

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

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**ЛЕВИК ПАВЛО ІГОРОВИЧ**

УДК 631.362.633

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Удосконалення конструктивних параметрів машин для подрібнення  
кормового 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 Олена Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

К.І.Н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2021

## АНОТАЦІЯ

Левик П.І. Удосконалення конструктивних параметрів машин для подрібнення кормового зерна. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Робота присвячено одному із перспективних напрямків в галузі подрібнення зерна для тварин. В останні роки розробка подрібнювачів відцентрово-дискового типу стає досить перспективним, так як вони знаходять широкого розповсюдження. У зв'язку з цим підвищення ефективності процесу подрібнення зерна дисковим подрібнювачем за рахунок обґрунтування і оптимізації конструктивних параметрів робочих поверхнею дисків і зниження енергоємності процесу подрібнення, є актуальною задачею.

**Ключові слова:** подрібнювач, дисковий, робочі органи, зерно, удосконалення, ефективність.

## ABSTRACT

**Levyk P.** Improving the Design Parameters of Machines for Grinding Feed Grain. Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - Agroengineering. - Polissia National University, Zhytomyr, 2021.

The work is devoted to one of the promising areas in the field of grain grinding for animals. In recent years, the development of centrifugal-disk shredders has become quite promising, as they are widespread. In this regard, improving the efficiency of the process of grinding grain with a disk shredder by substantiating and optimizing the design parameters of the working surface of the disks and reducing the energy consumption of the grinding process, is an urgent task.

**Key words:** shredder, disk, working bodies, grain, improvement, efficiency.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА	7
1.1.    Способи та аналіз конструкцій для подрібнення зерна	7
1.2.    Особливості процесу подрібнення зерна	13
Висновки по розділу 1	15
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА	16
2.1. Аналіз процесу подрібнення зерна	16
2.2.    Взаємодія робочої поверхні дисків подрібнювача із зерном	17
Висновки по розділу 2	22
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ МАШИНИ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА	23
3.1. Опис експериментальної установки	23
3.2.    Фізико-механічні властивості і пружньо-в'язкі характеристики зерна	25
3.3.    Результати дослідження взаємодії параметрів подрібнювача	27
3.4.    Методика розрахунку параметрів дискового подрібнювача	30
Висновки по розділу 3	32
ВИСНОВКИ	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	34

## ВСТУП

Актуальними проблемами сучасного аграрного виробництва є забезпечення населення в достатній кількості продуктами тваринництва. Забезпечення тварин і птиці повноцінними кормами, збалансованими у відповідності з продуктивністю – є одним із вирішуваних умов додаткового виробництва і покращення якості продукції тваринництва. Якість кормів, степінь збалансованості, а також раціони годування здійснюють значний вплив на продуктивність тварин і якість отриманої продукції, а також на здоров'я [1].

Без використання ресурсозберігаючих машинних технологій, вискоефективних комплексів машин і поточних ліній неможливо вирішити життєво важливі ринкові проблеми сучасного тваринництва [2, 3].

Прискорене створення, виробництво та використання нової техніки – один із пріоритетних напрямків в аграрній політиці в умовах ринкової економіки [4].

Принцип всіх цивілізованих країн полягає в тому, що повинні формуватись основні положення досліджень на шляху вирішення задач аграрної науки в галузі механізації тваринництва і кормо виробництва, тобто принцип інтенсифікації, який полягає в тому, щоб з кожного гектара землі, від кожної тварини отримувати найбільше продукції з мінімальним використанням ресурсного потенціалу [5, 6].

Концентровані корми в раціоні великої рогатої худоби складають 25-60%, свиней і птиці – до 80-95% за поживністю. У структурі собівартості продукції тваринництва корма займають перше місце і складають 60-70% витрат. Ефективність використання концентрованих кормів залежить від якості їх приготування.

Основними операціями приготування комбікормів для тваринництва і птиці є очищення, подрібнення, дозування та змішування.

Подрібнення є самою енергоємною операцією, що регламентується вимогами ДСТУ і зоотехнічними рекомендаціями зі ступеня подрібнення (модулю) і фракційному складу, в тому числі допустимому вмісту

пилоподібний фракції. Відхилення від даних технологічних вимог понижує ефективність використання дорогих кормових ресурсів (до 20–30%).

Дослідження вказують на можливість значного підвищення ефективності згодовування концентрованого орму за рахунок фракціонування його при подрібненні для кожного виду тварин. Переподрібнення зерна, негативно відбивається на продуктивності тварин їх здоров'я, а також збільшується енергоємність процесу.

Одним із перспективних напрямків в галузі подрібнення зерна в останні роки стає розробка подрібнювачів відцентрово-дискового типу, які в даний час знаходять широкого розповсюдження. У зв'язку з цим удосконалення робочого процесу дискових подрібнювачів, що направлене на підвищення якості готового продукту і зниження енергоємності процесу подрібнення, є актуальною задачею.

Відповідно до викладеного, у кваліфікаційній роботі сформульовано **мету дослідження**: підвищення ефективності процесу подрібнення зерна дисковим подрібнювачем за рахунок обґрунтування і оптимізації конструктивних параметрів робочих поверхнею дисків.

**Об'єкт дослідження**: технологічний процес безударного подрібнювання зерна дисковим подрібнювачем.

**Предмет дослідження**: закономірності впливу конструктивних параметрів і робочих поверхнею дисків на ефективність процесу подрібнення зерна.

**Методи дослідження**: теоретичні обґрунтування параметрів і режимів роботи дискового подрібнювача проводилось з використанням методів математичної статистики і моделювання, законів і методів класичної механіки, методів планування багатофакторного експерименту і математичного аналізу отриманих результатів.

**Публікації**. За результатами досліджень опубліковано тези у збірнику матеріалів науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2021» та збірнику матеріалів V міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи»..

**Обсяг та структура роботи.** Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 36 сторінках машинописного тексту, містить 4 таблиць, 21 рисунка, списку використаних джерел з 26 найменувань.

## РОЗДІЛ 1.

# СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА

### 1.1.Способи та аналіз конструкцій для подрібнення зерна

У даний час уснує безліч видів кормів, які направлені на задоволення потреб організмів різних видів, порід і вікових груп тварин. Це допомагає створенню великої кількості способів обробки зерна.

За видами обробки кормових способів можна розділили: на тепловий, механічний, хімічний, біологічний і біохімічний. У зв'язку з вищевикладеним можна зробити висновок: вид обробки різних матеріалів шляхом механічної дії за допомогою інструменту або робочого органу відноситься до обробки за допомогою механічної технології [7].

Подрібнення – це процес розділення матеріалу на частинки подрібного розміру з заданими параметрами. Процес подрібнення проходить за рахунок прикладення до матеріалу руйнівних сил (рис. 1.1). У результаті прикладення до зернівки сил накопичується напруга, через виникнення перевищуючої сили молекулярного зчеплення, відбувається руйнування матеріалу [8].

Найбільш розповсюдженими видами подрібнення зерна є:

Подрібнення ударом. Один із самих розповсюджених видів подрібнення, при якому відбувається вплив робочого органу на зернівку. Робочий орган представляє собою собою били, які наносять удари по матеріалу. При даному способі подрібнення відбувається руйнування ударом. Поділяють його на руйнування матеріалу вільним ударом і стисненим. Руйнування при вільному ударі залежить від швидкості руху молотка. При стисненому ударі матеріал руйнується між двома робочими органами.

Подрібнення матеріалу за допомогою стирання. Спосіб відомий з давніх давен. Подрібнення стиранням відбувається за рахунок виникнення сил тертя під визначним тиском на зерно робочими органами подрібнювального пристрою і поступальним рухам робочих органів.

Роздавлювання або плющення. При роздавлюванні відбувається обмінне руйнування оброблювального матеріалу за рахунок перевищення внутрішніх напруг над зовнішніми.

Різання. Спосіб руйнування, який полягає в розділенні матеріалу на частинки, що параметри форми і розміри яких задані.

