

ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

рівня вищої освіти «Магістр» на тему:

**Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів
обладнання для підготовки зерна до згодовування**

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-3-24
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Макаров Віталій Олександрович

Керівник: _____ Білоус Ілля Михайлович

Рецензент: _____ Садченко Роман Вікторович

Дніпро 2025

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис) (прізвище, ініціали)

«24» жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Макарову Віталію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів обладнання для підготовки зерна до згодовування

керівник роботи: Білоус Ілля Михайлович, доктор філософії

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від
«24» жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025 р.

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

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз стану питання. 2. Теоретичне обґрунтування параметрів дробарки. 3. Експериментальні дослідження дробарки. 4. Охорона праці. 5. Техніко-економічна оцінка. Загальні висновки. Бібліографічний список

5. Перелік демонстраційного матеріалу

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-5	Білоус І.М., ст. викл.		
Нормоконтроль	Івлєв В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 24.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 01.10.2025 р.	
2	Теоретичний	до 20.10.2025 р.	
3	Експериментальний	до 09.11. 2025 р.	
4	Охорона праці	до 19.11. 2025 р.	
5	Економічний	до 26.11. 2025 р.	
6	Демонстраційна частина	до 30.11. 2025 р.	

Студент

(підпис)

Макаров В.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Білоус І.М.

(прізвище та ініціали)

Макаров В.О. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів обладнання для підготовки зерна до згодовування /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

У дипломній роботі розглянуто підвищення ефективності подрібнення пророщеного висушеного зерна шляхом розроблення подрібнювача з комбінованою дробильною камерою, у якій поєднано молотковий та ножовий барабани. Об'єктом дослідження є процес подрібнення пророщеного зерна у технології приготування комбикормів, предметом – конструктивно-режимні параметри подрібнювача та їхній вплив на гранулометричний склад продукту, енергоємність і продуктивність. Запропоновано конструкцію подрібнювача, побудовано теоретичні залежності для оцінки продуктивності й енергоємності в шарах дії молотків і ножів, обґрунтовано раціональні параметри робочих органів. Проведено багатофакторні експериментальні дослідження, встановлено, що застосування двох типів робочих органів забезпечує частку цільової фракції понад 93 % при енергоємності подрібнення 5,8–7,2 кВт·год/т і продуктивності 0,52–0,54 т/год. Економічні розрахунки показали зниження питомих експлуатаційних витрат порівняно з дробаркою-аналогом та строк окупності інвестицій менше одного року, що підтверджує доцільність впровадження розробленого подрібнювача у виробництво.

Ключові слова: пророщене зерно, подрібнювач кормів, комбінована дробильна камера, молотковий барабан, ножовий барабан, гранулометричний склад, модуль помелу, енергоємність подрібнення, продуктивність подрібнювача

ЗМІСТ

Вступ	8
1 Аналіз стану питання	11
1.1 Класифікація способів та технічних засобів для подрібнення зерна	11
1.2 Аналіз технічних рішень дробарок	12
1.3 Використання пророщеного зерна для годівлі сільськогосподарських тварин	31
1.4 Аналіз стану досліджень	33
1.5 Висновки	34
2 Теоретичне обґрунтування параметрів дробарки	36
2.1 Опис запропонованої конструкції	36
2.2 Загальна постановка задач теоретичних досліджень	38
2.3 Обґрунтування конструктивних параметрів дробарки	41
2.4 Обґрунтування продуктивності дробарки	46
2.5 Розрахунок енергетичних показників процесу подрібнення	49
2.6 Висновки	51
3 Експериментальні дослідження дробарки	53
3.1 Загальна будова та принцип дії запропонованої дробарки	53
3.2 Результати експериментальних досліджень оцінки розміру подрібнених частинок	56
3.3 Результати експериментальних досліджень енергоємності процесу подрібнення та продуктивності дробарки	57
3.4 Висновки	60
4 Охорона праці	61
4.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі з подрібнювачем	61

4.2	Оцінка з точки зору охорони праці розробленого подрібнювача	62
4.3	Проект інструкції з охорони праці оператора подрібнювача	62
4.4	Висновки	65
5	Техніко-економічна оцінка	67
	Загальні висновки	70
	Бібліографія	72
	Додатки	74

ВСТУП

Сучасний розвиток тваринництва вимагає інтенсивного використання високоякісних повноцінних кормів, здатних забезпечити високі прирости живої маси та продуктивність тварин при одночасному зниженні собівартості продукції. Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності годівлі є використання у складі комбікормів пророщеного зерна, яке характеризується підвищеною перетравністю, вмістом біологічно активних речовин, ферментів та вітамінів. Однак для його повноцінного використання в технології приготування кормів необхідно забезпечити заданий гранулометричний склад та однорідність помелу, що безпосередньо залежить від конструкції та режимів роботи подрібнювального обладнання.

Більшість серійних молоткових дробарок розроблені для подрібнення сухого зерна та традиційних кормових компонентів. Вони не враховують специфічні властивості пророщеного зерна, яке має неоднорідну структуру: щільну зернівку та волокнистий росток. У результаті подрібнення на звичайних дробарках формується широкий гранулометричний склад, зростає частка переподрібненої фракції та пилу, збільшуються енерговитрати, погіршується технологічна придатність і споживні властивості готового корму. Водночас спеціалізовані промислові подрібнювачі, адаптовані саме до пророщеного зерна, практично відсутні, що зумовлює актуальність розроблення нових технічних рішень.

Перспективним напрямом підвищення ефективності подрібнення пророщеного зерна є застосування комбінованих робочих органів, що поєднують ударну дію молотків на зернівку та різання ростків ножами. Таке поєднання в одній дробильній камері з відповідно підібраними конструктивно-режимними параметрами дозволяє цілеспрямовано впливати на різні структурні елементи продукту, забезпечуючи необхідну однорідність помелу при зниженні енергоємності процесу. Це потребує наукового обґрунтування геометричних параметрів робочих органів, режимів їх роботи та побудови математичних

моделей, що описують взаємозв'язок між конструкцією подрібнювача, характеристиками продукту та якістю подрібнення.

Об'єктом дослідження в дипломній роботі є процес подрібнення пророщеного висушеного зерна у кормовиробництві. Предметом дослідження є конструктивно-режимні параметри подрібнювача пророщеного зерна з комбінованою дробильною камерою (молотковий та ножовий барабани) та їхній вплив на гранулометричний склад продукту, енергоємність процесу й продуктивність установки.

Метою дипломної роботи є підвищення ефективності подрібнення пророщеного зерна шляхом наукового обґрунтування конструктивно-режимних параметрів подрібнювача з комбінованою дробильною камерою, розроблення його конструкції, перевірки працездатності в умовах експерименту та оцінки економічної доцільності впровадження.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

- виконати аналітичний огляд існуючих способів і технічних засобів подрібнення зерна та встановити їхні можливості й обмеження щодо подрібнення пророщеного зерна;
- розробити конструкцію подрібнювача з комбінованою дробильною камерою, у якій поєднано молотковий і ножовий барабани, та обґрунтувати вибір основних конструктивних параметрів;
- побудувати теоретичні залежності для оцінки продуктивності, енергоємності та якості подрібнення в шарах дії молотків і ножів, визначити раціональні параметри робочих органів (товщину молотків, кут загострення та геометрію ножів, відстань між ножами, діаметр барабанів, частоти їх обертання);
- створити та описати експериментальну установку, розробити методику проведення багатofакторних досліджень, визначення гранулометричного складу, модуля помелу, енергоємності та продуктивності подрібнювача;
- провести серію експериментальних досліджень, встановити вплив основних конструктивно-режимних параметрів на показники подрібнення пророщеного зерна, визначити оптимальні діапазони їх зміни;

– виконати техніко-економічне обґрунтування застосування розробленого подрібнювача в технологічних лініях підготовки кормів порівняно із серійною дробаркою-аналогом.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні конструкції подрібнювача пророщеного зерна, що забезпечує підвищену однорідність помелу та зниження енергоємності процесу, а також у можливості використання отриманих теоретичних залежностей і експериментальних даних для модернізації існуючого обладнання кормоцехів і проектування нових машин для комбикормової промисловості та тваринницьких підприємств.

1 Аналіз стану питання

1.1 Класифікація способів та технічних засобів для подрібнення зерна

Оснoву комбiкормiв становить належним чином пiдготовлене зернове зерно, а також рiзні кормові добавки й премікси. Технологiчний процес пiдготовки зернової частини комбiкорму включає послiдовні операції: очищення зерна вiд домішок, подрiбнення, дозування окремих компонентiв у змiшувач згiдно з рецептом, змiшування та облiк готового комбiкорму.

Машини для подрiбнення кормової сировини розрiзняють за принципом дії; вони можуть бути унiверсальними або спеціалiзованими. У вальцьових млинах матерiал затягується в зазор мiж вальцями, де й вiдбувається його руйнування. Вальці обертаються з рiзними кутовими швидкостями, а кiнцевий розмiр продукту регулюють змiною зазору мiж ними. У жорнових млинах один жорнов обертається вiд приводу, а другий — за рахунок сил тертя мiж подрiбнюваним продуктом i ведучим жорновом. Такий принцип подрiбнення реалiзують у жорнових млинах.

У плющилках застосовують подiбну схему, але на виході отримують не борошно, а сплющені у пластiвці зерна. Товщина пластiвцiв залежить вiд зазору мiж плющильними вальцями та вологості продукту.

Пiд час подрiбнення зерна значно зростає сумарна площа поверхні частинок. Завдяки цьому в шлунково-кишковому тракті тварин такі частинки бiльшою площею контактують iз шлунковим соком, що пiдвищує ступiнь засвоєння поживних речовин. Водночас надмірне подрiбнення може спричинити порушення роботи травного тракту. Кiнцевий розмiр частинок комбiкорму повинен вiдповiдати виду та вiковій групі тварин. Орієнтовно:

- для свиней розмiр частинок має становити близько 0,9–1,4 мм;
- для птиці — приблизно 1,8–2,5 мм;
- для великої рогатої худоби як компонента в раціонах — близько 1,0–1,9

мм.

Якість подрiбненого продукту оцінюють не лише за питомими енерговитратами та модулем помелу, а й за вмістом пилоподiбної фракції

(частинок менше 0,25 мм). Надмірна кількість пилу свідчить про переподрібнення, що призводить до зростання енергоємності процесу.

Для досягнення необхідних кінцевих розмірів зерно подрібнюють у дробарках різних типів. Якщо вихідний матеріал містить великі грудки, спочатку виконують попереднє подрібнення, а потім основне.

Найбільшого поширення набули молоткові дробарки завдяки простоті конструкції та високій надійності. Їх застосовують для подрібнення зерна, шроту, жому. Підбираючи решета з певним діаметром отворів, можна регулювати необхідний розмір частинок. Залежно від вологості, міцності та інших властивостей матеріалу продуктивність і енергоємність молоткових дробарок змінюються у широкому діапазоні. Водночас до їхніх недоліків належить неоднорідність гранулометричного складу готового продукту.

Роботу подрібнювального обладнання вважають задовільною, якщо забезпечується заданий кінцевий розмір частинок. Наприклад, ячмінь слід подрібнювати так, щоб вміст фракції, що проходить крізь сито з отворами до 0,2 мм, не перевищував 10 %.

Зниження енергоємності процесу подрібнення пов'язане з удосконаленням камери подрібнення та раціональним вибором робочих органів з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалу. Важливо забезпечити мінімальну довжину холостих траєкторій частинок у камері подрібнення. Для продуктів із неоднорідною структурою доцільно застосовувати різні робочі органи залежно від характеру сировини.

1.2 Аналіз технічних рішень дробарок

Робота агрегатів для приготування кормів полягає у впливі на кормову сировину різними способами: температурою, вологістю, тиском, а також механічними діями — зусиллям від ножів, молотків та інших робочих органів. Застосування цих способів змінює форму, розміри й фізико-механічні властивості вихідної сировини, що використовується для виробництва кормів.

Механічна підготовка вихідного матеріалу є однією з ключових стадій. У процесі подрібнення збільшується сумарна площа поверхні частинок, тому при подальшій обробці, наприклад тепловій, вони інтенсивніше взаємодіють із робочим середовищем, що дає змогу зменшити витрати теплоносія.

На рисунку 1.1 наведено класифікацію дробарок зерна.

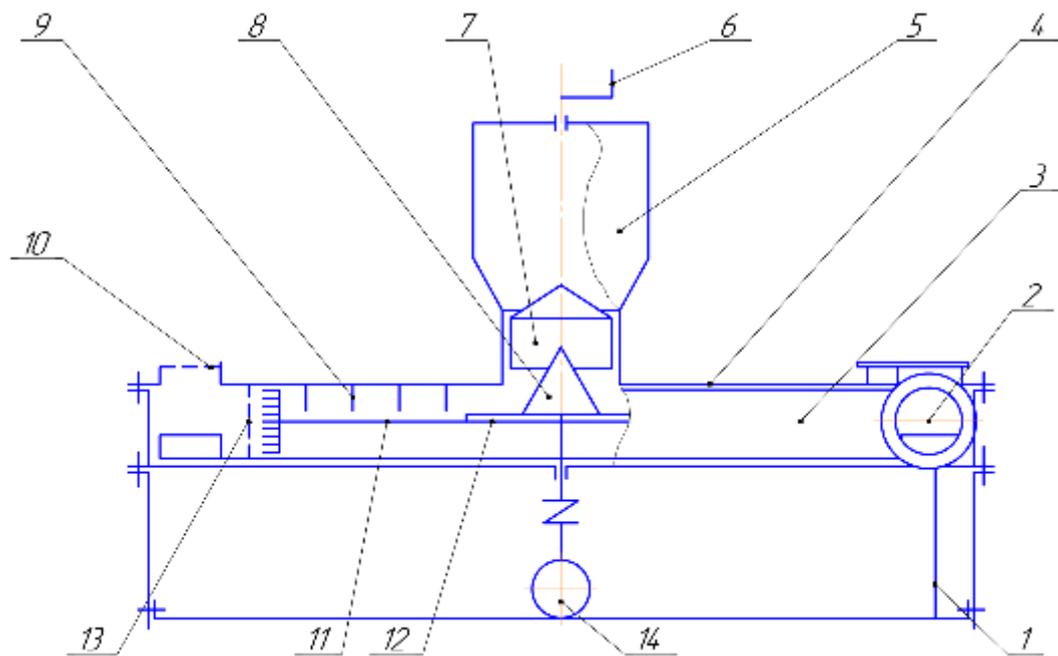


Рисунок 1.1 – Класифікація дробарок пророщеного зерна

Для підготовки зерна до згодовування використовують, зокрема, такі способи, як плющення та дроблення. Під час плющення отримують плоскі

пластівці товщиною орієнтовно 0,5–1 мм. Такі пластівці зазвичай мають вологість понад 14 %. Однак для тривалого зберігання зерна або його використання як компонента комбікорму вологість не повинна перевищувати приблизно 14 %.

