна записати у вигляді:

$$P_2 = \frac{S}{S_1} \cdot n_p \cdot v_p \cdot \sin^2 \alpha \left( \frac{1}{f_c} - 2 + f_c \right) \cdot K_M \quad (2.27)$$

Третій член  $A_3$  формули (2.29) виражає витрату роботи на відкидання матеріалу і подолання сил тертя. Отже, витрата потужності для цього виду опору визначиться:

$$P_3 = P_{\text{отб}} + P_{\text{тр}} \quad (2.28)$$

Відомо, що:

$$P_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot v_c \quad (2.29)$$

$$F_{\text{тр}} = F_y \cdot f_g \quad (2.30)$$

Підставляючи в рівняння (2.42) значення сил тертя, отримаємо:

$$P_{\text{тр}} = \frac{m \cdot v_c^2}{R} \cdot v_c \cdot f_g \quad (2.31)$$

Швидкість руху  $v_c$  визначається шляхом ділення довжини подрібнювальної камери  $S_c$  на час перебування частинки в подрібнювальній камері:

$$v_c = \frac{S_c}{t_c} \quad (2.32)$$

Шлях частки  $S_c$  в метрах в подрібнювальній камері визначається:

$$S_c = (2 \cdot \pi \cdot R - C) \quad (2.33)$$

де  $C$  - частина робочої довжини деки, яка не бере участі в технологічному процесі, тобто довжина вікна камери для виведення подрібненої маси з подрібнювача.

Якби не було тертя матеріалу, що подрібнюється по внутрішній поверхні подрібнювальної камери, тоді швидкість його руху повинна дорівнювати швидкості руху робочих органів (молотків), а отже, число обертів корму в камері подрібнення повинна дорівнювати числу оборотів ротора машини, тобто:

$$\frac{\pi \cdot D \cdot n_c}{60} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_p}{60} \text{ або } n_c = n_p$$

Однак при русі в камері подрібнення має місце тертя об деку і інші частинки подрібнювальної камери, тому нами введений коефіцієнт  $f_c$ , умовно названий коефіцієнтом ковзання. Практично робоче рівняння:

$$n_c = f_c \cdot n_p \quad (2.34)$$

де  $n_p$  - частота обертання ротора,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$n_c$  - число змін порції матеріалу, що подрібнюється всередині камери подрібнення в хвилину.

Звідси випливає, що якщо в хвилину ротор подрібнювача здійснює  $n_p$  оборотів, то число робочих ходів в хвилину дорівнюватиме  $n_c = f_c \cdot n_p$ .

Таким чином, якщо подрібнювач має продуктивність  $Q_T$  (кг/год), то за кожну зміну порції в камері подрібнення буде подрібнено:

$$q^1 = \frac{Q_T}{60 \cdot f_c \cdot n_p} \quad (2.35)$$

де  $q^1$  - кількість матеріалу, що знаходиться в технологічному процесі в кг.

Маса матеріалу, що знаходиться в технологічному процесі за одну секунду визначається як:

$$m = \frac{q}{g} = \frac{Q_T}{60 \cdot f_c \cdot n_p} \cdot \frac{n_c}{60} = \frac{Q_T}{3600} \quad (2.36)$$

де  $g$  - прискорення сил вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ .

Підставляючи значення  $m$  з формули (2.49) в вираз (2.44) і враховуючи, що  $v_c = f_c \cdot v_p$  отримаємо у кВт:

$$N_{TP} = \frac{Q_T \cdot f_c^3 \cdot v_p^3 \cdot f_g}{3600 \cdot g \cdot R} \quad (2.37)$$

Кінетична енергія, що витрачається на відкидання (прискорення) подрібненого матеріалу в процесі його подрібнення дорівнює:

$$T_{омб} = \frac{m \cdot v_{омб}^2}{2} \quad (2.38)$$

При прямому центральному ударі швидкість відкидаємих частинок дорівнює швидкості монолітного молотка в точці удару, тому  $v_{омб} = v_p$ . Допустимо, що  $v_p$  - це швидкість кінця монолітного молотка і удари наносяться по часткам тільки кінцями молотків. Тоді  $T_{омб} = \frac{m \cdot v_p^2}{2}$ , а при ексцентричному ударі:

$$T_{омб} = \frac{m \cdot (v_p \cdot \sin \alpha)^2}{2} \quad (2.39)$$

де  $\alpha$  - кут нахилу ударної межі молотка до поверхні деки. Підставляючи значення маси  $m$  з (2.49) в (2.52), отримаємо у  $\frac{Дж}{с}$  (Вт):

$$P_{омб} = \frac{Q_T (v_p \cdot \sin \alpha)^2}{2 \cdot 3600} \quad (2.40)$$

Таким чином, потужність, що витрачається на прискорення частинок, і подолання тертя матеріалу, що подрібнюється в процесі подрібнення визначається:

$$P_3 = P_{омб} \quad (2.41)$$

Позначаючи постійні величини першої частини формули через  $\frac{1}{2 \cdot 3600} = K_M$ , отримуємо у Вт:

$$P_3 = Q_T \cdot K_M (v_p \cdot \sin \alpha)^2 \quad (2.42)$$

Таким чином, визначені всі три члена теоретичної формули для енергетичного розрахунку малогабаритного молоткового подрібнювача. Формула потрібної потужності при продуктивності  $Q_T \left( \frac{кг}{год} \right)$ :

$$P_{mp} = \frac{1}{\eta} \left( R_{on} \cdot f_{II} \cdot r \cdot \omega + \frac{\gamma_6 \cdot S_l \cdot i \cdot r_l^3}{2} \cdot \omega^3 \right) + Q_T \cdot n_p \cdot v_p \left( \frac{1}{f_c} - 2 + f_c \right) \cdot K_M + Q_T \cdot K_W (v_p \cdot \sin \alpha)^2 \quad (2.43)$$

### 2.3 Висновки по розділу

1. Обґрунтована конструкція експериментального монолітного молотка з двома гострими ріжучими кромками, що дозволяє використовувати найменш енергоємний спосіб подрібнення «удар вліт»;

2. Було знайдене рівняння мінімальної маси монолітного молотка, яке забезпечує його радіальне положення при сталому русі. Розраховане значення  $m_{\min} = 0,24$  кг;

3. Складено рівняння енергетичного балансу роботи малогабаритного молоткового подрібнювача, а також отримане значення потрібної потужності за відповідної продуктивності  $P_{mp} = 2,3$  кВт;

4. Отримані теоретичні межі значень параметрів роботи подрібнювача: колової швидкості  $v_i = 10 \dots 30$  м/с та кількості молотків  $N_M = 2 \dots 4$  шт.

### **3 Експериментальні дослідження**

#### **3.1 Програма експериментальних досліджень**

На підставі теоретичної частини роботи, а так само з поставленою метою і завданнями дослідження, була розроблена програма, яка відображає наступні пункти:

1. Визначення якості та відповідність подрібненого продукту ДСТУ ам і зоотехнічним вимогам.
2. Отримання залежностей впливу колової швидкості молотків на якісні та енергетичні показники роботи подрібнювача.
3. Отримання залежностей впливу кількості молотків на якісні та енергетичні показники роботи подрібнювача.
4. Отримання залежностей впливу подачі на якісні та енергетичні показники роботи подрібнювача.
5. Визначення критеріїв оптимізації по питомій витраті енергії і модулю помелу.

На етапі лабораторних досліджень основне завдання полягало в тому, щоб виявити залежність критеріїв оптимізації від факторів, які змінюються в період проведення експериментів.

В якості критеріїв оптимізації приймаємо такі: модуль помелу і питома витрата енергії.

#### **3.2 Визначення якості та відповідності подрібненого продукту ДСТУ і зоотехнічним вимогам**

Основні фізико-механічні характеристики досліджуваного зернового матеріалу є типовими для зернофуражного корму, тому дані про щільність, міцність на подрібнення при проведенні розрахунків були взяті з літературних джерел.

З метою зниження кількості дослідів, в якості основного експериментального зернового матеріалу була обрана пшениця сорту «Селенга», яка використовується в нашому регіоні.

Критеріями вибору пшениці як основного зернового матеріалу в дослідженні подрібнювача є його високі характеристики, типовість форми і геометричних розмірів серед фуражних культур (пшениці, вівса, ячменю та ін.), А також велика питома вага цієї фуражної культури в кормовиробництві.

Характеристики зернового матеріалу наведені в таблиці 3.1 і 3.2

Таблиця 3.1 – Фізико-механічні характеристики зернового матеріалу

Показники	Культура
	Пшениця
Вологість, %	13,2±0,5
Об'ємна маса, кг/м <sup>3</sup>	810±7
Маса 1000 зерен, г	30±6
Вміст сміттєвих домішок, %	0,7±0,2
Густина, кг/м <sup>3</sup>	1,36×10 <sup>3</sup>

Таблиця 3.2 – Розміри зерна пшениці

Культура	Розміри, мм				
	<i>l</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d<sub>ек</sub></i>	<i>φ</i>
Пшениця	4,2-8,6	1,6-4,0	1,5-3,8	3,8	0,82-0,85

Примітка: *a*, *b*, *l* - відповідно, ширина, товщина, довжина зерна

### 3.3 Опис і принцип роботи експериментальної установки

На підставі теоретичного і патентного дослідження була розроблена і виготовлена експериментальна установка для подрібнення фуражного зерна. Її схема приведена на рисунку 3.1, а загальний вигляд - на рисунку 3.3.

Малогабаритний подрібнювач фуражного зерна складається з корпусу 12 з робочою камерою 11, в якій розташований ротор 13 з шарнірно-рухомими на його осях 2 молотками 7, вивантажувального отвору 10. Для подачі зерна в камеру подрібнення на корпус встановлюється приймальний бункер 5, який з'єднаний з подрібнювальною камерою. На вході в горловину встановлена регулююча заслінка 6, для дозування зернового матеріалу. Подача зерна здійснюється самопливом тангенціально по ходу обертання ротора, а привід вала подрібнювача здійснюється від однофазного електродвигуна 1 потужністю 1,1 кВт. Корпус подрібнювача встановлений на чотирьох-лапчастій стійці 4.

Молоток подрібнювача (рисунок 3.2) зварений у формі тригранної призми з двома стійками для шарнірного закріплення на диску ротора. Тригранна призма молотка виготовлена з двома гострими крайками для подрібнення зернового матеріалу і виконана по довжині подрібнюючого молоткового барабана.

За допомогою частотного регулятора VLT Danfoss FC-301, змінювали частоту обертання електродвигуна приводу дробарки, тим самим змінюючи колову швидкість молотків.

Подрібнювач працює наступним чином: очищене від сторонніх і металевих домішок фуражне зерно завантажується в приймальний бункер 5 і через регульовану заслінку 6 і самопливом тангенціально по ходу обертання ротора направляється в подрібнюючу камеру 11. В подрібнювальній камері зерно потрапляє під ударний вплив молотка (спосіб подрібнення «удар вліт») і отримує часткове руйнування (мікро тріщини). Частково зруйноване зерно набуває прискорення спрямоване перпендикулярно до нерухомої межі корпусу 12, де відбувається його повне руйнування між ДСТУ рими крайками монолітного молотка і гострими ребрами граней нерухомої деки (спосіб «сколювання-зріз»). Подрібнений продукт виводиться через вивантажний отвір 10 з подрібнювальної камери. Додатково кормоподрібнювач обладнаний загрузочним отвором для подрібнення качанів кукурудзи 8.

Ступінь подрібнення матеріалу регулюється ситом 3 кормодробарки. Сито кріпиться зажимним бовтом та гайкою 9. Основні технічні параметри експериментального подрібнювача фуражного зерна представлені в таблиці 3.3.