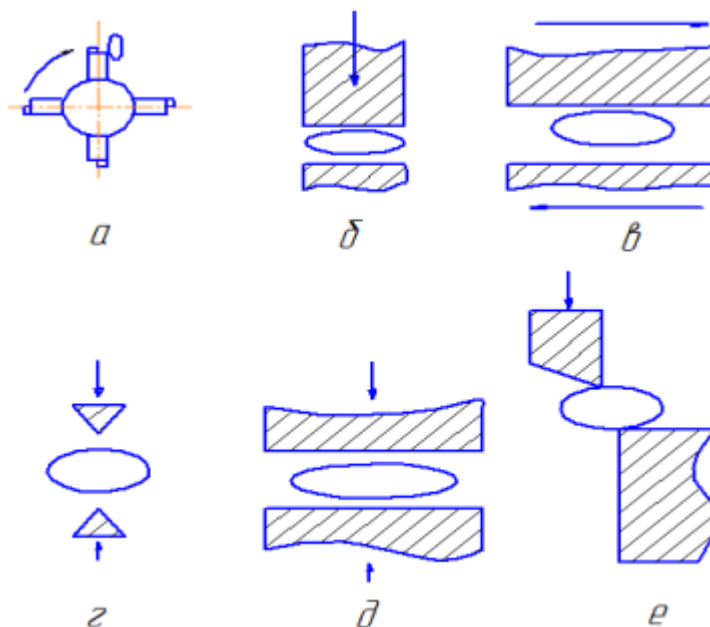


Рисунок 1.1 – Схеми способів подрібнення: а – вільний удар; б – стиснений удар; в – стирання; г – сколювання; д – роздавлювання; е – різання

Конструкції подрібнювачів та принципи їх роботи залежать від фізико-механічних властивостей подрібнювального матеріалу [9,10].

У комбікормовій промисловості розрізняють три степені крупності помелу: крупний, якщо величина подрібнення частинок 2,6-1,8 мм, середній 1,8-1,0 мм і дрібний 1,0-0,2 мм. [11 - 13].

Компоненти подрібнюються в основному в молоткових дробарках та рідше у вальцевих подрібнювачах. Молоткові дробарки є універсальними машинами, вони можуть розмелювати будь-які компоненти комбікормів.

Незалежно від степені подрібнення і фізичні властивості продукту, конструктивних особливостей подрібнюючих машин вони можуть задовольняти наступні вимоги: безперервна, рівномірна подача продукту в робочу зону; рівномірне його подрібнення і швидке видалення із робочої зони; можливість регулювання степені подрібнення; легка заміна



швидкозношувальних деталей; мінімальна питома витрата енергії [14, 15].

**Жорнові млини.** Принцип дії яких відомий з давніх давен та практично не змінився з початку їх виникнення. Вони працюють за принципом стиснення і здвигу. Даний спосіб застосовується для обробки сухих немаслянистих культур. Як правило, робочими органами є два плоских жорна. Зерно подрібнюється між жорнами за рахунок обертання одного із робочих органів.

**Вальцеві верстати.** Призначені для помелу зернових культур. Основний компонент верстата – система валів (рис. 1.2). Працюють за принципом сколювання і здвигу. Робочі органи вальцевих верстатів – рифлені вальці. Обертаються з різними або однаковими швидкостями або один із робочих органів рухомий, а інший – нерухомий.

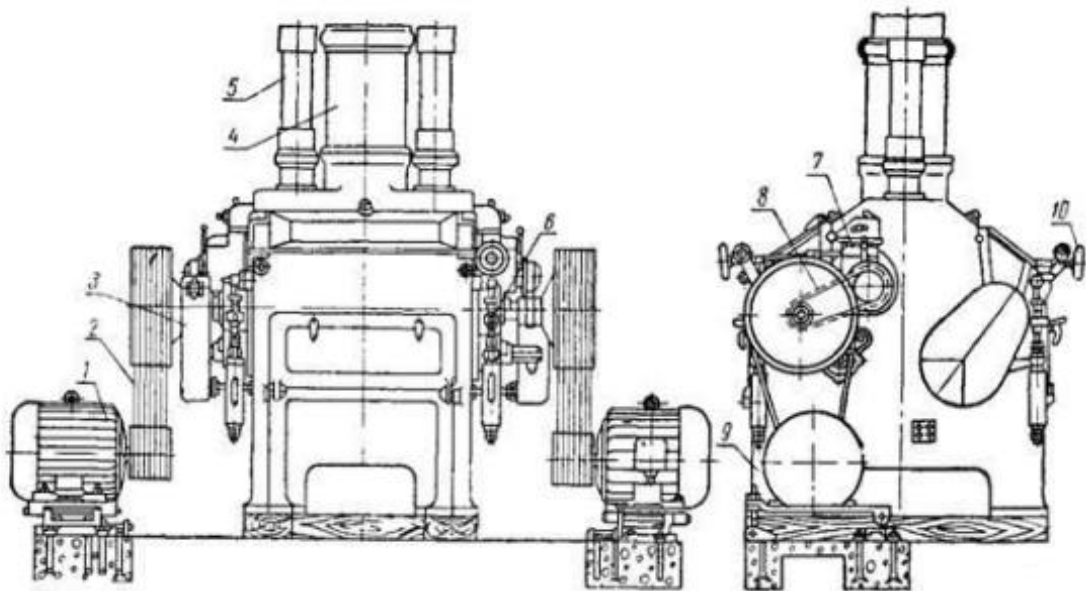


Рисунок 1.2. Вальцевий верстат БВ: 1 – електродвигун; 2 – клинопасова передача; 3 – коробка передач; 4 – приймальна труба; 5 – пневмопривід; 6 – механізм налаштування валів; 7 – автомат привально-відвальний; 8 – пасова передача; 9 – станина; 10 – механізм точного налаштування зазору вальців

Вальцевий верстат БВ використовується на борошномельних заводах. Випускається трьох розмірів в залежності від довжини вальців: 1000×250 мм; 800×250 мм; 600×250 мм.

**Плющильні верстати.** Використовується для плющення круп та лущеного зерна при виробництві вівсяних, гречаних, кукурудзяних, пшеничних та інших пластівців. До особливостей роботи можна віднести охолодження

вальців, що дозволяють створити оптимальні умови плющення. Плющене зерно – розповсюджений кормовий засіб в раціоні ВРХ, кіз, овець. Схема плющеного верстату зображена на рис. 1.3.



Рисунок 1.3. Плющильний верстат

Робочі органи верстату є гладенькі вальці, також зустрічаються плющильні стрічки.

**Молоткові дробарки.** В залежності від продуктивності, побіблювального продукту змінюються розміри, маса і деякі конструктивні елементи дробарок. Але їх загальна будова однакова. Молоткові дробарки складаються із завантажувального пристрою, молоткового ротора, плит, сита або колосникового пристрою, а також пристрою для виведення продукту із машини механічним або пневматичним транспортером, системи автоматичного або ручного регулювання режиму роботи [16].

На тваринницьких комплексах і фермах найбільш розповсюдження отримали дробарки молоткового типу КДУ, ДКУ, КДМ, ДБ, ДДК, ДДЗ та ін.

Часто зустрічаються у сільському господарстві безрешітна дробарка ДБ-5, її основне призначення – подрібнення різних видів фуражного зерна нормальної і підвищеної вологості (до 17%). Схема дробарки представлена на рис. 1.1.

Технічні характеристики дробарки ДБ-5:

1. Продуктивність по основному часу на зерні ячменя вологістю 12-14%, не менше 2т/год. Для продукту, що має залишок на ситі з отворами діаметром 3 мм, не більше 5% - 2 т/год.

2. Продуктивність за експлуатаційним часом на зерні ячменя вологістю 12-14%; для продукту, що має залишок на ситі з отворами діаметром 3 мм, 2 т/год.

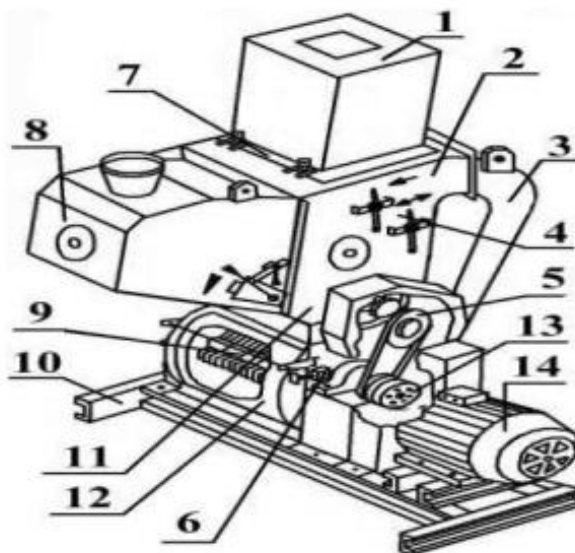


Рисунок 1.2. Схема дробарки ДБ-5: 1 – фільтр; 2 – розділювальна камера; 3 – кормопровід; 4 – механізми керування заслінкою; 5 – двохступінчатий шків; 6, 12 – кришка; 7 – рама; 8 – бункер; 9 – ротор; 10 – рама; 11 – корпус; 13 – втулково-пальцева муфта; 14 – електродвигун

Недоліки даної дробарки:

- велика частка пилоподібної фракції в продукті помелу;
- велика енергоємність процесу, так як в процесі подрібнення до зернівки прикладаються сили зі сторони подрібнювального матеріалу та робочих органів.

