

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**КАНЮКА БОГДАН ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 631.362.633

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Удосконалення конструктивних параметрів машин для подрібнення зерна  
(тема роботи)

208 «Агроінженерія»  
(шифр і назва спеціальності)

---

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр  
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело

---

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи  
Сукманюк О.М.  
(прізвище, ім'я, по батькові)  
к.і.н., доцент  
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2020

## АНОТАЦІЯ

Канюка Б.В. Удосконалення конструктивних параметрів машин для подрібнення зерна. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Робота присвячена проблемі підвищення ефективності технологічних засобів для ефективного процесу подрібнення фуражного зерна з використанням багатоступеневого подрібнення і сепарації зернової дерті через змінні решета.

У роботі наведена оцінка впливу основних конструктивних і режимних параметрів на якісні показники продукту та обґрунтовано вибір конструктивно-кінематичної схеми багатоступеневого подрібнювача, сформульовані мета і задачі дослідження і основні конструктивно-режимні параметри багатоступеневого подрібнювача.

**Ключові слова:** фуражне зерно, подрібнення, ефективність, енергоємність, режими роботи.

## ABSTRACT

Kanyuka B. Improved design parameters of grain mixing machines. The quality of the robot for the purpose of the master's degree for specialty 208 - agroengineering. - Polissia National University, Zhytomyr, 2020.

The robot is assigned a problematic check of the efficiency of technological processes for processing feed grain with the processing of admitted grain in the separation of grain processing through a specific solution.

The robots have a methodology for working with the main structural elements and modes of working with tools, showing the products and the obtained vibro-constructive-kinematic diagrams of the available feed, new methods for analyzing the pumping-modes of the designer's tasks.

**Key words:** fodder grain, supplementation, efficiency, energy efficiency, robotic modes.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА	6
1.1. Аналіз способів подрібнення зернового матеріалу	6
1.2. Тенденції розвитку технології та обладнання для подрібнення фуражного зерна	11
Висновки по розділу 1	15
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА	16
2.1. Фактори і параметри оптимізації процесу багатоступеневого подрібнення фуражного зерна	16
2.2. Обґрунтування технологічної схеми багатоступінчастого подрібнювача фуражного зерна	18
2.3. Математична модель руйнування фуражного зерна багаторазовим впливом на зернівку способом «сколювання-зріз» з урахуванням пауз механічної дії	20
Висновки по розділу 2	23
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ ЗЕРУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ БАГАТОСТУПІНЧАТОГО ПОДРІБНЮВАЧА	24
3.1. Обґрунтування подрібнюючих елементів, які забезпечують подрібнення зернівки способом «сколювання-зріз»	24
3.2. Визначення частоти обертання ротора-диска, при якій буде дотримано стійкий рух зернівки в зону подрібнення	28
3.3. Експериментальна установка багатоступінчастого подрібнювача	32
3.5. Результати експериментальних досліджень	34
Висновки по розділу 3	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41

## ВСТУП

Основним напрямком розвитку галузей тваринництва, в найближчий час, буде впровадження енергоресурсозберігаючих технологій на основі досягнення сучасної науки і передового досвіду. Підйом тваринництва буде забезпечуватися за рахунок підвищення продуктивності худоби і птиці, а основою розвитку і зміцнення галузей тваринництва є створення міцної кормової бази, вдосконалення технічних засобів механізації процесів виробництва і переробки кормів. З усього різноманіття існуючих способів приготування кормів найбільше застосування отримала механічна технологія.

У механічній технології приготування кормів найпоширенішим і важливим процесом є подрібнення, зумовлене вимогами фізіології годування тварин і птиці.

Основними машинами, застосовуваними в сільськогосподарському виробництві та інших галузях народного господарства для подрібнення зернового матеріалу, є молоткові дробарки, але вони мають ряд суттєвих недоліків.

Поряд з цим сучасні дослідження в області годування сільськогосподарських тварин і птиці показують, що слід не тільки забезпечити необхідний модуль розмелу зернової дерті при згодовуванні її для різних видів, груп і віку тварин і птахів, а й рівність частинок за класами і необхідний розподіл за крупністю фракційного складу подрібненого продукту.

У зв'язку з цим розробка і обґрунтування основних конструктивних параметрів технічних засобів з кормоприготування, які будуть пристосовані до різних умов виробництва, є актуальною задачею. Також, одним із актуальних напрямів в сільському господарстві є вирішення проблеми енергозбереження. У зв'язку з вищевикладеним, виключно більшої актуальності набувають питання узагальнення наявних дослідницьких і конструкторських робіт зі створення енергоресурсозберігаючих технологій з кормоприготування, в тому числі розробки менш енергоємних технічних засобів нового покоління.

Відповідно до викладеного, у кваліфікаційній роботі сформульовано **мету дослідження**: удосконалення конструктивних параметрів машин для подрібнення зерна, що забезпечує покращення якісних показників процесу кормоприготування.

**Об'єкт дослідження**: процес подрібнення зерна з використанням багатоступінчатого подрібнення.

**Предмет дослідження**: закономірності взаємодії робочих органів енергозберігаючого подрібнювача із зерном, залежності кількісних і якісних показників роботи від конструктивних параметрів.

**Методи дослідження**: теоретичні обґрунтування параметрів і режимів роботи енергозберігаючого подрібнювача зерна проводилось з використанням математичного моделювання, та базувалось на законах класичної механіки, механіки матеріалів і аналітичної геометрії.

**Публікації**. За результатами досліджень опубліковано тези у Збірнику доповідей учасників II Міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи в агропромисловому виробництві» та збірнику матеріалів науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2020».

**Обсяг та структура роботи**. Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 46 сторінках машинописного тексту, містить 4 таблиць, 26 рисунків, списку використаних джерел з 37 найменувань.

# РОЗДІЛ 1.

## СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА

### 1.1. Аналіз способів подрібнення зернового матеріалу

У даний час існує велика кількість кормів, які направлені на задоволення фізіологічних потреб різних видів і груп тварин. Відповідно до кормових матеріалів існує велика кількість способів їх обробки, які можна розділити на: теплові, механічні, хімічні, біологічні і біохімічні. Відповідно до цього всі види обробки (переробки) різних матеріалів шляхом механічної дії на них за допомогою інструменту або робочого органу машини відносяться до механічної технології.

Подрібнення – це процес розподілу матеріалу на частинки потрібного розміру із заданими параметрами. Процес подрібнення відбувається за рахунок впливу зовнішніх сил, напруження від яких, виникають в матеріалі, які вище напружень молекулярних сил зчеплення.

При проведенні аналізу джерел було встановлено, що багато дослідників пропонують різні класифікаційні схеми способів подрібнення, у своїх роботах Бауман В.А. зазначає, що в машині залежно від її призначення і принципу дії можуть використовуватися такі навантаження: розчавлювання, удар, розколювання, злам, стирання [1].

Бутковський В.А. вважає, що основними способами подрібнення зернового матеріалу на борошномельних заводах є стиснення і зсув, удар, удар і стирання, стирання і удар, стиснення [2].

На думку І.Т. Мерко, способи подрібнення засновані на використанні наступних деформацій: стиснення, зрушення, удар, стирання[3].

Можливість подрібнення зерна способом затиснутого удару розглядає У.К. Сабієв, при даному виді подрібнення відбувається вплив на матеріал як одним

робочих органом (лезом), так і декількома. Руйнування відбувається за рахунок концентратора напруг в самій важко подрібнювальній частині зернівки [4].

Соловійов І.К. зазначає, що робочий процес в сучасних машинах для механічного подрібнення інгредієнтів при виробництві комбікормів заснований на таких основних принципах механічного впливу продукт: руйнування ударом, сколювання (різання), розтирання, роздавлювання (плющення) [5]. Також принципи подрібнення кормів, як різання, ламання (подрібнення), розтирання (розмелу), розплющення (здавлювання), розбивання вільним ударом у своїх працях зазначає П.Ф. Сушков [6].

Основним для подрібнення способом руйнування ударом «вліт» (подрібнення, що відбувається у молоткових дробарок) вважає Демідов А.Р. [7].

Схему роздавлювання шматків матеріалу на більш дрібні частинки, такі як: розчавлювання, вільний удар, стирання, розколювання, розрізання, запропонував в 1962 році Єлісеєв В.А. [8]. Але найбільш поширеними способом подрібнення кормів є: подрібнення ударом, розколювання, стирання (розмелу), плющення і різання лезом, різцем або пуансоном, який запропонував в 1978 році Мельников С.В. [9].

С.В. Золотарьов [10] наводить таку схему способів подрібнення матеріалів: роздавлювання, розколювання, розмелу, різання, розпилювання, стирання, стиснутий удар і вільний удар. Рейс [11] поділяє руйнування матеріалів за показниками міцності і структурним властивостями матеріалів на десять груп: твердо-сколювальні, твердо-тендітні, твердо-в'язкі, середньої твердості, пружно-м'які, волокнисті, чутливі до теплоти, м'яко-тендітні, волого-пластичні, м'яко-в'язкі. Для перших восьми він рекомендує удар і стиснення. Приблизно такі ж класифікаційні схеми способів подрібнення призводять більшість дослідників. Найбільш частіше зустрічаються в цих схемах є наступні способи (рис. 1.1):

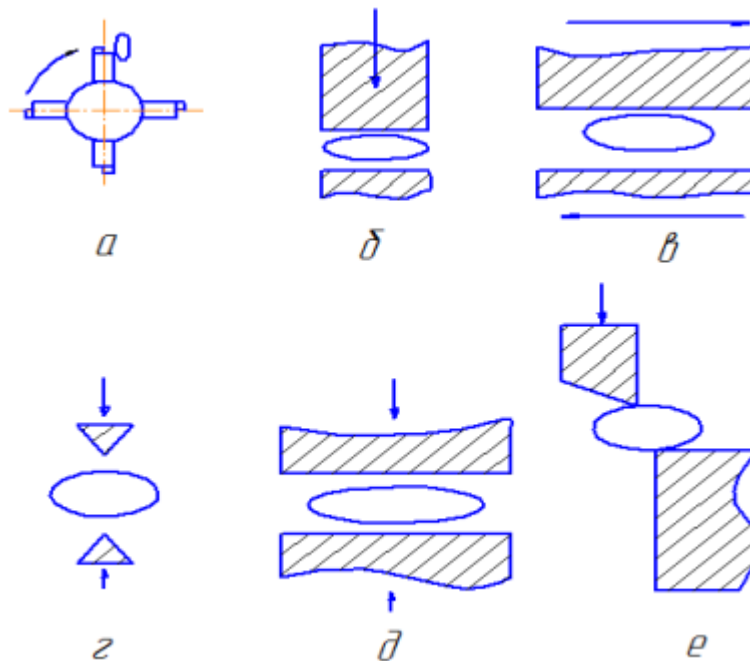


Рисунок 1.1. – Схеми способів подрібнення: а – вільний удар; б – стиснений удар; в – стирання; г – сколювання; д – роздавлювання; е – різання

Для подрібнення зернових матеріалу існує велика кількість пристроїв, що подрібнюють зернові культури. Ці пристрої можна поділити на основні види машин.

Жорнові млини. Принцип дії яких не змінювався від початку їх використання. Вони працюють за принципом стиснення і здвигу. Робочі органи яких - це два плоских жорна, зерно подрібнюється за рахунок обертання одного із робочих органів.

Вальцеві станки призначені для помелу зернових культур (рис. 1.2). Основною складовою станка – це система валів, які працюють за способом сколювання і здвигу. Робочі органи вальцевих станків – це рифлені вальці, які обертаються з різними або однаковими окружними швидкостями або один із робочих органів рухомий, а інший – нерухомий.



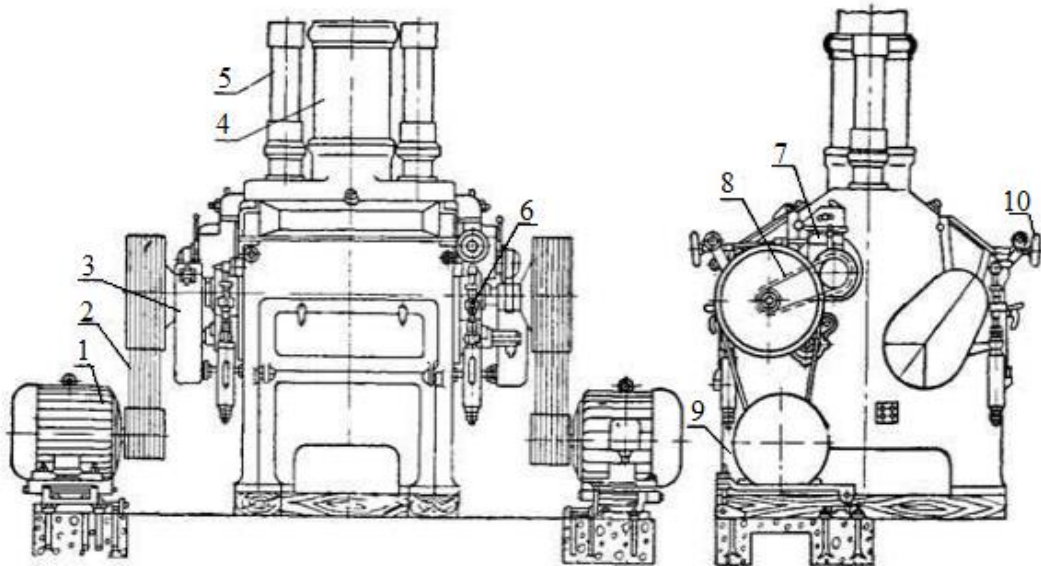


Рис. 1.2. Вальцевий станок БВ: 1 – електродвигун; 2 – клиннопасова передача; 3 – коробка шестеренчастої передачі; 4 – приймальна труба; 5 – пневмопривід; 6 – механізм налаштування паралельності вальці; 7 – автомат привально-відвальний; 8 – пасова передача; 9 – станина; 10 – механізм точного налаштування зазору між вальцями.