За дроблення зерна його руйнування відбувається шляхом удару молотків. Кінцевий продукт подрібнення — це фракції розміром від часток міліметра до кількох міліметрів. Особливістю пророщеного зерна є наявність як власне зерна, так і зеленої прорості. Для подрібнення сухого зерна з вологістю не більше 14 % зазвичай застосовують ударну дію молотків: сила удару та внутрішні напруження, що виникають у матеріалі, перевищують сили молекулярного зв'язку, унаслідок чого відбувається руйнування зернини. Для подрібнення зеленої маси використовують переважно спосіб різання з застосуванням ножів.



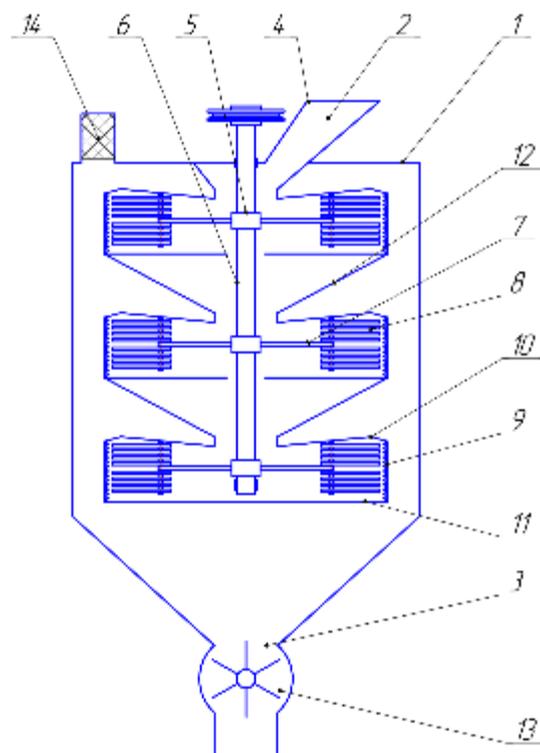
1 – рама; 2 – патрубок; 3 – робоча камера; 4 – кришка; 5 – бункер; 6 – привід; 7 – циліндрична обичайка; 8 – конус; 9 – штифт; 10 – повітрязабірник; 11 – диск; 12 – магнітне кільце; 13 – решето; 14 – електродвигун.

Рисунок 1.2 – Дробарка зерна

Відома конструкція дробарки зерна, зображена на рисунку 1.2. Продукт подають у завантажувальний бункер, звідки він під дією сили тяжіння потрапляє на конус і рівномірно розподіляється по його периферії, після чого надходить на диск, що обертається від електродвигуна. Перебуваючи на рухомому диску, зернова маса взаємодіє зі штифтами, внаслідок чого відбувається її подрібнення. Далі, під дією відцентрових сил, подрібнений матеріал проходить крізь отвори решета.

Недоліком цієї конструкції є те, що штифти розташовані на значній відстані один від одного, що не дає змоги отримувати дрібну фракцію подрібненого продукту.

Робота наступної дробарки (рисунок 1.3) відбувається так. Електродвигун через клинопасову передачу приводить в обертання ротор 5, на якому розміщені робочі органи.



1 – стінка корпусу; 2 – завантажувальний патрубков; 3 – розвантажувальний отвір; 4 – бункер; 5 – ротор; 6 – приводний вал; 7 – розгінні диски; 8 – молоток; 9 – дека; 10, 11 – решето; 12 – похила поверхня; 13 – лопатевий дозатор; 14 – фільтрувальний елемент.

Рисунок 1.3 – Багатоступенева дробарка

Продукт, що підлягає подрібненню, завантажують у бункер 4, звідки він скочується по похилій поверхні до центру розгінного диска першого ступеня подрібнення. Перебуваючи на розгінному диску, матеріал під дією відцентрових сил переміщується від центра диска 7 до периферії, де взаємодіє з молотками 8 і декою 9, у результаті чого відбувається руйнування частинок. Частинки, відкинуті від деки 9, повторно потрапляють у зону дії рухомих молотків. Подрібнення здійснюється за рахунок послідовного проходження маси через кілька ступенів робочих органів.

Проміжне накопичення подрібненого або частково подрібненого матеріалу відбувається в дробильній камері. Розгінні диски 7 і молотки 8 створюють висхідний потік повітря, який через верхній сепаратор 10 подає подрібнений матеріал з камери подрібнення у внутрішній простір корпусу 1. У середню дробильну секцію повертається більш крупна фракція, що не пройшла через сепаратор.

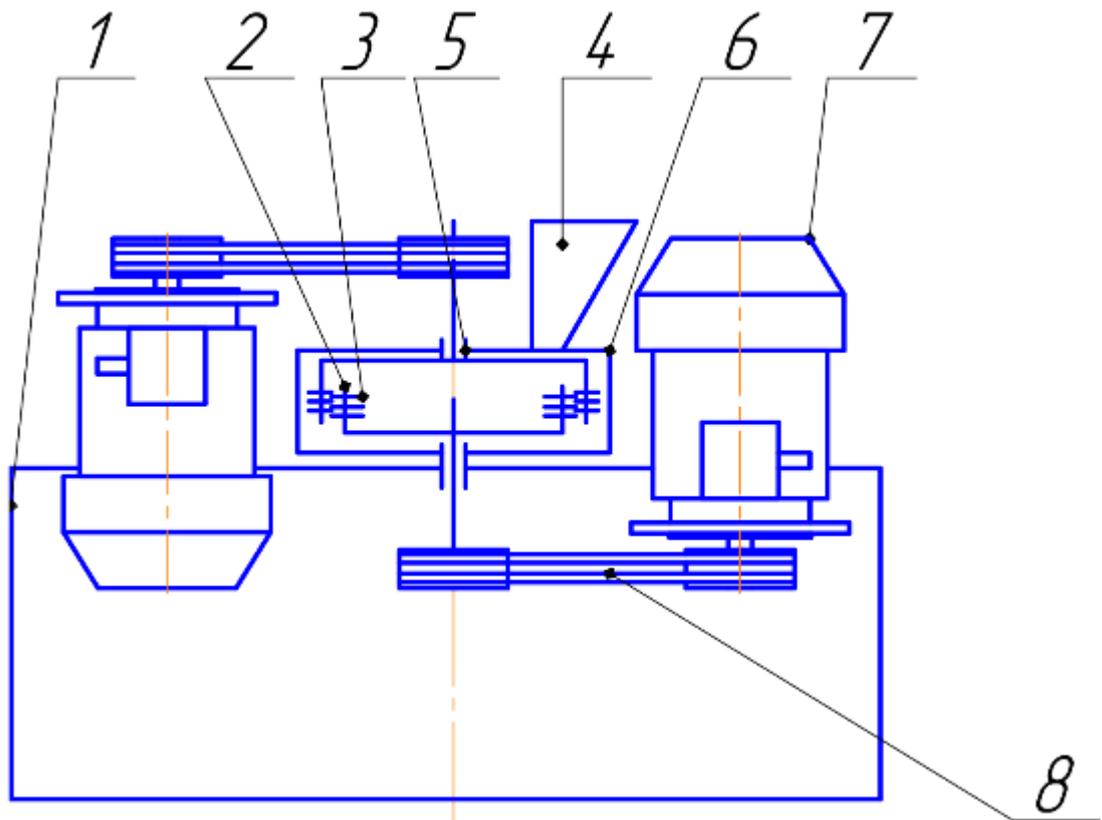
Середня дробильна секція працює аналогічно верхній. Після проходження третього ступеня подрібнення продукт затримується на похилій поверхні, поступово скочується вниз, накопичується перед розвантажувальним отвором і за допомогою лопатевого дозатора вивантажується з дробарки. Повітря, насичене дрібними частинками, проходить через фільтр, після чого очищеним виходить в атмосферу.

Недоліком цієї конструкції є те, що в процесі подрібнення маса проходить через кілька роторів, що призводить до пере-подрібнення продукту. Крім того, при роботі молотків виникають значні осьові навантаження, які прискорюють їх знос. Наявність трьох роторів на одному валу ускладнює балансування, через що агрегат схильний до підвищених вібрацій.

Відома ударно-відцентрова дробарка з двома зустрічно обертовими, співвісно розташованими роторами.

Конструкція установки включає раму 1, опорну плиту та робочі органи у вигляді двох зустрічно обертових роторів 2 і 3. На кожному роторі в чотири ряди шарнірно закріплені молотки. Ротори змонтовані в кожусі дробильної камери.

Вигрузний патрубок на кожусі виконаний тангенціально, а завантажувальне вікно приймального бункера — у вигляді чотирьох сегментних пазів.



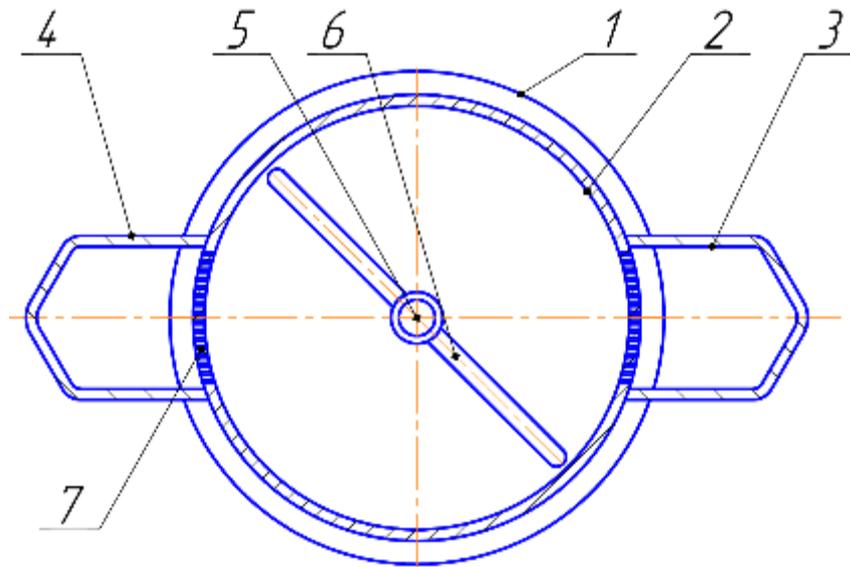
1 – рама; 2 – ротор; 3 – подрібнювальний елемент; 4 – приймальний бункер; 5 – опора; 6 – кришка; 7 – електродвигун; 8 – клинопасова передача.

Рисунок 1.4 – Ударно-відцентрова дробарка

Ротори розташовані так, що молотки зовнішнього ротора заходять у проміжки між молотками внутрішнього. Таким чином утворюються дві активні зони інтенсивного подрібнення. Опора зовнішнього ротора встановлена на кришці дробильної камери, а внутрішнього — на опорній плиті рами.

Недоліком такої конструкції є дуже високі вимоги до точності взаємного розташування роторів. За найменшого порушення співвісності можливе зіткнення молотків, що призведе до серйозних аварійних пошкоджень дробарки.

У цій конструкції (рисунок 1.5) корпус 1 оснащено обичайками 2, розвантажувальними патрубками 3 і 4, валом 5 із робочим органом 6 та решітчастою вставкою 7.



1 – корпус; 2 – обичайки; 3, 4 – розвантажувальний патрубок; 5 – вал; 6 – робочий орган; 7 – решітчаста вставка.

Рисунок 1.5 – Дробарка кормів

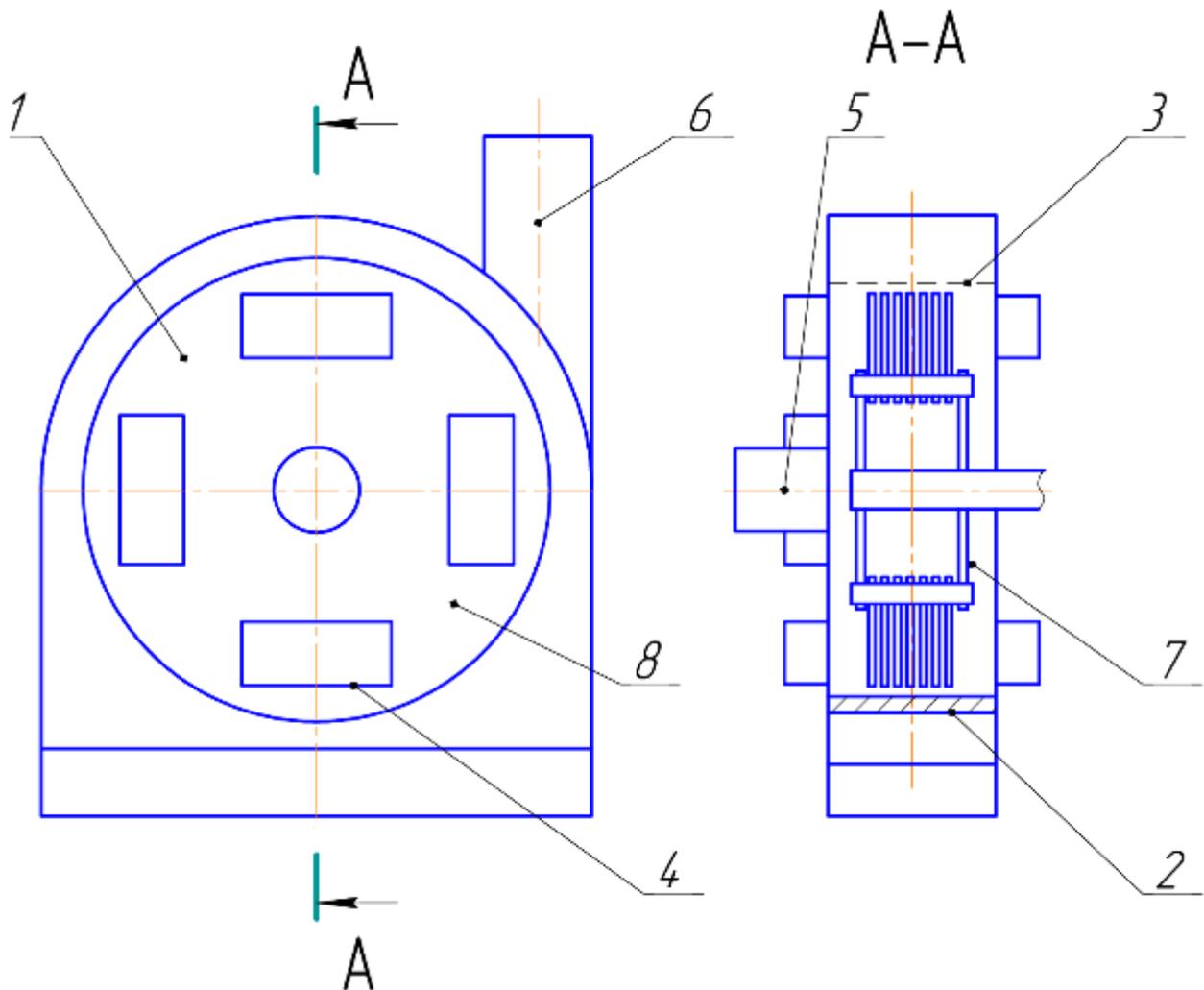
На валу закріплено ротор із робочими елементами. Обичайка змонтована нерухомо відносно ротора і закрита кришкою для запобігання потраплянню сторонніх предметів. Вона виконана у вигляді циліндра, на твірній якого розташовано отвори, закриті змінними решетами. Розвантажувальні патрубки встановлені за решітчастими вставками. Щоб зменшити пере-подрібнення, отвори решіт мають різний діаметр.