Німецького виробництва молоткова дробарка для подрібнення зерна *RVO 1045* (рис. 1.3). Дана дробарка встановлена на рамі, а ротор її розміщений на валу двигуна, потужність якої 45 кВт.

Продуктивність (ячмінь) – 5,7 т/год, (пшениця) – 11,5 т/год [17].



Рисунок 1.3 – Молоткова дробарка *RVO 1045*

Зернова дробарка ДЗ-Т-1 (рис. 1.4, а) проста та надійна у роботі. Складається з завантажувального бункера 1, вивантажувального патрубку 2, корпусу 3, електродвигуна 4, кабеля живлення 5, напірного каналу 6 та блоку конденсаторів 7.

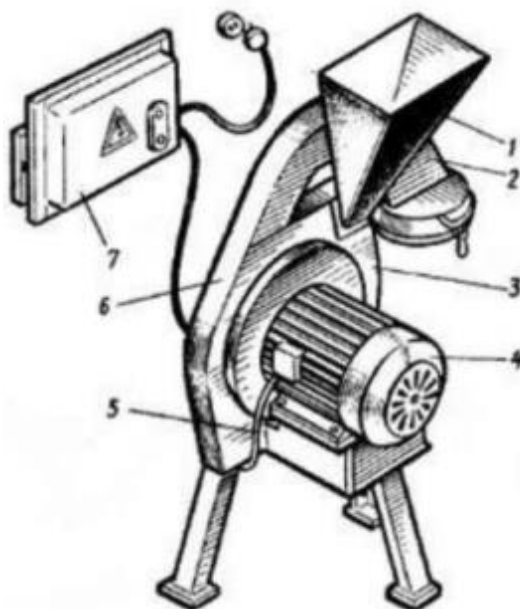


Рисунок 1.10 – Дробарка зернова ДЗ-Т-1

Основні недоліки даної конструкції – це використання конденсаторного двигуна, що не призначений для тривалої роботи.

## 1.2. Особливості процесу подрібнення зерна

Руйнування зернових матеріалів можна представити як процес, що проходить циклічними діями навантаження. При дії зовнішніх сил оболонка зернівки деформується, а внутрішня частина (зародок) надає в'язкий опір переміщенню оболонки, враховуючи тим самим міцність і жорсткість тіла. Межа міцності оболонки не залежить від часу дії навантаження, а в'язкий опір зарода змінюється з часом.

При тривалій дії навантаження зародок практично не здійснює опору і міцність тіла визначається міцністю оболонки. Тому для руйнування такого тіла потрібна більш високе питоме навантаження, так як опір руйнуванню визначається спільною міцністю оболонки і зародка.

Для руйнування оболонки твердої пшениці сколювання питома енергія подрібнення, первинного руйнування зерна знаходиться на рівні 1,9-4кДж/кг [18]. Так як зернівки володіють пружньо-пластичними властивостями. Відношення між пружньо і пластичними складовими складають 10...35 (90...65%). Таким чином основні затрати енергії подрібнення знаходяться в межах пластичної деформації.

Розділення процесу подрібнення на етапи, враховуючи ці фізико-механічні особливості будови зернівки можуть бути перспективними на шляху зниження затрат енергії на процес в цілому. Тому особливий інтерес для оцінки процесу подрібнення зерна представляють процеси ущільнення матеріалів рослинного походження [19, 20].

Основні наукові результати з подрібнення зерна були показані В.П. Горячкіним (рис. 1.11) [21].

В частині 1 вся кінетична енергія молотка, витрачається на деформацію зерна  $V_{ч}=0$ . По мірі руху вправо  $V_{ч}=0$  частка енергії деформації зменшується в точку  $V_{ч}/V_{м}=1$  рівна 0.

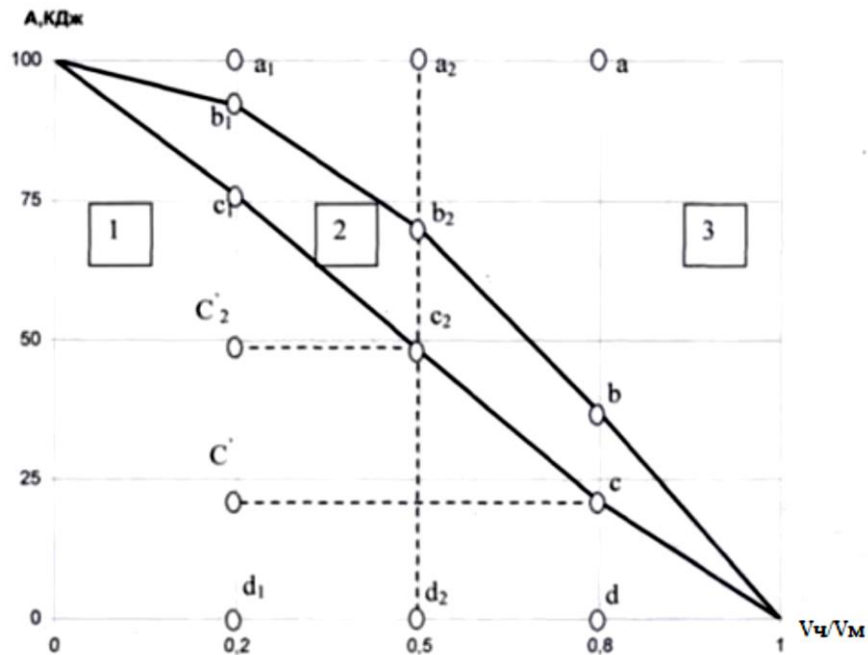


Рисунок 1.11. Зниження енергоємності подрібнення зерна (В.П. Горячкін): А – повна кінематична енергія молотка; 1 – корисна енергія; 2 – енергія частинок; 3 – енергія холостого ходу; ab – ордината холостого ходу; вс – ордината енергії частинок; dc – ордината корисної енергії; Vч – швидкість частинки; Vм – швидкість молотка

Відомо, що в даній частині  $Vч/ Vм=0,75-0,85$  працюють молоткові дробарки та інші швидкісні подрібнювачі. При цьому корисною енергією деформації може бути і енергія, що передана частинці (частина 2) (рис.1.11), так як швидкість частинок зіштовхується з молотком та може бути руйнуючою.

Коефіцієнт ефективності процесу може оцінюватись відношенням  $\vartheta = \frac{b \times d}{a \times d}$ .

Пружню деформацію технічно можна виконати в пертині  $a_1 - d_1$  вальцевої або дискової пари різної геометрії, а пластичну, остаточне подрібнення в перетині  $a - d_3$ . Тоді коефіцієнт енергетичної ефективності процесу, може бути визначений з наступного відношення:

$$\vartheta_k = \frac{(cd \times c_1 d_1)}{2(a \times d)} \quad (1.1)$$

Фаза прастичного, остаточного подрібнення, може бути виконана колоками зі значно меншою робочою швидкістю  $Vч < (0,4-0,6)Vм$ , дисками або жорнами, штифтовими або іншими робочими органами, реалізуючи ефект П.А. Ребіндера зниження муцності при циклічних напруженнях тіл, що отримали на першій стадії дефекти [22].

## **Висновки по розділу 1**

Виконані в даному напрямку дослідження оригінальних технічних рішень та запропонованих аналітичних залежностей для визначення балансу енергії й напруження, співвідношення поверхонь робочих органів та числа їх елементів, дозволяють шукати нові рішення енергозбереження та покращення технологічного процесу подрібнення.

У результаті проведеного огляду способів подрібнення зерна та аналізу конструкцій, прийшли до висновку про необхідність удосконалення конструктивних і режимних параметрів дискового подрібнювача.

## РОЗДІЛ 2.

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА

#### 2.1. Аналіз процесу подрібнення зерна

Робочі органи подрібнювача розміщені горизонтально і представляють два диска. Покладаючись на основний закон подрібнення зернових матеріалів, запропонований П.А. Ребіндером, можна отримати обґрунтовані технологічні схеми подрібнення зернових матеріалів. [23]:

$$A = f(\Delta v) + f(\Delta s). \quad (2.1)$$

Закон деформації можна розглядати як суму роботи пружних деформацій і роботи, що витрачається на утворення нових поверхонь.

$$A = A_d + A_n, \quad (2.2)$$

де  $\Delta v$  – об'єм деформаційного тіла;

$\Delta s$  – прирощування питомої площини поверхні матеріалу;

$A_d$  – робота пружних деформацій;

$A_n$  – робота, що витрачається на утворення нових поверхонь.