Плющильні верстати. Призначені для плющення крупи і лушчильного зерна при виробництві вівсяних, гречаних, перлових, кукурудзяних, пшеничних, рисових та інших видів пластівців. Спосіб стиснення і роздавлювання покладено в основу роботи плющильних верстатів. Робочі органи – це два гладких циліндричних валка, один з яких має притискний пристрій. Руйнування зерна здійснюється між двома гладкими валками, що обертаються з однаковими керованими швидкостями.

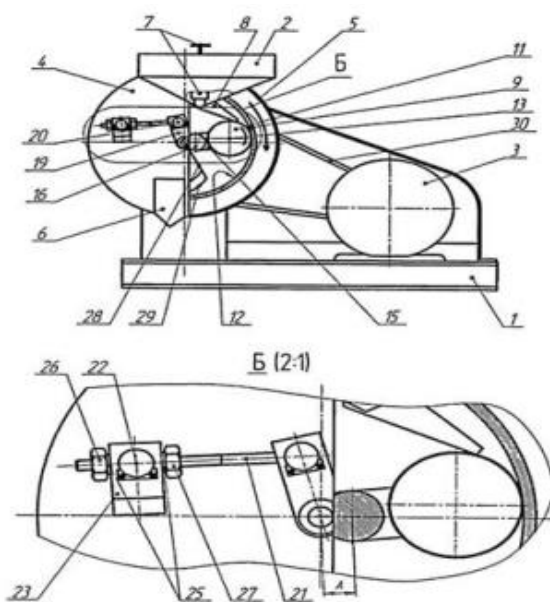


Рис. 1.3. Схема плющильного верстата: 1 – рама; 2 – пальцевий станок; 3 – камера; 4 – вальці; 5 – приймальний бункер; 6 – регулювальна заслінка; 7 – живильний пристрій (скребковий транспортер); 8 – живильний бункер; 9 – скребки; 10 – нижня стінка; 11 – маленькі домішки; 12 – фуражне зерно; 13 – насінневе зерно; 14 – великі домішки.

Плющене зерно – є розповсюдженим кормовим засобом в раціоні великої рогатої худоби, кіз, овець та інших тварин.

На тваринницьких фермах і комплексах найбільше розповсюдження отримали дробарки молоткового типу із замкнутим повітряним контуром типу КДУ, ДКУ, КДМ, ДБ.

Зернова дробарка КДМ-3,0 призначена для подрібнення фуражного зерна на корм худобі і птиці і встановлюється в потокових технологічних лініях кормоцехів на тваринницьких фермах і комплексах [13]. Зернова дробарка КДМ-3,0 є модифікацією універсальної дробарки КДУ-2,0. Відрізняється від неї тим, що не має подрібнювального апарата, живильного і підпресовуючого транспортерів для подрібнення грубих і соковитих кормів. Схема дробарки фуражного зерна КДМ-3,0 представлена на рис. 1.4.

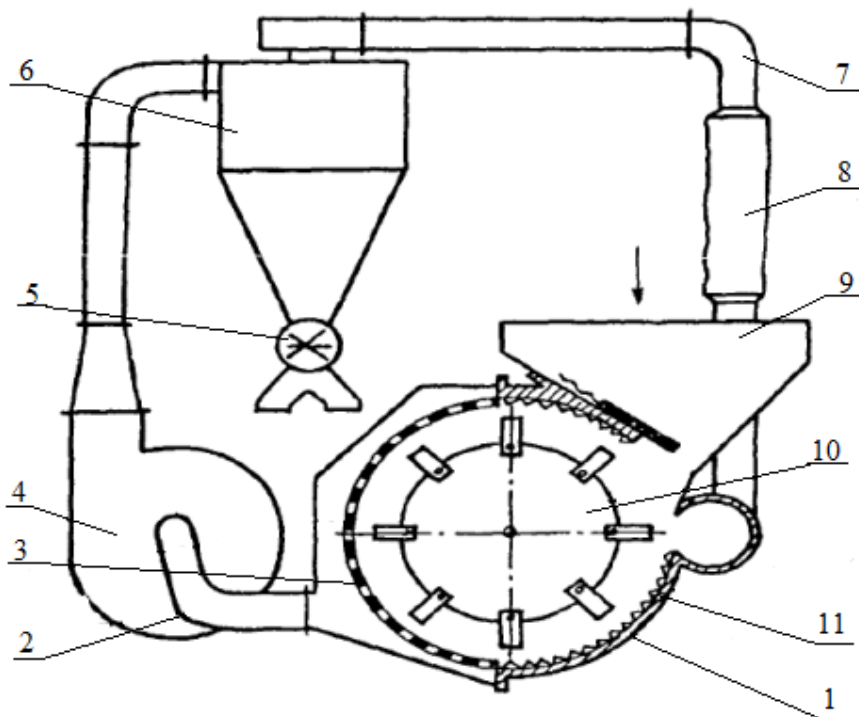


Рис. 1.4 – Схема кормодробарки КДМ-3,0: 1 – корпус; 2 – подвійний патрубок; 3 – решета; 4 – вентилятор; 5 – шлюзовий затвор; 6 – циклону; 7 – трубопровід; 8 – фільтр; 9 – бункер; 10 – дробильний барабан; 11 – деки.

Кормодробарка має продуктивність до 3 т / год, потужність приводу ротора 28 кВт, частоту обертання ротора 2725 хв<sup>-1</sup>, питома металомісткість - 333 кг/т.

Недоліками даної конструкції дробарки є надмірне подрібнення вихідного продукту з великим вмістом борошнистої фракції і велика енергоємність цього процесу. Ці недоліки обумовлені тим, що всередині дробильної камери молотковим барабаном створюються круговіповітряні потоки, які викликають ковзання продуктово-повітряного шару по решеті і тим самим обмежують його пропускну здатність.

## **1.2. Тенденції розвитку технології та обладнання для подрібнення фуражного зерна**

Технології подрібнення зернового матеріалу на тваринницьких фермах, а також на комбікормових агрегатах, засновані на одностадійному процесі подрібнення сировини, який призводить до переподрібнення, значної витрати електроенергії, зниження продуктивності обладнання для подрібнення.

Однією із перспективних технологій є багатостадійне подрібнення сировини з проміжним просіюванням. Дана технологія сприяє збільшенню продуктивності обладнання для подрібнення, зниження енерговитрат і відповідний гранулометричний склад одержуваного продукту. Дослідження, які були проведені Афанасієм В.А. [14] з визначення ефективності застосування двохстадійного подрібнення показали, що продуктивність лінії подрібнення зросли на 43%, а питома витрата електроенергії знизилась на 32...34% у порівняно з одностадійним подрібненням. Зіставлення гранулометричного складу розмеленої суміші при одно- і двохстадійному способах подрібнення показали, що середній розмір часток подрібненої зернової був більш вирівняний і крупніший після двохстадійного подрібненні, також типова витрата електроенергії знизилась на 24% (рис. 1.5).

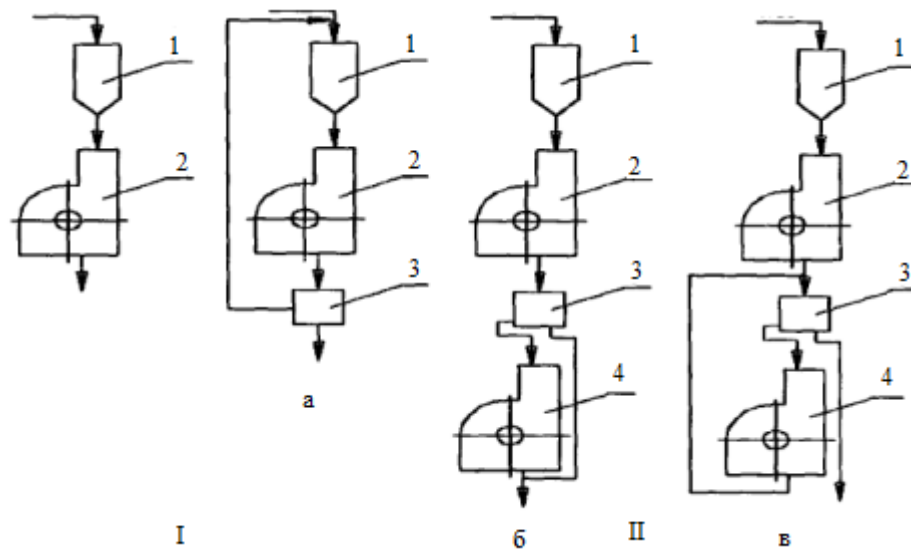


Рис. 1.5 – Технологічні схеми різних способів подрібнення: I - одностадійний спосіб; II - двохстадійний спосіб (а - циклічний; б - ступінчастий; в - східчато-циклічний); 1 - бункер; 2 - дробарка А1-ДДР; 3 - сепаратор ЗСШ-20; 4 - дробарка А1-ДДП

Необхідність активного управління технологічним процесом подрібнення зернового матеріалу з отриманням продукту із заданою розмірною характеристикою привела до появи і розробки двохстадійних схем подрібнення зерна під керівництвом професора В.А. Єлісеєва та його учнів. На (рис. 1.6) представлені схеми двох стадійного подрібнення [8].

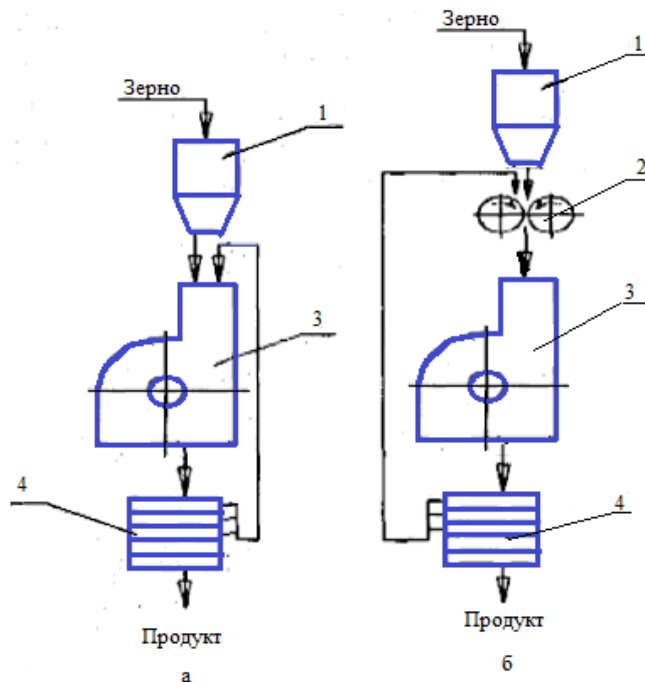


Рис. 1.6. Технологічні схеми подрібнення зернових кормів: а) подрібнення + просіювання; б) плющення + подрібнення + просіювання; 1 - бункер; 2 - плющилка; 3 - молоткова дробарка; 4 - розсів

При порівнянні результатів проведених із використанням технологічних схем, було видно, що при використанні операції просіювання у процесі подрібнення зерна дозволяє збільшити продуктивність у 2..3 рази у порівнянні з процесом без просіювання, а також знизити витрату енергії у 1...3 рази. Поєднання разом операції плющення і операції просіювання збільшує продуктивність у 5...10 разів і знижується питома витрата енергії у 1,6...2,3 рази.

Дослідженням відцентрових дробарок ударної дії, що використовував у технологічному процесі подрібнення фуражного зерна займалися ряд вчених [15-17]. В.А. Денисовим була розроблена відцентрова багатостадійна установка (рис. 1.7) [18].