Таблиця 3.3 - Технічна характеристика експериментальної установки

№	Показники	Значення показників
1	Діаметр ротора по кінцях молотків, мм	195
2	Довжина ротора, мм	100
3	Кількість молотків, шт.	2,3,4
4	Маса молотка, г	260
5	Колова швидкість молотків, м/с	10,20,30
6	Зазор між декою і кінцем молотків, мм	2
7	Подача зернового матеріалу, кг/год	Самопливом, тангенціально по ходу обертання ротора
8	Продуктивність при подрібненні зернового матеріалу, кг/год	240
9	Потужність електроприводу, кВт	2,5
10	Габаритні розміри, мм: довжина ширина висота	650 590 1000
11	Маса, кг	48

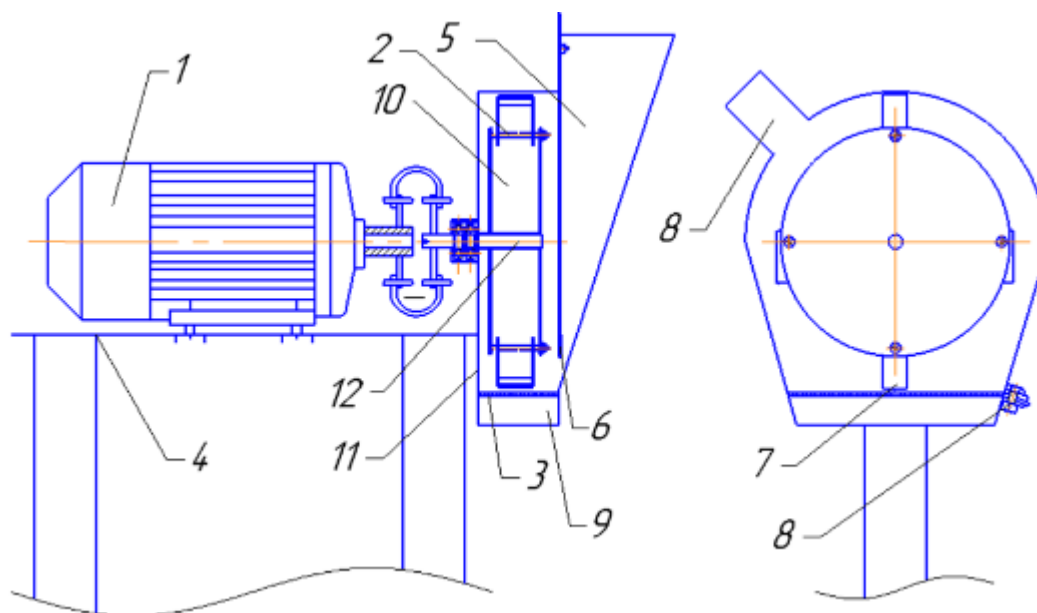


Рисунок 3.1 - Загальний вигляд малогабаритного молоткового подрібнювача: 1 - електродвигун; 2 - палець; 3 – сито кормодробарки; 4 - стійка; 5 - бункер; 6 - заслінка; 7 - молоток; 8 – загрузочний отвір для качанів кукурудзи; 9 – зажим для сита; 10 – вивантажний отвір; 11 – подрібнююча камера; 12 - корпус; 13 – ротор

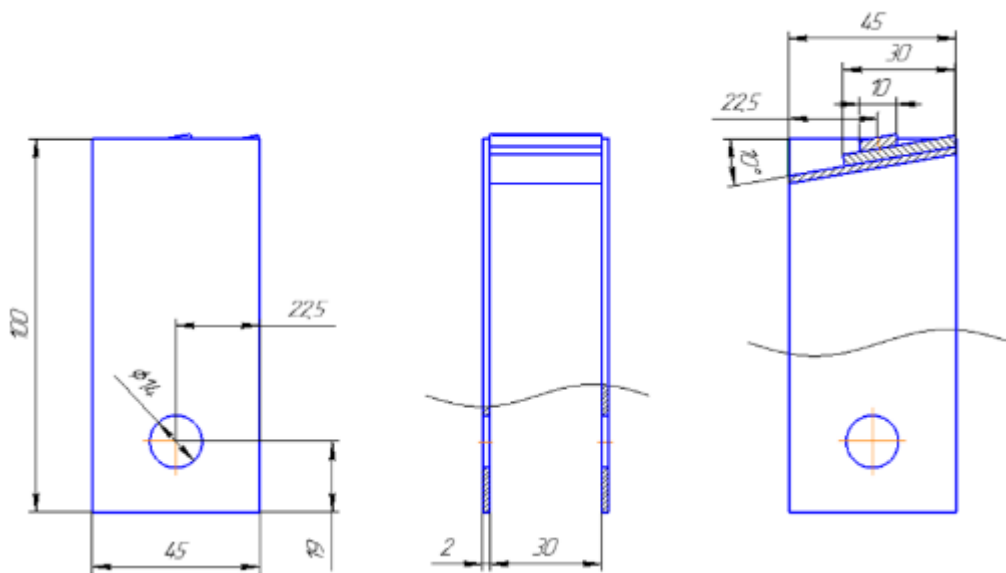


Рисунок 3.2 - Загальний вигляд молотка



Рисунок 3.3 - Загальний вигляд експериментальної установки: 1 – експериментальна установка; 2 – частотний регулятор; 3 – ноутбук для отримання та розрахунку даних.

В якості критерію оптимізації було обрано питому енергоємність, крім того контролювали відповідність отриманого продукту зоотехнічними вимогами. Згідно отриманих у другому розділі даних, в якості незалежних факторів було обрано колову швидкість, яка коливалась в межах  $v_i = 10 \dots 30$  м/с, кількість молотків  $N_M = 2 \dots 4$  шт. та, подачу матеріалу  $Q_{\Pi} = 120 \dots 210$  кг/год.

Таблиця 3.4 – Критерії оптимізації та їх варіювання

Найменування факторів	Позначення		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральне	Кодоване	-1	0	1	
Кількість монолітних молотків, шт.	$N_M$	$X_1$	2	3	4	1
Подача матеріалу, кг/год	$Q_{\Pi}$	$X_2$	120	165	210	45
Колова швидкість, м/с	$v_i$	$X_3$	10	20	30	10

### 3.4 Результати повного факторного експерименту. Метод крутого сходження

Для пошуку оптимального поєднання виділених факторів, що дають оптимальний модуль помелу  $M_{\Pi}$ , був проведений повний факторний експеримент типу  $2^k$ , що включає спочатку 8 дослідів, а потім виконану програму крутого сходження по поверхні відгуку, що складається з чотирьох дослідів.

Згідно з прийнятою методикою була реалізована матриця планування (таблиця 3.1) були розраховані коефіцієнти регресії:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= 2,51 & b_{12} &= 0,0625 \\
 b_1 &= 0,1375 & b_{13} &= -0,0125 \\
 b_2 &= -0,0375 & b_{23} &= -0,0875 \\
 b_3 &= 0,2375 & &
 \end{aligned}$$

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії, показала наступні результати:  $S^2_{LF} = 0,06645$  і  $S^2_y = 0,083$ , розрахункове значення  $F = 0,8006$ , яке менше табличного  $F_{табл} = 3,0$  при числі ступенів вільності чисельника  $f_1 = N - k - l = 8 - 3 - 1 = 4$  і знаменника  $f_2 = N(n - 1) = 8(3 - 1) = 16$  з 95% достовірністю.

Про адекватність лінійної моделі також можна судити і за критерієм, згідно з яким лінійна модель не є адекватною, якщо виявився, значущий хоча б один з ефектів взаємодії.

Перевіряємо адекватність за другим критерієм рівності нулю коефіцієнтів при квадратичних членах ( $\beta_{11} = 0$ ), Для цього ставимо досліди в середині експерименту і отримуємо:  $b_0 = 2,51$ ;  $y_0 = 2,35$ ; різницю  $b_0 - y_0 = 2,51 - 2,35 = 0,16$ ; помилка експерименту  $S_y = 0,122$ . Значимість цього експерименту перевіряється по  $t$  - критерію Стьюдента і отримали  $t_{розрах} = 4,15$ . Величину  $t_{розрах}$  порівнюємо з табличним значенням  $t$  - критерію при числі ступенів вільності  $f = N(n_0 - 1) = 10(2 - 1) = 10$ . В результаті порівняння  $t_{табл} = 2,228 < 4,15$ . Табличне значення  $t$  - критерію менше розрахункового і тому можна зробити висновок, що різниця  $b_0 - \bar{y}_0$  значима з 95% вірогідністю і нуль - гіпотеза не може бути застосована.

Перевіряємо значимість коефіцієнтів регресії  $b_i$  і  $b_y$  - лінійних ефектів і ефектів парних взаємодій.

Довірчий інтервал  $\Delta b_i$ , для коефіцієнтів регресії визначаємо за формулою:

$$\pm \Delta b_i = b_i - \beta_i = \pm t \cdot S^2 \cdot b_i = 4,15 \cdot 0,01 = \pm 0,0415 \quad (3.1)$$

Коефіцієнти  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{23}$  значимі, тому що абсолютна величина перевищує довірчий інтервал. Таким чином, гіпотеза про адекватність лінійної моделі не може бути прийнята, тому що незначимими коефіцієнтами є  $b_2$  і  $b_{13}$ .

На підставі вище викладеного приходимо до висновку, що для опису поверхні відгуку лінійна модель не може бути прийнята, тому в подальших дослідженнях з метою вивчення та опису поверхні відгуку необхідно використовувати планування другого порядку, що дозволяє отримати уявлення про функції відгуку за допомогою полінома другого ступеня.

Таблиця 3.1 - Матриця планування і програма крутого сходження по поверхні відгуку

Позначення	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y$
1	2	3	4	5
Верхній рівень (+1)	4	210	30	
Основний рівень (0)	3	165	20	
Нижній рівень (-1)	2	120	10	
Дослід: 1	+	+	+	2,9
2	+	+	-	2,6
3	+	-	+	3,0
4	+	-	-	2,4
5	-	+	+	2,5
6	-	+	-	2,2
7	-	-	+	2,9
8	-	-	-	2,2
Коефіцієнт регресії, $b_i$	0,1375	-0,0375	0,2375	
Інтервал варіювання, $E$	1	45	10	
Добуток, $b_i \cdot E$	0,1375	-1,688	2,375	
Крок відповідний зміні $X_1$ на один молоток.	1	-12,3	17,3	
Округлений крок	1	-10	+15	
9	3	165	20	2,7
10	2	175	20	3,1
11	2	185	20	2,8

### 3.5 Залежність питомої витрати енергії від колової швидкості, кількості монолітних молотків і подачі матеріалу

Рівняння регресії, що описує зміну значень питомої витрати енергії  $A_{num}$  зерна має вигляд:

$$A_{num} = -0,129N_M^2 + 0,2v_M^2 - 0,19Q_{II} + 0,1N_M + 0,41v_M + 0,19Q_{II} + 1,09 \quad (3.2)$$

У таблиці 4.2 наведені усереднені експериментальні значення  $A_{num}$ , визначені при граничних значеннях змінних  $v_i$ ,  $N_M$ ,  $Q_{II}$  і значення  $P$ , розраховані за рівнянням регресії (4.2).

Аналіз графічних інтерпретацій математичної моделі показує, що збільшення подачі матеріалу (рисунок 4.1) веде до лінійного збільшення питомої витрати енергії в 1,8 рази з значень 0,461 до 0,841  $\frac{Вт \cdot год}{кг}$  при  $N_M = 2$  шт. і  $v_i = 15$ .