Основною задачею подрібнювача є отримання нових поверхонь в результаті руйнування частинок. Корисною потрібно рахувати тільки роботу, що затрачається на утворення нових поверхонь  $A_n$ .

Умовно оцінюємо ККД ( $\eta$ ) процесу подрібнення.

$$\eta = \frac{A_n}{(A_d + A_n)}. \quad (2.3)$$

З рівняння (2.3) видно, що залежність ККД процесу подрібнення в пристрої прямо пропорційна від роботи пружних деформацій. Так як зерно є тілом з анізотропними властивостями і в процесі подрібнення приймає на себе велику кількість пружних деформацій, ККД процесу низький. Для підвищення ефективності подрібнення і підвищення ККД подрібнювача необхідно виконати умови:



- звести до мінімуму пружні деформації  $A_{\text{п}}$ . Дані умови можливо виконати, застосовувавши руйнування зерна способом зрізу сколювання. При цьому прикладати руйнівальні зусилля потрібно поперек зернівки;
- збільшити роботу утворення нових поверхонь  $A_{\text{п}}$  шляхом ступінчатого подрібнення зернових матеріалів з своєчасним і обов'язковим введенням продукту помелу;
- забезпечити краще проходження зернового матеріалу між ступенями робочих органів.

Головною задачею процесу подрібнення є отримання частинок подрібнювального продукту з заданими параметрами при незмінних затратах електроенергії або її зниження.

## 2.2. Взаємодія робочої поверхні дисків подрібнювача із зерном

Робочий простір подрібнювача утворюється поверхнями двох дисків (рис. 2.1), верхнім нерухомим і нижнім рухливим, встановленим на вертикальному валу. Геометричні елементи поверхні дисків утворюють приймальний пояс шириною  $(R_n - R_{np})$  і модульний – шириною  $(R_n - R_{np})$ . Степінь подрібнення регулюється зазором  $\delta_m$  між площами

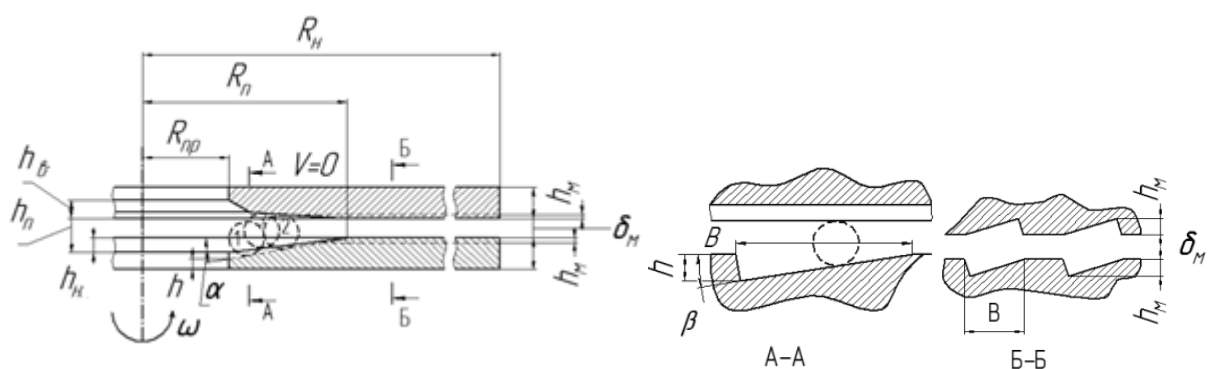


Рисунок 2.1. Радіальний перетин дискової пари подрібнювача:  $h_{\text{вк}}$  – висота верхнього приймального конуса;  $h_{\text{нк}}$  – висота нижнього приймального конуса; 1, 2 – положення частинок у борозенці; 3 – положення частинок в поясі релаксації; А-А – профіль борозенок подаючого пояса; Б-Б – профіль борозенок модульного пояса

Площа перетину приймального каналу дискової пари  $F$  включає (рис. 2.1) площа кільця вистою  $h_{\pi}$  і загальну площу подаючих борозенок рухомого диску шириною  $B$  і глибиною  $h$ .

$$F = 2\pi R_{np} h_{\pi} + B h z_{\phi} / 2, \quad (2.4)$$

де  $z_{\phi}$  – число борозенок,  $R_{np}$  – радіус приймальної заглибини, м.

Площа перетину випускного каналу на відстані  $R_{np}$  від центру обертання диска складає:

$$F = 2R_{\pi} \delta_m + B h_m z_m / 2, \quad (2.5)$$

де  $z_m$  – число модульних борозенок на обох дисках;  $R_{\pi}$  – радіус дисків, м.

Зернівка, що потрапляє на вході в положення 1, під дією відцентрової сили переміщується в положення 2 і заклинюється в поясі деформації. Зернівка 3 в поясі затримання деформації перекочується в положення дна наступної борозенки і таким чином відкидається від центра обертання по мірі руйнування в нове положення заклинювання, прокочування і деформації зі значно меншим зазором.

З даною метою необхідно виконати умови руху зерен і відділених частинок по нахиленій плоскій площині верх (рис. 2.2) в приймальний канал без перекочування [24].

Рух частинок вгору по обертаючій похиленій площині без врахування переносного руху показаний у наступному виразі:

$$m\omega^2 R_{min} \cos\alpha > mg \sin\alpha + mg f \cos\alpha + m\omega^2 R_{min} f \sin\alpha, \quad (2.6)$$

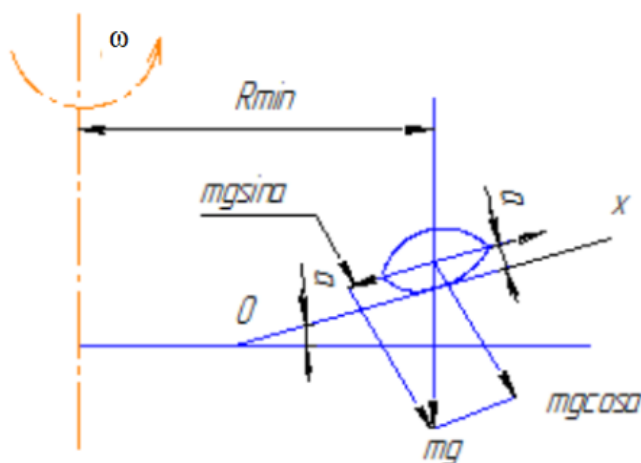


Рисунок 2.2. Рух частинки по похилій площині

Після скорочення отримаємо:

$$\omega > \sqrt{\frac{g(\sin\alpha + f\cos\alpha)}{R_{\min}(\cos\alpha - f\sin\alpha)}} \quad (2.7)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя продукту об диск;  $\alpha$  – кут підйому падаючої борозенки;  $R_{\min}$  – радіус приймального отвору.

Вхідні та вихідні перетини міждискового простору повинні бути узоджені таким чином, щоб подача в довільному перетині міждискового простору відповідала постійній, або незначно збільшувалась, а пояс утримання деформації розширювався з постійним градієнтом для сепарації потоку і розподілу його частинок у відповідних їх розмірах простору за умовою [25]:

$$F_{\text{вх}} V_{\text{вх}} \rho_{\text{вх}} \theta_{\text{вх}} < F_{\text{вих}} V_{\text{вих}} \rho_{\text{вих}} \theta_{\text{вих}}, \quad (2.8)$$

де  $V_{\text{вх}}$ ,  $V_{\text{вих}}$  – відповідно швидкість входу і виходу продукту, м/с;  $\rho_{\text{вх}}$ ,  $\rho_{\text{вих}}$  – густина вхідного та подрібненого продукту, кг/м<sup>3</sup>;  $\theta_{\text{вх}}$ ,  $\theta_{\text{вих}}$  – коефіцієнти заповнення впускного і випускного перетину.

Робочі органи подрібнювача представляють собою пару дисків (рис. 2.3.), один з яких верхній – нерухомий, а нижній обертається на валу.