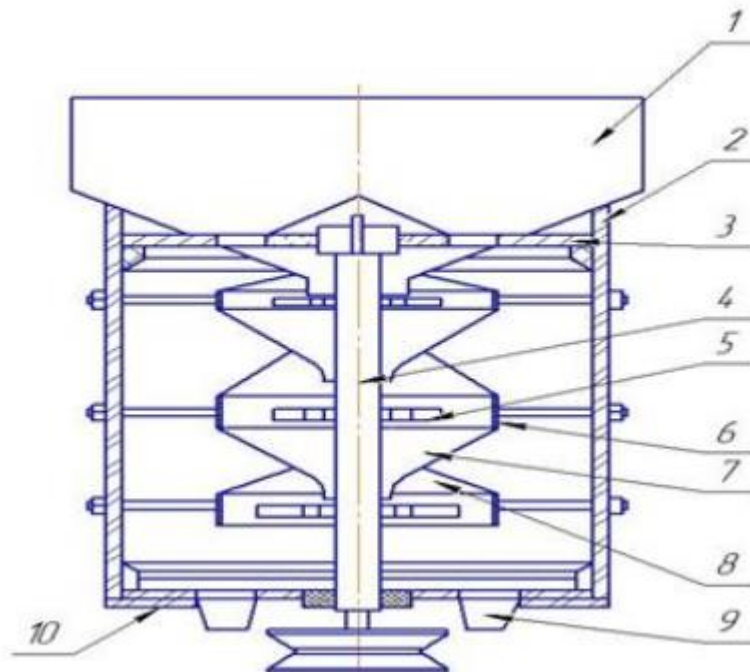


Рис. 1.7 – Схема відцентрової багатостадійної дробарки зерна: 1-завантажувальний бункер; 2 – циліндричний корпус; 3 – верхні плити; 4 – вертикальний вал; 5 – розгонні диски; 6 – відбійні плити; 7 – корпусні воронки 8 – скатні дошки; 9 – відвідні патрубки; 10 – нижні опорні плити

Прийнята конструкція багатостадійного подрібнення (кількість і розміри ступенів подрібнення) обумовлена робочою коловою швидкістю розгінних дисків. Для більш повного руйнування дрібних частинок необхідно створити більш високі колові швидкості, ніж для великих і цілих зерен. У зв'язку з цим

розміри розгінних дисків збільшуються по ходу руху матеріалу. А змінні решета, встановлені між дисками, дозволяють здійснити операцію просіювання. Дана конструкція дозволяє знизити енергоємність процесу подрібнення, поліпшити якість одержуваного продукту з мінімальним вмістом пилоподібної фракції, отримати більш рівномірний гранулометричний склад подрібненого продукту.

Золотаревим С.В. була запропонована і досліджена ударно-відцентрова дробарка фуражного зерна із зустрічно обертаючими роторами та закріпленими на них плоскими робочими органами (рис. 1.8)

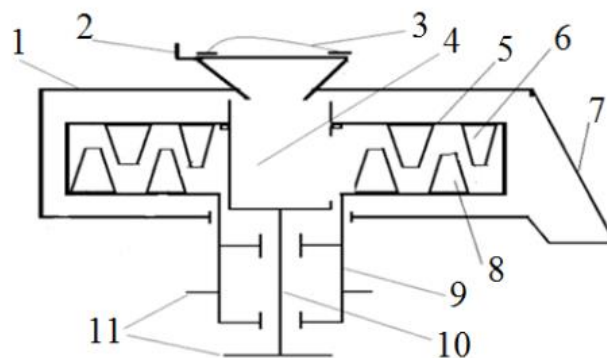


Рис. 1.8 – Схема ударно-відцентрової дробарки фуражного зерна

Дробарка складається із деталей: корпус 1, вивантажувальний патрубок 10, бункер 3, робочі органи у вигляді зустрічно обертаючих дисків 4, 5 з чотирма рядами плоских подрібнюючих елементів 5, 6 входять в простір між першим подрібнюючим елементом і зубом 8. Привід дробарки здійснюється від двох електродвигунів через шківів 11 за допомогою кринопасової передачі, частота обертання –  $2970 \text{ хв}^{-1}$  [19; 20].

Процес подрібнення фуражного зерна багатостадійної відцентрової дробарки, що працює за принципом зрізу сколювання та своєчасним виведенням готової продукції розглядав І.Б. Шагдиров [21].

Під керівництвом професора П.І. Леонтєва його учнями Малаєва М.Д. [22]; Сергєєва Н.С. [23, 24]; Фіапшева А.Г. [25]; Карташова Б.В. [26]; Федорова В.А. [27] та ін. були розроблені і досліджені ряд конструкцій дробарок багатостадійного принципу дії. Дані подрібнювачі обладнані автоматичними живильниками для подачі вихідного зернового матеріалу в камеру подрібнення [28].

Всі виконані роботи спрямовані на підвищення ефективності процесу подрібнення фуражного зерна на корм худобі і птиці.

### **Висновки по розділу 1**

На основі проведеного аналізу існуючих технічних засобів для подрібнення кормових матеріалу можна зробити висновок про те, що процес подрібнення кормових засобів недостатньо вивчений. Необхідно підвищити якість подрібненого матеріалу, знизити енергозатрати в процесі подрібнення за рахунок розробки нових засобів подрібнення.

Даний аналіз дозволив зробити висновки про те, що:

- можливість створення енергозберігаючих технологій в кормоприготуванні на основі створення подрібнювачів нового покоління, що знижують метало- і енергоємність процесу подрібнення фуражного зерна;

- можливість створення подрібнювача з більш перспективними енергетичними показниками, які працюють за менш енергетичними способами подрібнення «сколювання-зріз», що дозволить активно управляти якістю одержаного продукту подрібнення;

- можливість створення багатоступінчатого подрібнювача при підготовці фуражного зерна.

Для досягнення поставленої задачі необхідно сформулювати задачі дослідження.

1. Виявити основні закономірності процесу багатоступінчатого подрібнення, що забезпечують подрібнення способом «сколювання-зріз»;

2. Розробити математичні моделі процесів: руйнування фуражного зерна багаторазовим впливом на зернівку способом «сколювання-зріз» з урахуванням пауз механічного впливу;

3. Обґрунтувати оптимальні конструктивно-режимні і технологічні параметри багатоступінчастого подрібнювача, що забезпечують зниження енерговитрат на подрібнення і підвищення якості подрібненого продукту, який відповідає зоотехнічним вимогам для різних видів, груп, віку тварин і птиці.

## РОЗДІЛ 2.

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА

#### 2.1. Фактори і параметри оптимізації процесу багатоступеневого подрібнення фуражного зерна

На ефективність роботи багатоступінчастого подрібнювача впливає цілий ряд факторів, що визначають енергоємність процесу і ступінь подрібнення фуражного зерна.

Відповідно до інформації і вивчення загальної кваліфікаційної схеми факторів, що впливають на ефективність роботи молоткової дробарки, запропонованої професором СВ. Мельниковим [29], нами була складена класифікаційна схема факторів, що впливають на ефективність роботи багатоступінчастого подрібнювача (рис. 2.1).

Дана схема складається з трьох основних груп: технологічної, механічної і конструктивної, в які входять 20 чинників [30].

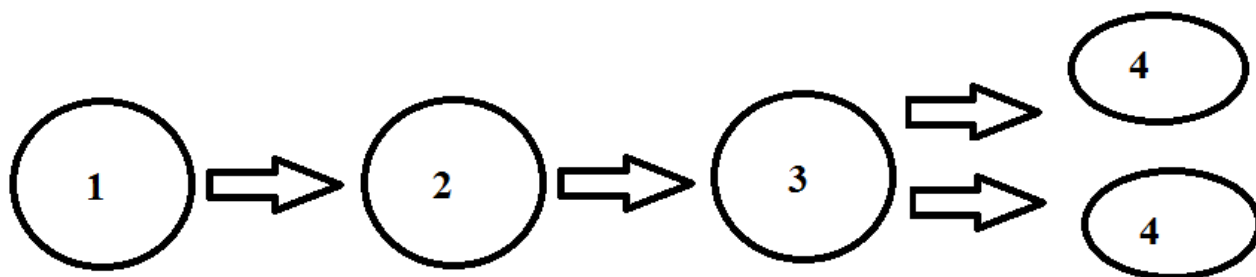


Рис.2.1. Структурний блок дослідження процесу подрібнення фуражного зерна в багатостадійному подрібнювачі де 1 - дослідження руху зернівки по робочих поверхнях елементів подрібнювача; 2 - дослідження процесу подрібнення зернівки способом «сколювання зріз»; 3 - дослідження процесу сепарації зернової дерті, через решітні сепаратори встановлені всередині подрібнювача; 4 - дослідження та обґрунтування параметрів багатоступінчастого подрібнювача за енергоємністю і за ступенем подрібнення.

Технологічна група чинників включає чотири класи: а) ступінь подрібнення; б) технологічні властивості зерна; в) фізико-механічні властивості



зерна; г) просіюваємість частинок зернової дерті через решітну поверхню сепаратора.

Механічне подрібнення зернових культур можна поділити на два види: подрібнення різанням і дробленням. За даними досліджень, різання є найбільш енергоємним процесом при подрібненні зернового матеріалу [31 - 34].

Подрібнення зернівок відбувається за рахунок руху частинок по круговим координатам з наступним зіштовхуванням з кромками робочих органів подрібнювача. Конструктивні особливості установки дозволяють забезпечити направлений розгін частинок за рахунок виконання робочих кілець подрібнювача. Траєкторію і значення швидкості частинок в подрібнювачі можна описати, використовуючи відомі закони механіки.

У проведених дослідженнях в якості параметрів оптимізації процесу подрібнення багатоступінчастого подрібнювача була прийнята величина енерговитрат, віднесена до одиниці ступеня подрібнення матеріалу, яка визначається за формулою [35]:

$$E = \frac{N_{\text{вим}}}{Q \times \lambda}, \quad (2.1)$$

де  $N_{\text{вим}}$  – потужність, що витрачається на подрібнення, кВт;  $Q$  – продуктивність подрібнювача, кг/год;  $\lambda$  – ступінь подрібнення зерна/

Для якісної оцінки ефективності роботи багатоступінчастого подрібнювача в якості другого параметра оптимізації була прийнята величина ступеня подрібнення зернового матеріалу, що визначається за формулою [35]:

$$\lambda = \frac{S_k - S_n}{S_n} = \frac{\Delta S}{S_n}, \quad (2.2)$$

де  $S_k$  – кінцева сумарна поверхня частинок;  $S_n$  – початкова сумарна поверхня частинок;  $\Delta S$  – приріст поверхонь частинок.

Середня дисперсність подрібнення зернового матеріалу визначалися модулем розмелу за формулою:

$$M = \frac{\frac{d_0+d_1}{2}P_0 + \frac{d_1+d_2}{2}P_1 + \frac{d_2+d_3}{2}P_2 + \dots + \frac{d_n+d_{n+1}}{2}P_n}{G}, \quad (2.3)$$

$P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$  – маса залишку на дні зернового матеріалу, г;

$d_0, d_1, d_2, d_3, d_n$  – діаметр отворів відповідних сит, мм;

$G$  – загальна маса навішення, г ( $G = 100$  г).

## 2.2. Обґрунтування технологічної схеми багатоступінчастого подрібнювача фуражного зерна

При відомому і широко поширеному подрібненні зерна ударом вліт (молоток) утворюється одна або кілька розгалужених тріщин, що й обумовлює великий розкид продукту за розмірами і його переподрібнення. При руйнуванні зернівок способом «сколювання-зріз» по ним наноситься удар двох лез, при цьому формується прямолінійна тріщина, що розвивається, як правило, без розгалуження. Це і призводить до того, що спосіб «сколювання-зріз» дає більш вирівняний за розмірами і фракційним складом подрібнений продукт. На рис. 2.2 показані схеми подрібнення зернівок і форми отримання подрібненого продукту.

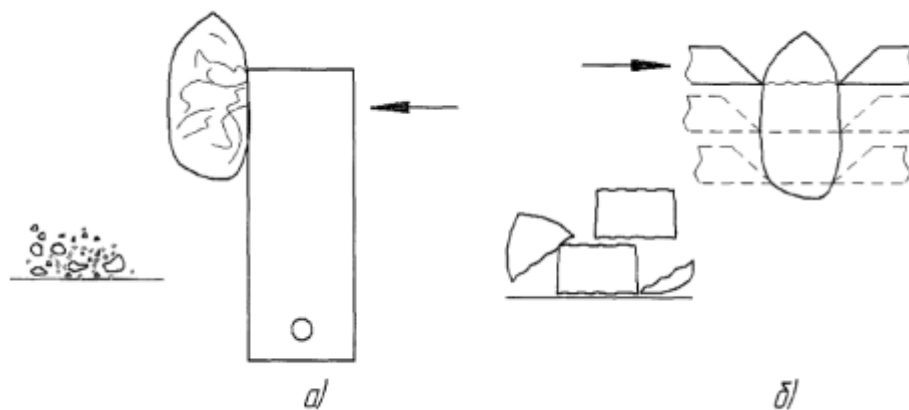


Рис. 2.2. Схеми подрібнення зернівок: а) подрібнення ударом вліт; б) подрібнення способом «сколювання-зріз»

Покладаючись на основний закон подрібнення зернових матеріалу, запропонований П.А. Ребіндером, можна отримати обґрунтування технологічної схеми подрібнення зернового матеріалу [36].

$$A = f(\Delta V) + f(\Delta S). \quad (2.4)$$

Закон П.А. Ребіндера можна розглядати, як суму роботи пружних деформацій і роботу, що затрачається на утворення нових поверхонь.

$$A = A_y + A_s, \quad (2.5)$$

де  $\Delta V$  – об'єм деформованої частини тіла;  $\Delta S$  – приріст питомої площини поверхні матеріалу;  $A_y$  – робота пружних деформацій;  $A_s$  – робота, що витрачається на утворення нових поверхонь.