Робота дробарки відбувається так: спочатку вмикають привід і виводять частоту обертання робочого органа на номінальне значення без навантаження. Потім у дробильну камеру подають матеріал, який багаторазово взаємодіє з робочим органом і обичайкою, у результаті чого відбувається подрібнення до заданого розміру.

Недоліком є висока нерівномірність ступеня подрібнення. Робочий орган виконаний у вигляді планки, що призводить до підвищених питомих енерговитрат на подрібнення.

Конструкцією молоткової дробарки (рисунок 1.6) передбачено розташування по боках основної дробильної камери 1 двох вихрових камер 4, де

формується додаткові повітряні потоки. У камері також розміщені дека 2, решето 3, завантажувальна 5 та розвантажувальна 6 горловини, молотковий ротор 7 і бічна стінка 8.



1 – дробильна камера; 2 – дека; 3 – решето; 4 – вихрова камера; 5 – завантажувальна горловина; 6 – розвантажувальна горловина; 7 – молотковий ротор; 8 – бічна стінка.

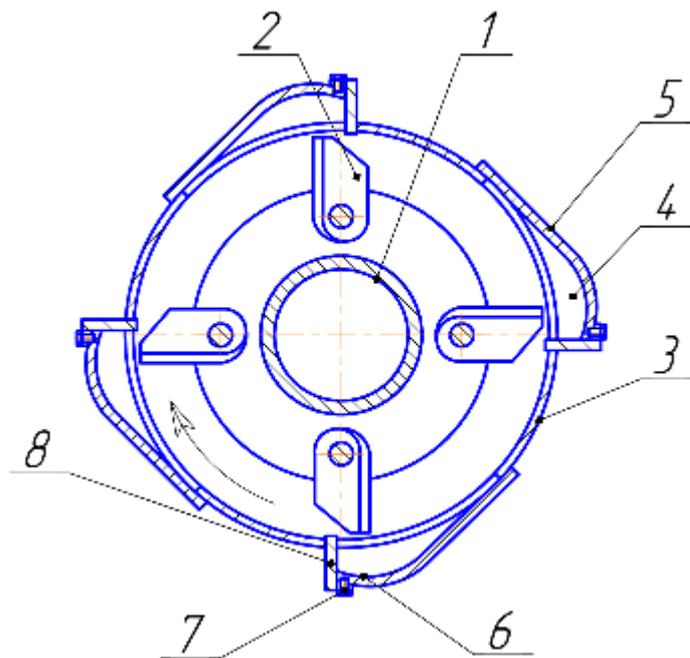
Рисунок 1.6 – Молоткова дробарка

Спочатку без навантаження вмикають привід дробарки й доводять частоту обертання молоткового ротора до номінальної. Потім подають сировину. Молотки ротора одночасно подрібнюють продукт і створюють потік повітря. Матеріал взаємодіє з молотками, решетом і декою, потрапляє у вихрові камери, де змінює напрям руху, а потім знову повертається в зону дії молотків. Багаторазова циркуляція забезпечує інтенсивне подрібнення. Після досягнення

необхідного розміру частинок продукт проходить крізь отвори решета та виводиться з дробарки.

Недоліком цієї конструкції є можливість налипання частинок матеріалу на внутрішніх поверхнях вихрових камер, що знижує ефективність роботи дробарки.

Дробарка з вихровою камерою (Міхлін, Фаянс). У ще одній конструкції дробарки (рисунок 1.7) використано камеру подрібнення 3 із приєднаною вихровою камерою 4. У центрі розміщено ротор 1 з робочим органом 2. Стіни 5, 8 та кутова частина 6 формують зону, де різко змінюється траєкторія руху частинок.



1 – ротор; 2 – робочий орган; 3 – камера подрібнення; 4 – вихрова камера; 5 – стінка; 6 – кутова частина; 7 – гвинт; 8 – стінка.

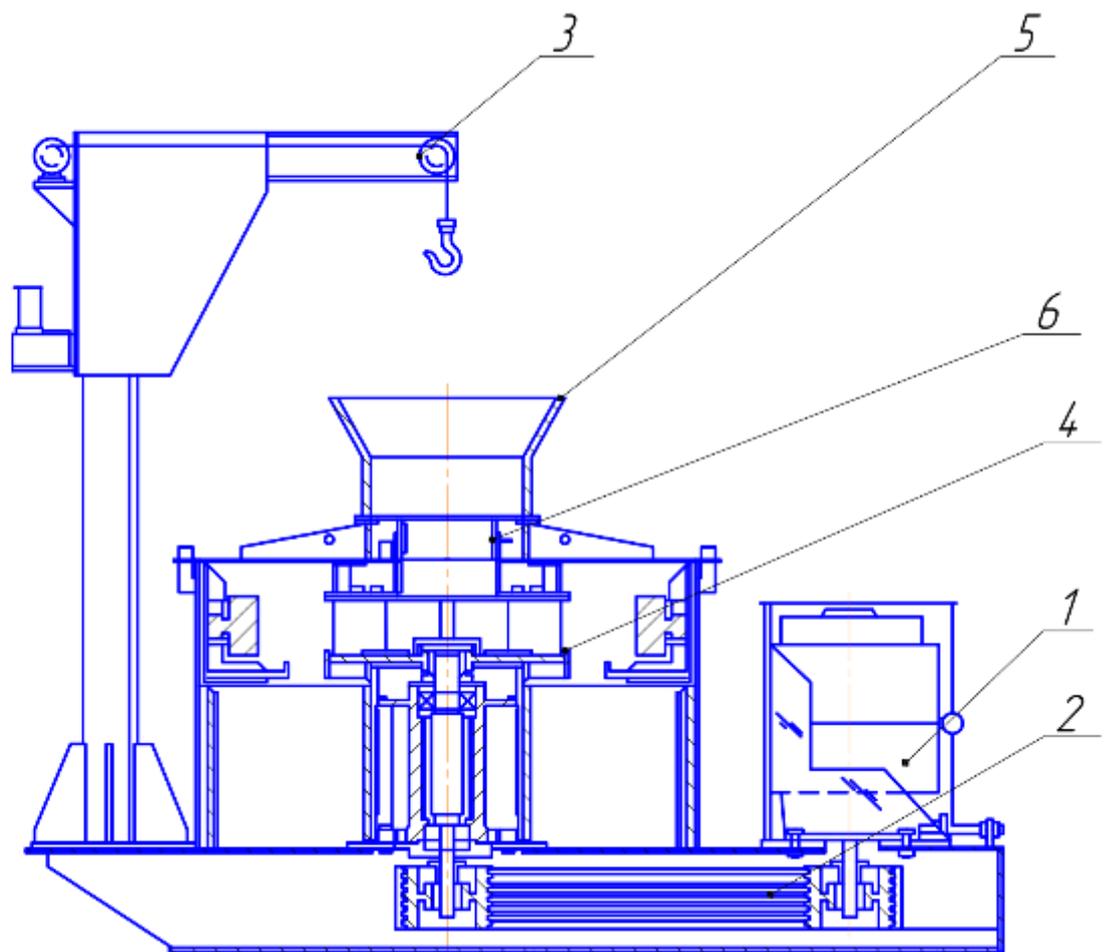
Рисунок 1.7 – Дробарка

Після виходу ротора на робочі оберти завантажують продукт. При взаємодії зі робочими органами матеріал набуває кінетичної енергії та рухається до периферії камери під дією відцентрових сил. Далі він ковзає вздовж стінки, потрапляє в зону з кутом повороту близько 90° , різко гальмується, змінює

напрям руху й знову спрямовується до ротора. Цей цикл повторюється багаторазово, поки частинки не досягнуть заданого розміру.

Недоліком є те, що матеріал, потрапляючи на робочі органи, відкидається до периферії під кутом, відмінним від розрахункового, і значна частина енергії витрачається на ковзання, а не на руйнування. У кутах вихрових камер формуються застійні зони, де накопичується продукт. Це призводить до виходу частинок не в напрямку центра камери, а по дотичній, що погіршує якість подрібнення.

Вертикальна ударна дробарка з кільцевим сегментом (EP0261913). Вертикальна ударна дробарка (рисунки 1.8, 1.9) включає привід 1, клинопасову передачу 2, механізм подачі 3, дробильну камеру 4 циліндричної форми, завантажувальний бункер 5 та направляючу трубу 6.

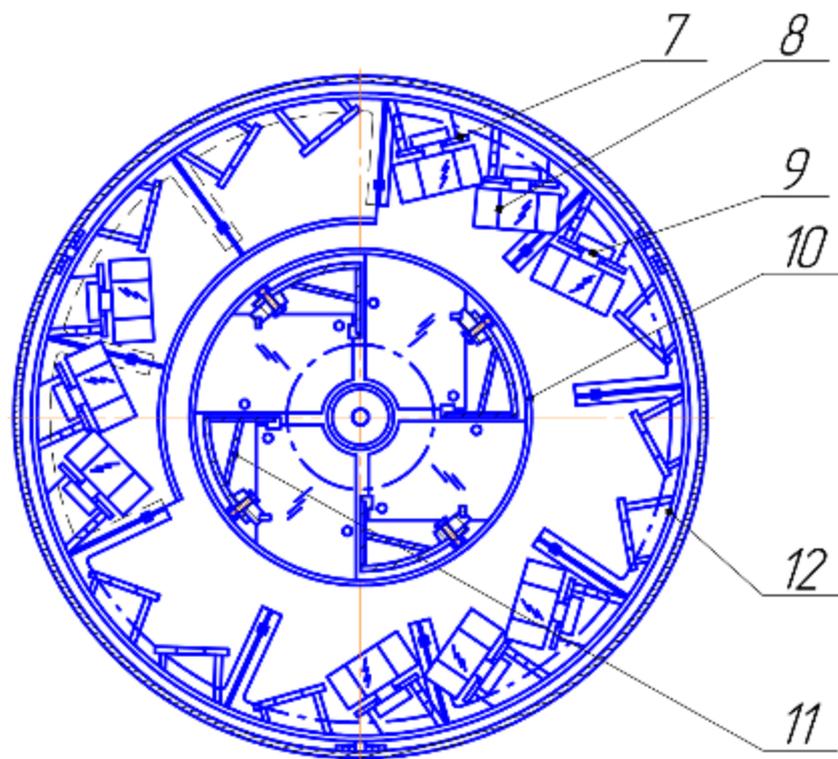


1 – привід; 2 – клинопасова передача; 3 – механізм завантаження; 4 – дробильна камера; 5 – завантажувальний бункер; 6 – направляюча труба.

Рисунок 1.8 – Вертикальна дробарка EP0261913

Ротор 10 із кільцем 12 показано на рисунку 1.9. На кожному кронштейні 7 змонтовано молоток 8, що складається з восьмигранної робочої головки та квадратної частини кріплення 9. Крепильна частина і голівка симетричні відносно осі, яка утворює кут $\alpha \approx 5-15^\circ$ із дотичною до ротора 10.

Під час роботи матеріал безперервно подають у завантажувальний бункер 5, далі — через направляючу трубу 6 у центр ротора 10. Ротор обертається зі швидкістю приблизно 900–1800 об/хв, розганяє матеріал і викидає його в радіальному напрямку в кармани 11.



7 – кронштейн; 8 – молоток; 9 – кріплення; 10 – ротор; 11 – карман; 12 – кільце.