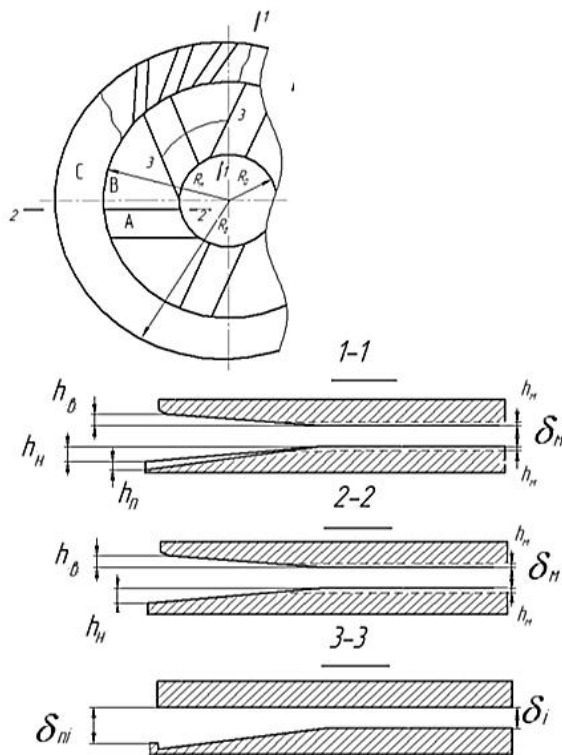


Рисунок 2.3. Робочі поверхні дискової пари: А – подавальна борозенка; В – площадка деформації; С – модульний пояс;  $R_B$  – радіус приймального вікна;  $R_D$  – радіус диска;  $R_M$  – радіус модульного пояса;  $h_B$  – висота конуса верхнього диска;  $h_K$  – висота нижнього конуса диска.

На робочій поверхні нижнього диска (рис. 2.3) знаходяться подаючі борозенки А, площадки деформації В і модульний пояс С, що забезпечують циклічну дію на зернівку від входження в робочий простір до повного подрібнення та виходу з нього.

Площа борозенок і класифікатора подаючого пояса, визначається із залежності:

$$F_{\text{п.б.}} = \frac{\pi(R_M^2 - R_B^2)}{(\lambda + 1)}; F_{\text{к.}} = \frac{\pi(R_M^2 - R_B^2)\lambda}{(\lambda + 1)}. \quad (2.9)$$

Площа поверхні подрібнюючого пояса:

$$F_{\text{п.п.}} = (F_{\text{п.б.}} + F_{\text{к.}})\lambda. \quad (2.10)$$

Зовнішній діаметр диска, що відповідає розмірам подаючого пояса, визначається із рівняння (2.10) з врахування рівняння (2.9):

$$R = \sqrt{R_M^2(\lambda + 1) - \lambda R_B^2}, \quad (2.11)$$

де  $\lambda$  – перехід між ділянками і ступенями подрібнення.

Процес деформації зернівки кормових культур, відповідно дослідженням, підчинається спрощеному закону лінійного деформування [26]:

$$Mt\epsilon' + T_p\epsilon = \sigma + t\sigma', \quad (2.12)$$

де  $M$ ,  $T_p$  – миттєвий і тривалий модулі деформації, Па;  $\epsilon'$ ,  $\epsilon$  – відносна деформація, і її похідна з часом, швидкість;  $\sigma$ ,  $\sigma'$  – напруження і її похідна, Па, Па/с.  $t$  – тривалість напруження, с.

Напруга стиснення в частинках потоку, з врахуванням пружньо-в'язких властивостей зернівки геометрії та кінематики робочих поверхонь елементів поясів дисків (2.9) складають:

$$\sigma_{\text{ч}} = \frac{\omega R_B T g a}{h_n + \delta_n} \left[ T_p n + t(M - T_p)(1 - e^{-\frac{n}{t}}) \right], \quad (2.13)$$

де  $h_n$  – сумарна висота конусів дисків;  $a$  – кут підйому дна борозенки;  $\delta_n$  – модульний зазор між дисками.

У модульному між дисковому просторі С (рис. 2.3) напруження стиснення, за аналогією (2.13) визначаємо за формулою:

$$\sigma_M = \frac{\omega R_M T g a}{h_M + \delta_M} \left( \left[ T_p n + t(M - T_p)(1 - e^{-\frac{n}{t}}) \right] + \vartheta_0 M e^{-\frac{n}{t}} \right), \quad (2.14)$$

де  $\vartheta_0$  – початкова відносна деформація, отримана частинками в подаючому поясі та визначається за формулою:

$$\vartheta_0 = 1 - \frac{\delta_M}{h_0}, \quad (2.15)$$

де  $h_0$  - початкова максимально можлива висота зернівок, мм.

Враховуючи характер напруження на межі борозенки і класифікатора, їх розмірів та коефіцієнтів заповнення зусилля  $P$  деформації стиснення потоку частинок визначаємо залежності:

Для борозенок

$$P_B = \frac{\pi(R_M^2 - R_B^2)}{2(\lambda+1)} \mu_B, \quad (2.16)$$

Для класифікаторів

$$P_K = \frac{\pi(R_M^2 - R_B^2)}{2(\lambda+1)} \mu_K, \quad (2.17)$$

де  $\mu_B$ ,  $\mu_K$  – відповідно коефіцієнти заповнення елементів подаючого простору дисків.

Коефіцієнт заповнення  $\mu_M$  для модульного простору зусилля стиснення потоку визначається за залежністю:

$$P_M = \delta_M \pi (R_D^2 - R_B^2) \mu_M. \quad (2.18)$$

Потужність на процес деформації і класифікації продуктів подрібнення в робочому просторі дискової пари, без врахування транспортової та вентиляційної складової, визначаємо із залежності

$$N_D = (P_B + P_K) \frac{R_M + R_B}{2} \omega f_n + P_M \frac{R_D + R_M}{2} \omega f_m, \quad (2.19)$$

де  $f_n$ ,  $f_m$  – коефіцієнти перекочування продуктів подрібнення по робочим поверхням дисків.

Обертаючись нижній диск забезпечує циклічну напругу зернівок у борозенках, утримуючи деформації класифікаторами, вільні під дією відцентрової сили, переміщення дрібних частинок до периферії подаючого пояса, не перешкоджає руху в аксіальному напрямку затиснених частинок великих розмірів. Дані частинки, досягаючи країв борозенки, попадають у вільний простір, затискаються, руйнуються, а продукт руйнування знову виноситься в класифікатор і т.д.

## **Висновок по розділу 2**

Для розробки енергозберігаючого процесу подрібнення кормового зерна з врахуванням його пружньо-в'язких характеристик, потрібне визначення миттєвого  $M$  і тривалого  $T_r$  модулів пружності і тривалості деформації в діапазоні технологічної вологості 10-14 тривалого зберігання.

З врахуванням пружньо-в'язких властивостей зернівки отримані залежності визначення напруження деформації (2.13, 2.14), робочих зусиль деформації стиснення потоку частинок (2.16, 2.17, 2.18) та потужності на процес деформації і класифікації продуктів подрібнення в робочому просторі дискової пари (2.19).

### РОЗДІЛ 3.

## УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ МАШИНИ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА

Для перевірки теоретичних даних, отриманих в попередньому розділі, були проведені експериментальні дослідження. Програмою дослідження передбачалось проведення дослідів в декілька етапів:

1. Розробка методики експериментального дослідження.
2. Розробка і виготовлення робочої моделі дискового подрібнювача.
3. Аналіз даних та отримання регресійних залежностей, що описують процес роботи дискового подрібнювача зерна.
4. Визначення, на основі отриманих залежностей і результатів дослідів, раціональних кінематичних, енергетичних і технологічних параметрів роботи дискового подрібнювача.

### 3.1. Опис експериментальної установки

Дослідження робочого процесу дискового подрібнювача зерна проводилось на зразку, який був виготовлений для перевірки роботоздатності подрібнення на різних зернових кормах. Даний пристрій призначений для подрібнення фуражного зерна на комбікорм та може використовуватись в індивідуальних господарствах.

Дисковий подрібнювач (рис. 3.1) складається: станини 1, привода 5, сита 8 і відбивача 9. Завантажувальний бункер 2 з вікном 3 для подавання зерна закріплений на станині. На привідному валу 4 розміщена дискова пара 6. Сито і відбивач виконані у вигляді усічених конусів.

Подрібнювач працює наступним чином. У завантажувальний бункер 2 засипають зерновий матеріал, вмикають привід 5, який приводить в дію вертикальний привідний вал 4. Подрібнювальний продукт із завантажувального бункера 2 самопливом через отвір надходить на пару дисків 6, зерно попадає в

приймальний пояс 1 (рис. 3.2), переходячи в подаючий пояс 2, піддається деформації подаючим борозенкам і остаточно подрібнюється в модульному поясі 3. Потім, подріблений продукт подається на сито 8 і відбивач 9.