Задачею процесу подрібнення є отримання нових поверхонь в результаті розрушення частинок. Корисною роботою рахуємо тільки ту, що витрачається на утворення нових поверхонь  $A_s$ . Умовно оцінюємо ККД ( $\eta_{\text{п}}$ ) процесу подрібнення.

$$\eta_{\text{п}} = \frac{A_s}{(A_y + A_s)}. \quad (2.6)$$

Проаналізувавши рівняння (2.6) і спираючись на висновки з першого розділу, можна прийти до висновку, що для підвищення ефективності та ККД процесу подрібнення фуражного зерна необхідно виконати наступні умови:

- зменшити роботу пружних деформацій  $A_y$  шляхом використання в подрібнювачі робочих органів, що працюють за способом подрібнення «сколювання-зріз» з прикладанням руйнівного зусилля поперек зерна, тобто  $A_y \rightarrow \min$ ;

- збільшити роботу на утворення нових поверхонь  $A_s$  шляхом використання багатоступінчастого подрібнення з обов'язковим і своєчасним виводом готового продукту заданого гранулометричного складу з робочої зони після кожного ступеня подрібнення, тобто  $A_s \rightarrow \max$ .

Для виконання поставлених умов щодо підвищення ефективності та збільшення ККД процесу подрібнення, крім використання подрібнюючих робочих органів, що працюють за способом подрібнення «сколювання-зріз», необхідно передбачити як обов'язкову операцію сепарування готового подрібненого продукту з використанням змінних решіт після кожного ступеня подрібнення.

Наявність даної операції дозволяє:

- вивести із загальної подрібненої маси ту частину продукту, частинки якого мають задані розміри або менше їх, і направити їх до патрубків

вивантаження, що дозволить знизити витрати енергії на подрібнення, пов'язані з переподрібненням продукту через несвоєчасне виведення готового продукту із зони подрібнення, а також їх транспортуванням;

- решту цілого і недоподрібненого продукту направити на наступний етап подрібнення;

- на останньому етапі подрібнення передбачити ширину паза між подрібнюючими елементами робочих органів ротора-диска менше середніх розмірів цілого зерна, що дозволить отримати готовий продукт без вмісту в ньому цілих зерен;

- отримати більш рівномірний, заданий гранулометричний склад подрібненого продукту, що відповідає зоотехнічним вимогам, що пред'являються до готового продукту для різних видів, груп, віку тварин і птиці.

### **2.3. Математична модель руйнування фуражного зерна багаторазовим впливом на зернівку способом «сколювання-зріз» з урахуванням пауз механічної дії**

Процес руйнування матеріалів в різних типах дробарок і подрібнювачів слід розглядати як стохастичний, описуваний ймовірносно-статистичними методами.

Висунемо гіпотезу про те, що процес руйнування зернівки зводиться до збільшення наявних розмірів і кількості дефектів, а при частих циклічних навантаженнях з кожним наступним циклом кількість дефектів в тілі збільшується і його міцність падає, тіло руйнується. У додатку 1 (табл.1-3) дано відповідність змінної  $x$ ,  $y$  і їх розрахунок ймовірності руйнування зерен фуражних культур від числа прийомів руйнування  $n$ , де  $y$  - відсоток руйнування пшениці, вівса і ячменю в залежності від  $x$  - частоти обертання ротора-диска  $\omega$  ( $c-1$ ) і числа прийомів руйнування  $n$ .

Даний процес не цілком детермінований, він залежить від багатьох випадкових факторів [37]. Згладжуючи ці випадкові чинники, складемо статистичне рівняння регресії. Аналізуючи представлені таблиці (додаток 1), в результатах яких явно простежується лінійний зв'язок, тому математична модель руйнування матиме вигляд:

$$\hat{y} = a + bx, \quad (2.7)$$

Для цього приймаємо такі позначення:

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}, \bar{y} = \frac{\sum y}{n}, \text{ тоді } b = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\bar{x}^2 - (\bar{x})^2}, a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Коефіцієнт парної кореляції:

$$r_{xy} = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (2.8)$$

де  $\sigma$  - середньоквадратичне відхилення.

Середня помилка апроксимації:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left( \frac{y - \bar{y}}{y} \right) 100, \quad (2.9)$$

$\bar{A}$  не повинна перевищувати 10%.

Надійність рівняння (2.7) оцінюється за критерієм Фішера:

$$F_{\text{факт}} = \frac{r_{xy}^2}{1 - r_{xy}^2} (n - 2), \quad (2.10)$$

число  $n$  – число прийомів руйнування в експерименті.

Надійність параметрів рівняння (2.7) оцінюємо за критерієм Стьюдента:

$$t_b = \frac{b}{m_b}, t_a = \frac{a}{m_a}, t_r = \frac{r_{xy}}{m_r}$$

$$m_b = \sqrt{F_{\text{факт}}}, m_a = \frac{S_{\text{зал}} \sqrt{\sum x^2}}{n \sigma_x}, m_r = \sqrt{\frac{1 - r_{xy}^2}{n - 2}}.$$

Розрахунок ймовірності руйнування зерен пшениці проведено по табл. 1. (додатку 1). Отримані наступні значення:  $b = 0,306$ ;  $a = -5,689$ , тоді рівняння регресії ймовірності руйнування набуде вигляду:

$$\bar{y} = -5.689 + 0.306x, r_{xy}^2 = 0.955, F_{\text{факт}} = 275.899, F_{\text{табл}} = 4,67.$$

Так як  $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$  то рівняння буде значиме.

Слід зазначити, що значення параметра  $x$  в даному випадку змінюється в сегментах (205 ... 209); (257 ... 261); (310 ... 314). Ці значення частоти обертання ротора-диска ( $\omega$ ) прийняті, так як є оптимальними значеннями по проведеним попередніми експериментів, при яких забезпечуються зоотехнічні вимоги, для різних видів, груп, віку тварин і птиці.

В інших межах варіювання фактора  $x$  (209 ... 257); (261 ... 310) значення  $y$  є прогнозованими з незначними довірчими інтервалами. Довірчі інтервали прогнозу будуть тільки значимі при  $205 <x> 310$ . При цих значеннях  $x$  потрібно прораховувати довірчі інтервали для кожного значення  $x_p$  за формулою:

$$m_{\bar{y}_p} = \sqrt{\frac{\sum(y-\bar{y}^2)}{n-2}} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_p-\bar{x})^2}{\sum x-\bar{x}^2}}, \quad (2.12)$$

$$\bar{y} - \Delta\bar{y} < \bar{y} < \bar{y}_p + \Delta\bar{y}$$

У нашому випадку:  $t_{\text{табл}} = \{1,7704 \text{ при } a = 0.1; 2.1604 \text{ при } a = 0.05; 3.0545 \text{ при } a = 0.01\}$

де  $\alpha$  - рівень значущості Стьюдента.

Розрахунок ймовірності руйнування зерен вівса проведено по табл. 2. (додатку 1). Отримані наступні значення:

$b = 0,138$ ;  $a = 35,948$ , тоді рівняння регресії ймовірності руйнування набуде вигляду:

$$\bar{y} = 35,948 + 0.138x, r_{xy}^2 = 0.903, F_{\text{факт}} = 59.891, F_{\text{табл}} = 4,67.$$

Так як  $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$  то рівняння буде значиме.

Розрахунок ймовірності руйнування зерен ячменю проведено по табл. 2.3.

Отримані наступні значення:

$a = - 88,195$ ;  $b = 0,528$ , тоді рівняння регресії ймовірності руйнування набуде вигляду:

$$\bar{y} = 88,195 + 0.528x, r_{xy}^2 = 0.957, F_{\text{факт}} = 435, F_{\text{табл}} = 4,67.$$

Так як  $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$  то рівняння буде значиме.

Для прогнозування процесу руйнування зерен фуражних культур здійснюваного в багатостадійному подрібнювачі, були проведені дослідження

по визначенню ймовірності руйнування зерен фуражних культур пшениці, вівса і ячменю від числа прийомів руйнування, при різних значеннях частот обертання ротора-диска.

## **Висновки по розділу 2**

У даному розділі було розроблено та отримано:

- класифікаційну схему факторів, що впливають на ефективність роботи багатоступінчастого подрібнювача фуражного зерна, визначені 20 чинників,
- структурний блок дослідження процесу подрібнення фуражного зерна в багатостадійному подрібнювачі;
- формулу за якою можна підрахувати доцільність використання багатоступінчастого процесу подрібнення фуражного зерна і оптимальне число ступенів подрібнення;
- математичну модель руйнування багаторазовим впливом на зернівку способом «сколювання-зріз» з урахуванням пауз механічного впливу;

**РОЗДІЛ 3.**

**УЗАГАЛЬНЕННЯ                      ЗЕРУЛЬТАТІВ                      ДОСЛІДЖЕНЬ**

**БАГАТОСТУПІНЧАТОГО ПОДРІБНЮВАЧА**

Виходячи з поставленої мети і завдань, була розроблена програма досліджень, яка відображає наступні пункти:

1. Обґрунтувати оптимальні конструктивно-режимні і технологічні параметри багатоступінчастого подрібнювача, що забезпечують зниження енерговитрат на подрібнення і підвищення якості подрібненого продукту, який відповідає зоотехнічним вимогам для різних видів, груп, віку тварин і птиці.

2. Отримання залежностей питомої енергоємності та ступеня подрібнення при різних поєднаннях конструктивно-режимних і технологічних параметрів подрібнювача.

3. Визначення оптимальних параметрів роботи багатоступінчастого подрібнювача при мінімальній енергоємності процесу подрібнення з урахуванням якості і ступеня подрібнення продукту, що відповідає вимогам для різних груп тварин.

**3.1. Обґрунтування подрібнюючих елементів, які забезпечують подрібнення зернівки способом «сколювання-зріз»**

Важливим завданням теорії різання є пошук залежностей процесів взаємодії ріжучого елемента і оброблюваного матеріалу аналітичними виразами, в які органічно входили б параметри його фізико-механічних властивостей.

Теорія різання розглядає два комплексні питання: по-перше, вона вивчає вплив різних чинників на величину опорів і енергоємність процесу різання; подруге, вона вивчає конструкції ріжучих апаратів і їх динаміку.



Теорію різання лезом розробив академік В.П. Горячкин, подальший розвиток вона отримала в працях академіка В.А. Желіговського, професора Н.Є. Резника та інших вчених.

Залежно від способу впливу робочого органу на матеріал розрізняють три способи різання: пуансоном (штамп), різцем (клин) і лезом (ніж) і три характерних випадки, або три види різання: нормальне, похиле і ковзне.

Нормальне різання. Різання відбувається тільки нормальною силою без бокового переміщення ножа, тобто без участі бічної сили, має місце «рубка» матеріалу. Кут ковзання  $\tau = 0$  (рис. 3.1а).

Похиле різання. Різання відбувається нормальним тиском, але має місце і бічна сила, яка дуже мала і не може викликати змінного руху матеріалу по лезу, тому що кут ковзання менше кута тертя, тобто  $0 < \tau < \varphi$ . Різання проводиться нормальним тиском, але зі змінним кутом заточки (рис. 3.1б).

Ковзне різання. Різання проводиться нормальним тиском за участю бічної сили, яка обумовлює ковзний рух матеріалу уздовж по лезу. Кут ковзання більше кута тертя, тобто  $\tau > \varphi$  (рис. 3.1 в).

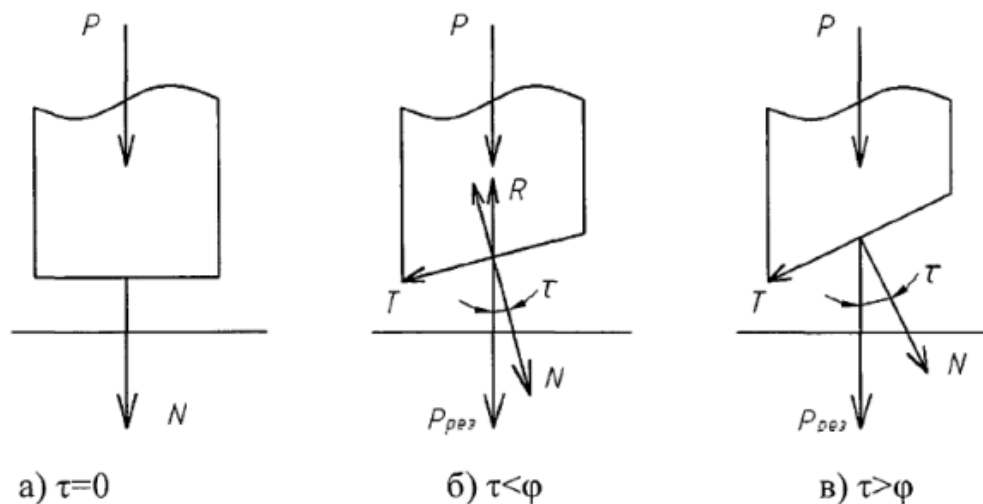


Рис. 3.1. Види різання

При розробці елементів подрібнення багатоступінчастого подрібнювача, які працюють за способом подрібнення «сколювання-зріз», був прийнятий вид різання - «нормальне різання» з використанням нормальної сили без участі бічної сили переміщення. Кут ковзання  $\tau = 0$ .