Таблиця 3.2 - Таблиця композиційного плану повного трьохфакторного дворівневого експерименту типу  $2^3$

Номер досліджу	Фактори			Значення $A_{num}, \frac{Вт \cdot год}{кг}$			
	$N_M$	$v_i$	$Q_{II}$	Повторності			Середнє
				1	2	3	
1	-	-	-	0,54	0,63	0,59	0,6
2	+	-	-	0,81	0,81	0,79	0,78
3	-	+	-	1,31	1,27	1,29	1,28
4	+	+	-	1,46	1,43	1,44	1,44
5	-	-	+	0,9	1,00	0,94	0,93
6	+	-	+	1,14	1,02	1,09	1,11
7	-	+	+	1,54	1,45	1,49	1,5
8	+	+	+	1,55	1,71	1,69	1,68
9	+1,215	0	0	1,08	1,16	1,13	1,14
10	-1,215	0	0	1,02	0,75	0,86	0,8
11	0	+1,215	0	2,37	2,21	2,3	2,32
12	0	-1,215	0	0,52	0,63	0,59	0,61
13	0	0	+1,215	1,71	1,59	1,63	1,6
14	0	0	-1,215	0,8	0,81	0,79	0,76
15	0	0	0	9,86	0,98		0,91

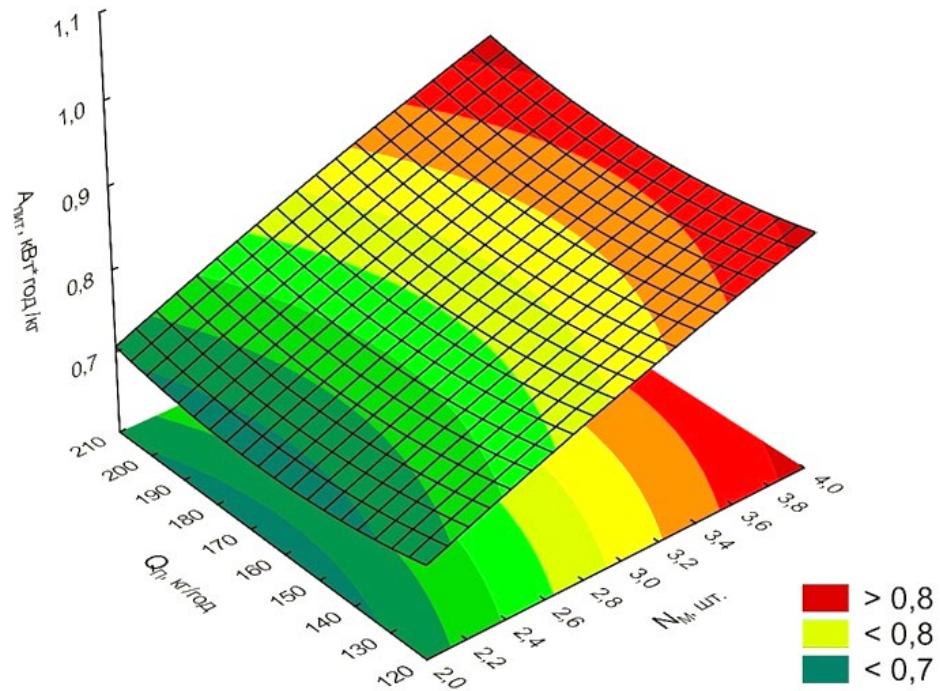


Рисунок 3.1 - Графік поверхні математичної моделі

$$A_{num} = f(v_i, Q_P, N_M) \text{ при } v_i = 20 \text{ м/с}$$

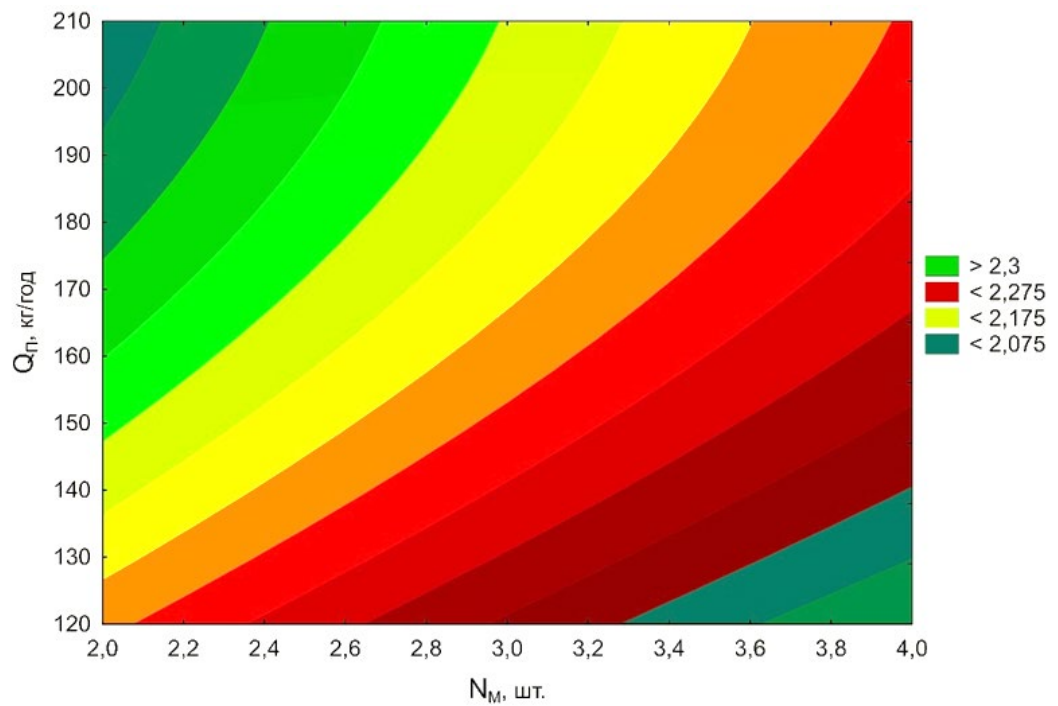


Рисунок 3.2 - Карта ліній відгуку математичної моделі



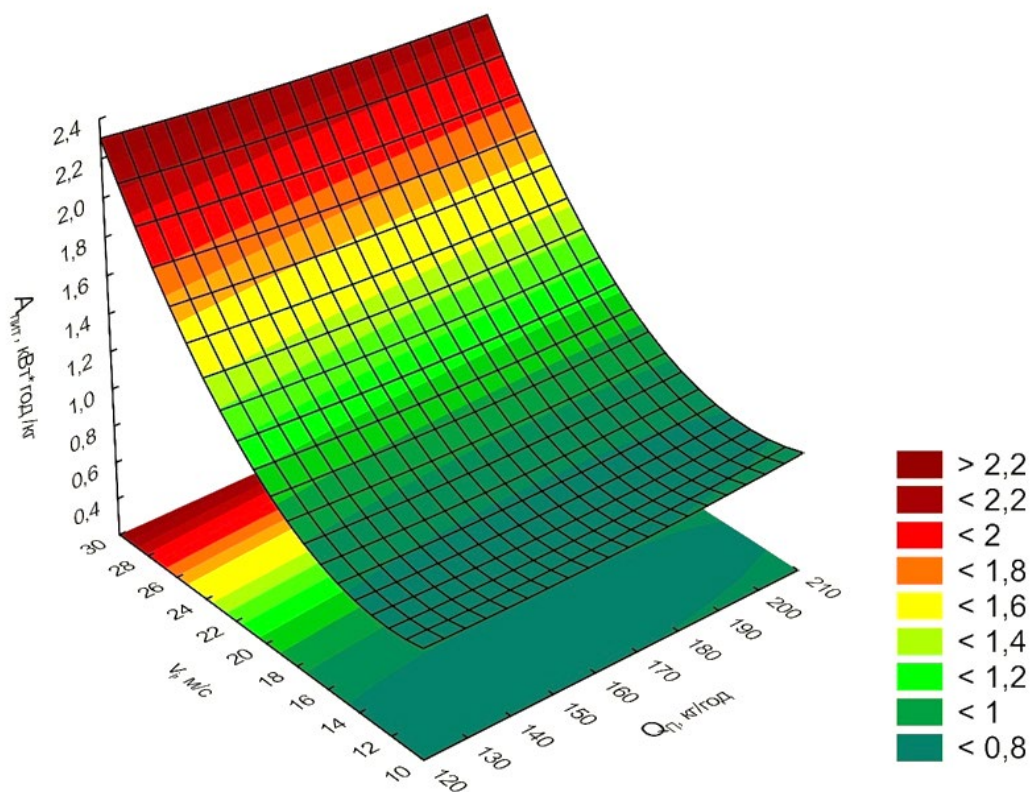


Рисунок 3.3 - Графік поверхні математичної моделі

$$A_{num} = f(v_i, Q_{П}, N_M) \text{ при } N_M = 3 \text{ шт.}$$

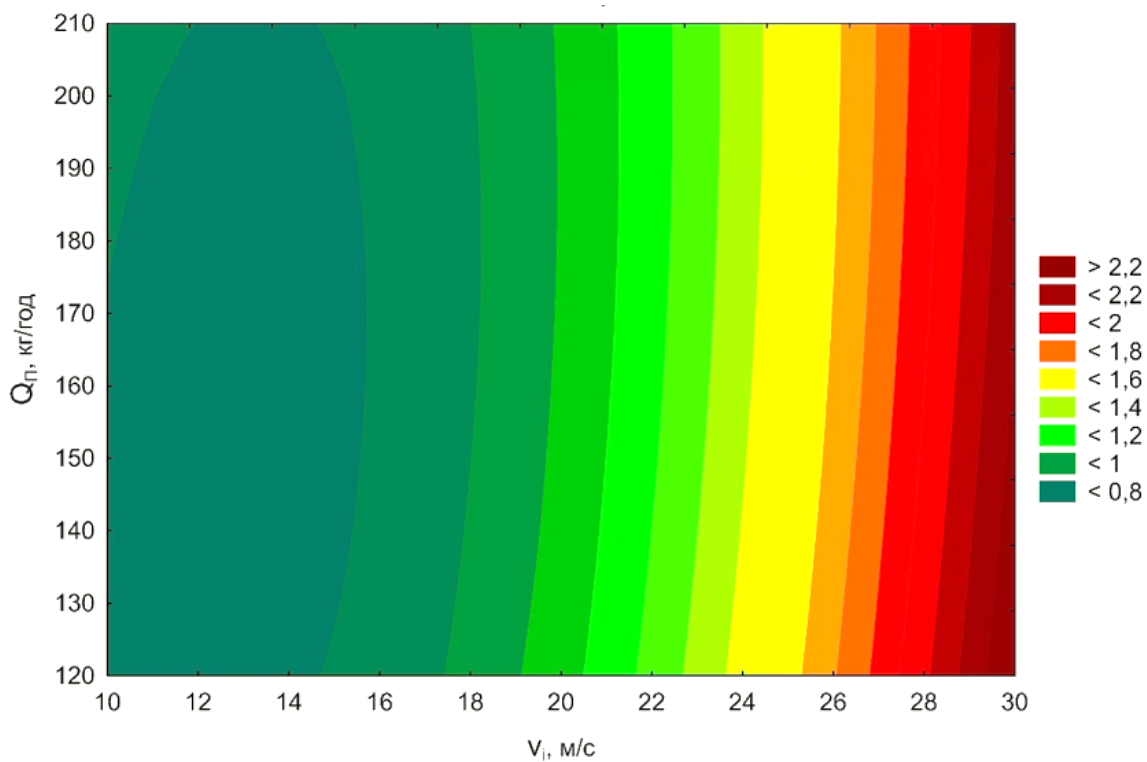


Рисунок 3.4 - Карта ліній відгуку математичної моделі



При збільшенні швидкості монолітних молотків до  $v_i = 25$  м/с і зміні подачі матеріалу питома витрата енергії збільшується в 1,29 рази, тобто при збільшенні подачі матеріалу для зниження енергоємності процесу необхідно збільшувати швидкість молотків.