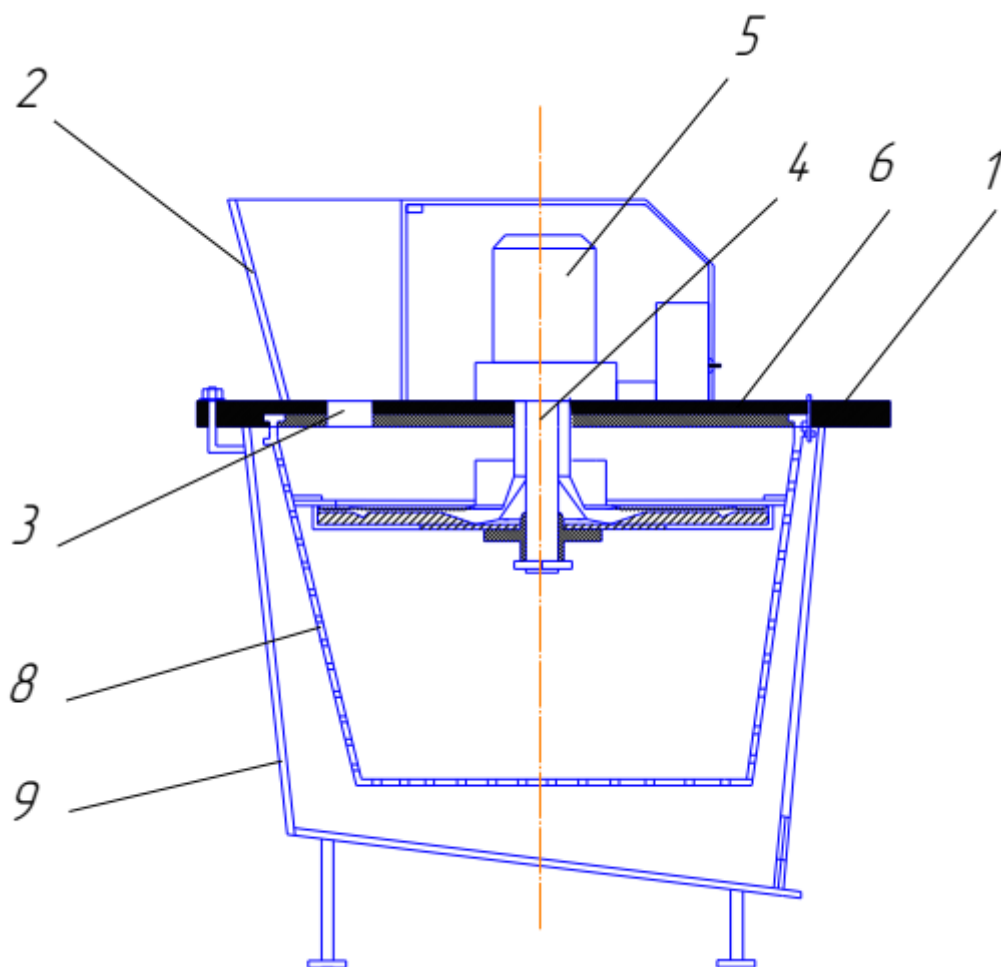


Рисунок 3.1. Дісковий подрібнювач

Робоча поверхня диска подрібнювача утворює три пояса (рис. 3.2), що мають оригінальні геометричні елементи, які забезпечують приймання, подачу і задаваний ступінь подрібнення продукту технологічним простором, утворюваними дисками.

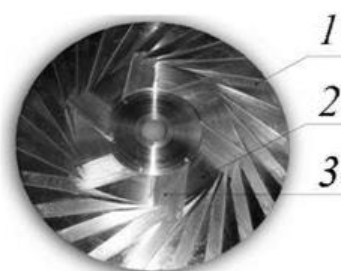


Рисунок 3.2. Дісковий подрібнювач: 1 – приймальний пояс; 2 – подаючий пояс; 3 – модульний пояс



Зміна зазору між дисками здійснюється безпосередньо переміщенням валу регулювальним гвинтом.

### 3.2. Фізико-механічні властивості і пружньо-в'язкі характеристики зерна

У процесі дослідження визначались наступні величини:

- густина (об'ємна маса) зерна, фракційний склад і гранулометричний;
- модуль помелу, фракційний склад продуктів помелу, степiнь подрiбнення.

Для дослідження спільного впливу основних факторів – зазору між дисками  $\delta_n$ , вологість зерна  $w$  і частота обертання рухомого диску  $\omega$  – на якісні показники процесу подрiбнення – модуля помелу, був складений повний факторний експеримент по матриці планування типу  $2^3$  (табл. 3.1).

Таблиця 3.1.

Матриця планування повного факторного експерименту типу  $2^3$

№ дослідю	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	Y
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$Y_1$
2	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	$Y_2$
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	$Y_3$
4	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	$Y_4$
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	$Y_5$
6	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	$Y_6$
7	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	$Y_7$
8	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	$Y_8$

Фактори і рівні їх варіювання наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Основні фактори і рівні варіювання

Рівні	Фактори		
	зазор між дисками	вологість зерна	частота обертання диска
Натуральне позначення	$\delta_m$ , мм	w, %	$\omega$ , хв. <sup>-1</sup>
Верхній	1,2	14	1000
Нульовий	0,8	12	800
Нижній	0,4	10	600
Кодове	$x_1$	$x_2$	$x_3$

позначення			
Верхній	+1	+1	+1
Нульовий	0	0	0
Нижній	-1	-1	-1

В якості критерію оптимізації, що характеризує робота дискового подрібнювача, приймаємо модуль помелу  $M$ .

За результатами експерименту вирішувалась задача отримання рівняння регресії в закодованому вигляді:

$$y = b_0 + b_1x_1^2 + b_2x_2^2 + b_3x_3^2 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3 \quad (3.1)$$

Однорідність дисперсії перевірялась за критерієм Кохрена. Значимість коефіцієнтів регресії перевірялась за критерієм Стьюдента. Адекватність моделі перевірялась за критерієм Фішера, за прийнятим рівнянням значимості  $\alpha = 0,05$ .

За результатами оцінки значимості коефіцієнтів рівняння регресії аналізу поверхні відгуку ставилась задача отримання значень параметрів дискового подрібнювача визначення питомих значень.

Для отримання достовірних результатів зерно кормових культур піддавалось попередній підготовці в лабораторних умовах.

Фракційні властивості визначались з врахуванням вихідного стану зерна і характеру навантаження.

Площа поперечних перетинів зернівки визначалась вимірюванням довжини, товщини і ширини за формулами:

$$\begin{cases} F_{\Gamma} = \frac{\pi}{4} lb, (\text{горизонтальна}) \\ F_{\text{б}} = \frac{\pi}{4} lh, (\text{на боці}) \\ F_{\text{в}} = \frac{\pi}{4} bh, (\text{вертикальна}) \end{cases} \quad (3.2)$$

Статична межа міцності визначалась як відношення руйнуючого зусилля до площини відповідного її об'єму зернівки за аналогією з поперечною площиною за вимірюваними розмірами з допущенням сферичної форми приведеної до фактичним радіусам, орієнтованим по вісям прямокутних координат.

$$V_{\text{зер}} = \frac{\pi}{6} lbh. \quad (3.3)$$

Результати розрахунків густини і меж міцності показані в табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Фізико-механічні і технологічні характеристики зерна

Вологість, %	Довжина, $l$ ширина, $b$ товщина $h$	Коефіцієнт тертя, $f_n/f_m$	Густина, г/см <sup>3</sup>	Межа міцності, МПа	
				статична	динамічна
Пшениця 12,23-14,56	4,3...7,8 1,8...4,3 1,49...4,1	(0,37...0,56) /(0,29...0,54)	1,23...1,5	6,55...6,27	11,58...11,88
Ячмінь 10,55-13,45	7,6...9,8 2,7...5,6 1,8...3,9	0,34...0,58 /(0,34...0,46)	1,35...1,40	7,08...7,35	12,77...12,98
Овес 12,68-14,62	7,9...12,4 1,5...3,8 1,3...2,9	0,42...0,58 /(0,37...0,58)	1,22...1,39	4,12...4,35	5,88...7,75

Руйнування тверих частинок пов'язане з їх деформацією і утворенням поверхні сколювання. Для руйнування ендосперми пшениці твердих сортів сколюванням потрібно зусилля 0,94-1,11 МПа, м'яких сортів – 0,27-0,33 МПа.