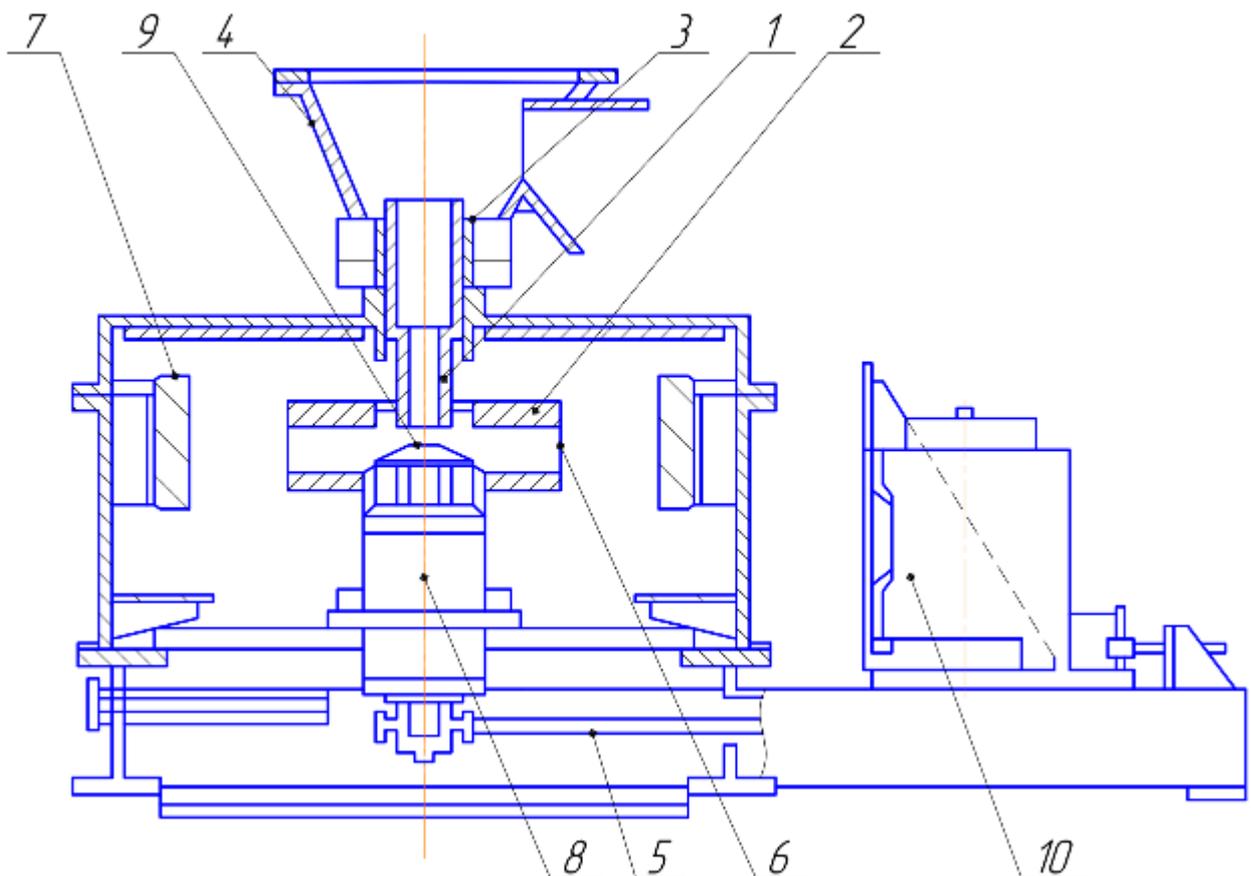
Рисунок 1.9 – Ротор дробарки з кільцем

З карманів 11 матеріал подається до молотків 8 і рухається під кутом близько $5-15^\circ$ до дотичної траєкторії ротора. При ударі об молоток майже вся кінетична енергія передається частинкам матеріалу, а втрати на рикошет є незначними.

Недоліком цієї конструкції є нерівномірний розподіл матеріалу за висотою дробильної камери, що призводить до неоднорідності процесу подрібнення та нерівномірного зносу робочих органів.

У 1992 році Окава Кoji запропонував конструкцію дробарки з вертикальним валом, яку можна використовувати для подрібнення зерна та інших сипких матеріалів (рисунок 1.10).

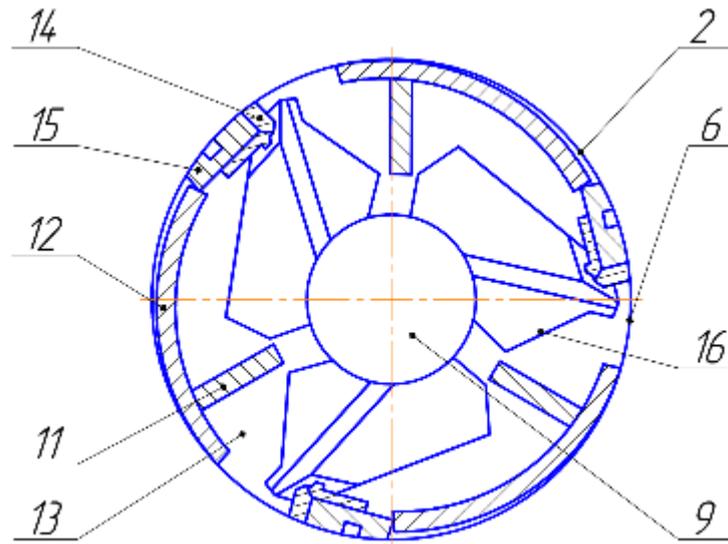
Дробарка містить вертикальний вал 1, установлений у підшипниковому блоці живильника 3, розташованому у верхній центральній частині, та бункер 4.



1 – вертикальний вал; 2 – ротор; 3 – живильник; 4 – бункер; 5 – клинопасова передача; 6 – розвантажувальний отвір; 7 – молоток; 8 – підшипниковий блок; 9 – центральний розподільник; 10 – електродвигун.

Рисунок 1.10 – Дробарка з вертикальним валом JP4110050

На нижньому диску ротора 2 (рисунок 1.11) розташовано три лопаті 11, розміщені під однаковими кутами. Лопаті 11 закріплені на внутрішній поверхні стінок 12.



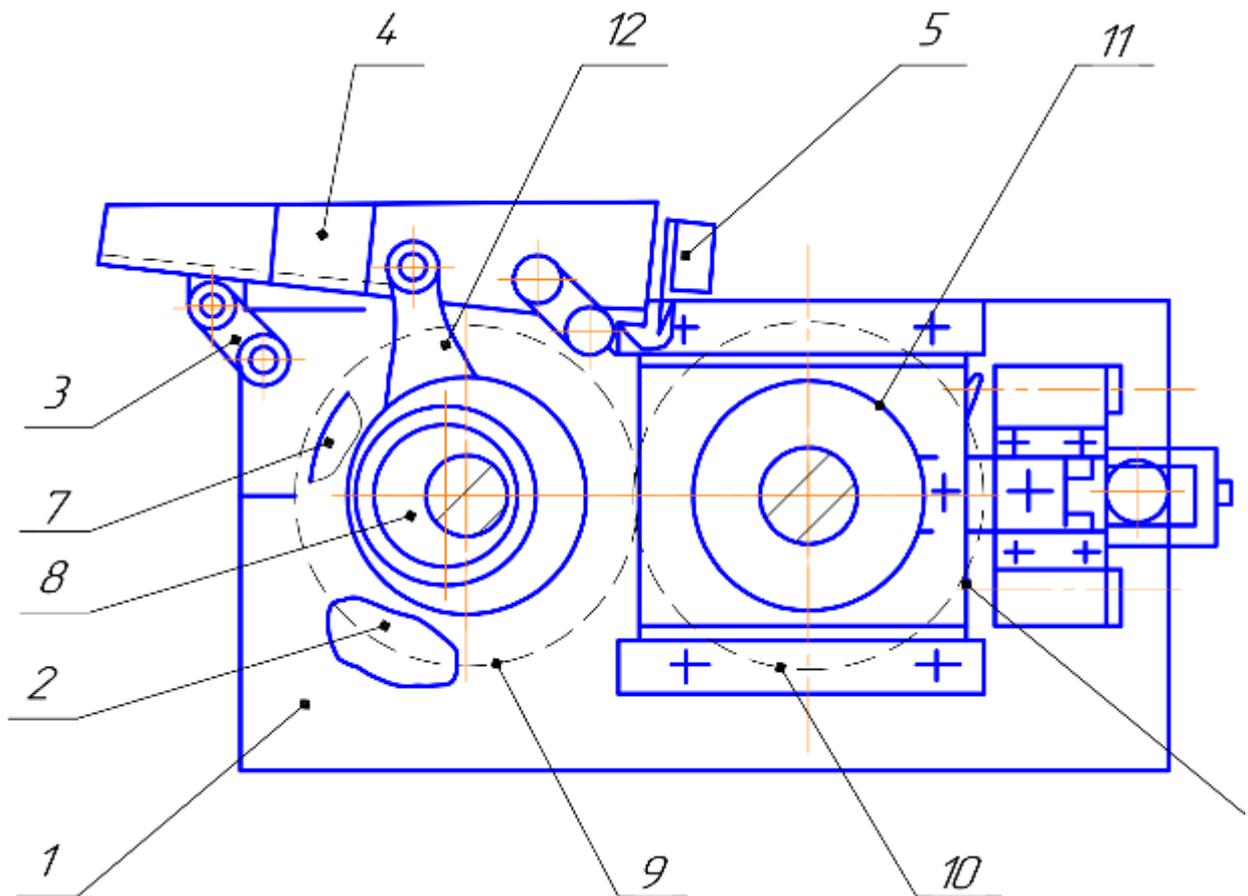
11 – лопаті; 12 – стінка; 13 – диск; 14 – било; 15 – поворотний блок; 16 – напрямні.

Рисунок 1.11 – Ротор

Робота дробарки відбувається так. Ротор 2 обертається з великою частотою на вертикальному валу 1. Подрібнюваний матеріал із бункера 4 через канал живильника 3 надходить на ротор 2, а далі — на центральний розподільник 9. Під дією відцентрових сил матеріал притискається до внутрішньої стінки 12. Лопаті 11 запобігають проковзуванню шару матеріалу, додатково розганяють його по колу, після чого через вікна вивантаження продукт подається в зону дії молотків 7 (рисунок 1.10). У результаті виникають внутрішні напруження в частинках і відбувається їх руйнування (дроблення).

Недоліком цієї дробарки є можливе забивання внутрішнього простору ротора (простору між лопатями), а також необхідність дуже високих швидкостей обертання ротора для забезпечення гарантованого руйнування матеріалу, що зумовлює підвищену енергоємність процесу.

Конструкція наступної дробарки (рисунок 1.12) включає раму, на якій змонтовані всі робочі та допоміжні елементи. До допоміжних належать електропривід, елементи передач, важелі, редуктор, завантажувальний лоток, опорні вузли. Робочими органами є два вальці: швидкохідний і повільнохідний, між якими створено зазор для проходження матеріалу. Вальці кінематично пов'язані між собою зубчастою передачею. У верхній частині корпусу розміщено коливний завантажувальний лоток, який має невеликий нахил до горизонту, що полегшує подачу продукту до робочих органів. Сам корпус виконаний нерухомим, а подрібнення відбувається всередині нього. Щоб вібрації лотка не передавалися на фундамент, машину встановлено на віброізолюючі опори.

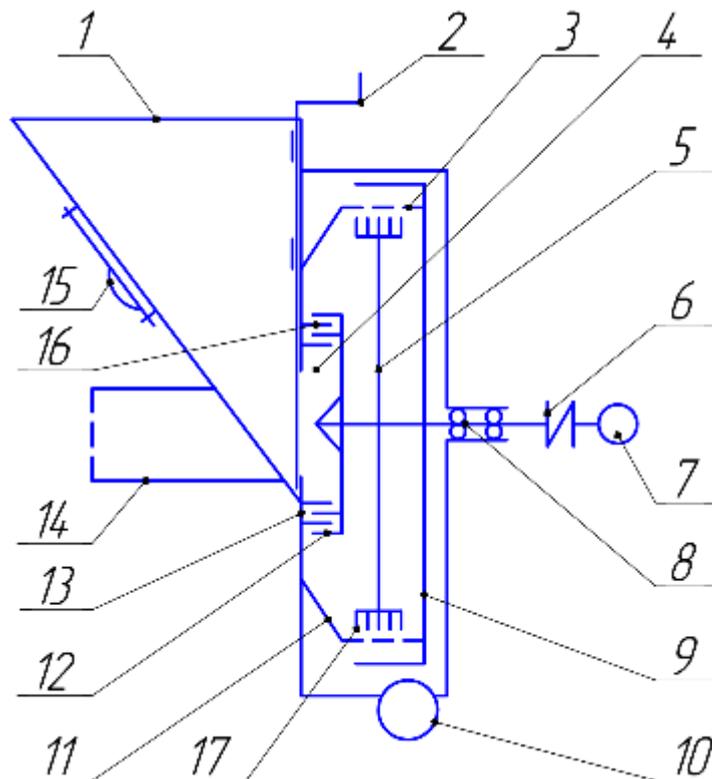


1 – нерухомий корпус; 2 – швидкохідний вальць; 3 – важіль; 4 – завантажувальний лоток; 5 – відбивач; 6 – рухомий корпус; 7 – приводний шків; 8 – ексцентрик; 9, 10 – передаточна пара шестерень; 11 – повільнохідний вальць; 12 – важіль.

Рисунок 1.12 – Вальцьова дробарка

Технологічний процес подрібнення відбувається так. На лоток подають матеріал, якому за допомогою електродвигуна й системи важелів надають коливальний рух. Під дією вібрації продукт переміщується від верхньої точки до нижньої, взаємодіє з відбивачем 5 і потрапляє в зазор між вальцями. Обертаючись від приводу через редуктор, вальці за рахунок різниці в кутових швидкостях перетирають або плющують частинки.

Недоліком цієї вальцевої дробарки є нерівномірний розподіл матеріалу по ширині робочого простору, що викликає неоднорідність ступеня подрібнення та підвищені енерговитрати. Крім того, дана конструкція фактично реалізує переважно перетирання та плющення, а не інтенсивне дроблення.



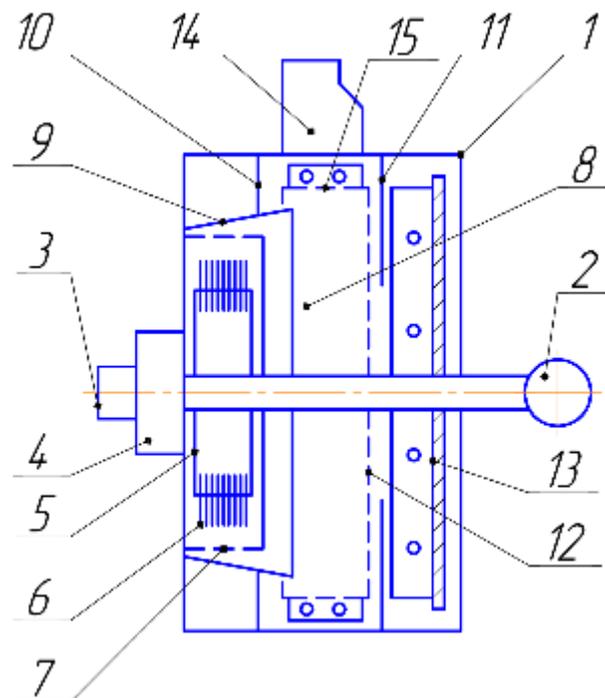
1 – бункер; 2 – заслінка; 3 – решето; 4 – робоча камера; 5 – диск; 6 – муфта; 7 – електродвигун; 8 – підшипниковий вузол; 9 – вентилятор; 10 – вихідний патрубок; 11 – дефлектор; 12 – обертовий диск; 13 – нерухомий диск; 14 – повітрязабірник; 15 – магнітний очистник; 16 – подрібнювальний штифт; 17 – молоток.