Це дозволяє значно зменшити витрати на виготовлення подрібнюючих елементів через простоту виготовлення, так як кут заточки подрібнюючих елементів  $\beta_1$  і  $\beta_2$  дорівнює  $90^\circ$ , де кут  $\beta_1$  - кут заточки подрібнюючого елемента статора;  $\beta_2$  - кут заточки подрібнюючого елемента ротора-диска.

До конструктивних параметрів робочих органів подрібнювальної пари багатоступінчастого подрібнювача відносяться: кути встановлення подрібнюючих елементів  $\gamma_1$  - статора і  $\gamma_2$  - ротора-диска; гострота граней ребер подрібнюючих елементів  $\delta_1$  - статора і  $\delta_2$  - ротора-диска;  $\Delta S$  - зазор між подрібнюючими елементами статора і ротора-диска; довжина пазів  $b_1$  - статора і  $b_2$  - ротора-диска; ширина подрібнюючих елементів  $a_1$  - статора і  $a_2$  - ротора-диска; Кут заточування подрібнюючих елементів  $\beta_1$  - статора і  $\beta_2$  - ротора-диска; кут різання  $\varepsilon = \delta = 90^\circ - \gamma$ . Зазначені параметри характеризують геометричну форму подрібнюючих елементів статора і ротора - диска (рис. 3.2).

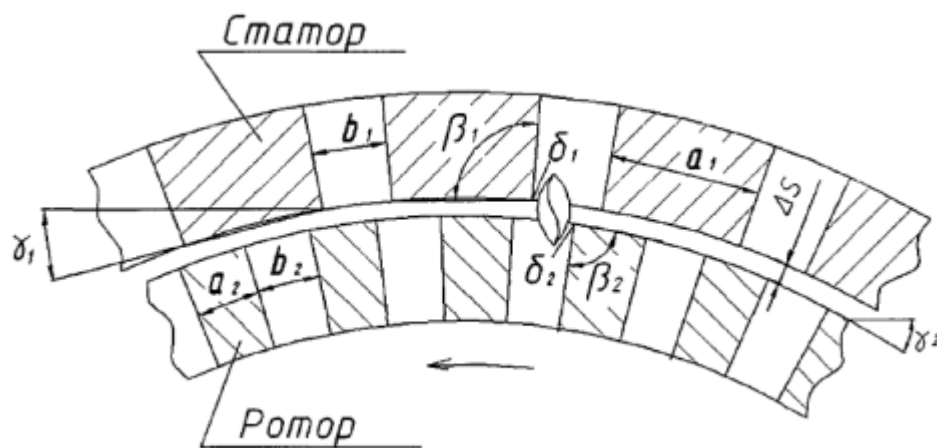


Рис. 3.2. Схема подрібнювальної пари в площині різання багатоступінчастого подрібнювача

У технологічному процесі багатоступінчастого подрібнювача при подрібненні зернової дерті важливе значення має кут защемлення  $\chi$ . Кут защемлення  $\chi$  - це кут між ріжучою кромкою подрібнюючого елемента статора і ріжучою крайкою подрібнюючого елемента ротора-диска.

Розглянемо умови, при яких буде забезпечуватися защемлення зернівки між подрібнюючими елементами статора і ротора-диска, при цьому цей кут  $\chi$  будемо називати кутом розчеплення (рис. 3.3).

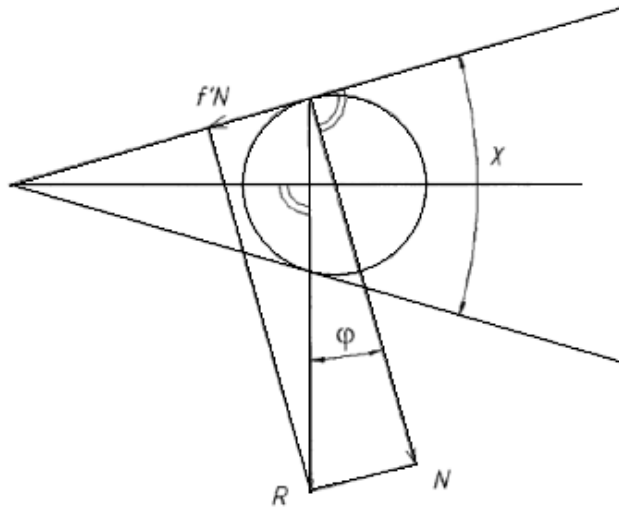


Рис. 3.3. Схема сил діючих на зерно в момент початку защемлення

Припустимо, що рівнодіюча  $R$  сил  $N$  і  $f/N$  отримала напрямок, перпендикулярний бісектрисі кута  $\chi$ . Тоді можна записати  $\chi^2 = \varphi$  або  $\chi = 2\varphi$ .

Це гранично допустимий кут розчеплення, так як при його збільшенні проекція рівнодіючої  $R$  на бісектрису вже не буде дорівнює нулю, а дасть складову силу, спрямовану з розчеплення подрібнювальної пари назовні, матеріал буде виштовхувати. Отже, подрібнююча пара затискає зерновий матеріал, якщо кут розчеплення дорівнює або менше подвійного кута  $\varphi$  змінного різання (тертя), при цьому умови кут розчеплення будемо називати кутом защемлення.

При робочому процесі різання двома подрібнюючими елементами, між якими знаходиться зернівка, можна спостерігати три випадки (рис. 3.3), коли рівнодіюча сила  $R$  нормального тиску  $N$  і сил тертя  $f/N$  спрямована в бік вершини кута - зернівка надійно затискаються. Якщо кут  $\chi = 2\varphi$ , розрізана зернівка залишатиметься нерухомою. Якщо кут  $\chi > 2\varphi$ , то рівнодіюча  $R$  направлена від вершини кута і зернівка виштовхуватиметься в цьому напрямку до тих пір, поки кут защемлення  $\chi$  не стане рівним  $2\varphi$ , тобто за умови  $\chi < 2\varphi$  зернівка буде надійно затиснена.

Допустимо величину кута защемлення слід визначати дослідним шляхом, при різних умовах (тип ріжучого інструменту, його гострота, фізико-механічні властивості досліджуваного матеріалу).

### 3.3. Визначення частоти обертання ротора-диска, при якій буде дотримано стійкий рух зернівки в зону подрібнення

Для цього розглянемо фізичну природу руху матеріалу на горизонтальному роторі - диску який обертається з постійною кутовою швидкістю (рис. 3.4). Якщо швидкість обертання диска мала, то зернівка (М) протягом досить малого проміжку часу почне рухатися разом з диском.

Відносний рух зернівки буде відсутній. Якщо ж швидкість обертання велика, то зернівка почне рухатися по деякій траєкторії в абсолютному, і за деякою траєкторією у відносному русі.

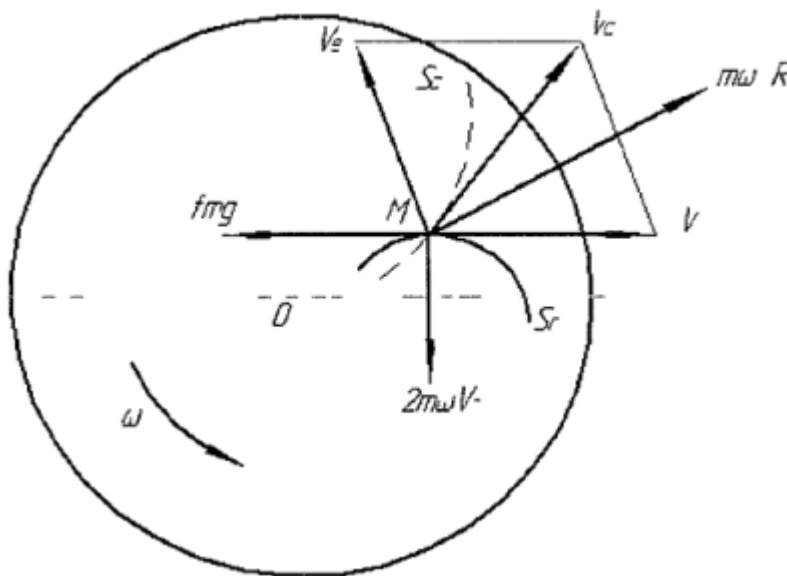


Рис. 3.4. Схема швидкостей сил, що діють на зернівку, що обертається на горизонтальній площині з постійною кутовою швидкістю

Зернівка, потрапляючи на бічну поверхню подрібнюючого елемента ротора-диска, змінює свою умову руху, яку необхідно розглянути (рис. 3.5).

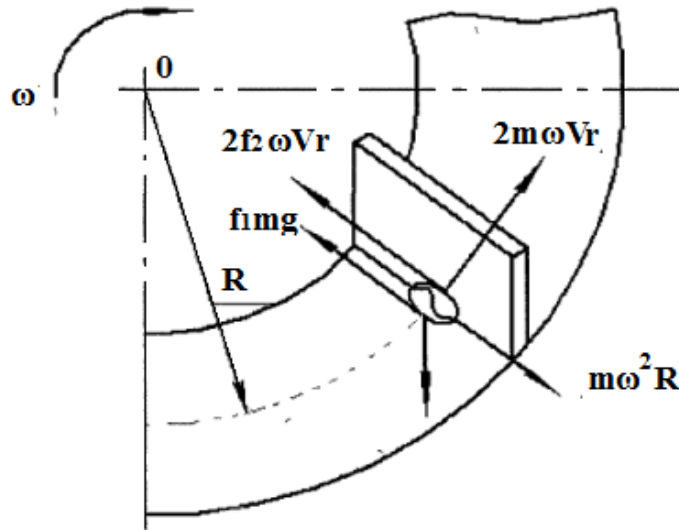


Рис. 3.5. Схема швидкостей сил, що діють на зернівку, що рухається по боковій поверхні подрібнюючого елемента ротора-диска

Переміщення зернівки по горизонтальному диску можливе за умови:

$$f_1 mg + 2f_2 m \omega V_r \leq m R \omega^2, \quad (3.1)$$

де  $f_1$  – коефіцієнт тертя зернівки по диску;  $f_2$  – коефіцієнт тертя зернівки об поверхню подрібнювача;  $mg$  – маса зернівки;  $mR\omega^2$  – відцентрова сила, спрямована по радіусу диска до його периферії;  $2f_2 m \omega V_r$  – коріолісова сила, направлена у зворотній бік руху ротора.

Підставляючи значення  $V_r = \omega R$  з урахуванням рівності (3.2) в рівняння (3.1) отримуємо вираз:

$$fmg + 2fm\omega V_r \leq mR\omega^2, \quad (3.3)$$

З цього виразу, провівши перетворення, визначимо частоту обертання ротора-диска, при якій буде дотримано умову стійкого руху зернівки в зону подрібнення:

$$\omega = \sqrt{\frac{fg}{R(1-2f)'}}, \quad (3.4)$$

Для визначення ширини паза між подрібнюючими елементами статора і кількості нерухомих подрібнюючих елементів статора потрібно знати швидкість проходження зернівки в точці його контакту з подрібнюючим елементом (рис. 3.6). Ця відносна швидкість визначиться з виразу (3.5):

$$V_r = \frac{R\omega^2 - fg}{f\omega}, \quad (3.5)$$

Звідси, 
$$V_r = \frac{M}{t}, \quad (3.6)$$

$$V_e = \frac{S_3}{t}, \quad (3.7)$$

$$V_a = \sqrt{V_e^2 + V_r^2}, \quad (3.8)$$

де  $V_a$  - абсолютна швидкість проходу зернівки в точці її контакту з подрібнюючим елементом статора, м/с;  $V_r$  - відносна швидкість проходу зернівки в точці її контакту зподрібнюючим елементом статора, м/с;  $V_e$  - переносна швидкість проходу зернівки в точці її контакту з подрібнюючим елементом статора, м / с;  $M$  - заданий зоотехнічними вимогами модуль помелу зерна, м;  $S_3$ - ширина паза між подрібнюючими елементами, м;  $t$  - час, за яке зернівка пройде відстань, рівну  $M$ , хв.