Збільшення кількості монолітних молотків веде до збільшення питомої витрати енергії з максимумом енергоємності при трьох молотках. При кількості монолітних молотків:  $N_M = 2$  шт.,  $Q_{II} = 120$  кг/год,  $v_i = 15$  м/с - значення  $A_{num}$  становить  $0,461 \frac{Вт \cdot год}{кг}$ .  $N_M = 3$  шт.,  $Q_{II} = 120$  кг/год,  $v_i = 15$  м/с - значення  $A_{num}$  становить  $0,69 \frac{Вт \cdot год}{кг}$  і при  $N_M = 4$  шт.,  $Q_{II} = 120$  кг/год,  $v_i = 15$  м/с - значення  $A_{num}$  становить  $0,66 \frac{Вт \cdot год}{кг}$  відповідно.

На мою думку, така картина обумовлена наступними факторами, при збільшенні кількості молотків до 3 шт., ростуть витрати енергії за рахунок розкручування більшої маси, а при 4 молотках, велика маса веде до збільшення корисної роботи на деформацію матеріалу.

Збільшення швидкості молотків веде до зростання енергоємності процесу, проте необхідно відзначити факт, що при більшій кількості молотків збільшення швидкості більш сприятливо, ніж при кількості молотків 2 шт., Так при кількості молотків 2 шт.,  $Q_{II} = 120$  кг/год і збільшенні швидкості до 25 м/с питома витрата енергії підвищується в 2,9 рази, а при 4 молотках в 2,2 рази відповідно. Значення  $A_{num}$  змінюються при цьому з 0,46 до  $1,35 \frac{Вт \cdot год}{кг}$  і 0,66 до  $1,481 \frac{Вт \cdot год}{кг}$  відповідно. Значення питомої витрати енергії отримані розрахунковим і експериментальним шляхом наведені в таблиці 4.3, а графічна інтерпретація математичної моделі  $A_{num} = f(v_i, Q_{II}, N_M)$  при подачі зернового матеріалу  $Q_{II} = 120$  кг/год представлена на рисунку 3.2.

Таблиця 3.3 – Значення питомої витрати енергії  $A_{пит}$  експериментального подрібнювача

№ Дослідду	$N_M$ , шт.	$v_i$ , м/с	$Q_{II}$ , кг/ГОД	$A_{пит}$ , $\frac{Вт \cdot год}{кг}$	
				Середнє по дослідду	Розрахункове
1	2	15	120	0,6	0,461
2	4	15	120	0,78	0,66
3	2	25	120	1,28	1,35
4	4	25	120	1,44	1,48
5	2	15	210	0,93	0,84
6	4	15	210	1,11	1,04
7	2	25	210	1,5	1,66
8	4	25	210	1,68	1,86
9	5	20	165	1,14	1,02
10	1	20	165	0,8	0,77
11	3	30,37	165	2,32	1,88
12	3	12,34	165	0,61	0,88
13	3	20	98,76	1,6	1,32
14	3	20	255,15	0,76	0,85
15	3	20	165	0,91	1,09

Як відомо, значення модуля помелу  $M_{II}$  визначається цільовою групою тварин. Комплексний аналіз графіків і їх накладення показало, що для забезпечення значень дрібного помелу  $M_{II}$  від 0,2 до 1,0 мм необхідне встановлення 4 молотків, невисокі значення подачі і підвищення колової швидкості від 25 до 30 м / с. Для забезпечення середнього і крупного помелу придатного для таких груп тварин, як великої рогатої худоби та молодняку ВРХ, досить установки 2-х молотків і варіювання параметрами колової швидкості і подачі матеріалу.

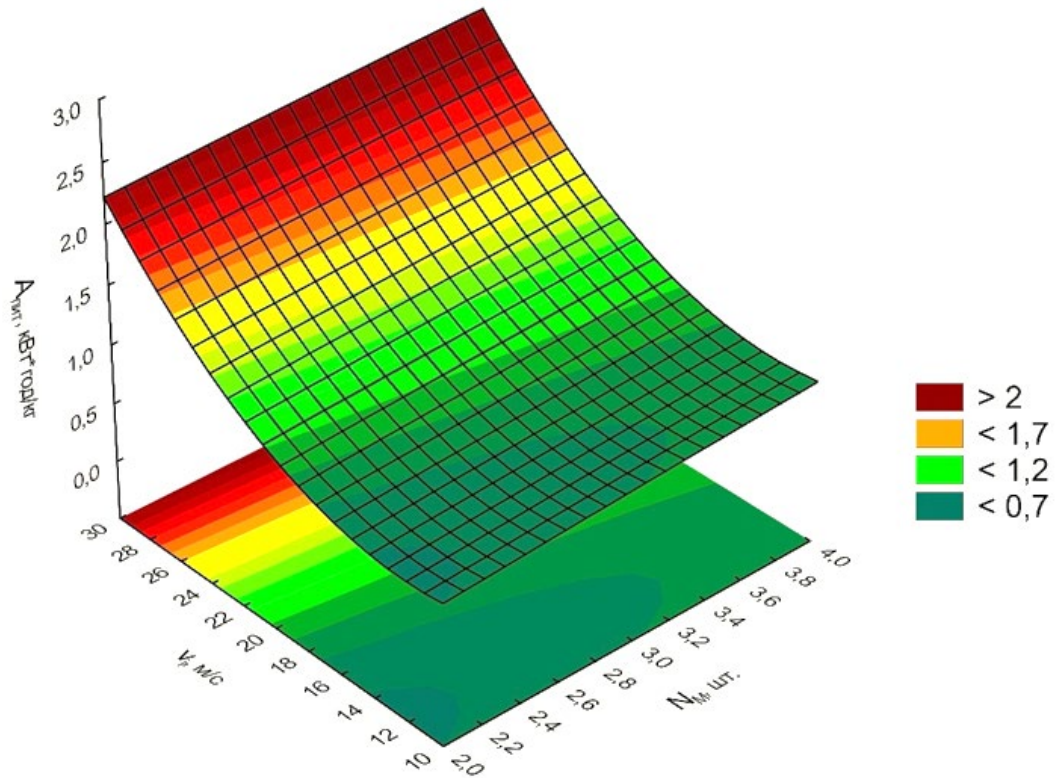


Рисунок 4.5 - Графік поверхні математичної моделі

$$A_{num} = f(v_i, Q_{II}, N_M) \text{ при } Q_{II} = 120 \text{ кг/год}$$

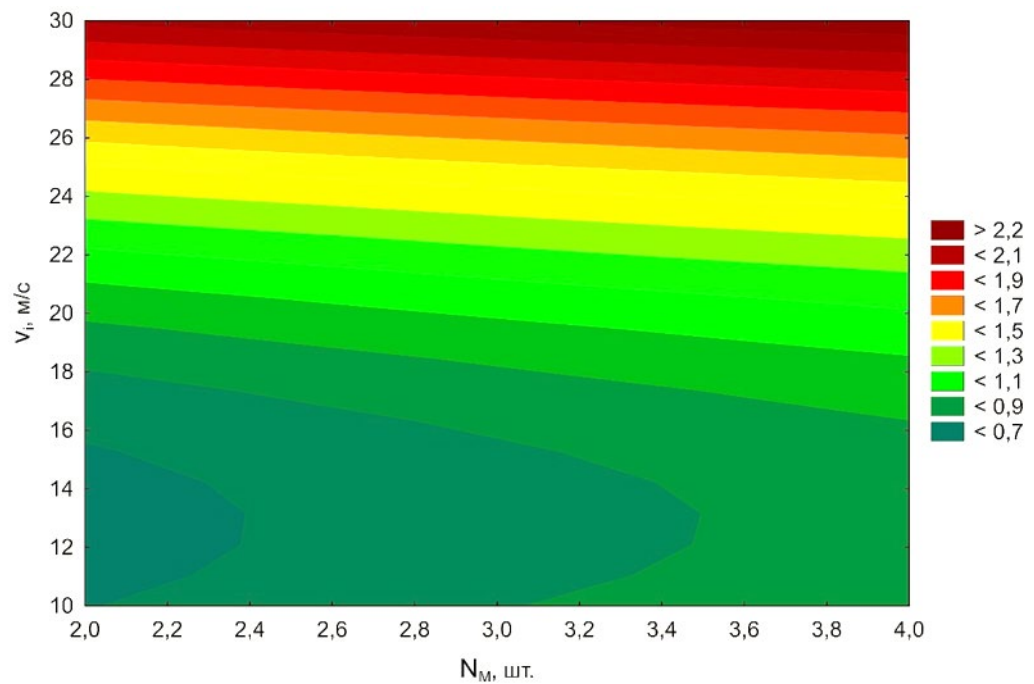


Рисунок 4.6 Карта ліній відгуку математичної моделі

З умови мінімуму витрат енергії і високої продуктивності мною рекомендуються наступні конструктивно-режимні параметри нового подрібнювача:

- для дрібного помелу ( $M_{II} = 0,2...1,0$  мм) -  $N_M = 4$  шт.,  $Q_{II} = 120$  кг/год,  
 $v_i = 25 - 30$  м/с, при значеннях  $A_{num} = 1,54...1,7 \frac{Вт \cdot год}{кг}$ ;
- для середнього помелу ( $M_{II} = 1,0...1,8$  мм) -  $N_M = 2$  шт.,  $Q_{II} = 165$  кг/год,  
 $v_i = 20 - 25$  м/с, при значеннях  $A_{num} = 1,59...1,35 \frac{Вт \cdot год}{кг}$ ;
- для грубого помелу ( $M_{II} = 1,8...2,6$  мм) -  $N_M = 2$  шт.,  $Q_{II} = 210$  кг/год,  
 $v_i = 20 - 25$  м/с, при значеннях  $A_{num} = 1,8...1,5 \frac{Вт \cdot год}{кг}$ .

### 3.6 Висновки по розділу

1. Підвищення кількості монолітних молотків  $N_M$ , колової швидкості  $v_i$  і зменшення подачі продукту  $Q_{II}$  веде до зниження значень модуля помелу  $M_{II}$ ;
2. Підвищення кількості монолітних молотків  $N_M$ , колової швидкості  $v_i$  і подачі продукту  $Q_{II}$  веде до підвищення значень питомої витрати енергії  $A_{num}$ ;
3. Для нового подрібнювача у розділі рекомендуються конструктивно-режимні параметри для дрібного, середнього та грубого помелу при відповідних значеннях питомої витрати енергії.

## **4 Охорона праці**

### **4.1 Загальні вимоги охорони праці при на комбікормових підприємствах**

Загальні вимоги охорони праці на комбікормових підприємствах регламентуються нормативно-правовими актами України та Європейського Союзу, які спрямовані на забезпечення безпечних умов праці, захист здоров'я працівників та екологічну безпеку.

В Україні основні положення щодо охорони праці визначаються Законом України "Про охорону праці" та Кодексом законів про працю України (КЗпП). Ці нормативні акти передбачають обов'язок роботодавця забезпечити безпечні умови праці, включно із дотриманням вимог до технічного стану обладнання, вентиляційних систем, рівня шуму, пилу та освітлення на робочих місцях. Спеціальну увагу приділяють безпеці під час роботи з обладнанням для подрібнення та транспортування кормів, враховуючи підвищені ризики травматизму через рухомі механізми.