Рисунок 1.13 – Дробарка зерна

Технологічний процес у дробарці (рисунок 1.13) здійснюється так. Зерно подають у бункер 1, де магнітний очистник 15 відокремлює металодомішки, запобігаючи пошкодженню робочих органів. Через відкрту заслінку 2 продукт надходить у робочу камеру 4. Спочатку, за участю нерухомого 13 та обертового 12 дисків зі штифтами 16, відбувається попереднє подрібнення. Далі маса надходить у зону вторинного подрібнення, де під дією численних ударів молотків 17 доводиться до необхідного гранулометричного складу. Потім повітряним потоком, створюваним вентилятором 9, подрібнений продукт вноситься з робочої камери через патрубок 10.

Недоліком цієї дробарки є те, що штифти не забезпечують достатнього подрібнення ростків пророщеного зерна до заданих розмірів, унаслідок чого готова маса має неоднорідну структуру.

Дробарка зерна з сепарацією (рисунок 1.14).

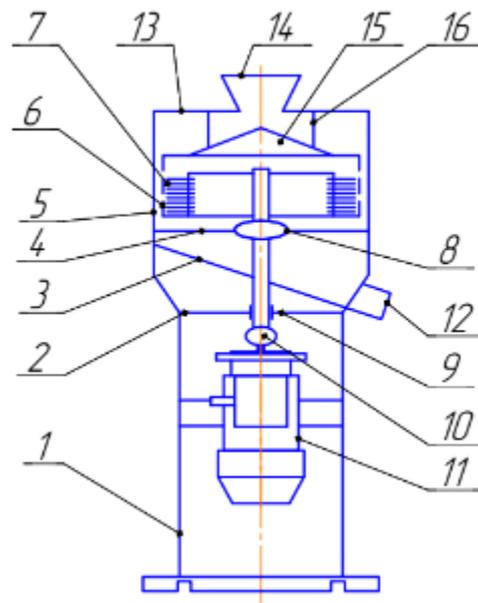


1 – корпус; 2 – електродвигун; 3 – завантажувальний патрубок; 4 – магніт; 5 – дробильна камера; 6 – ротор із молотками; 7 – сито; 8 – сепараційна камера; 9 – ребро жорсткості; 10, 11 – перегородка; 12 – сито; 13 – вентилятор; 14 – вивантажувальний патрубок; 15 – сито.

Рисунок 1.14 – Дробарка зерна з сепарацією

Робота дробарки відбувається таким чином. Через завантажувальний патрубок 3 зерно надходить у дробильну камеру 5, де при взаємодії з молотками ротора 6 руйнується і просіюється крізь сито 7. Далі подрібнена маса переміщується по ребрах жорсткості 9 у сепараційну камеру 8. Завдяки розрідженню, яке створює вентилятор 13, легкі домішки проходять крізь сито 12 і відводяться, тоді як основна дроблена фракція під дією відцентрових сил проходить через сито 15 і вивантажується через патрубок 14.

До недоліків конструкції можна віднести незручність завантаження сировини у горизонтально розташований патрубок 3, а також те, що конструкція дробильного барабана не дає змоги ефективно подрібнювати стеблові матеріали.



1 – рама; 2 – основа; 3 – похила (скатна) поверхня; 4 – спиця; 5 – дробильна камера; 6 – решето; 7 – ротор із молотками; 8 – підшипниковий вузол; 9 – опора; 10 – муфта; 11 – електродвигун; 12 – розвантажувальне вікно; 13 – кришка; 14 – завантажувальна горловина; 15 – розподільник; 16 – напрямна.

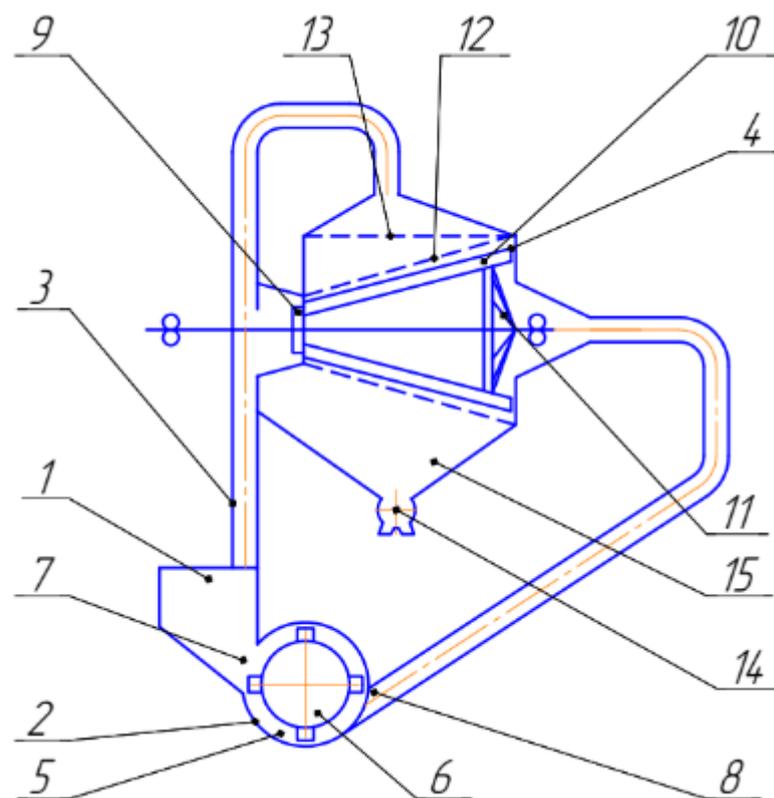
Рисунок 1.15 – Дробарка для зерна

Процес роботи відбувається так. Через завантажувальну горловину 14 продукт потрапляє на розподільник 15, а далі під дією відцентрових сил

відкидається до периферії дробильної камери 5. У зоні дії молотків ротора 7 зерно подрібнюється, після чого проходить крізь отвори решета 6, потрапляє на похилу поверхню 3 і видаляється через розвантажувальне вікно 12.

Недоліком цієї дробарки є можливе накопичення подрібненої маси на похилій поверхні 3, що призводить до забивання розвантажувального вікна 12. Крім того, верхній кінець вала, на якому закріплений дробильний барабан, не має додаткової опори, тому вал зазнає вигинальних навантажень, що знижує довговічність конструкції.

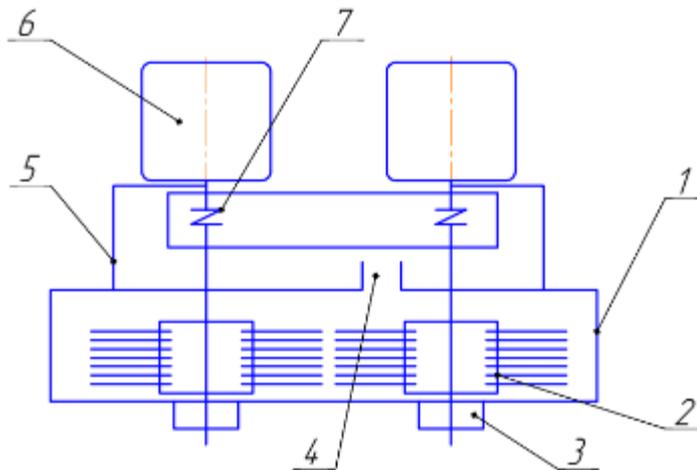
Молоткова дробарка для фуражного зерна з роздільною камерою (рисунок 1.16).



1 – бункер; 2 – корпус; 3 – трубопровід; 4 – роздільна камера; 5 – камера подрібнення; 6 – ротор; 7 – завантажувальне вікно; 8 – розвантажувальне вікно; 9 – диск; 10 – бичовий барабан; 11 – перфорований конус; 12 – решето; 13 – фільтрувальний матеріал; 14 – шибєрний (шлюзовий) затвор; 15 – бункер.

Рисунок 1.16 – Молоткова дробарка

Технологічний процес реалізується так. Зерно завантажують у бункер 1, звідки воно через вікно 7 надходить у камеру подрібнення 5. Під дією ударів молотків ротора 6 зерно руйнується. Потім повітряним потоком подрібнена маса по трубопроводу 3 подається на лопаті розкидувального конуса 11. Лопаті додатково закручують потік і спрямовують його на перфоровану конічну поверхню. Частинки, що не пройшли крізь отвори решета 12, повертаються трубопроводом 3 на повторне подрібнення. Матеріал, який пройшов крізь отвори решета, надходить у бункер 15 і через шлюзовий затвор 14 виводиться з дробарки.



1 – корпус; 2 – дробильний барабан; 3 – підшипниковий вузол; 4 – завантажувальне вікно; 5 – захисний кожух; 6 – електродвигун; 7 – муфта.

Рисунок 1.17 – Дробарка зерна

Робота дробарки відбувається так. Вмикають електродвигун 6, який через муфту 7 приводить у обертання дробильні барабани 2. Через завантажувальне вікно 4 у дробильну камеру подають зерно, що подрібнюється ударами молотків, змонтованих на барабанах.

Недоліком цієї конструкції є те, що подрібнена одним барабаном маса може повторно потрапляти на інший барабан, що призводить до переподрібнення продукту, збільшення частки пилу, відповідних втрат та зростання енергоємності процесу подрібнення.

1.3 Використання пророщеного зерна для годівлі сільськогосподарських тварин

Пророщене зерно розглядають як високобіологічний компонент раціонів, насамперед для молодняку, ремонтного поголів'я та високопродуктивних корів, свиноматок, птиці. У процесі пророщування активізуються ферментні системи зерна, частково розщеплюються крохмаль і складні білки до більш простих сполук, підвищується вміст вітамінів групи В, Е, біологічно активних речовин, ферментів і антиоксидантів. Завдяки цьому корм легше перетравлюється, поліпшується апетит тварин, зростає засвоєння поживних речовин, що позитивно позначається на приростах, молочній продуктивності та загальному стані здоров'я. Важливо також, що пророщене зерно частково компенсує дефіцит вітамінних добавок у зимово-стійловий період.

Технологія підготовки пророщеного зерна до згодовування зазвичай включає такі етапи:

- попереднє очищення та сортування зерна від домішок, пошкоджених і уражених зернин;

- замочування до досягнення вологості, необхідної для дружного проростання;

- пророщування у контрольованих умовах (температура, вологість, аерація) до отримання ростків заданої довжини;

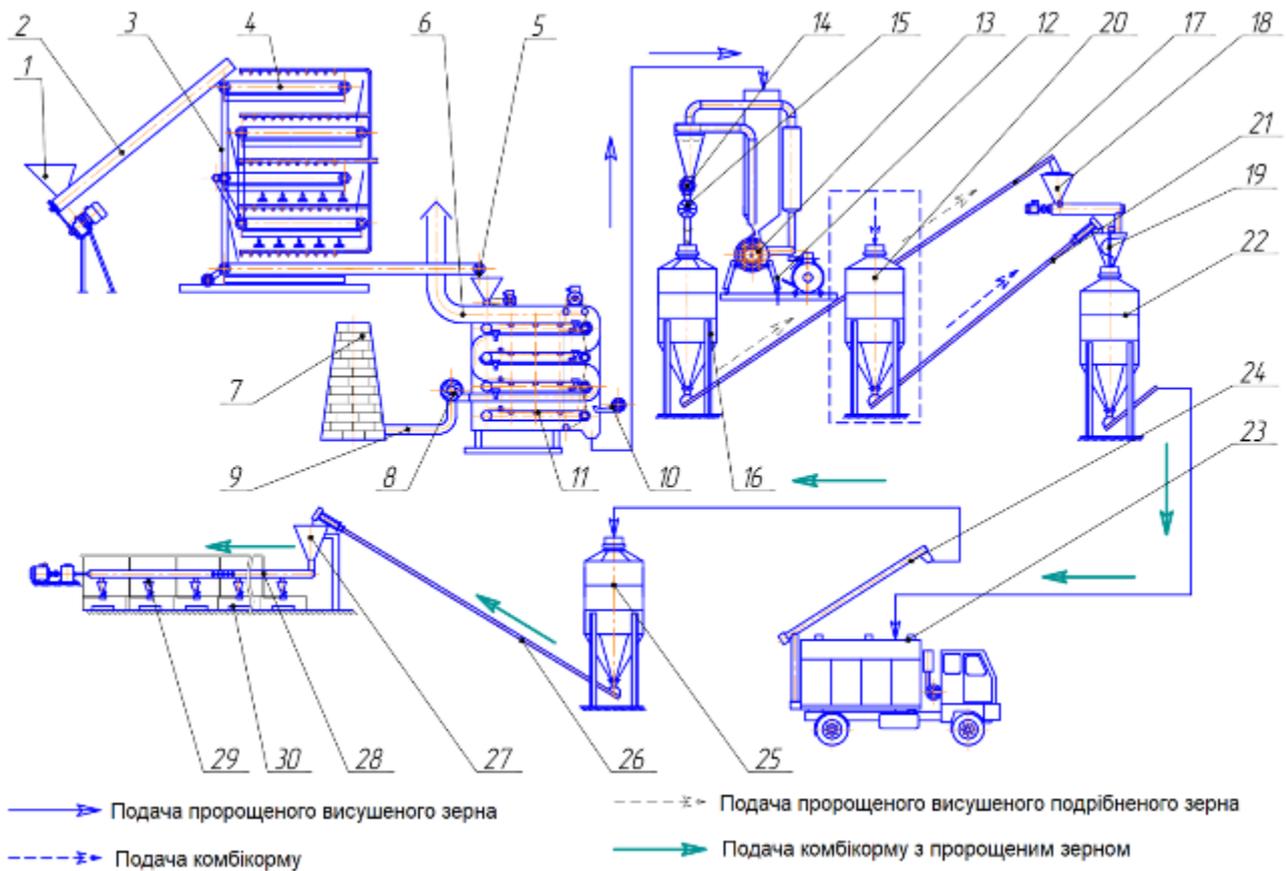
- підсушування до рівня вологості, безпечної для подальшої переробки й короткочасного зберігання;

- подрібнення з урахуванням неоднорідної структури маси (тверда зернівка + м'який росток) та змішування з комбікормом для рівномірного розподілу в раціоні.