Час  $t$  визначається за формулою:

$$t = \frac{1}{\omega} \ln\left(\frac{R+M+\sqrt{(R+M)^2-R}}{R}\right), \quad (3.9)$$

Але так як  $V_r = \omega R$ , то після деякого перетворення формул (3.6) і (3.7) знаходимо ширину паза між подрібнюючи ми елементами статора:

$$S_3 = 2fM, \quad (3.10)$$

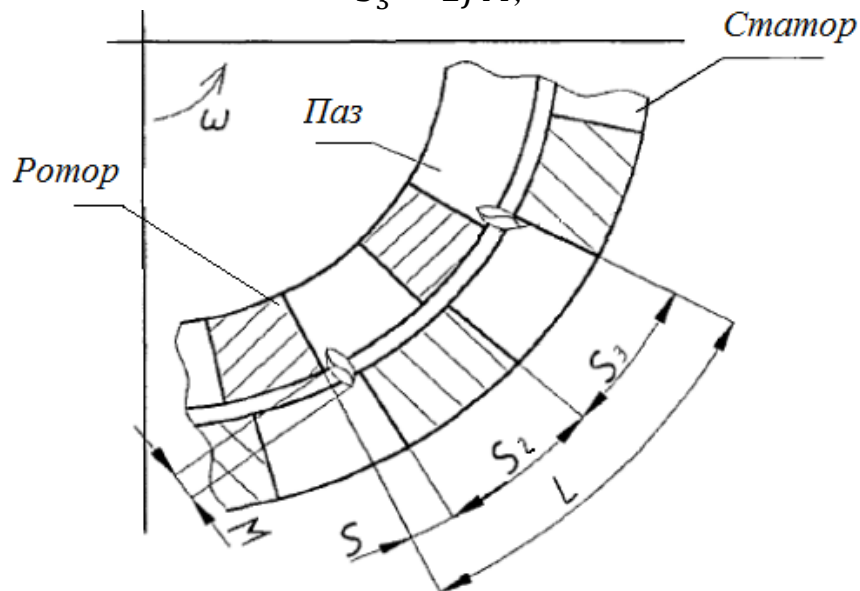


Рис. 3.6. Схема розташування подрібнюючих елементів на роторі-диску і статорі

Для знаходження необхідної кількості нерухомих подрібнюючих елементів статора (рисунок 3.6) потрібно знати:

- час  $t_1$  зрізу зернівки:

$$t_1 = \frac{S_1}{V_{kol}}, \quad (3.11)$$

де  $V_{kol}$  - колова швидкість ротора в зоні подрібнення, м / с;  $S_1$  - середня ширина зернівки, м

- час  $t_2$  стояння зернівки в зоні подрібнення:

$$t_2 = \frac{S_1+S_2}{V_{kol}}, \quad (3.12)$$

де  $S_2$ - довжина подрібнюючого елемента статора, м.

- час  $t_3$  між контактами зернівки з першим і другим подрібнюючим елементом:

$$t_3 = \frac{S_3+S_2}{V_{kol}}, \quad (3.13)$$

де  $S_3$ - ширина паза між подрібнюючими елементами, м

- час подвійного зрізу  $T$  зернівки:

$$T = t_3 + t_2, \quad (3.14)$$

- коловий шлях, пройдений за час  $T$ :

$$L_1 = V_{kol}T, \quad (3.15)$$

Тоді кількість нерухомих подрібнюючих елементів статора знаходимо за формулою:

$$Z_c = \frac{L}{L_1}, \quad (3.16)$$

$L$  –довжина кола ротора-диска, м;  $L_1$  –довжина кола, пройденого за час  $T$ ,м

Кількість рухомих подрібнюючих елементів робочих органів ротора-диска визначається за формулою:

$$Z_p = \frac{2\pi R_i}{V_a T + (c_i + z_i)}, \quad (3.17)$$

де  $R_i$ - внутрішній радіус  $i$ -го кільцевого ряду, м;  $c_j$  - ширина пазів подрібнюючих елементів ротора-диска, м;  $z_j$ - довжина подрібнюючих елементів ротора-диска, м.

Кількість радіальних пазів ротора-диска і статора на першому місці подрібнення визначаємо за формулою:

$$Z_n = \frac{\pi D_i}{c_i + z_i}, \quad (3.18)$$

$D_i$  - внутрішній діаметр  $i$ -го кільцевого ряду подрібнюючі елементів ротора-диска і статора, м.

### 3.4. Експериментальна установка багатоступінчастого подрібнювача

Робочий процес на багатоступінчастому подрібнювачі фуражного зерна (рис. 3.7.) проходив наступним чином: очищене від металевих і сторонніх домішок фуражне зерно, яке підлягає подрібненню, завантажується в завантажувальний бункер 1 і через завантажувальні вікна 2 у верхній торцевій плиті 5, величина відкриття яких регулюється заслінками 19, надходить на швидкісний диск 7 першого ступеня подрібнення. Подрібнений матеріал за

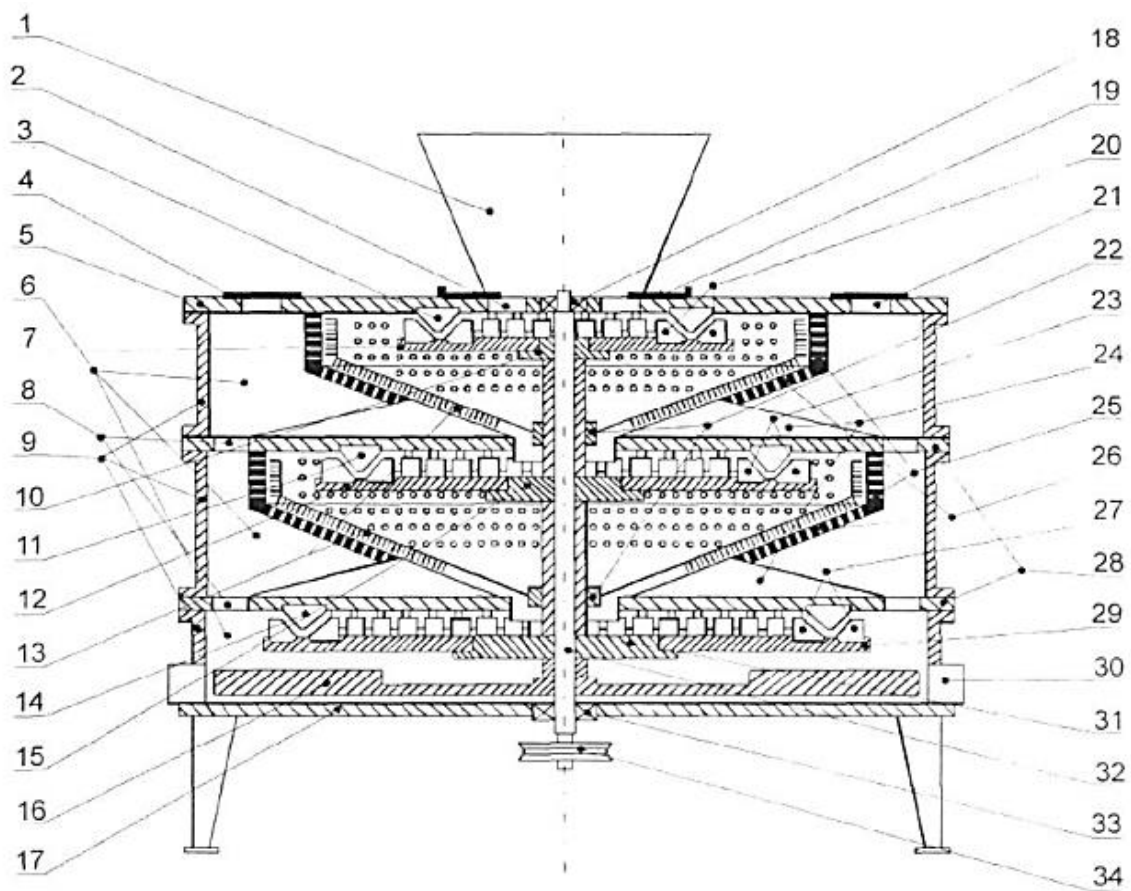


Рис. 3.7. Багатоступінчастий подрібнювач фуражного зерна: 1 – завантажувальний бункер; 2 – завантажувальні вікна; 3, 11, 14 – робочі органи статора; 4 – кільцева заслінка; 5 – верхня торцева плита; 6 – за решітний простір; 7, 12, 29 – диска; 8 – кришки; 9 – збірний циліндричний корпус; 10, 15, 31 – маточини; 13 – очисні щітки; 16 – крилач; 17 – нижня торцева плита; 18, 33 – корпуси; 19 – регулююча заслінка; 20, 23 і 27 – робочі органи ротора-диска; 21 – регулювальні вікна; 22 – хомути; 24 – скатні дошки; 25 – решето-матриця; 26 – конусна воронка; 28 – статори; 30 – відвідні патрубки; 32 – вертикальний вал; 34 – шків.



рахунок відцентрової сили відкидається від центру обертання до периферії, де потрапляє під вплив обертових робочих органів 20 ротора-диска і нерухомих робочих органів 3 статора. Основний процес подрібнення фуражного зерна здійснюється із застосуванням способу подрібнення «сколювання-зріз» між бічними гранями подрібнюючих елементів 20 ротора-диска і бічними гранями подрібнюючих елементів 3 статора.

Додаткове подрібнення вихідний продукт отримує від удару об решето-матрицю 25. Подрібнений на першому місці подрібнення до необхідного фракційного складу готовий продукт виводиться із зони подрібнення через решітний сепаратор і направляється по скатних доках 24 через розвантажувальні вікна 8 до відповідних патрубків 30 і виводяться з подрібнювача. Своєчасне вилучення зернової дерті із зони подрібнення забезпечується за рахунок створення вертикального повітряного потоку, утвореного в зарешітному просторі 6 подрібнювача, що призводить до збільшення абсолютної швидкості повітряного потоку в отворах решітного сепаратора. Створення вертикального повітряного потоку в зарешітному просторі подрібнювача дозволяє інтенсифікувати процес сепарації. Подрібнені частинки зернової дерті, які застрягли в отворах решітного сепаратора в процесі просіювання, видаляються з отворів решітних сепараторів за допомогою, двох очисних щіток 13, що обертаються на вертикальному валу 32 і направляються на другу сходинку подрібнення. Процес подрібнення на другому ступені аналогічний процесу подрібнення на першому місці. Неподрібнене на другому ступені зерно надходить на третю сходинку, де доподрібнюється. Робочі органи третього ступеня подрібнення конструктивно виконані з меншою шириною паза між подрібнюючими елементами роторадиска, ніж середні розміри вихідного продукту. Це не дає можливості цілому зерну пройти через пази подрібнюючих елементів ротора-диска, тим самим забезпечуючи необхідну якість одержуваного продукту без операції сепарування після третього ступеня подрібнення.

### 3.5. Результати експериментальних досліджень

Проведена в попередньому розділі математична модель руйнування фуражного зерна багаторазовим впливом на зернівку способом «сколювання-зріз» з урахуванням пауз механічної дії дозволили провести докладне обґрунтування основних конструктивнорежимних і технологічних параметрів багатоступінчастого подрібнювача.

З метою полегшення розрахунків аналіз математичної моделі проводили з закодованими величинами факторів.

Двовимірні перерізи для вивчення впливу факторів  $X_1$  і  $X_2$  на показник питомої енергоємності побудовані при стабілізації факторів  $X_3$  і  $X_4$  на нульовому рівні. Підставивши в рівняння регресії значення факторів  $X_3 = 0$  і  $X_4 = 0$ , отримаємо:

$$Y - 2,705 = - 0,384X_{12} + - 0,899X_{22} \quad , \quad (3.19)$$

Так як коефіцієнти регресії канонічної форми мають однакові знаки, то для рівняння (3.19) криві поверхні будуть типа мінімум.

Результати розрахунків представлені у вигляді таблиці 4 (додатку 1) і графічно на рис. 3.8.

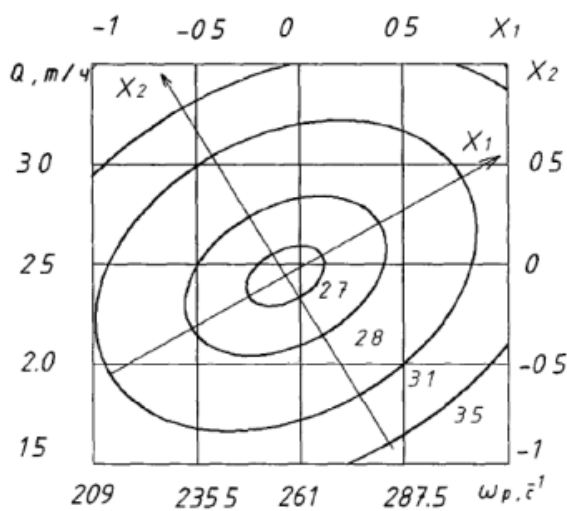


Рис. 3.8. Залежність питомої енергоємності процесу подрібнення від  $Q$  і  $\omega_p$  при  $d = 2,5$  мм і  $h = 14$  мм

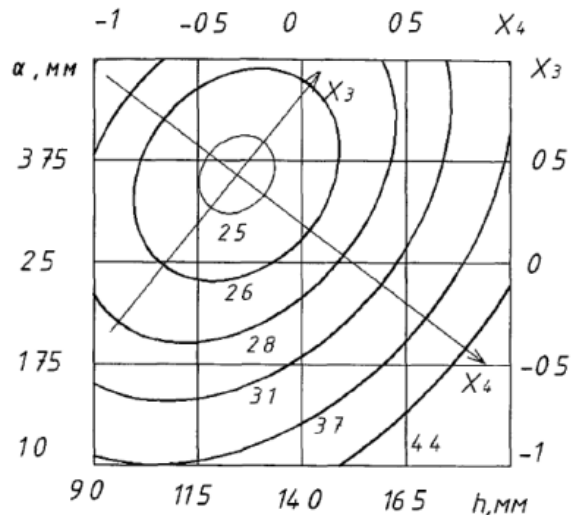


Рис. 3.9. Залежність питомої енергоємності процесу подрібнення від  $d$  і  $h$  при  $\omega_p = 261$  с-1 і  $Q = 2,5$  т/год

З рис. 3.8. видно, що представлена система контурних кривих, рівних питомій енергоємності процесу подрібнення, має вигляд еліпсів. Причому велика вісь еліпса розташовується по фактору  $X_1$  (частота обертання ротора). Це пояснюється великим впливом даного чинника на показник питомої енергоємності, ніж фактор  $X_2$  (подача зерна в подрібнювач).