Комбікормові підприємства належать до об'єктів із підвищеним рівнем небезпеки, оскільки їх діяльність пов'язана з обробкою сипучих матеріалів, що може спричинити забруднення повітря пилом. У цьому контексті актуальним є дотримання вимог Державних санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень та правил захисту органів дихання працівників. Також повинні бути виконані положення Закону України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення".

Відповідно до європейського законодавства, підприємства зобов'язані дотримуватися Директиви 2009/104/ЄС "Щодо мінімальних вимог до безпеки та здоров'я під час використання робочого обладнання" та Директиви 89/391/ЄС "Про впровадження заходів щодо поліпшення безпеки та охорони здоров'я працівників на робочому місці". Ці акти встановлюють вимоги до оцінки ризиків, належного інформування працівників про небезпеки та забезпечення засобів індивідуального захисту. Особливу увагу приділяють вибухонебезпеці пилу, яка регулюється Директивою 94/9/ЄС (ATEX).

На підприємствах повинна бути організована система управління охороною праці, яка включає проведення інструктажів, регулярних медичних оглядів працівників, навчання безпечним методам роботи та аудитів з охорони праці. Також необхідно забезпечити відповідність технологічного обладнання стандартам ISO 45001 (Система управління охороною здоров'я та безпекою праці) та EN 60204-1 (Безпечність машин – Електричне обладнання машин).

Дотримання цих вимог є ключовим для забезпечення безпеки працівників, зменшення виробничих ризиків та створення умов для сталого розвитку комбікормового виробництва.

## **4.2 Проект інструкції з охорони праці при роботі з молотковим подрібнювачем концентрованих кормів**

### **1. Загальні положення**

1.1. Інструкція розроблена відповідно до Закону України "Про охорону праці", Правил безпеки у виробництві комбікормів та інших нормативно-правових актів України, що регулюють охорону праці.

1.2. Ця інструкція є обов'язковою для виконання всіма працівниками, які працюють з молотковими подрібнювачами концентрованих кормів.

1.3. До роботи допускаються особи, які пройшли медичний огляд, вступний інструктаж, навчання з безпечних методів роботи, інструктаж на робочому місці та перевірку знань з охорони праці.

1.4. Робота з подрібнювачем пов'язана з підвищеними ризиками травматизму (рухомі частини, електричне обладнання) та небезпекою пилу.

1.5. Працівник зобов'язаний використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): захисні окуляри, респіратор, рукавички, засоби для захисту слуху (беруші або навушники).

### **2. Перед початком роботи**

2.1. Перевірити справність молоткового подрібнювача, особливу увагу звернути на:

наявність та цілісність захисних кожухів і огорожень рухомих частин;

стан електропроводки та заземлення обладнання;  
рівень затяжки кріплень;  
відсутність сторонніх предметів у зоні подрібнення.

2.2. Переконайтеся, що приміщення має належну вентиляцію для зниження концентрації пилу.

2.3. Забороняється працювати з несправним обладнанням. У разі виявлення несправностей негайно повідомити керівника.

2.4. Підготувати сировину для подрібнення, видаливши з неї сторонні предмети, які можуть спричинити поломку обладнання.

2.5. Перевірити наявність і придатність ЗІЗ.

3. Вимоги безпеки під час роботи

3.1. Увімкнення подрібнювача здійснюється лише після перевірки всіх захисних систем.

3.2. Забороняється:

відкривати захисні кожухи або здійснювати технічне обслуговування під час роботи подрібнювача;

подавати сировину руками або іншими предметами, що не передбачені конструкцією;

перебувати в зоні виходу продукту без захисних засобів.

3.3. Під час роботи забезпечувати рівномірну подачу сировини, уникаючи перевантаження.

3.4. Слідкувати за справністю роботи обладнання та сигналами датчиків (за наявності). У разі виявлення сторонніх шумів, вібрацій або інших ознак несправності негайно зупинити машину.

3.5. Забезпечити регулярне видалення накопиченого пилу з робочого місця для запобігання вибухонебезпечних ситуацій.

4. Вимоги безпеки після завершення роботи

4.1. Вимкнути подрібнювач від електромережі.

4.2. Дочекатися повної зупинки рухомих частин перед проведенням очищення або технічного обслуговування.

4.3. Очищення обладнання здійснювати за допомогою щіток або інших інструментів, що не пошкоджують поверхні.

4.4. Перевірити стан подрібнювача, виявлені несправності записати у журнал обліку.

4.5. Зняти ЗІЗ, очистити їх від пилу та розмістити у відведеному місці.

5. Вимоги безпеки у разі аварійних ситуацій

5.1. У разі виникнення аварійної ситуації (раптове зупинення, вихід з ладу, задимлення):

негайно вимкнути обладнання;

повідомити керівника або відповідальну особу;

за необхідності викликати аварійні служби.

5.2. Якщо стався нещасний випадок, надати потерпілому першу медичну допомогу та викликати медичних працівників.

5.3. Забороняється самостійно усувати несправності, які пов'язані з електричним обладнанням.

6. Відповідальність працівників

6.1. Працівники, які порушують вимоги даної інструкції, несуть відповідальність згідно з чинним законодавством України.

6.2. Роботодавець зобов'язаний забезпечити регулярне навчання та контроль знань з питань охорони праці.

Інструкція набуває чинності з дати затвердження.

### **4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях**

Порядок дій у разі вибуху пилоповітряної суміші на комбікормовому підприємстві

Негайні дії персоналу:

Припинити всі роботи та негайно повідомити про інцидент керівника зміни або відповідальну особу з охорони праці. Викликати аварійно-рятувальні служби за номером 101. За можливості, за допомогою засобів пожежогасіння (вогнегасників, пожежних шлангів) локалізувати вогонь у зоні вибуху, але лише за



умови, що це безпечно для життя працівників. Організувати евакуацію працівників із небезпечної зони згідно з планом евакуації підприємства.

Евакуація:

Використовувати тільки визначені евакуаційні шляхи та виходи. Забороняється користуватися ліфтами (за наявності). Допомогти працівникам, які потребують підтримки або не можуть самостійно покинути небезпечну зону. При пересуванні у зоні задимлення використовувати засоби індивідуального захисту органів дихання (респіратори, маски). У разі їх відсутності прикрити рот і ніс змоченою тканиною.

Локалізація вторинних ризиків:

Якщо вибух спричинив пожежу, негайно відключити електропостачання в зоні аварії (за можливості та за відсутності додаткових ризиків). Перекрити подачу газу або інших горючих речовин до ділянки вибуху. Уникати зон із високою концентрацією пилу, оскільки можливі повторні вибухи.

Медична допомога:

Організувати надання першої допомоги потерпілим:

У разі опіків – охолодити уражені ділянки тіла під проточною водою протягом 10–20 хвилин. У разі отруєння продуктами горіння – забезпечити доступ до свіжого повітря. У разі зупинки серця або дихання – розпочати серцево-легеневу реанімацію. Викликати медичних працівників для госпіталізації постраждалих.

Повідомлення керівництва:

Інформувати керівництво підприємства та відповідальну особу за охорону праці про подію. Зробити первинну оцінку масштабів аварії, кількості потерпілих та матеріальних збитків.

Оцінка безпечності об'єкта:

До прибуття аварійно-рятувальних служб і представників відповідних органів забезпечити, щоб ніхто не входив у зону вибуху без дозволу. Перевірити стан вентиляційної системи та приміщень на предмет залишкової концентрації пилу та інших небезпечних речовин.

Робота з аварійно-рятувальними службами:

Надати доступ до планів приміщень і технологічних установок підприємства. Забезпечити інформаційну підтримку щодо матеріалів, що могли стати джерелом вибуху, та можливих ризиків для рятувальників.

Подальші дії:

Після ліквідації наслідків аварії здійснити детальне розслідування причин вибуху комісією підприємства разом із представниками відповідних державних органів. Розробити та впровадити заходи для запобігання повторенню подібних інцидентів. Провести позаплановий інструктаж з охорони праці для всіх працівників.

Інформація для контролюючих органів:

Надати звітність про вибух, його наслідки та вжиті заходи до територіальних органів Держпраці України відповідно до чинного законодавства. Дотримання цього порядку дій дозволить мінімізувати ризики для життя та здоров'я працівників, а також зменшити матеріальні збитки підприємства.

#### **4.4 Висновки по розділу**

Загальні вимоги охорони праці на комбікормових підприємствах, розроблені на основі українського та європейського законодавства, регламентують безпечні умови роботи, охорону здоров'я працівників, зниження впливу шкідливих факторів (пилу, шуму) та організацію належного контролю за станом виробничого середовища.

Порядок дій у разі вибуху пилоповітряної суміші акцентує увагу на важливості оперативного реагування, евакуації персоналу, локалізації небезпеки та подальшого розслідування причин аварії для попередження подібних випадків у майбутньому.

Сукупність вимог до безпеки на підприємстві охоплює всі аспекти роботи – від підготовки обладнання до його експлуатації та ліквідації аварійних ситуацій. Дотримання цих заходів сприяє зниженню травматизму, підвищенню продуктивності праці та забезпеченню екологічної безпеки виробництва.

## 5 Економічна оцінка розробленого подрібнювача

### 5.1 Вихідні дані

Метою магістерської роботи є розробка перспективної конструктивно-технологічної схеми подрібнювача фуражного зерна, що забезпечує високу якість подрібнювання при мінімальних питомих витратах енергії і максимальній пропускній здатності.

У даному розділі визначається передбачувана економічна ефективність застосування розробленого подрібнювача кормів. За прототип був узятий молотковий подрібнювач кормів КР-02.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до розрахунку техніко економічних показників

Показник	Варіанти	
	подрібнювач кормів КР-02	розроблений подрібнювач
Об'єм робіт на зимовий період (210 днів), т	100	100
Продуктивність, кг/год	200	240
Потужність приводу, кВт	2,5	2,5
Питома енергоємність, кВт·год/т	12,5	10,4
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1
Балансова вартість, грн	14800	-
Капітальні вкладення, грн	-	5200

### 5.2 Розрахунок показників економічної ефективності

Порівняння базового та удосконаленого подрібнювачів кормів буде здійснюватися на основі питомих експлуатаційних витрат. До складу цих витрат входять витрати на оплату праці, витрати на енергоресурси, амортизаційні

відрахування, а також витрати на ремонт і технічне обслуговування. Розрахунок зазначених показників виконуватиметься згідно з методиками та рекомендаціями, викладеними у джерелі [47].

Таблиця 6.2 - Показники економічної ефективності  
розробленого подрібнювача

Показники	Варіанти		Експериментальний варіант в % до базового
	0,2	0,24	
Продуктивність, т/год.	0,2	0,24	120,0
Встановлена потужність, кВт	2,5	2,5	100,0
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1	100,0
Балансова вартість, грн.	14800	-	-
Капітальні вкладення, грн.	-	5200	-
Питомі річні експлуатаційні витрати, грн./т	457,40	378,37	82,7
в т.ч.: заробітна платня	421,25	350,00	83,1
витрати на електроенергію	32,50	27,08	83,3
амортизаційні відрахування	2,03	0,71	35,1
витрати на ТО та ремонт	1,62	0,57	35,1
Максимальне річне навантаження, т	-	100	-
Економія питомих експлуатаційних витрат, грн./т	-	79,03	-
Економія експлуатаційних витрат, грн.	-	7903,4	-
Строк окупності капітальних вкладень, років	-	0,7	-

### 5.3 Висновки до розділу

Техніко-економічна оцінка експериментального подрібнювача показала, що в порівнянні з базовим КР-02 він має переваги за експлуатаційними витратами. При цьому строк окупності при впровадженні складе 0,7 роки, а річний економічний ефект за нашими розрахунками становить 7903,4 грн.