Питома енергія подрібнення, первинного руйнування зерна знаходиться в межах 1,8-4,1 кДж/кг. Як і більшість матеріалів рослинного походження зернівки володіють пружньо-пластичними властивостями. Відношення між пружньо-пластичними деформаціями, в залежності від хімічного складу зернівки складає 10...35 %. Отже, основні затрати енергії подрібнення відбуваються при пластичних деформаціях.

### 3.2. Результати дослідження взаємодії параметрів подрібнювача

Після проведення дослідів і отримання їх результатів був проведений регресійний аналіз. В якості критерію оптимізації був прийнятий показник «модуль помелу  $Y$ ».

Результати експерименту, що встановлюють залежність між модулем помелу, вологістю зерна, частотою обертання диска і зазором між ним наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4.

Результати експерименту подрібнення зернівки дисковим подрібнювачем

№ дослідю	Фактори			Маса продукту, г			Числові характеристики М
	$x_1$ $\delta_m$ , мм	$x_2$ , w, %	$x_3$ , $\omega$ , %	1 повторність	2 повторність	3 повторність	
1	1,2	14	1000	72,3	68,5	71,9	2,58
2	1,2	12	800	136,2	142,1	139,6	2,7
3	0,8	14	1000	93,4	89,6	92,2	2,1
4	0,8	12	800	48,8	47,8	57,7	2,15
5	0,8	10	600	41,2	39,8	29,5	2,05
6	0,4	14	1000	54,1	75,5	63,0	1,98
7	0,4	12	800	36,5	35,5	38,8	1,72
8	0,4	10	600	64,5	55,8	57,8	2,01

Регресійний аналіз проводився за допомогою програми Excel. У результаті обробки дослідних даних відомим методом була побудована статична математична модель процесу подрібнення зернівок:

$$y = 2,2155 + 0,1325x_1 + 0,3124x_2 - 0,7841x_3 + 0,043x_1x_2 + 0,0251x_1x_3 + 0,0189x_2x_3 + 0,0188x_1x_2x_3 \quad (3.4)$$

Аналізуючи отримане рівняння регресії, слід відмітити, що основну увагу на формування степеня подрібнення, величини модуля помелу, виявляє зазор між дисками  $x_1$ .

Рівняння регресії встановлює залежність між критерієм оптимізації  $y$  (модулем помелу), зазором між дисками  $\delta_m$  і вологістю зерна та частотою обертання рухомого диску  $\omega$ . За допомогою критерію Кохрена проведена оцінка однорідності дисперсії. Критерій Кохрена, рівний за розрахунками 0,3557, а табличне значення  $[G] = 0,5157$ . Отримані дані дозволяють зробити висновок, що гіпотеза про однорідність дисперсії приймається.

Перевірка значимості коефіцієнтів регресії, проводилась за критерієм Стьюдента показала, що є незначні коефіцієнти (табл. 3.5):

Таблиця 3.5

Коефіцієнти рівняння регресії

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$
2,2155	0,1325	0,3124	0,7841	0,043	0,0251	0,0189	0,0188
значимий	значимий	значимий	значимий	незначимий	незначимий	незначимий	незначимий

Після відповідних перетворень рівняння (3.4) набуло вигляд:

$$y = 2,2155 + 0,1325x_1 + 0,3124x_2 - 0,7841x_3, \quad (3.5)$$

На поверхні відгуку відображені залежності взаємодії факторів, що свідчать про процес, а також функціональний рівень звязку критерію оптимізації – модуля помелу із зазором в модульному поясі і частотою обертання робочого диску в межах їх раціональних значень (рис. 3.3-3.5).

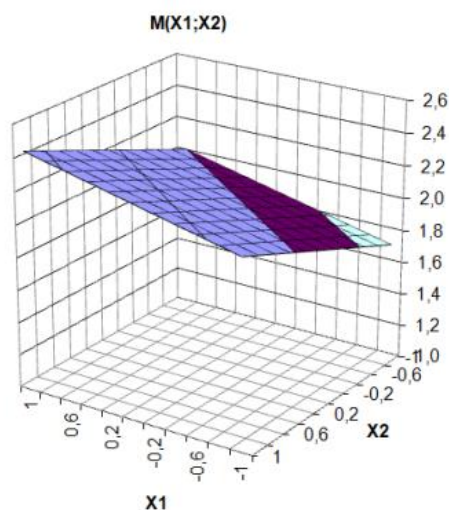


Рисунок 3.3 – Поверхня відгуку взаємодії факторів зазору ( $x_1$ ) і вологості ( $x_2$ )

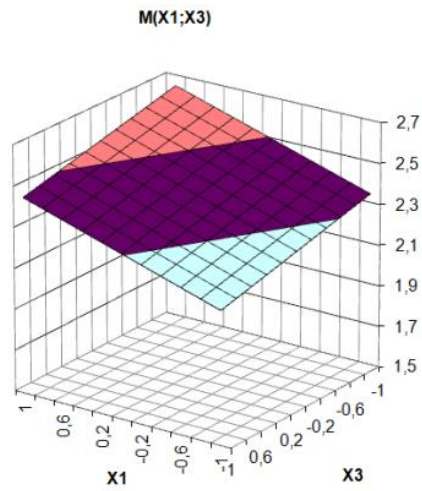


Рисунок 3.5 – Поверхня відгуку взаємодії факторів зазору ( $x_1$ ) і частоти обертання ( $x_3$ )

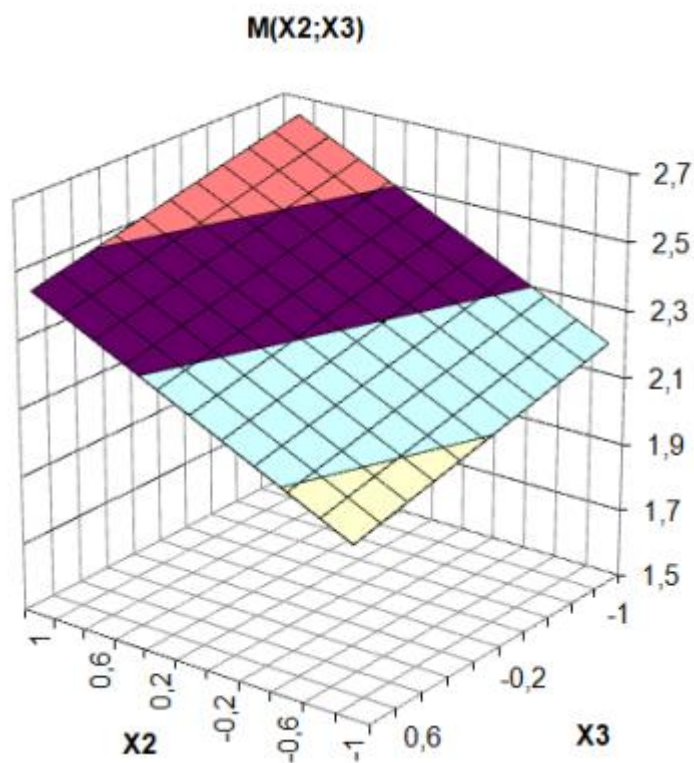


Рисунок 3.6 – Поверхня відгуку взаємодії факторів вологості ( $x_2$ ) і частоти обертання ( $x_3$ )

Аналізуючи представлені поверхні, слід відмітити, що зі зменшенням модульного зазору і вологості зерна (рис. 3.4) величина модуля помелу зменшується, що відповідає робочому параметру  $\delta_m$  подрібнювача і вимог до кормового зерна.

Збільшення модульного зазору і частоти обертання робочого диску (рис. 3.5) призводить до погіршення процесу подрібнення і збільшення модуля помелу.

Вплив вологості зерна і частоти обертання диску (рис. 3.6) на модуль помелу слід признати раціональними, що забезпечують управляємий процес при середніх значеннях.

### 3.3. Методика розрахунку параметрів дискового подрібнювача

Визначаємо площу робочої поверхні дискової пари:

$$F = \frac{Q}{q_{\text{пит}}} = \frac{500}{11460} = 0,045 \text{ м}^2.$$

Пропускнну здатність приймального бункера перевіряємо за співвідношенням:

$$Q < Q_{\text{б}}$$

$$Q_{\text{max}} = 2\pi \times R_{\text{в}} \times d \times V_n \times \rho \times \vartheta = 2 \times 3.14 \times 0.06 \times 0.03 \times 0.25 \times 0.8 \times 3600 = 813 \text{ кг/год}$$

$$500 \text{ кг/год} < 813 \text{ кг/год.}$$

За заданою продуктивністю, отриманою величини робочої поверхні і радіусу пояса моделі  $R_{\text{в}} = 60 \text{ мм}$  визначаємо величину радіуса дисків за відношенням:

$$F = \pi(R_{\text{з}}^2 - R_{\text{н}}^2)$$

$$R_{\text{н}} = \sqrt{\frac{0.045 + 3.14 \times 0.036}{3.14}} = 0.134 \text{ м.}$$

Округлюємо до стандартного розміру 135 мм. Діаметр дисків без фасок 270 мм.