Аналіз двовимірних перерізів показує, що практично вірно обрана область експерименту. Зі зміною факторів  $X_1$  і  $X_2$  показник питомої енергоємності процесу подрібнення має мінімум, який перебуває в досліджуваній області.

Так як подача зерна в подрібнювач ( $X_2$ ) і частота обертання ротора ( $X_1$ ) значно впливають на ефективність процесу подрібнення фуражного зерна то має велике значення оптимізація цих параметрів. З рис. 3.8 видно, що оптимальна зона досягається при наступних межах зміни факторів: подача зерна в подрібнювач 2,4 ... 2,6 т / год і частота обертання ротора 248 ... 268 с-1 при мінімальній питомій енергоємності процесу подрібнення 2,705 кВтгод/т.од.ст.вим.

Аналогічно перетину  $X_1 - X_2$  були побудовані двовимірні перерізи  $X_1 - X_3$ ,  $X_1 - X_4$ ,  $X_3 - X_2$ ,  $X_2 - X_4$  і  $X_3 - X_4$  для вивчення впливу факторів  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  і  $X_4$  на показник питомої енергоємності процесу подрібнення фуражного зерна в подрібнювачі.

Аналіз двовимірних перерізів  $X_3 - X_4$  (рис. 3.9) показує, що зі збільшенням фактора  $X_4$  (висота робочих органів) показник питомої енергоємності процесу подрібнення поступово збільшується. А зі збільшенням фактора  $X_3$  (діаметр отворів решіт) питома, енергоємність знижується і має мінімальне значення  $E = 2,48$  кВт-год / т.од.ст.вим. при  $d = 3,75$  мм. Подальше збільшення фактора  $X_3$  веде до незадовільної якості одержуваного подрібненого зерна, що не відповідає зоотехнічним вимогам, які пред'являються до подрібненого зернового продукту. Характер контурних кривих аналогічний двовимірним перетинам  $X_1$  і  $X_2$ , показує переважання впливу фактора  $X_3$  над фактором  $X_4$ .

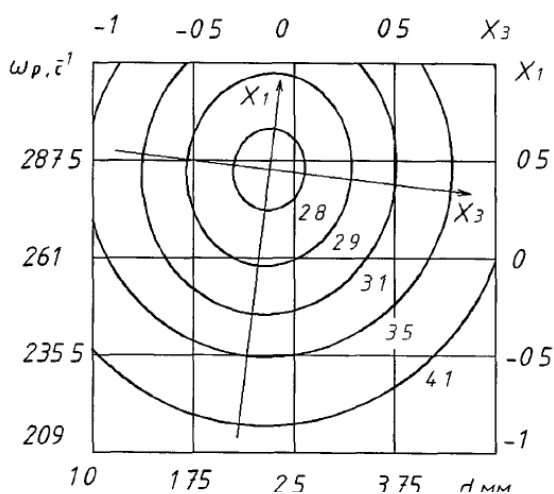


Рис. 3.10. Залежність питомої енергоємності процесу подрібнення від  $\omega_r$  і  $d$  при  $Q = 2,5$  т/год і  $h = 14$  мм

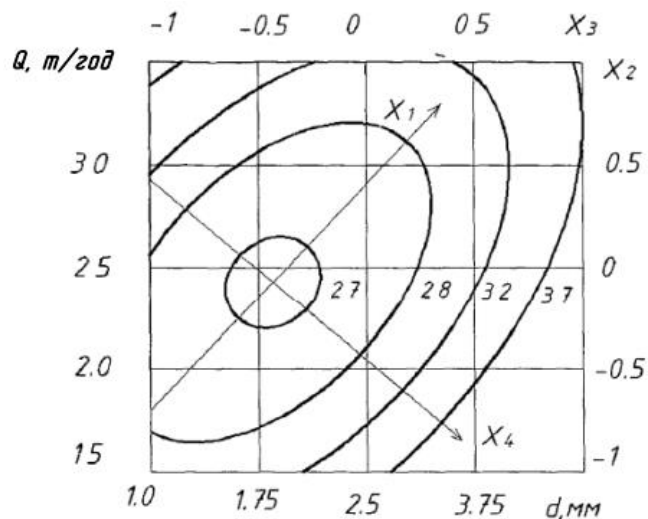


Рис. 3.11. Залежність питомої енергоємності процесу подрібнення від  $\omega_r$  і  $h$  при  $Q = 2,5$  т / год і  $d = 2,5$  мм

Аналіз двовимірних перерізів  $X_1 - X_3$  (рис. 3.10) показує, що при факторі  $X_2$  (подача зерна в подрібнювач) і факторі  $X_4$  (висота робочих органів), закріплених на нульовому рівні, дає оптимальне значення для фактора  $X_1$  - частота обертання ротора, рівного  $+ 0,475$  ( $\omega_r = 273$  с-1); для фактора  $X_3$  - діаметр отворів решіт, рівного  $- 0,125$  ( $h = 2,4$  мм) при мінімальній питомій енергоємності процесу подрібнення ( $E = 2,78$  кВт-год / т.од.ст.вим.).

Подальше збільшення фактора  $X_3$  з 2,4 до 4,0 мм веде до зростання питомої енергоємності процесу подрібнення з 2,78 до 4,1 кВт-год / т.од.ст.вим. Це пояснюється тим, що зі збільшенням фактора  $X_3$  зменшується ступінь подрібнення, яка є обернено пропорційною величиною питомої енергоємності процесу подрібнення.

Зі збільшенням фактора  $X_1$  з 273 до 314 с-1 також помічається зростання питомої енергоємності процесу подрібнення. Це пояснюється тим, що зі збільшенням фактора  $X_1$  ускладнюється надходження зерна в зону подрібнення багатоступінчастого подрібнювача.

Аналіз двовимірних перерізів  $X_1 - X_4$  (рис. 3.11) показує, що при стабілізації фактора  $X_2$  і фактора  $X_3$  на нульових рівнях отримуємо оптимальне значення для фактора  $X_1$  - частота обертання ротора, що дорівнює  $- 0,05$   $\omega_r =$

258с-1, а для фактора  $X_4$  - висота робочих органів, що дорівнює  $-0,425 h = 11,8$  мм при мінімальній енергоємності процесу подрібнення  $E = 2,68$  кВт-год / т.од.ст.вим. Збільшення параметра оптимізації з 2,68 до 3,7 кВт-год / т од ст.вим. відбувається при збільшенні фактора  $X_4$ . Це пояснюється тим, що збільшується площа контакту робочих граней ребер подрібнюючих елементів з зерном.

Аналіз двовимірних перерізів  $X_2 - X_3$  (рис. 3.12) показує, що при стабілізації фактора  $X_1$  (кутова швидкість ротора) і фактора  $X_4$  (висота робочих органів) на нульових рівнях дає оптимальне значення для фактора  $X_2$  подача зерна в подрібнювач, рівного +1 ( $Q = 2,70$  т / год), для фактора  $X_3$ , діаметр отворів решіт дорівнює +0,475 ( $d = 3,7$  мм), мінімальна енергоємність процесу подрібнення  $E = 2,48$  кВт-год / т.од.ст.вим.

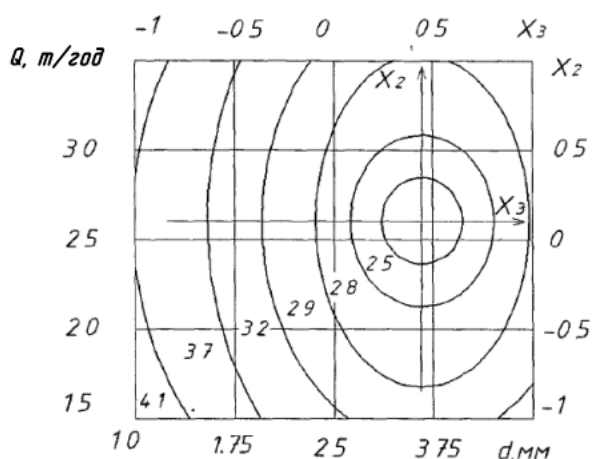


Рис. 3.12. Залежність питомої енергоємності процесу подрібнення від  $Q$  і  $d$  при  $\omega = 261$  с-1 і  $h = 14$  мм

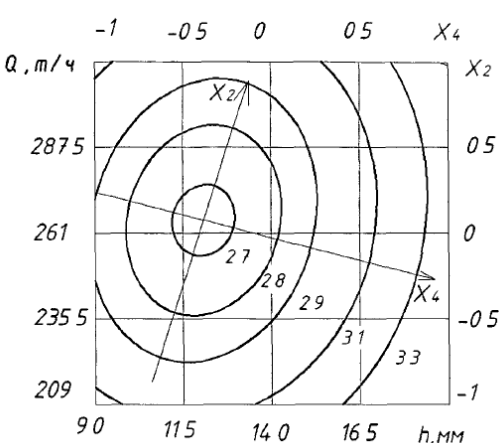


Рис. 3.13. Залежність питомої енергоємності процесу подрібнення від  $Q$  і  $h$  при  $\omega = 261$  с-1;  $d = 2,5$  мм

Збільшення фактора  $X_3$  з 1,0 до 3,75 мм веде до зниження параметра оптимізації з 4,1 до 2,48 кВт-год / т.од.ст.вим. Подальше збільшення фактора  $X_3$  небажане, оскільки погіршується якість одержуваного подрібненого продукту, що не задовольняє зоотехнічним вимогам, які пред'являються до подрібненого зернового продукту. Фактор  $X_2$  (подача зерна в подрібнювач) значніше впливає на параметр оптимізації, ніж фактор  $X_3$  (діаметр отворів решіт), так як велика вісь еліпса лежить за дією фактора  $X_2$ .

Аналіз двовимірних перерізів  $X_2 - X_4$  (рис. 3.13) показує, що при факторах  $X_1$  і  $X_3$  закріплених на нульових рівнях, оптимальне значення становить для факторів:  $X_2$  - подача зерна в подрібнювач, рівного + 0,75 ( $Q = 2,65$  т / год) для  $X_4$  - висота робочих органів, рівного - 0,425 ( $h = 11,7$  мм) при мінімальній енергоємності процесу подрібнення,  $E = 2,68$  кВт-год / т од.ст.вим. фактор  $X_2$  (подача зерна в подрібнювач) має такий же вплив на параметр оптимізації, що і фактор  $X_4$  (висота робочих органів), так як контурні криві мають форму кола, що показує рівномірний вплив кожного фактора на параметр оптимізації. Зі збільшенням подачі зерна в подрібнювач і зі збільшенням висоти робочих органів підвищується значення енергоємності через збільшення надходження зерна в зону подрібнення і збільшення площі контакту зерна з подрібнюючими елементами робочих органів.

Аналіз двовимірних перерізів показує, що характер контурних кривих всіх перетинів має форму еліпсоїда; центри експерименту знаходяться в досліджуваній зоні, що дозволяє встановити оптимальні параметри для різних сполучень факторів; витягнутість еліпсоїда показує переважання одного фактора над іншим за ступенем впливу його на показник енергоємності процесу подрібнення фуражного зерна в подрібнювачі.

Розглянувши та проаналізувавши всі вищеописані двовимірні перерізи в сукупності один з одним, нами були зафіксовані межі оптимальних значень всіх чотирьох чинників:

$X_1$  - частота обертання ротора,  $\omega_p = 248,25 \dots 267,63$  с-1;

$X_2$  - подача зерна в подрібнювач,  $Q = 2,4 \dots 2,8$  т / год;

$X_3$  - діаметр отворів решіт,  $d = 2,5 \dots 3,5$  мм;

$X_4$  - висота робочих органів,  $h = 11,5 \dots 12$  мм.

При цих межах зміни факторів забезпечується отримання подрібненого фуражного зерна, що відповідає зоотехнічним вимогам для різних видів, груп, віку тварин і птахів при мінімальній питомій енергоємності процесу подрібнення  $E = 2,44 \dots 2,72$  кВт-год.

Для знаходження оптимальних значень факторів  $X_1, X_2, X_3$  і  $X_4$  при різних їх поєднаннях між собою на всіх рівнях варіювання була складена програма для

обчислення мінімального значення питомої енергоємності процесу подрібнення фуражного зерна в багатоступеневому подрібнювачі. При обчисленні були отримані наступні оптимальні значення для факторів:  $X_1$  - частота обертання ротора,  $\omega_p = 261 \text{ с}^{-1}$ ;

$X_2$  - подача зерна в подрібнювач,  $Q = 1,5 \text{ т / год}$ ;

$X_3$  - діаметр отворів решіт,  $d = 4,0 \text{ мм}$ ;

$X_4$  - висота робочих органів,  $h = 14 \text{ мм}$ .

При мінімальній питомій енергоємності процесу подрібнення  $E = 2,11 \text{ кВтгод}$ .

### **Висновки по розділу 3**

В даному розділі було обґрунтовано подрібнюючі елементи, що забезпечують подрібнення зернівки способом «сколювання-зріз»; визначено частота обертання ротора-диска, при якій дотримується стійкий рух зернівки в зону подрібнення; визначено ширину паза між подрібнюючими елементами статора та кількість нерухомих подрібнюючих елементів статора та рухомих подрібнюючих елементів робота диска.