## Загальні висновки

1. Проведений аналіз стану питання, огляд існуючих конструкцій подрібнювачів кормового зерна та проаналізовані останні дослідження процесу подрібнення.

2. На підставі теоретичних досліджень обґрунтовані конструктивно-режимні параметри малогабаритного молоткового подрібнювача фуражного зерна. Отримано рівняння для отримання мінімальної маси молотка, рівняння енергетичного балансу потужності роботи експериментального подрібнювача.

3. Розроблений та реалізований дослідний зразок подрібнювача. Проведені його експериментальні випробування на предмет пошуку оптимальних значень конструкційно-технологічних параметрів.

4. За результатами експериментальних досліджень отримані математичні моделі питомої витрати енергії  $A_{num}$ , що дозволяють оптимізувати технологічні, конструктивно-режимні параметри малогабаритного молоткового подрібнювача.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень рекомендуються наступні технологічні та конструктивно-режимні параметри нового подрібнювача:

- для дрібного помелу ( $M_{II} = 0,2...1,0$  мм) -  $N_M = 4$  шт.,  $Q_{II} = 120$  кг/год,  
 $v_i = 25 - 30$  м/с, при значеннях  $A_{num} = 1,54...1,7 \frac{Вт \cdot год}{кг}$ ;

- для середнього помелу ( $M_{II} = 1,0...1,8$  мм) -  $N_M = 2$  шт.,  $Q_{II} = 165$  кг/год,  
 $v_i = 20 - 25$  м/с, при значеннях  $A_{num} = 1,59...1,35 \frac{Вт \cdot год}{кг}$ ;

- для грубого помелу ( $M_{II} = 1,8...2,6$  мм) -  $N_M = 2$  шт.,  $Q_{II} = 210$  кг/год,  
 $v_i = 20 - 25$  м/с, при значеннях  $A_{num} = 1,8...1,5 \frac{Вт \cdot год}{кг}$ . Також обґрунтовані

основні параметри малогабаритного молоткового подрібнювача: зазор між кінцем молотка і декою 1,5 мм, вага молотка – 0,26 кг, ширина барабана - 590 мм, число обертів ротора -1000...2900 об/хв, кількість молотків 2-4 шт.

5. Надані рекомендації для безпечного виконання робіт по подрібненню фуражного зерна на експериментальному подрібнювачі, що передбачаються дипломною роботою.

6. Техніко-економічна оцінка експериментального подрібнювача показала, що в порівнянні з базовим КР-02 він має переваги за експлуатаційними витратами. При цьому строк окупності при впровадженні складе 0,7 роки, а річний економічний ефект за нашими розрахунками становить 7903,4 грн.

## Бібліографія

1. Єгоров, Б.В. Технологія виробництва комбікормів [Текст]: підруч. для вищ. навч. закладів/Б.В. Єгоров.–Одеса.: Друкарський дім, 2011.– 448 с.
2. Дудін В.Ю. Технологія виробництва і переробки продукції свинарства: навчальний посібник / М. Повод, О. Бондарська, В. Лихач, С. Жижка, В. Нечмілов та ін. – Київ : Науково-методичний центр ВФПО, 2021. – 360 с.
3. Романюха І.О., Дудін В.Ю. Курсове і дипломне проектування тваринницьких підприємств: навч. посібн. [для студ. вищ. навч. закл.]/І.О. Романюха, В.Ю. Дудін; за ред. І. Романюхи. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2014. – 418 с.
4. Повод М.Г, Дудін, В.Ю., Шпетний М.Б. Розробка основних засад щодо обґрунтованого визначення розмірів санітарно-захисних зон свиноферм: монографія, Суми, «Сумський національний аграрний університет» 2019. – 96 с., ISBN 978-617-593-059-5
5. Дудін В.Ю. Експериментальні дослідження малогабаритного подрібнювача соковитих кормів/ В.Ю. Дудін, О.С. Гаврильченко, П.С. Височин // Materials of the XIII International scientific and practical Conference Science and civilization – 2018, Volume 12, January 30 - February 7, 2018.: Sheffield. Science and education LTD – 41-45 p
6. Дудін В.Ю. Формування якості годівлі повнораціонними комбікормами / В.Ю. Дудін, О.С. Гаврильченко, Ю.І. Мудрак, П.І. Черниш //Materiály XIV Mezinárodní vědecko - praktická konference «Moderní vymoženosti vědy - 2018», Volume 8 : Praha. Publishing House «Education and Science» - S. 48-53.
7. Дудін В.Ю. Дослідження енергетичних характеристик процесу змішування сипких кормів/ В.Ю. Дудін, Я.О. Муха, О.Ю. Лук'яненко // Materials of the XIII International scientific and practical Conference Conduct of modern science - 2018 , November 30 - December 7, 2018. Construction and architecture. Agriculture. Modern information technology.: Sheffield. Science and education LTD – 41-45 p.
8. Дудін В.Ю. Дослідження процесу різання коренеплодів / В.Ю. Дудін, І.А. Бородавка//Materialy XV Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, «Strategiczne pytania światowej nauki - 2019» , Volume 10 Przemysł: Nauka i studia– 36-39 s.

9. Дудін В.Ю. Дослідження подрібнювача фуражного зерна сколюючої дії / В.Ю. Дудін, О.М. Антіпов // *Materialy XV Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, «Strategiczne pytania światowej nauki - 2019»*, Volume 10 *Przemysł: Nauka i studia* -33-35 s.
10. Suhadi, W. Die Schecke als Arbeitsorgan in verarbeitungs - maschinen. / W.Suhadi. // *Maschinenbautechnik* –№5, 1967, – P. 41-56. (англ)
11. Oyama J., Ayaki K. Kagaki Kikai, 1956, №20, – P. 6.
12. Lacey. P.M. Development in the Thery of Particfl mixing. *J. Appl. Chem.* 1954, №4, – P. 257
13. Duschek K. Optimierung der Produktion in einem bolivianischen Ziegelwerk / *Ziegelindustrie International*. Wiesbaden: Dauerlag
14. [http://mehzavod.com.ua/Materials/%D0%91%D1%83%D0%BA%D0%BB%D0%B5%D1%82\\_%D0%9C%D0%9A%D0%A3.pdf](http://mehzavod.com.ua/Materials/%D0%91%D1%83%D0%BA%D0%BB%D0%B5%D1%82_%D0%9C%D0%9A%D0%A3.pdf)
15. [https://downloads.skiold.dk/downloads/leaflets/engelsk/disc-mill\\_gb.pdf](https://downloads.skiold.dk/downloads/leaflets/engelsk/disc-mill_gb.pdf)
16. <https://downloads.skiold.dk/downloads/feed/psheet/130986003949.pdf>
17. <https://agrostory.com/ua/info-centre/agronomists/mobilnyy-kombikormovyy-zavod-i-perspektivy-ego-ispolzovaniya/>
18. <https://propozitsiya.com/ua/kombikorm-na-kolesah>
19. <https://riela.com.ua/peresuvna-ustanovka-kombikormiv/>
20. Magnus, K. Schwingungen: Eine Einführung in die physikalischen Grundlagen und die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen [Text] / Kurt Magnus. - Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2008. – 74p.
21. Parkinson, A.G. Vibration and balancing of rotating continuous shafts [Text]/A.G. Parkinson, R.E.B. Bishop // *Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science.* – 1961. – No.3. – P. 200-213.
22. Баранецька О.Р. Вібраційне змішування сумішей сипучих матеріалів [Текст] / О.Р. Баранецька // *Машинознавство.* – 2000. – № 3 (33). – С. 60–63.
23. Афтаназів, І.С. Вибір технології і обладнання для змішування сумішей сипучих матеріалів [Текст] / І.С.Афтаназів, О.Р.Баранецька, О.М. Сімчук// *Машинознавство.* – 1999. – № 5 (23). – С. 55–62.



24. Берник, М.П. Віброімпульсний привод нового вібраційного змішувача [Текст] / М.П. Берник, О.В. Цуркан, Л.Д. Величко // Вибрації в техніке и технологиях. – 2001. – № 2(18). – С. 3–7.
25. Sarang O. Effects of powder cohesion and segregation on pharmaceutical mixing and granulation: dissertation doctor of philosophy: 05.2003/ O.Sarang // USA: New Jersey. – 2016. – P.1-8 (140).
26. Берник М.П., Цуркан О.В. Обґрунтування технологічних та конструктивних схем енергозберігаючих віброзмішувачів барабанного типу // Вибрації в техніке и технологиях. – 2001. – №1 (17). – С. 34–37.
27. Цуркан О.В., Величко Л.Д. Віброімпульсний привод нового вібраційного змішувача // Вибрації в техніке и технологиях. – 2001. – №2 (18). – С. 3–7.
28. Берник П.С., Берник М.П., Цуркан О.В. Енергозберігаючі змішувачі для приготування сипучих кормів // Техніка АПК. – 2003. – №8. – С. 16–18.
29. Регресійний аналіз [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://libfree.com/114811945\\_ekonomikaregresiyuy\\_analiz.html](http://libfree.com/114811945_ekonomikaregresiyuy_analiz.html)- Назва з екрану.
30. Рогатинський Р.М. Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів з сировиною сільськогосподарського виробництва: Дис.- докт. техн. наук: 05.20.01. - К., 1997.- 425 с.
31. Гевко І.Б., Гурик О.Я. Дослідження конструкторсько-технологічних параметрів зони перевантаження гвинтових транспортно-технологічних систем. Збірник наукових праць Національного аграрного університету "Механізація сільськогосподарського виробництва". - Том VII. - К.: Видавництво НАУ. - 2000. - с. 184-190.
32. Григор'єв А.М., Преображенський П.А. Комплексна механізація і автоматизація вантажорозвантажувальних і транспортних робіт в машинобудуванні і приладобудуванні. К.: Наукова думка, - 1967. - 116 с.
33. Радик Д.Л., Гурик О.Я. Дослідження енерговитрат шнекового змішувача. - Тернопіль: Вісник ТДТУ, 2001, Том. 6, №3 - С56-61.
34. Оришка Х.О., Гончаров В., Кравцова Г., Артюхов А.. Процес взаємодії з сипкими матеріалами у постачальному пристрої гравітаційно- роторного типу. Вісник ТДТУ, Т.6., №4., 2001. С. 88-95.

35. Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин. Навч. посібник. -К.: НМК ВО, 1992. - 320 с.
36. Стадник І.Я. Науково-технічні основи дискретної дії на компоненти при перемішуванні : монографія / І.Я. Стадник. – Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. – 240 с.
37. Strenk F. Mieszanieimieszalniki (Mixing and mixingequipment) / F.Strenk. – Warszawa : Wydawnictwa NaukowoTechniczne, 1971. – 367 p.
38. Стадник І.Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста : дис ... д.т.н. : 05.18.12 / І.Я. Стадник. – Київ. – 2013. – 487 с.
39. Researching of the concentration distribution of soluble layers when mixed in the weight condition / I.Stadnyk, J.Pankiv, P.Havrylko, H.Karpyk // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. – 2019. – Vol. 13. – № 1. – P. 581–592. DOI: 10.5219/1129. 5
40. Корнієнко Я.М. Процеси переносу в дисперсних системах : навч. посіб. / Я.М. Корнієнко, Р.В. Сачок. – Київ, 2011. – 132 с. 10. Расслоение в псевдоожигеном слое [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://repetitora.com/rassloeniev-psevdoozhizhenom-sloe>.
41. Drobot V.I. Technological calculations in baking production / V.I. Drobot. – Condor, 2010. – 440 p.
42. Закон України «Про охорону праці»
43. НПАОП 0.00-4.21-04. «Типове положення про службу охорони праці»
44. ДСТУ 2293-99 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять»
45. НПАОП 0.00-6.03-93 «Порядок опрацювання і затвердження роботодавцем нормативних актів з охорони праці, що діють на підприємстві»
46. Положення «Про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту» (Наказ Держгірпромнагляду від 24.03.2008 року № 53).
47. ДСТУ 4397: 2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 15 с.

## ДОДАТКИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра інжинірингу технічних систем

## Модернізація конструкції подрібнювача концентрованих кормів

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МгАІ-1-23  
Браціло Дмитро Костянтинович

**Науковий керівник:** к.т.н., доцент  
Дудін Володимир Юрійович

Дніпро-2024

### Мета і задачі досліджень

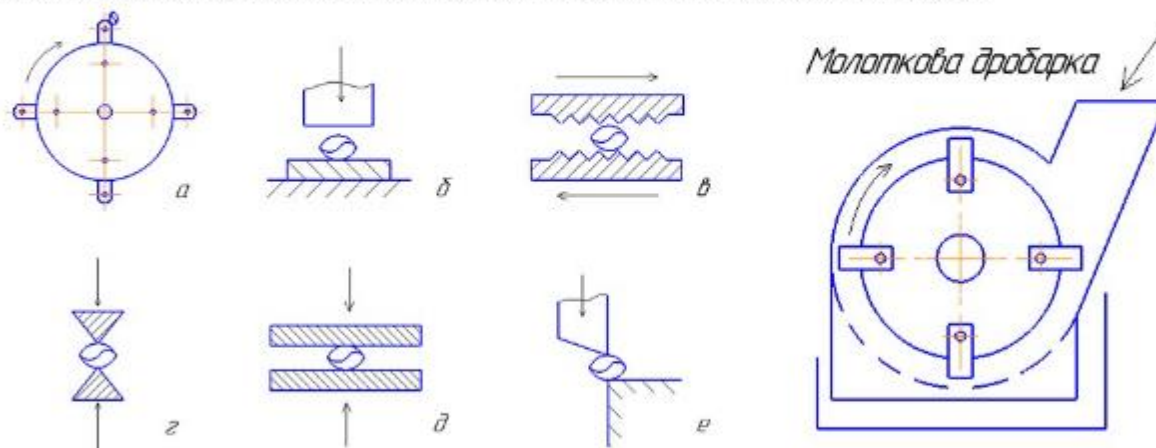
**Мета дипломної роботи:** підвищення ефективності робочого процесу подрібнювача концентрованих кормів шляхом оптимізації основних конструкційно-технологічних параметрів.

Відповідно до мети поставлені **задачі**, які необхідно вирішити на етапах дослідження:

- провести огляд існуючих конструкцій подрібнювачів кормового зерна та аналіз останніх досліджень процесу подрібнення;
- провести теоретичне обґрунтування конструктивно-режимних параметрів малогабаритного молоткового подрібнювача фуражного зерна;
- розробити та реалізувати дослідний зразок подрібнювача та провести його експериментальні випробування на предмет пошуку оптимальних значень конструкційно-технологічних параметрів;
- експериментально дослідити показники якості процесу подрібнення, а саме: питомої витрати енергії від колової швидкості, кількості монолітних молотків і подачі матеріалу;
- провести розробку заходів при експлуатації та прогнозування інженерної обстановки при виникненні надзвичайної ситуації;
- провести техніко-економічне обґрунтування удосконаленого подрібнювача зерна.

## Аналіз стану питання

**Подрібнення** - найпоширеніший і абсолютно обов'язковий спосіб підготовки зернових кормів. При розмелі, дробленні і плющенні руйнується тверда оболонка зерна, полегшується розжовування, поживні речовини робляться доступнішими травним соком.



Схеми способів подрібнення фуражного зерна:  
 а) Вільний удар; б) Обмежений удар; в) Стирання;  
 г) Сколювання; д) Роздавлювання; е) Різання.

Вплив робочих органів молоткової дробарки на подрібнюваний матеріал: вільний удар та стирання.

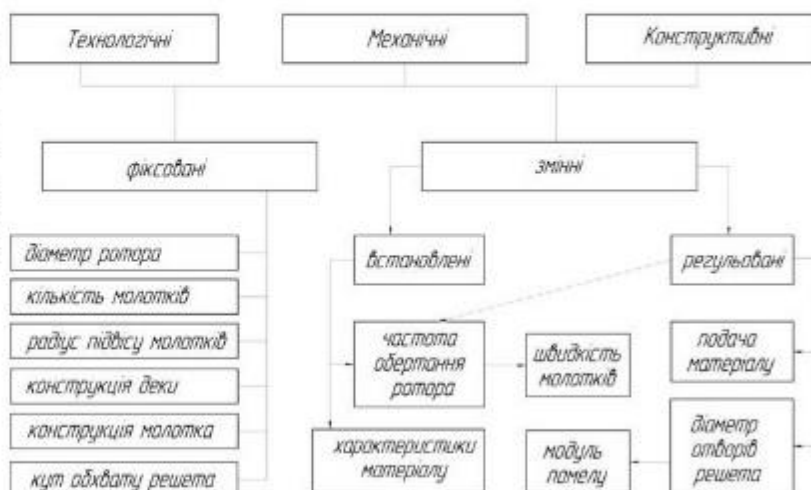
3

## Аналіз стану питання

### Зоотехнічні вимоги:

Концентровані корми подрібнюють до часток з такими розмірами: для ВРХ – не більше 3 мм, для свиней – до 1 мм, для птиці – до 2...3 мм при сухій годівлі і до 1 мм при годівлі вологими мішанками.

Однорідність складу забезпечує однакову поживну цінність усієї кормової суміші. Для зернових кормів показник однорідності суміші повинен бути не менше 90...95% (залежно від призначення за видом і віком тварин).

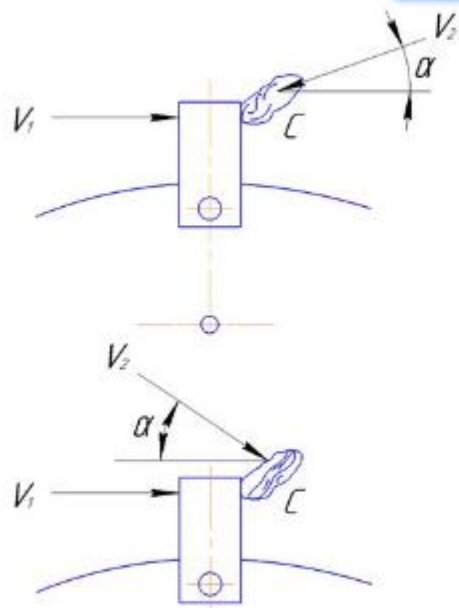


Основні фактори які впливають на ефективність роботи молоткових дробарок

4



## Теоретичне обґрунтування подрібнення



Мінімальна маса молотка, яка забезпечує його радіальне положення при сталому русі:  $m_{\min} > \frac{F_t \cdot h}{f \cdot \omega^2 \cdot R_1 \cdot r}$

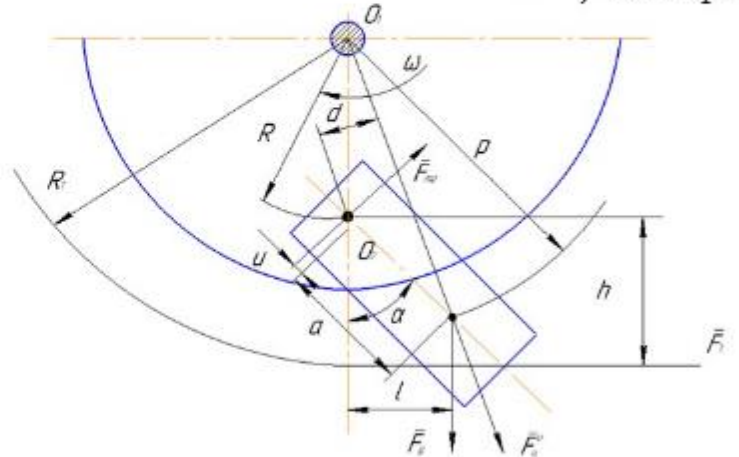


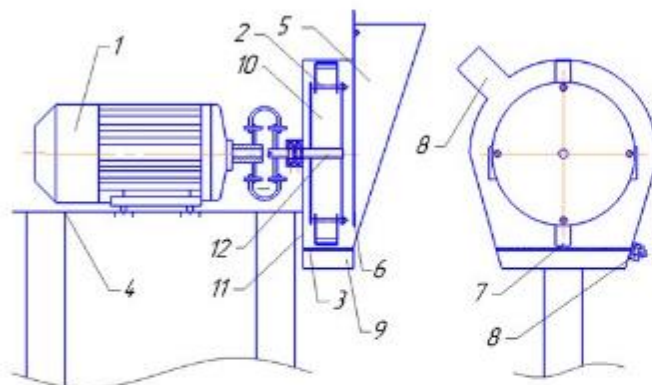
Схема діючих сил на молоток при русі

Сума векторів швидкостей молотка і зерна

$$v = v_1 \pm v_2 \cdot \cos \alpha$$

5

## Програма і методика експериментальних досліджень



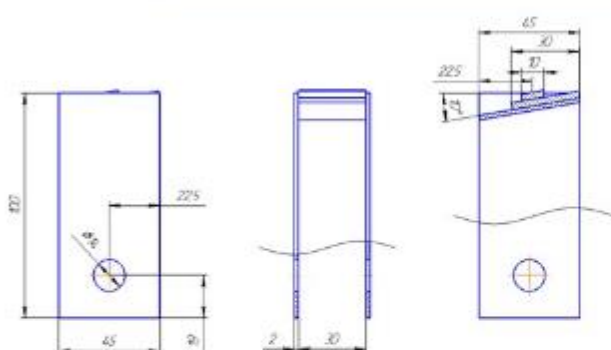
**Загальний вигляд малогабаритного молоткового подрібнювача:** 1 - Електродвигун; 2 - Палець; 3 - Сито кормодробарки; 4 - Стійка; 5 - Бункер; 6 - Заслінка; 7 - Молоток; 8 - Загрузочний отвір для качанів кукурудзи; 9 - Зажим для сита; 10 - Вивантажний отвір; 11 - Подрібнююча камера; 12 - Корпус; 13 - Ротор.

**Загальний вигляд експериментальної установки:**

1 - Експериментальна установка; 2 - Частотний регулятор; 3 - Ноутбук для отримання та розрахунку даних.