Значення коефіцієнта подрібнювача від подаючого до модульного поясів  $\lambda = 2$ , визначаємо величину радіусу модульного пояса за залежністю:

$$R_{\text{м}} = \sqrt{\frac{R_{\text{н}}^2 + \lambda R_{\text{в}}^2}{1 + \lambda}} = \sqrt{\frac{0,0174 + 2 \times 0,0036}{3}} = 0,094 \text{ м.}$$

Округлюємо до стандартного розміру  $R_{\text{м}} = 95 \text{ мм}$ .

Знаючи величину радіусу модульного пояса розраховуємо площу борозенок і площу деформації за залежностями:

$$F_{\text{п.б.}} = \frac{\pi(R_{\text{м}}^2 - R_{\text{в}}^2)}{\lambda + 1} = 0,00489 \text{ м}^2.$$

$$F_{\text{п.п.}} = \frac{\pi(R_{\text{м}}^2 - R_{\text{в}}^2)\lambda}{\lambda + 1} = 0,0096 \text{ м}^2.$$

З врахуванням напружень на елементах робочої поверхні дисків, визначаємо сили стиснення потоку продукту подрібнення за залежностями:

для борозенок

$$P_6 = \sigma_n \frac{F_{п.б.}}{2} \vartheta_n = 544,2 \text{ Н.}$$

для класифікаторів

$$P_k = \sigma_k \frac{F_{п.п.}}{2} \vartheta_k = 822,45 \text{ Н.}$$

для модульного пояса

$$P_m = \sigma_m \frac{F_{в.}}{2} \vartheta_m = 1598,14 \text{ Н.}$$

Потужність, що необхідна для виконання процесу подрібнення – деформації і класифікації частинки:

$$N_d = (P_6 + P_k) \frac{R_m + R_b}{2} \omega f_n + R_m \frac{R_d + R_m}{2} \omega f_m = (544,2 \times 0,05 \times 0,075 + 822,45 \times 0,05 \times 0,075 + 1598,14 \times 0,05 \times 0,075) 60 = 694,38 \text{ Вт.}$$

### **Висновки по розділу 3**

Результати дослідження методом планування експерименту дозволили отримати рівняння регресії процесу подрібнення зерна і оцінити вплив факторів на характер подрібнення.

Розрахункові параметри лабораторної моделі подрібнювача для режиму середнього помелу пшениці складають:  $R_b = 60$  мм,  $R_n = 135$  мм;  $R_m = 95$  мм;  $N_d = 694,38$  Вт.



## ВИСНОВКИ

Удосконалення робочого процесу дискового подрібнювача можливе, за рахунок підвищення ефективності дії робочих органів на подрібнювальний матеріал. Використання запропонованої гіпотези дозволило створити оригінальні робочі органи дискового типу, які забезпечують отримання необхідного модуля помелу зерна для тварин.

Головною задачею процесу подрібнення є отримання частинок подрібнювального продукту з заданими параметрами при незмінних затратах електроенергії або її зниження.

З врахуванням пружньо-в'язких властивостей зерна отримані залежності визначення деформації, робочих зусиль на елементах міждискового простору і потужності на процес деформації та класифікації продуктів подрібнення, що дозволило визначити основні параметри робочих органів подрібнювача.

Результати дослідження методом планування експерименту дозволили отримати рівняння регресії процесу подрібнення зерна і оцінити вплив факторів на характер подрібнення. Подрібнення можна рекомендувати:

- вологість зерна 10...14%;
- зазор міждискового простору повинен бути 0,4...1,2 мм;
- частота обертання диска 600...1000 об/хв.

Розрахункові параметри лабораторної моделі подрібнювача для режиму середнього помелу пшениці складають:  $R_B = 60$  мм,  $R_n = 135$  мм;  $R_M = 95$  мм;  $P_6 = 544,2$  Н;  $P_K = 822,45$  Н;  $P_M = 1598,1$ ;  $N_d = 694,38$  Вт.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бутковский В.А. Технология мукомольного, крупяного и комбикормового производства: учебники и учеб, пособия для высш. учеб, заведений. М.: Колос, 1981. 256 с.
2. Кукта Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов. / Г.М: Кукта М.: Агропромиздат, 1987. - 303 с., Барабашкин В.П. Молотковые и роторные дробилки. 2-е изд. М.: Недра, 1973. 144 с.
3. Подпратов Г.І., Рожко В.І., Скалецька Л.Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. К. : Аграрна освіта, 2014. 393 с.
4. Мерко І. Т. Моргун В. О. Наукові основи і технологія переробки зерна. Одеса : Друк, 2001. 348 с.
5. Янковська О.І. Інноваційний процес у сільському господарстві / О.І. Янковська // Наука й економіка. 2009. № 4, Т. 2. С. 54-58.
6. Дейнеко Л.В. Формування моделі інноваційного розвитку агропродовольчої сфери: національні інтереси і регіональні особливості / Л.В. Дейнеко, І.О. Іртищева // Збірник наукових праць. Економічні науки. Чернівці : Книги XII, 2010. Вип. 6. С. 141-148.
7. Демидов, Л.Г. Технология комбикормового производства. М.: Колос, 1968. 224 с.
8. Дацишин О. В. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв / О. В.Дацишин, А. І. Ткачук, О. В. Гвоздєв та ін. / За редакцією О.В. Дацишина. Навчальний посібник. – Вінниця: Нова Книга, 2008. – 488с.
9. Бурков, А.И. Ресурсосберегающие машины для послеуборочной обработки семян / А.И. Бурков, В.Л. Андреев, О.П. Роцин // Сб. науч. тр./ ВИМ. 2003. Т. 148. С. 162-171.
10. Кукта Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов. М.: Агропромиздат, 1987. 303 с.

11. Борискин М.А., Демский А.Б., Тамаров Е.В., Чернолихов А.С. Оборудование комбикормовых заводов. Справочник. М.: Агропромиздат, 1986. 175 с.
12. Ревенко І.І. Механізація виробництва продукції тваринництва / І.І. Ревенко, Г.М. Кукта та ін.; За дед. І.І. Ревенка. К.: Урожай, 1994. 264 с.
13. Теорія та розрахунок машин для тваринництва / І.Г. Бойко, В.І. Грідасов, А.І.Дзюба та ін.; За ред. І.Г. Бойко. Х.: НМЦ ХНТУСГ, 2002. 216 с.
14. Проектування технологій і технічних засобів для тваринництва. За ред. Скорика О.П., Полупанова В.М (авт. Науменко О.А., Бойко І.Г., Грідасов В.І., Дзюба А.І. та інші) Харків ХНТУСГ, 2009. 429 с.
15. Мельников, СВ. Технологическое оборудование животноводческих ферм и комплексов / СВ. Мельников. - 2-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Агропромиздат, 1985. 640 с.
16. Галкин, А.Ф. Комплексная механизация производственных процессов в животноводстве. Москва: Колос, 1969. 296 с.
17. <https://agrarka.com/ua/ads/r-110/p-1/>
18. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л.: Колос. Ленинград отделение. 1978. 560 с.
19. Черепанов С.В. Современные технологии дробления: от идеи до воплощения./ С.В. Черепанов, В.О. Карпушенко, М.В. Архипова // Хранение и переработка зерна. 2004.- №1. С. 37-38.
20. Подрібнення зерна і компонентів комбикормів [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://softagro.com/uk/kormovirobnictvo/podribnennya-zerna-i-komponentivkombikormiv.html>.
21. Горячкин, В.П. Собрание сочинений в трёх томах [Текст] / В.П. Горячкин. - М.: Колос, 1968. - Т. I. - 508 с.
22. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды Москва, Наука, 1979. - 384 с.
23. Ребиндер, П.А. Разрушение и обработка твердых тел. Сорена, 1940. № 12. С. 9–12.

24. Василенко М.В., Алексейчук О.М. Теорія коливань і стійкості руху. Підручник. – Київ: Вища школа, 2004. – 525 с.
25. Глебов Л.А., Газмаев Г. Гранулометрический состав измельченного зерна. Комбикормовая промышленность. 1997. №8. С. 15-16.
26. Ржаницын А.Р. Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени. М. Л. : Гостехиздат, 1949. 252 с.