В результаті проведених експериментальних досліджень була отримана залежність показників якості подрібненого матеріалу з конструктивнокінематичними параметрами подрібнювача, а також виявлені оптимальні значення величин технологічних зазорів, з урахуванням питомих енерговитрат процесу подрібнення продукту.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі обґрунтовані технологічні схеми багатоступінчастого подрібнення, що реалізують спосіб «сколювання-зріз» з сепарацією зернової дерті через змінні решета.

Розроблені математичні моделі процесів: руйнування фуражного зерна багаторазовим впливом на зернівку способом «сколювання-зріз» з урахуванням пауз механічного впливу.

Обґрунтовані оптимальні конструктивно-режимні і технологічні параметри багатоступінчастого подрібнювача, що забезпечують зниження енерговитрат на подрібнення і підвищення якості подрібненого продукту, який відповідає зоотехнічним вимогам для різних видів, груп, віку тварин і птиці. Зокрема частота обертання ротора -  $\omega_p = 261 \text{ с}^{-1}$ ; подача зерна в подрібнювач -  $Q = 1,5 \text{ т / год}$ ; діаметр отворів решіт -  $d = 4,0 \text{ мм}$ ; висота робочих органів -  $h = 14 \text{ мм}$ .



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дерев`янюк Д. А. Вплив технічних засобів та технологічних процесів на травмування і якість насіння: монографія / Д. А. Дерев`янюк // Ж.. Полісся: - 2015. – 772с.
2. Бутковский В.А. Технология мукомольного, крупяного и комбикормового производства [Текст] / В.А. Бутковский. - М.: Колос, 1981. - 255 с.
3. Мерко И. Т. Технология мукомольного производства [Текст] / И.Т. Мерко. - М.: Агропромиздат. - 1985. - 288 с.
4. Сабиев, У.К., Измельчитель зерновых материалов / У.К. Сабиев, А.С. Пушкарёв // Материалы Регион. студ. науч.-практ. конференции «Молодежь третьего тысячелетия». – Омск, – 2016 – С. 151.
5. Соколов А. Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна / А.Я. Соколов. - М.: «Колос». - 1967.
6. Сушков П. Ф. Кормодробилки. Теория, конструкция и производство с.-х. машин [Текст] / П.Ф. Сушков // Т. 4 / Под ред. В. П. Горячкина. - М. - Л., 1936.
7. Демидов, А.Р. Определение прочностных характеристик зерна различных культур / А.Р. Демидов, С.Е. Чирков, Л. Глебов // Мукомольно-элеваторная промышленность. – 1971. – № 8. – С. 29 – 30.
8. Елисеев В.А. Влияние диаметра рабочей: камеры на эффективность работы молотковой дробилки /В.А. Елисеев, А.П. Барбицкий,. А.А. Сундеев // Мукомольная и элеваторная; промышленность. 1966. - №8. -С.23-25.
9. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм [Текст] / С.В. Мельников. - Л.: Колос, 1978. - 560 с.
10. Золотарев С.В. Ударно-центробежные измельчители фуражного зерна (основы теории и расчета) [Текст] / С.В. Золотарев. - Барнаул: ГИПП «Алтай», 2001. - 200 с.

11. Reis D.F. Verfahrenst echische und technologische Problemen bei der Zerkleinerung weicher bis mittelharter Stoffe [Текст] / D.F. Reis // Aufbereitungs-Technik. - 1964. -В. 5 -№ 4 -Р. 166... 178.
12. Машков, Б.М. Справочник по качеству зерна и продуктов его переработки /Б.М. Машков, З.И. Хазина. – М. : Колос, 1980. – 250 с.
13. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм [Текст] / С.В. Мельников. - Л.: Колос, 1978. - 560 с.
14. Афанасьев В.А. Эффективность двустадийного измельчения сырья при производстве комбикормов для животноводческих комплексов [Текст] /А.В. Афанасьев, Л.А. Плаксина // Повышение эффективности технологических процессов производства комбикормов: Сб. науч. тр., вып.34. -М.: ЦНИИ-ТЭХлебопродуктов, 1990, с. 43...49.
15. Авдеев, Н.Е. Центробежные сепараторы для зерна : учебник / Н. Е. Авдеев. –М. : Колос, 1975. – 152 с.
16. Бурмистров, А.А. Исследование ручных секаторов с оптимальными режущими кромками / А.А. Бурмистров // Науч. тр. ВИСХОМ. – М., 1987 – № 10 –С.86–91.
17. Гиршсон, В.Я. Экспериментальные исследования процессов технологии измельчения зерна / В.Я. Гиршсон. – М. : Заготиздат, 1949. – 152 с.
18. Дринча В.М. Технология и комплекс машин для очистки зерна и семян / В.М. Дринча, Л. М. Суколин // Земледелие, 1997. - №3. – С. 34-35.
19. <http://www.freepatent.ru/patents/2217244>
20. Зюлин А.Н., Гозман Г.И. Зерноочиститель СЗГ-25 // Техника в сельском хозяйстве. - 1997. - № 6. - С. 30-31.
21. С.С. Ямпиров Технологические и технические решения проблемы очистки зерна решетками. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2004. –165 с.
22. Чазов С.А. Травмирование семян и пути снижения при механизированной обработке, обмолоте, сортировании / С.А. Чазов, П. Шелепень, З. Воцкий. Украинские нивы, 1981. - №8. – С. 41-43.

23. <https://propozitsiya.com/ua/analiz-zernoochisnih-separatoriv-dlya-suchasnih-elevatoriv>.
24. Ульрих Н.Н. Научные основы очистки и сортирования семян. - М.-Л.: ВАСХНИЛ, 1937. - 87 с.
25. Грабар І.Г., Водяницький Г.П. Технологія та теорія наукових досліджень. – Житомир. – ЖНАЕУ.- 2014 – 280 с.
26. Єгоров Б.В. Технологія виробництва комбикормів. - Одеса.: Друкарський дім, 2011. - 448 с.
27. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht\\_2019\\_25\\_3\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2019_25_3_3)
28. Леонтьев П.И. Автоматический питатель к дробилкам с вертикальной осью вращения [Текст] / П.И. Леонтьев, М.Д. Малаев, И.Б. Шагдыров // Ин-форм. листок № 66-84 / Челябинский ЦНТИ. - Челябинск, 1984. - 4 с.
29. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов [Текст] / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин. - Л.: Колос, 1980. - 168 с.
30. Гортинский В.В. и др. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях.- М.: Колос, 1973.-295 с.
31. Ньютон Г.В., Ньютон В.Г. Исследование эффективности классификации
32. Леонтьев, П.И. Использование измельченных семян рапса в кормлении коров. Уральские нивы. 1988. № 10. С. 47–49.
33. Сабиев, У.К. Измельчитель зерновых материалов. Сельский механизатор. 2018. № 3. С. 22–23.
34. Сергеев, Н.С. Определение максимальной производительности измельчителя фуражного зерна дисмембраторного типа. Сб. тр. Кабард.-Балк. ГСХА. Нальчик, 1995. С. 108-111.
35. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм [Текст] / С.В. Мельников. Л.: Колос, 1978. - 560 с.

36. Ребиндер, П.А. Разрушение и обработка твердых тел. Сорена, 1940. № 12. С. 9–12.

37. Шагдров И.Б. Математическая модель прогнозирования процесса разрушения фуражного зерна в трехступенчатом изельчителе. Вестник Бурятской ГСХА им.В.Р. Филиппова. Улан-Удэ: Изд-во БГСХА, 2011.- №3 (24). С. 61...65.

## ДОДАТОК А

Таблиця 1. Результати ймовірності руйнування зерен пшениці від частоти обертання ротора і числа прийомів руйнування

№	x/n	У	XX	УУ	xy	У	У-У	A <sub>1</sub>
1	205/1	54,49	42020	2969	11170	57,041	-2,551	0,047
2	206/2	55,12	42440	3038	11350	57,347	-2,227	0,04
3	207/3	56,26	42850	3165	11650	57,653	-1,393	0,025
4	208/4	57,18	43260	3270	11890	57,959	-0,779	0,014
5	209/5	58,84	43680	34620	12300	58,265	0,575	0,009
6	257/1	73,48	66050	5399	18880	72,953	0,527	0,007
7	258/»	74,95	66560	5618	19340	73,259	1,691	0,023
8	259/3	76,11	67080	5793	19710	73,569	2,541	0,033
9	260/4	78,31	67600	6132	20360	73,871	4,439	0,057
10	261/5	80,00	68120	6400	20880	74,177	5,823	0,073
11	310/1	82,62	96100	6826	25610	89,171	-6,551	0,079
12	311/2	84,35	96720	7115	26230	89,477	-5,127	0,061
13	312/3	88,02	97340	7748	27460	89,783	-1,743	0,099
14	313/4	91,12	97970	8303	28520	90,089	1,031	0,011
15	314/5	94,05	98600	8845	29530	90,395	3,655	0,039
Разом	3890	1105	1,03610	84080	294900	1031,44	0,089	0,617
Середнє	259,333	73,667	69070	5605	19660	67,762	0,006	0,0411

Таблиця 2. Результати ймовірності руйнування зерен вівса від частоти обертання ротора і числа прийомів руйнування

№	x/n	У	XX	УУ	xy	У	У-У	A <sub>1</sub>
1	205/1	65,09	42025	4236,70	13343,4	65,491	0,4172	0,00617
2	206/2	66,11	42436	4370,53	13618,6	65,629	-0,480	-0,0072
3	207/3	67,32	42849	4531,98	13935,2	65,767	-1,552	-0,0230
4	208/4	68,3	43264	4664,89	14206,4	65,904	-2,395	-0,0350
5	209/5	69,54	43681	4835,81	14533,8	66,042	-3,497	-0,0502
6	257/1	67,	66049	4489,	17219,	72,650	5,6506	0,08433
7	258/2	68,67	66564	4715,56	17816,8	72,788	4,1183	0,05997
8	259/3	70,26	67081	4936,46	18197,3	72,926	2,6660	0,03794
9	260/4	71,51	67600	5113,68	18592,6	73,063	1,5536	0,02172
10	261/5	73,04	68121	5334,84	19063,4	73,201	0,1613	0,00220
11	310/1	78,62	96100	6181,10	24372,2	79,947	1,3272	0,01688
12	311/2	78,94	96721	6231,52	24550,3	80,084	1,1449	0,01450
13	312/3	81,96	97344	6717,42	25571,5	80,222	-1,737	-0,0211
14	313/4	82,07	97969	6735,48	25687,9	80,360	-1709	-0,0208
15	314/5	86,15	98596	742182	27051,1	80,497	-5,652	-0,0656
Разом	3890	1094,5	1036400	80516,8	287659,	1094,5	-0,001	0,02081
Середнє	259,33	72,972	69093,33	5367,79	19177,3	72,971	-0,0001	0,00138

Таблиця 3. Результати ймовірності руйнування зерен ячменю від частоти обертання ротора і числа прийомів руйнування

№	x/n	У	XX	УУ	ху	У	У-У	А <sub>1</sub>
1	205/1	13,05	42025	170,30	2675,25	16,677	3,627	0,277
2	206/2	14,1	42436	198,81	2904,6	17,193	3,093	0,219
3	207/3	15,12	42849	228,61	3129,84	17,709	2,589	0,17
4	208/4	17,93	43264	321,48	3729,44	18,225	0,32	0,018
5	209/5	18,56	43681	382,59	4088,04	18,741	-0,819	-0,04
6	257/1	44,88	66049	2014,2	11534,1	43,509	-1,371	-0,03
7	258/2	46,25	66564	2139,0	11932,5	44,025	-2,225	-0,048
8	259/3	48,54	67081	2356,1	12571,8	44,541	-3,999	-0,08
9	260/4	51,46	67600	2648,1	13379,6	45,057	-6,403	-0,12
10	261/5	53,57	68121	2869,7	13981,7	45,573	-7,497	-0,15
11	310/1	63,93	96100	4087,0	19818,3	70,857	6,927	0,108
12	311/2	66,21	96721	4382,7	20591,3	71,373	5,163	0,078
13	312/3	68,91	97344	4748,5	21499,9	71,889	2,975	0,04
14	313/4	72,02	97969	5186,8	22542,2	72,405	0,385	0,005
15	314/5	75,16	98596	5649,0	23600,2	72,991	-2,169	-0,03
Разом	3890	670,69	1036400	37384,	187979,	670,79	0,1	0,4157
Середнє	259,333	44,71267	69093,33	2492,2	12531,9	44,72	0,007	0,02772

Таблиця 4. Допоміжна таблиця для розрахунку координат точок при побудові двовимірного перетину  $X_1 - X_2$

Величина параметра, у	Фактори		Величина параметра, у	Фактори	
	X1	X2		X1	X2
2,075	0	0	3,005	0	± 0,578
2,725	0	± 0,149	3,005	± 0,884	0
2,725	± 0,288	0	3,105	0	± 0,667
2,825	0	± 0,365	3,105	± 1,021	0
2,825	± 0,559	0	3,505	0	± 0,943
2,905	0	± 0,472	3,505	± 1,443	0
2,905	± 0,722	0			