У порівнянні з іншими технологіями підготовки зерна:

Сухе подрібнення в молоткових дробарках є найбільш простим і поширеним способом: забезпечує стабільний гранулометричний склад, невисоку собівартість та можливість механізації всіх операцій. Однак біологічна цінність

зерна при цьому практично не змінюється, вітамінний склад і ферментативна активність не зростають.



1 – бункер завантажувальний; 2 – шнек подаючий; 3 – конвеєр для пророщування зерна; 4 – транспортер стрічковий; 5 – бункер; 6 – конвеєрна сушарка; 7 – топкова; 8 – вентилятор агента сушіння; 9 – трубопровід агента сушіння; 10 – вентилятор холодного повітря; 11 – нижній транспортер; 12 – дробарка; 13 – дробильна камера; 14 – шлюзовий затвор; 15 – апарат вторинного подрібнення; 16 – бункер для пророщеного зерна; 17 – спіральний транспортер; 18 – дозатор; 19 – змішувач; 20 – бункер для комбікорму; 21 – спіральний транспортер; 22 – бункер готової суміші; 23 – автомобіль; 24 – шнек; 25 – бункер; 26 – спіральний транспортер; 27 – бункер-накопичувач; 28 – тросово-шайбовий транспортер; 29 – змішувач-роздавач; 30 – годівниця.

Рисунок 1.18 – Схема технологічної лінії пророщування та введення в комбікорм пророщеного зерна.

Плющення зерна покращує перетравність за рахунок руйнування оболонки та кращої доступності ендосперму для ферментів травного тракту, але, як і при звичайному подрібненні, не відбувається суттєвого збагачення вітамінами та біологічно активними речовинами.

Екструдувannya й експандування дають високу гігієнічну якість, знезараження та желатинізацію крохмалю, підвищену засвоюваність, але потребують складного, дорогого й енергоємного обладнання, що не завжди доступно для середніх і малих господарств.

Пророщене зерно забезпечує підвищену біологічну цінність та кращу перетравність завдяки природній ферментативній обробці, але вимагає складнішої технологічної схеми: контролю чистоти води, мікробіологічних показників, режимів пророщування й обов'язкового використання спеціальних подрібнювачів, здатних делікатно обробляти неоднорідну за структурою масу без надмірного утворення пилу.

Отже, пророщене зерно є перспективним напрямом підвищення поживної та біологічної цінності раціонів, однак його широке впровадження безпосередньо пов'язане з удосконаленням технології підготовки та розробкою спеціалізованих машин для подрібнення такого специфічного матеріалу.

1.4 Аналіз стану досліджень

На основі проведеного огляду літературних джерел та аналізу існуючих технічних рішень можна зробити такі узагальнені висновки:

Для ефективного використання пророщеного зерна в годівлі тварин необхідно виконувати комплекс підготовчих операцій. До таких операцій належать: сушіння пророщеного зерна до заданої вологості, подальше подрібнення, а також ретельне змішування його з комбікормом з метою рівномірного розподілу по об'єму кормосуміші.

На даний час промисловість не випускає дробарок, які б забезпечували необхідний ступінь подрібнення та високу однорідність пророщеного зерна. Відомі серійні установки та дослідні зразки подрібнювального обладнання

переважно призначені для роботи із сухим зерном і не враховують специфічних властивостей пророщеного матеріалу.

Пророщене зерно характеризується вираженою неоднорідністю структури як за фізико-механічними властивостями, так і за геометричними розмірами окремих елементів. Це зумовлює необхідність диференційованого підходу до процесу подрібнення: зернівку доцільно руйнувати переважно ударною дією молотків, тоді як зелені ростки раціонально перерізати ножами. Поєднання різних видів впливу в одному подрібнювальному апараті є актуальним напрямом подальших досліджень.

Проаналізувавши конструкції молоткових дробарок, можна відмітити, що вони не придатні для ефективного подрібнення неоднорідних матеріалів, які відрізняються за густиною, структурою волокон та формою частинок. До таких матеріалів належить пророщене зерно. У процесі роботи існуючі молоткові дробарки формують подрібнений продукт із широким розкидом за геометричними розмірами частинок.

Застосування решіт із меншим діаметром отворів не розв'язує цієї проблеми, а лише збільшує час перебування матеріалу в дробильній камері. Це сприяє пере-подрібненню продукту, інтенсивному утворенню пилоподібної фракції, що зумовлює додаткові втрати поживних речовин і призводить до зростання енергоємності процесу подрібнення.

1.5 Висновки

Якість подрібнення зерна (гранулометричний склад, вміст пиловидної фракції) істотно впливає на перетравність корму, енергоємність процесу та продуктивність тварин, тому вибір способу та засобів подрібнення є ключовим елементом технології комбикормів.

Існуючі дробарки (молоткові, вальцові, ударно-відцентрові, дискові тощо) забезпечують ефективне подрібнення сухого зерна та інших однорідних матеріалів, але формують продукт із широким розкидом за розмірами частинок і часто спричиняють переизмельчення та утворення надлишкової пилової фракції.

Пророщене зерно є перспективним компонентом раціонів завдяки підвищеній біологічній цінності, однак має неоднорідну структуру (зернівка + росток), різні фізико-механічні властивості та розміри складових, що ускладнює його подрібнення традиційними молотковими дробарками.

Промислових або експериментальних дробарок, здатних забезпечити одночасно необхідний ступінь подрібнення, високу однорідність фракцій та прийнятну енергоємність саме для пророщеного зерна, на даний час не створено.

Аналіз технологічних схем використання пророщеного зерна (подача цілого, висушеного, подрібненого, у складі комбікорму) показав доцільність розробки спеціалізованої системи подрібнення та введення пророщеного зерна в комбікорм, яка враховуватиме комбінований вплив – удар по зернівці та різання ростків.

Виявлені недоліки існуючого обладнання обґрунтовують необхідність подальших теоретичних і конструкторських досліджень, спрямованих на створення удосконаленої дробарки для пророщеного зерна та технологічної лінії його підготовки до згодовування.

2 Теоретичне обґрунтування параметрів дробарки

2.1 Опис запропонованої конструкції

Розглянувши різні конструкції дробарок, можна відмітити, що для подрібнення неоднорідних матеріалів, до яких належить і пророщене зерно, доцільно застосовувати різні типи робочих органів, зокрема молотки та ножі.

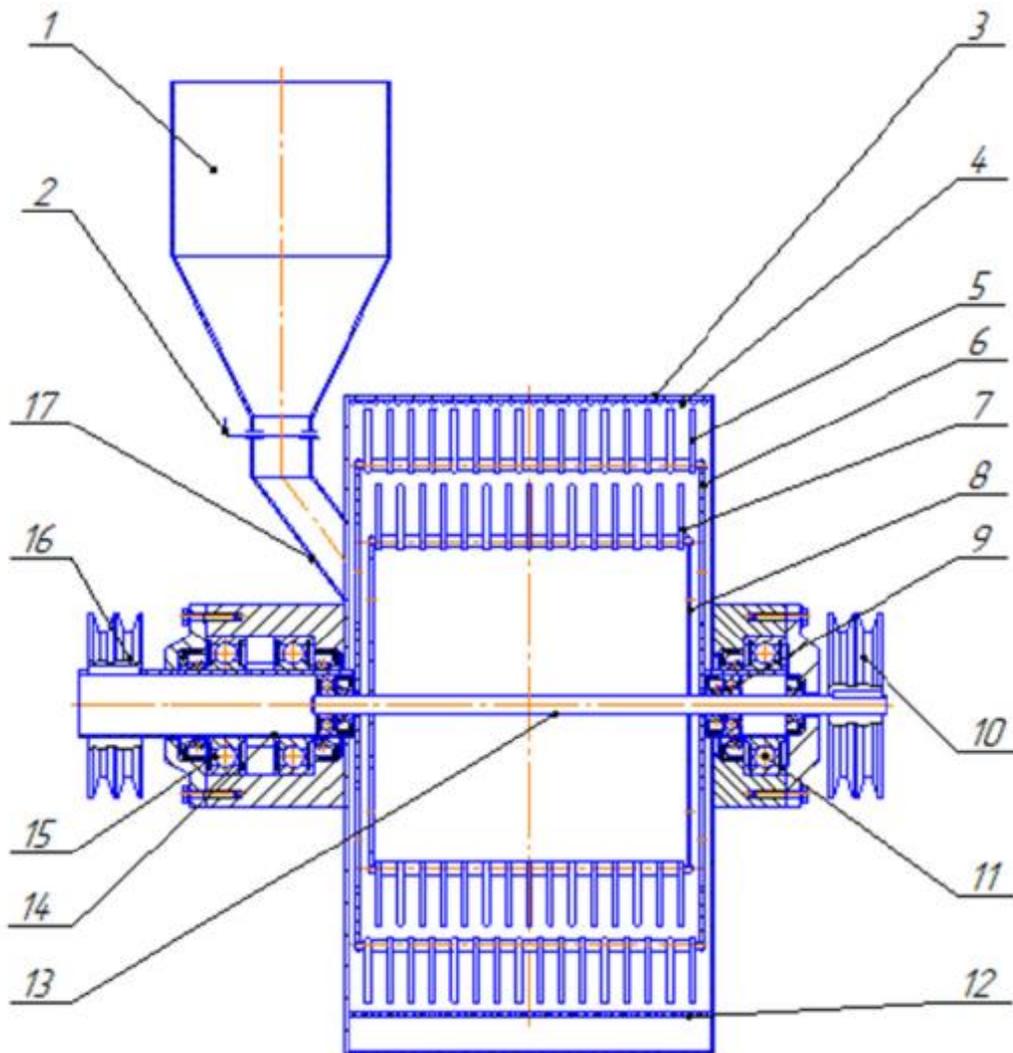
Існуючі молоткові дробарки мають низку недоліків: зазвичай використовується лише один тип робочих органів; дробильні камери розташовані на певній відстані одна від одної, що потребує додаткового транспортування подрібнюваного матеріалу з однієї камери до іншої і супроводжується додатковими енерговитратами. Для приводу робочих органів використовують два окремі приводи, що ускладнює конструкцію, підвищує її металоємність і вартість.

Завдання запропонованої дробарки полягає у підвищенні однорідності кінцевих розмірів частинок пророщеного зерна за рахунок використання різнотипних робочих органів: молотків, розташованих на зовнішньому барабані, та ножів, змонтованих на внутрішньому барабані. Передбачається усунення потреби в додатковому транспортуванні подрібнюваного матеріалу між дробильними барабанами та зниження енергоємності процесу подрібнення завдяки розміщенню обох барабанів в одній камері на спільній осі.

Запропонована установка для подрібнення пророщеного зерна складається з рами, на якій розміщено комбіновану дробильну камеру, бункер для подрібнюваного матеріалу, під яким встановлено дозувальну заслінку. Бункер, дозувальна заслінка та підвідна труба закріплені з торцевого боку комбінованої дробильної камери. Усередині комбінованої камери (рисунок 2.1) змонтовано два види робочих органів — молотки та ножі.

Усередині комбінованої дробильної камери (рисунок 2.1) розміщено два типи робочих органів – молотки та ножі. Між молотками встановлено розпірні втулки, а самі молотки зовнішнього барабана і ножі внутрішнього барабана шарнірно закріплені на осях (пальцях). Обидва барабани розташовані співвісно

та мають окремі приводи. У нижній частині камери змонтовано деку й решето, через які проходить подрібнений матеріал.



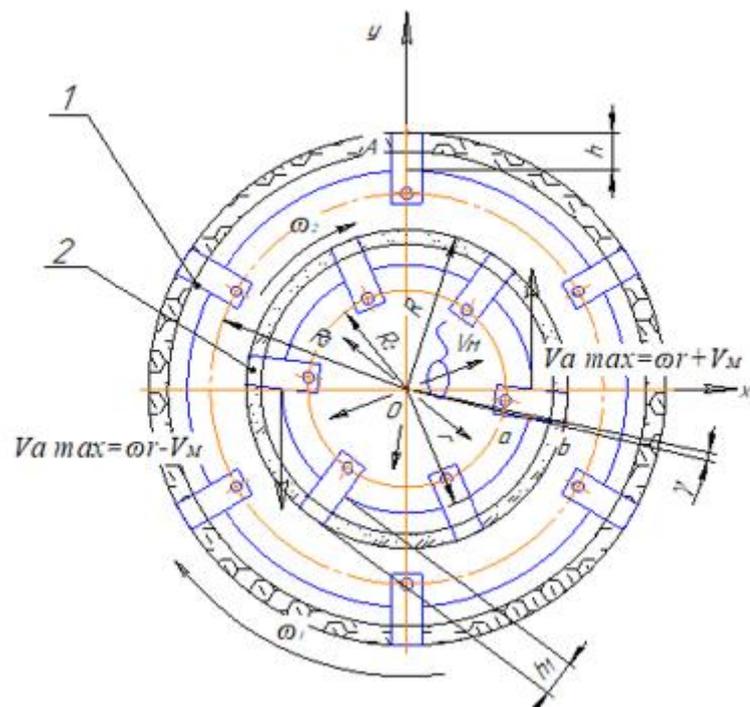
1 – завантажувальний бункер; 2 – дозувальна заслінка; 3 – комбінована дробильна камера; 4 – дека; 5 – молоток; 6 – зовнішній дробильний барабан; 7 – ніж; 8 – внутрішній дробильний барабан; 9 – внутрішній підшипниковий вузол; 10 – шків; 11 – зовнішній підшипниковий вузол; 12 – решето; 13 – внутрішній вал; 14 – зовнішній вал; 15 – шків; 16 – подаюча труба

Рисунок 2.1 – Комбінована дробильна камера.

Розроблену для вдосконалення процесу подрібнення пророщеного зерна дробарку розглядають як самостійну технічну систему, структурну будову якої подано у вигляді блок-схеми (рисунок 2.2).