6

## Програма і методика експериментальних досліджень



Загальний вигляд молотка



Фотографії молотка кормодробарки

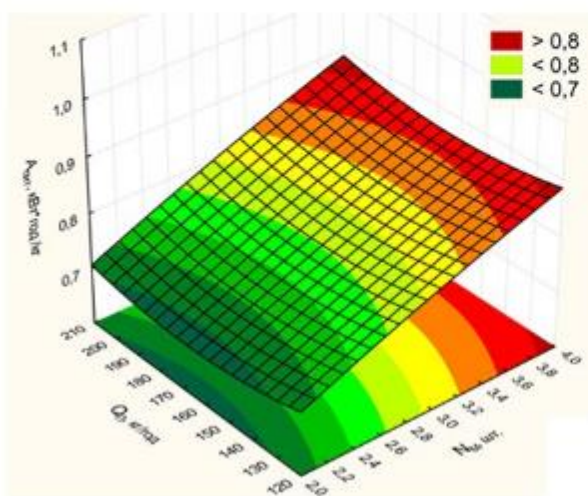
Найменування факторів	Позначення		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральне	Кодоване	-1	0	1	
Кількість монолітних молотків, шт.	$N_M$	$X_1$	2	3	4	1
Подача матеріалу, кг/год	$Q_P$	$X_2$	120	165	210	45
Колова швидкість, м/с	$v_i$	$X_3$	10	20	30	10

7

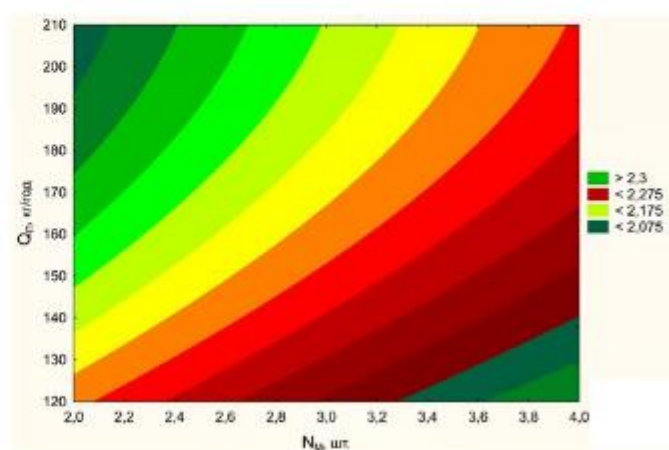
## Результати експериментальних досліджень

Залежність питомої витрати енергії від співвідношення кількості молотків  $N_M$  та подачі матеріалу  $Q_P$

$$A_{\text{пит}} = f(v_i, Q_P, N_M) \text{ при } v_i = 20 \text{ м/с}$$



Графік поверхні математичної моделі



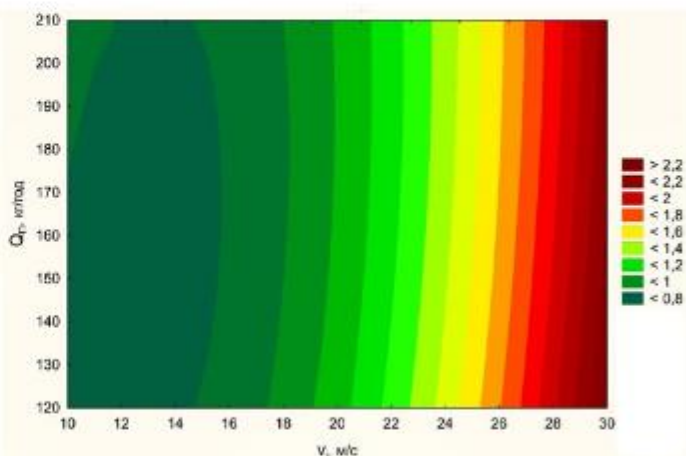
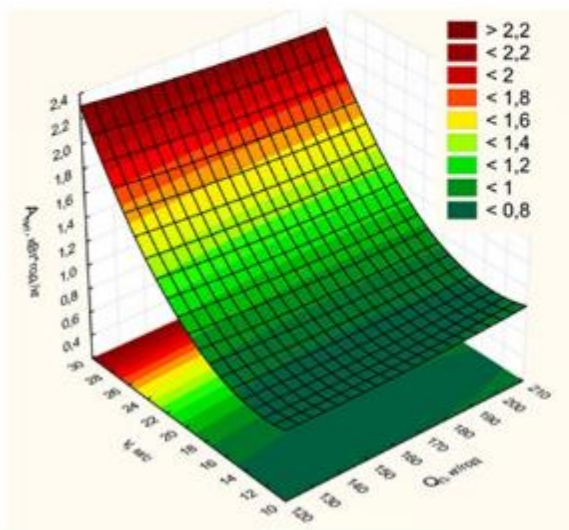
Карта ліній відгуку математичної моделі

8

## Результати експериментальних досліджень

Залежність питомої витрати енергії від співвідношення подачі матеріалу  $Q_{\Pi}$  та колової швидкості  $v_i$

$$A_{\text{пит}} = f(v_i, Q_{\Pi}, N_M) \text{ при } N_M = 3 \text{ шт.}$$



Карта ліній відгуку математичної моделі

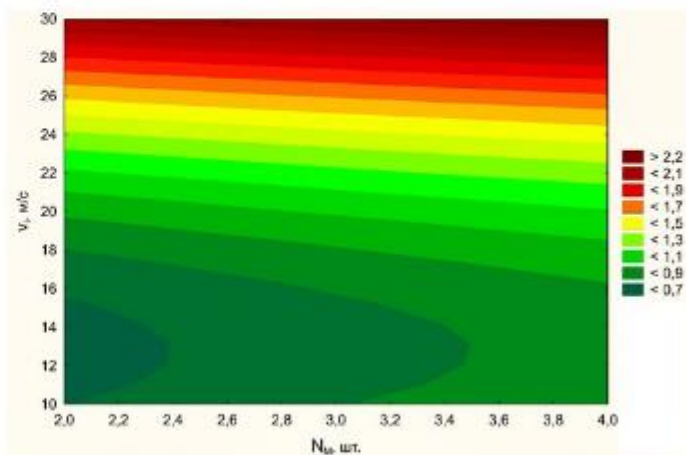
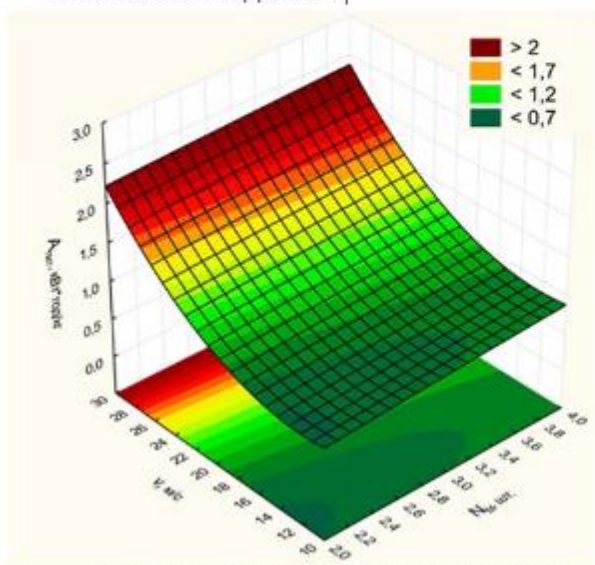
Графік поверхні математичної моделі

9

## Результати експериментальних досліджень

Залежність питомої витрати енергії від співвідношення кількості молотків  $N_M$  та колової швидкості  $v_i$

$$A_{\text{пит}} = f(v_i, Q_{\Pi}, N_M) \text{ при } Q_{\Pi} = 120 \text{ кг/год}$$



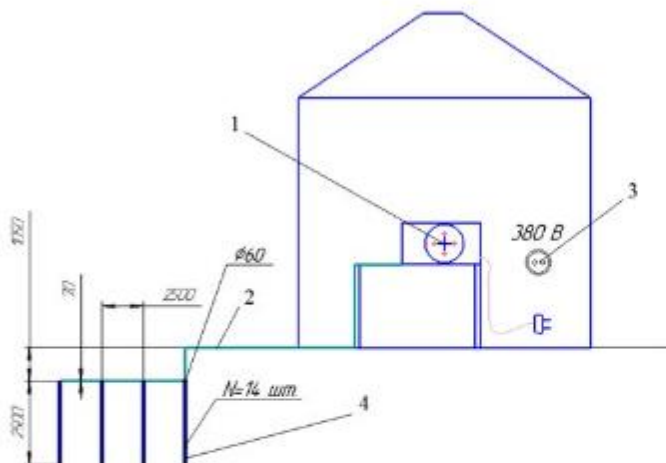
Карта ліній відгуку математичної моделі

Графік поверхні математичної моделі

10



## Охорона праці



**Схема захисного заземлення кормодробарки:**

1 – Кормодробарка; 2 – Горизонтальна смуга;  
3 – Мережа 380 В; 4 – вертикальні електроди.

З'єднання елементів заземлюючих пристроїв виконується за допомогою зварювання, а корпуси машин та апаратів з'єднуються з провідниками заземлюючих пристроїв зварюванням, надійним бовтовим з'єднанням.



**Зона осередку вибуху:**

$R_{10}$  – зона слабких руйнувань;  $R_{20}$  – зона середніх руйнувань;  $R_{30}$  – Зона сильних руйнувань;  $R_{50}$  – зона повних руйнувань;  $R_5$  – зона безпечної відстані.

11

## Економічні показники

Показники	Варіанти		Експериментальний варіант в % до базового
Продуктивність, т/год.	0,2	0,24	120,0
Встановлена потужність, кВт	2,5	2,5	100,0
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1	100,0
Балансова вартість, грн.	14800	-	-
Капітальні вкладення, грн.	-	5200	-
Питомі річні експлуатаційні витрати, грн./т	457,40	378,37	82,7
в т.ч.: заробітна платня	421,25	350,00	83,1
витрати на електроенергію	32,50	27,08	83,3
амортизаційні відрахування	2,03	0,71	35,1
витрати на ТО та ремонт	1,62	0,57	35,1
Максимальне річне навантаження, т	-	100	-
Економія питомих експлуатаційних витрат, грн./т	-	79,03	-
Економія експлуатаційних витрат, грн.	-	7903,4	-
Строк окупності капітальних вкладень, років	-	0,7	-

12

## Загальні висновки

1. Проведений аналіз стану питання, огляд існуючих конструкцій подрібнювачів кормового зерна та проаналізовані останні дослідження процесу подрібнення.

2. На підставі теоретичних досліджень обґрунтовані конструктивно-режимні параметри малогабаритного молоткового подрібнювача фуражного зерна. Отримано рівняння для отримання мінімальної маси молотка, рівняння енергетичного балансу потужності роботи експериментального подрібнювача.

3. Розроблений та реалізований дослідний зразок подрібнювача. Проведені його експериментальні випробування на предмет пошуку оптимальних значень конструкційно-технологічних параметрів.

4. За результатами експериментальних досліджень отримані математичні моделі питомої витрати енергії  $A_{\text{пит}}$ , що дозволяють оптимізувати технологічні, конструктивно-режимні параметри малогабаритного молоткового подрібнювача.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень рекомендуються наступні технологічні та конструктивно-режимні параметри нового подрібнювача:

- для дрібного помелу ( $M_{\text{п}} = 0,2...1,0$  мм) -  $N_{\text{м}} = 4$  шт.,  $Q_{\text{п}} = 120$  кг/год,  $v_i = 25-30$  м/с, при значеннях  $A_{\text{пит}} = 1,54...1,7$  (Вт-год)/кг;

- для середнього помелу ( $M_{\text{п}} = 1,0...1,8$  мм) -  $N_{\text{м}} = 2$  шт.,  $Q_{\text{п}} = 165$  кг/год,  $v_i = 20-25$  м/с, при  $A_{\text{пит}} = 1,59...1,35$  (Вт-год)/кг;

- для грубого помелу ( $M_{\text{п}} = 1,8...2,6$  мм) -  $N_{\text{м}} = 2$  шт.,  $Q_{\text{п}} = 210$  кг/год,  $v_i = 20-25$  м/с, при значеннях  $A_{\text{пит}} = 1,8...1,5$  (Вт-год)/кг. Також обґрунтовані основні параметри малогабаритного молоткового подрібнювача: зазор між кінцем молотка і декою 1,5 мм, вага молотка – 0,26 кг, ширина барабана - 590 мм, число обертів ротора - 1000...2900 об/хв, кількість молотків 2-4 шт.

5. Надані рекомендації для безпечного виконання робіт по подрібненню фуражного зерна на експериментальному подрібнювачі, що передбачаються дипломною роботою.

6. Річна економія експлуатаційних витрат при застосуванні запропонованої моделі подрібнювача в порівнянні з серійною КР-02 становить  $E_{\text{е}} = 7903,4$  грн. Строк окупності - 0,7 роки.