2.2 Загальна постановка задач теоретичних досліджень

Особливість процесу подрібнення пророщеного зерна полягає в тому, що кожна частинка є композиційним об'єктом: щільна зернівка з відносно малою площею поперечного перерізу жорстко з'єднана з легким, довгим та гнучким ростком. Фізико-механічні властивості цих двох частин істотно відрізняються, тому використання лише одного типу робочих органів не дозволяє отримати стабільний гранулометричний склад і високу однорідність продукту.



1 – молоток; 2 – ніж; γ – центральний кут між радіусами; r – поточний радіус (від центра барабана); R – радіус зовнішньої ріжучої кромки; R_2 – радіус кріплення ножів; R_3 – радіус кріплення молотків; ω_1 – кутова швидкість барабана з молотками; ω_2 – кутова швидкість барабана з ножами; a – основа ножа; b – вершина ножа; h – довжина робочої частини молотків; h_1 – довжина робочої частини ножів.

Рисунок 2.2 – Кінематична схема комбінованої дробильної камери

Найбільш доцільним для таких матеріалів є принцип роботи молоткової дробарки. Якщо в межах однієї комбінованої дробильної камери забезпечити поділ потоку пророщеного зерна на два шари та організувати окреме

подрібнення кожного з них, можна цілеспрямовано впливати на зернівку й росток різними робочими органами. У запропонованій дробарці цей поділ досягається завдяки різниці маси, геометрії та аеродинамічних характеристик частинок після першого удару.

Після взаємодії з ножами пророщене зерно розділяється на дві частини:

- більш масивна зернівка;
- легкий подовжений росток.

Обидві частинки отримують однакову початкову швидкість руху, але мають різну масу, площу фронтальної поверхні та, відповідно, різну початкову кінетичну енергію й опір повітряного середовища.

Кінетична енергія зернівки:

$$E_{k1} = \frac{m_1 v^2}{2} \quad (2.1)$$

де m_1 – маса зернівки, кг;

v – швидкість руху зернівки після удару ножа, м/с.

Кінетична енергія ростка:

$$E_{k2} = \frac{m_2 v^2}{2} \quad (2.2)$$

де m_2 – маса ростка, кг;

v – швидкість руху ростка після того ж удару, м/с.

Оскільки маса зернівки більша за масу ростка ($m_1 > m_2$), при однаковій швидкості її кінетична енергія також більша: $E_{k1} > E_{k2}$.

Під час руху в потоці повітря частинки витрачають свою кінетичну енергію на подолання сил аеродинамічного опору. Робота, що виконується силою опору повітря над зернівкою:

$$A_1 = F_1 X_1 \quad (2.3)$$

де F_1 – сила опору повітря рухові зернівки, Н;

X_1 – максимальна відстань польоту зернівки до повної втрати кінетичної енергії, м.

Для ростка:

$$A_2 = F_2 X_2 \quad (2.4)$$

де F_2 – сила опору повітря рухові ростка, Н;

X_2 – максимальна відстань польоту ростка до повної втрати кінетичної енергії, м.

Сили опору повітря пропорційні площі проєкції частинки, перпендикулярній до напрямку руху. Оскільки фронтальна площа зернівки менша, ніж у ростка, маємо $F_1 < F_2$. Кінетична енергія зернівки й ростка витрачається на роботу проти опору повітря:

$$E_{k1} = A_1 = F_1 X_1, \quad E_{k2} = A_2 = F_2 X_2.$$

Поділивши перше рівняння на друге, отримаємо співвідношення відстаней польоту:

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{m_1 F_2}{m_2 F_1} \quad (2.5)$$

З урахуванням того, що $m_1 > m_2$ та $F_1 < F_2$, із виразу (2.5) випливає, що $X_1 > X_2$. Тобто більш важка частинка з меншою площею фронтальної поверхні (зернівка) пролітає більшу відстань, ніж легкий і «парусний» росток.

Отриманий результат означає, що після першого удару ножа зернівки, маючи більшу інерцію та менший аеродинамічний опір, зміщуються до периферійної зони дробильної камери, де взаємодіють з молотками зовнішнього барабана. Ростки ж, через меншу масу і більший опір повітря, утворюють внутрішній шар і подаються до ножів внутрішнього барабана. Таким чином у

межах однієї камери формується периферійний шар із переважанням зернівок (подрібнення молотками) та внутрішній шар із ростків (подрібнення ножами), що підвищує однорідність кінцевого продукту.

Для ефективного подрібнення необхідно забезпечити таку швидкість руху робочих органів, за якої в матеріалі виникають руйнівні напруження. Цю граничну швидкість називають швидкістю руйнування зернівок v_p . У загальному вигляді її можна записати так:

$$v_p = \sqrt{\frac{K_d \sigma_p}{\rho_z}} \quad (2.6)$$

де K_d – динамічний (ударний) коефіцієнт, що враховує характер навантаження;

σ_p – розрахункове напруження руйнування зернівки, Па;

ρ_z – густина матеріалу зерна, кг/м³.

Знаючи v_p , можна задати необхідну колову швидкість периферійної зони барабана і, відповідно, частоту його обертання для забезпечення надійного руйнування зернівок у периферійному шарі.

У підсумку теоретична постановка задач передбачає: обґрунтування механізму поділу потоку пророщеного зерна на шари за рахунок відмінностей у масі та аеродинамічних властивостях частинок; встановлення зв'язку між кінетичною енергією, роботою сил опору та траєкторіями руху зернівок і ростків; визначення мінімально необхідної швидкості руху робочих органів, що забезпечує руйнування зернівок і реалізацію комбінованого подрібнення в одній камері.

2.3 Обґрунтування конструктивних параметрів дробарки

Основними параметрами робочих (дробильних) барабанів, які необхідно визначити під час розрахунку, є їхні геометричні розміри та кількість робочих органів (молотків і ножів) на кожному з барабанів.

Щоб виконати конструктивний розрахунок дробарки, потрібно знати початкові та кінцеві розміри частинок подрібнюваного матеріалу, його фізико-механічні властивості, а також тип робочих органів (молотки, ножі тощо).

Розрахунок доцільно починати з визначення геометричних параметрів камери подрібнення та дробильного барабана. Секундна продуктивність дробарки пов'язана з питомим навантаженням на барабан співвідношенням:

$$q_p = \frac{q}{DL} \quad (2.7)$$

де q_p – питоме навантаження на барабан, кг/(с·м²);

q – секундна продуктивність, кг/с;

D – діаметр барабана, м;

L – його довжина, м.

Для дробарок, що застосовуються в сільському господарстві, питоме навантаження зазвичай знаходиться в межах 2–6 кг/(с·м²). Розкид значень зумовлений видом сировини, умовами живлення, типом робочих органів та іншими факторами.

Зв'язок між продуктивністю і діаметром барабана часто задають емпірично:

$$D = A\sqrt{q} \quad (2.8)$$

де D – діаметр барабана, м;

q – секундна продуктивність (або приведена продуктивність), кг/с;

A – коефіцієнт, що залежить від типу барабана та співвідношення його осей (для барабана, який у розрахунках розглядається як еліпсоїд обертання, – відношення великої півосі до малої).

Під час роботи молотки взаємодіють із зерном і сприймають реакцію з боку подрібнюваного продукту. Щоб удари не передавалися безпосередньо на вісь

кріплення та підшипникові вузли, має виконуватися умова динамічної рівноваги молотка:

$$\rho_0^2 = cl \quad (2.9)$$

де ρ_0 – радіус інерції молотка відносно осі кріплення;

c – відстань від осі кріплення молотка до його центра мас, м;

l – відстань від осі кріплення до вільного кінця молотка, м.

Для пластинчастого молотка з одним отвором для пальця відстань c можна оцінити за формулою:

$$c = \frac{a^2 + b^2}{6a} \quad (2.10)$$

де a – довжина молотка, м;

b – його ширина, м.

Радіус інерції відносно осі кріплення визначається так:

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{12}} \quad (2.11)$$

Підставляючи вирази, одержують зв'язок між довжиною молотка a , відстанню l та геометрією барабана. При цьому центр мас молотка має знаходитися на колі деякого «радіуса рівноваги» R_0 , а відстані між центрами мас сусідніх молотків повинні відповідати кутовому кроку між ними.

У результаті виводяться співвідношення між діаметром барабана D , довжиною молотка l і радіусом розміщення молотків R_n (радіус робочої поверхні молотків):

$$l = 0,154D, \quad R_n = 0,346D \quad (2.12)$$

Якщо розрахунковий діаметр барабана менший за 0,4 м, рекомендується приймати довжину молотків не менше ніж $l = 0,2 D$, оскільки надто короткі молотки не забезпечать повноцінного подрібнення по всій ширині камери.

Розміри молотка (і ножа за аналогією) уточнюються із урахуванням досвіду експлуатації. Довжина молотка зазвичай приймається на рівні приблизно $a \approx 1,5 / l$; ширина b – у рекомендованому діапазоні (часто 0,4–0,5 від деякого базового розміру), а товщина вибирається з умови міцності. Для даної конструкції подальші інтервали розмірів уточнюються за результатами експериментів.

Діаметр отвору в молотку (або нозі) для встановлення на палець вибирають з урахуванням міцності пальця та матеріалу молотка. Для даної дробарки діаметр пальця приймають у межах 16–18 мм.

Основні вимоги до вибору кількості молотків і ножів полягають у забезпеченні відсутності «пропусків» у зоні подрібнення та статичної і динамічної врівноваженості барабанів.

Робочі органи мають перекривати всю площину по ширині камери подрібнення, щоб не залишалися «мертві» зони, де зерно не потрапляє під удар або різання. Схема розташування молотків і ножів на пальцях повинна давати мінімальні вібрації та рівномірне навантаження на підшипникові опори.

Щоб забезпечити заповнення всього поля молотками (або ножами), виконується умова:

$$z_k = \frac{(L - \Delta L)k}{a} \quad (2.13)$$

де z_k – загальна кількість молотків (або ножів) на барабані;

L – робоча ширина барабана, м;

ΔL – сумарна ширина ділянок, які не перекриваються молотками (товщина дисків, зазори тощо), м;

k – число молотків (ножів), що проходять по одній слідовій доріжці;

a – товщина (по ширині) одного молотка або ножа, м.

Число молотків і ножів можна визначити за формулами:

$$z_1 = m_1 \frac{(L - \Delta L)}{a_1} \quad (2.14)$$

$$z_2 = m_2 \frac{(L - \Delta L)}{a_2} \quad (2.15)$$

де z_1 – кількість молотків;

z_2 – кількість ножів;

a_1 – товщина молотка, м;

a_2 – товщина ножа, м;

m_1, m_2 – коефіцієнти, що враховують кількість робочих органів по сліду та конструктивні обмеження;

ΔL – сумарна ширина «порожніх» ділянок (диски, проміжки), м.

З урахуванням зв'язку між кутовою швидкістю та частотою обертання, формули для кількості молотків і ножів можуть бути переписані через частоту обертання ротора n . При цьому забезпечується повне перекриття площі подрібнення та допустимий крок між слідами ударів і різів.

На основі розрахунків та аналізу поверхонь відгуку, побудованих за результатами експериментального планування, одержано такі рекомендації щодо конструктивних і режимних параметрів комбінованої дробарки пророщеного зерна.

Для молоткового барабана рекомендовано: кількість молотків орієнтовно 68–72 шт.; частоту обертання барабана у межах 2400–2600 хв^{-1} ; товщину молотків близько 2,5–3,8 мм.

Для ножового барабана рекомендовано: кількість ножів приблизно 62–68 шт.; частоту обертання ножового барабана у межах 2600–2950 хв^{-1} ; товщину ножів орієнтовно 1,9–2,7 мм, визначену з урахуванням міцності матеріалу та забезпечення стабільного різання ростків.

Таким чином, на основі теоретичних розрахунків і експериментальних даних обґрунтовано раціональні значення геометричних розмірів та кількості робочих органів, а також діапазони частот обертання молоткового та ножового барабанів комбінованої дробарки пророщеного зерна.

2.4 Обґрунтування продуктивності дробарки

У комбінованій дробарці пророщеного зерна виділяють два робочі шари матеріалу: шар зернівок у зоні дії молотків та шар ростків у зоні дії ножів. Тому загальна продуктивність установки визначається як сума продуктивностей у кожному шарі.

$$q = q_1 + q_2 \quad (2.15)$$

q_1 – продуктивність у шарі зернівок (зона молотків), кг/с;

q_2 – продуктивність у шарі ростків (зона ножів), кг/с.

Для детальнішого опису процесу подрібнення продуктивність кожного шару можна визначати через елементарні перерізи потоку матеріалу.

У припущенні, що продукт рівномірно заповнює робочий об'єм, а процес подрібнення за один оберт ротора забезпечується заданою кількістю робочих органів, початково продуктивність кожного шару можна записати у вигляді

$$q_1 = \pi D L h_{ш1} \rho_1 \mu_{ц1} / t \quad (2.16)$$

$$q_2 = \pi D L h_{ш2} \rho_2 \mu_{ц2} / t \quad (2.17)$$

де D – діаметр барабана, м;

L – ширина барабана, м;

$h_{ш1}$ – товщина шару, що подрібнюється молотками (приймається $h_{ш1}=h$), м;

$h_{ш2}$ – товщина шару, що подрібнюється ножами (приймається $h_{ш2}=h_1$), м;

ρ_1, ρ_2 – густина відповідно зернівок і ростків, кг/м³;

$\mu_{ц1}, \mu_{ц2}$ – масові концентрації зернівок і ростків в шарі, кг/кг;

t – час перебування матеріалу в камері подрібнення, с.

Якщо обране число молотків k_{z1} у кожному подрібнювальному барабані забезпечує руйнування частинок за один оберт ротора, тоді продуктивність шару, що обробляється молотками, можна визначити, інтегруючи елементарний переріз потоку подрібненого матеріалу вздовж траєкторії руху

$$\Delta q_1 = \Delta S_1 v_1 \rho_1 \mu_{ц1} \quad (2.18)$$

$$\Delta q_1 = \Delta S_1 v_1 \rho_1 \mu_{ц1} \quad (2.19)$$

ΔS_1 – елементарна площа перерізу шару в зоні молотків, м²;

ΔS_2 – елементарна площа перерізу шару в зоні ножів, м²;

v_1 – лінійна швидкість руху частинок у шарі молотків, м/с;

v_2 – лінійна швидкість руху частинок у шарі ножів, м/с;

ρ_1 – густина зернівок, кг/м³;

ρ_2 – густина ростків, кг/м³;

$\mu_{ц1}$ – масова концентрація зернівок у шарі, кг/кг;

$\mu_{ц2}$ – масова концентрація ростків у шарі, кг/кг.

$$\Delta S_1 = L \Delta r \quad (2.20)$$

$$\Delta S_2 = L \Delta r \quad (2.21)$$

L – робоча ширина барабана, м;

Δr – елементарний приріст радіуса шару, м.

$$q_1 = \int_{R_1}^{R_1+h_{ц1}} L \omega_1 \rho_1 \mu_{ц1} r dr \quad (2.22)$$

$$q_1 = \int_{R_2}^{R_2+h_{u2}} L\omega_1\rho_1\mu_{y2} r dr \quad (2.23)$$

де R_1 – радіус початку шару зернівок (молотків), м;

R_2 – радіус початку шару ростків (ножів), м;

h_{cl1} – товщина шару, що подрібнюється молотками, м;

h_{cl2} – товщина шару, що подрібнюється ножами, м;

ω_1 – кутова швидкість обертання молоткового ротора, рад/с;

ω_2 – кутова швидкість обертання ножового ротора, рад/с;

r – поточний радіус у межах шару, м.

$$q_1 = \omega_1 L h_{u1} \rho_1 \mu_{y1} \left(R_1 + \frac{h_{u1}}{2} \right) \quad (2.24)$$

$$q_2 = \omega_2 L h_{u2} \rho_2 \mu_{y2} \left(R_2 + \frac{h_{u2}}{2} \right) \quad (2.25)$$

З урахуванням зв'язку між кутовою швидкістю та частотою обертання ($\omega = \pi n / 30$) формули для продуктивності можна записати через частоти обертання n_1 та n_2 .

$$q = \frac{\pi L}{30} \left[n_1 h \rho_1 \mu_{y1} \left(R_1 + \frac{h}{2} \right) + n_2 h_1 \rho_2 \mu_{y2} \left(R_2 + \frac{h_1}{2} \right) \right] \quad (2.26)$$

де n_1 – частота обертання молоткового ротора, $хв^{-1}$;

n_2 – частота обертання ножового ротора, $хв^{-1}$;

h – товщина шару, що подрібнюється молотками, м;

h_1 – товщина шару, що подрібнюється ножами, м.

За результатами розрахунків максимальна продуктивність комбінованої дробарки досягає приблизно 0,52–0,56 т/год за частот обертання $n_1 = 2200\text{--}2600$ хв⁻¹ для молоткового барабана та $n_2 = 2600\text{--}2800$ хв⁻¹ для ножового барабана.

2.5 Розрахунок енергетичних показників процесу подрібнення

Енергетичні показники комбінованої дробарки оцінюють окремо для шару молотків та шару ножів, а потім підсумовують. Розглядають питомі витрати енергії на подрібнення, потужність приводу та загальну енергоємність процесу.

$$A_n = A_{1n} + A_{2n} \quad (2.27)$$

A_{1n} – питомі витрати енергії в шарі молотків, Дж/кг;

A_{2n} – питомі витрати енергії в шарі ножів, Дж/кг.

Питомі витрати енергії в кожному шарі визначаються за залежностями, що враховують ступінь подрібнення та фізико-механічні властивості матеріалу.

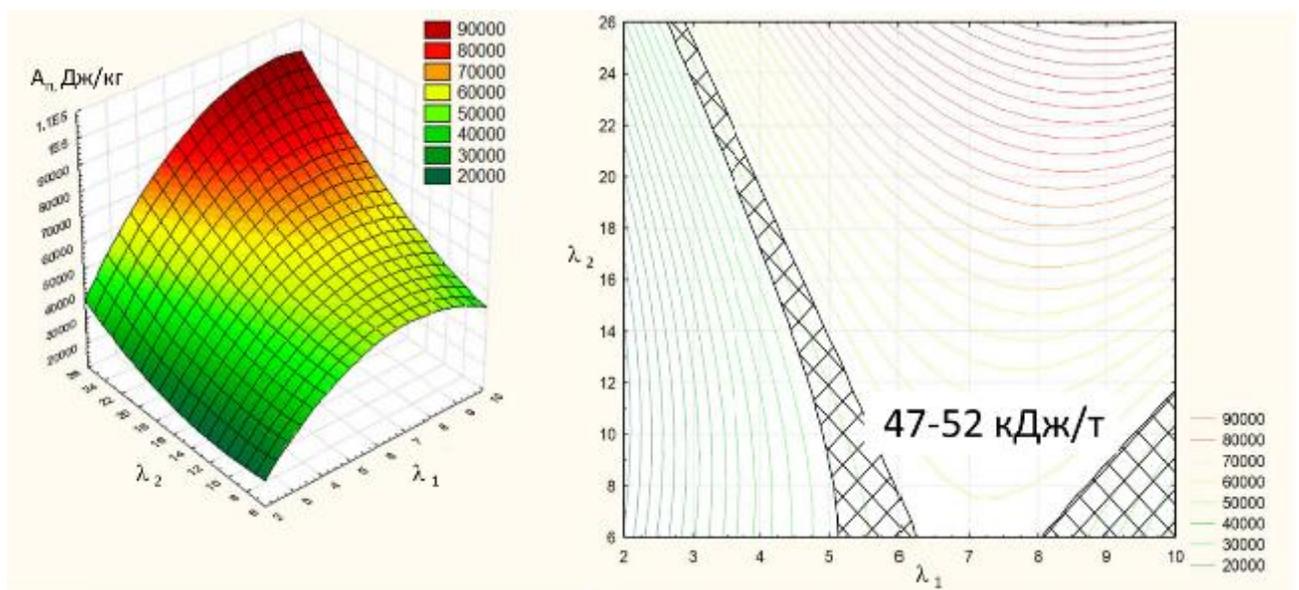


Рисунок 2.3 – Залежність питомих витрат енергії від ступеня подрібнення зерна λ_1 та паростків λ_2

$$N_n = N_{1n} + N_{2n} \quad (2.28)$$

N_{1n} – потужність, що витрачається на подрібнення в шарі молотків, кВт;

N_{2n} – потужність, що витрачається на подрібнення в шарі ножів, кВт.

$$N_{1n} = q_1 A_{1n} \quad (2.29)$$

$$N_{2n} = q_2 A_{2n} \quad (2.30)$$

q_1 – продуктивність у шарі молотків, кг/с;

q_2 – продуктивність у шарі ножів, кг/с.

$$N = (1,15 \dots 1,20) N_n \quad (2.30)$$

Коефіцієнт (1,15–1,20) враховує запас потужності на подолання додаткових втрат у трансмісії, підшипниках, а також можливі перевантаження під час роботи.

$$E_n = E_{n1} + E_{n2} \quad (2.29)$$

$$E_{n1} = \frac{N_{1n}}{q_1 \lambda_1} \quad (2.30)$$

$$E_{n2} = \frac{N_{2n}}{q_2 \lambda_2} \quad (2.30)$$

E_n – загальна енергоємність процесу подрібнення, кВт·год/т;

E_{n1} – енергоємність у шарі молотків, кВт·год/т;

E_{n2} – енергоємність у шарі ножів, кВт·год/т;

λ_1 – ступінь подрібнення в шарі молотків (відношення початкового розміру частинок до кінцевого);

λ_2 – ступінь подрібнення в шарі ножів;

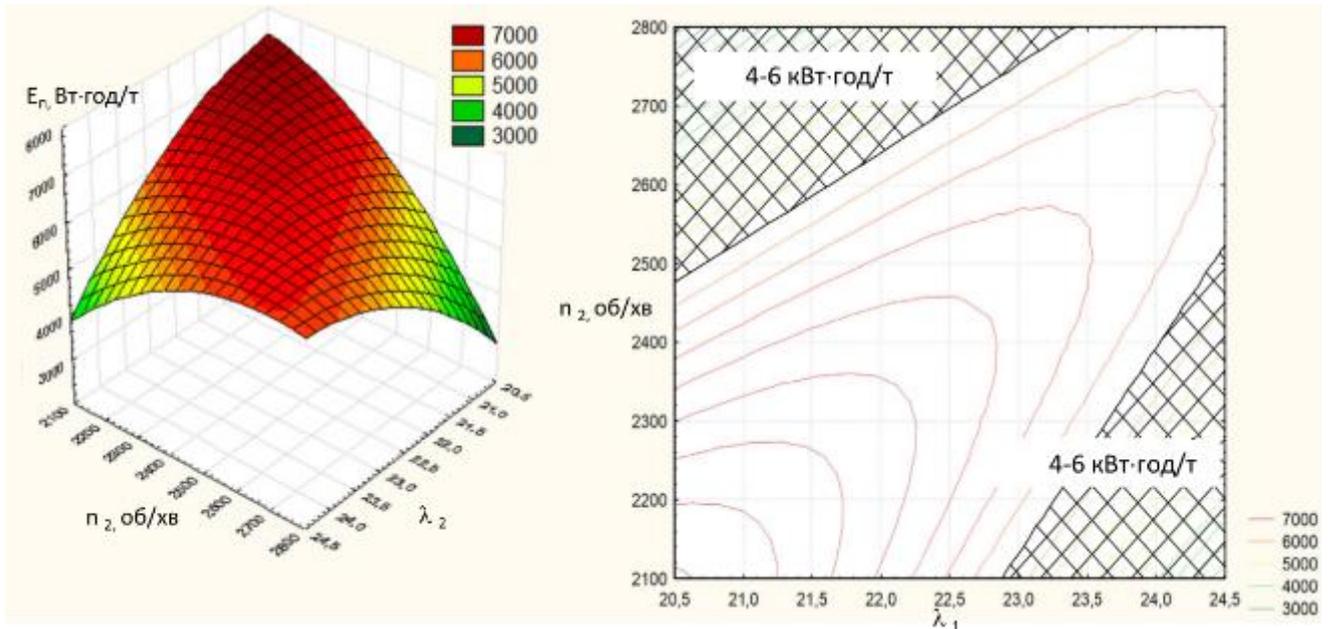


Рисунок 2.3 – Залежність питомих витрат енергії від ступеня подрібнення паростків λ_2 та частоти обертання ножового барабана n_2

Таким чином, наведені залежності дозволяють оцінювати питомі енергетичні витрати, потужність приводу та енергоємність процесу подрібнення з урахуванням роздільного подрібнення зернівок і ростків у комбінованій дробарці.

2.6 Висновки

Запропоновано методику розрахунку геометричних параметрів ножа за критерієм мінімальних витрат енергії на різання плоского шару продукту.

У результаті теоретичних досліджень отримано розрахункові формули для оцінки продуктивності та енергетичних витрат запропонованої конструкції дробарки з урахуванням її конструктивних особливостей і ступеня подрібнення продукту. Теоретичний аналіз показав, що:

– загальну продуктивність дробарки можна визначити як суму продуктивностей окремих робочих органів з урахуванням коефіцієнта їх завантаження та властивостей матеріалу;

– питомі витрати енергії на подрібнення можуть бути подані як сума витрат енергії на різання та дроблення;

– сумарна потужність є сумою потужностей, що витрачаються на подрібнення в кожному шарі матеріалу;

– загальну енергоємність процесу слід розраховувати з урахуванням потужностей на подрібнення в кожному шарі, загальної продуктивності дробарки, а також ступеня подрібнення та концентрації зернівок і ростків у кожному шарі.

Розрахунки показали, що рекомендовану кількість ножів 62–68 шт. можна встановити на ножовому барабані за частоти його обертання $2640\text{--}2950 \text{ хв}^{-1}$ і товщини ножів у межах 1,9–2,7 мм.

Також розрахунки засвідчили, що за продуктивності дробарки 510–520 кг/год, ступеня подрібнення ростків пророщеного зерна 10–23 та частоти обертання ножового барабана $2470\text{--}2800 \text{ хв}^{-1}$ мінімальне значення енергоємності становить 4–6 кВт·год/т.

3 Експериментальні дослідження дробарки

3.1 Загальна будова та принцип дії запропонованої дробарки

Аналіз існуючих конструкцій дробарок показує, що для подрібнення неоднорідних матеріалів, до яких належить пророщене зерно (зернівка + росток), недостатньо застосовувати лише один тип робочих органів. У таких умовах доцільно поєднувати ударну дію молотків та різальну дію ножів, щоб забезпечити якісне подрібнення як твердої частини зернівки, так і волокнистого ростка.

Традиційні молоткові дробарки мають низку суттєвих недоліків:

- використовують один тип робочих органів;
- часто мають дві окремі дробильні камери, рознесені в просторі;
- між камерами потрібне додаткове транспортування матеріалу, що веде до зайвих енергозатрат, ускладнює конструкцію та збільшує металоємність.

Запропонована дробарка покликана підвищити однорідність подрібненої маси пророщеного зерна (як зернівок, так і ростків) завдяки роботі двох типів робочих органів, розміщених в одній комбінованій дробильній камері:

- на зовнішньому барабані встановлені молотки;
- на внутрішньому барабані шарнірно закріплені ножі.

Таке компонування дозволяє відмовитися від додаткового транспортування матеріалу між окремими ступенями подрібнення та зменшити енергоємність процесу за рахунок розміщення обох барабанів на одній осі в одній камері.

Конструктивно установка являє собою агрегат на рамі, де розміщено:

- комбіновану дробильну камеру з двома барабанами (молотковим і ножовим);
- бункер для подачі матеріалу з дозуючою заслінкою;
- патрубки для підведення та відведення продукту;
- дека та решето, жорстко закріплені всередині дробильної камери;

– вузли підшипникових опор та клинопасову передачу від електродвигуна.

На зовнішньому барабані на пальцях змонтовані молотки, між якими встановлено розпірні втулки, що задають потрібний крок та запобігають взаємному торканню молотків. На внутрішньому барабані шарнірно закріплені ножі, орієнтовані таким чином, щоб забезпечити ефективне різання ростків. У середині комбінованої камери розташовані дека (для ударно-абразивної взаємодії з частинками) та решето, через яке виходить подрібнений матеріал заданої крупності.

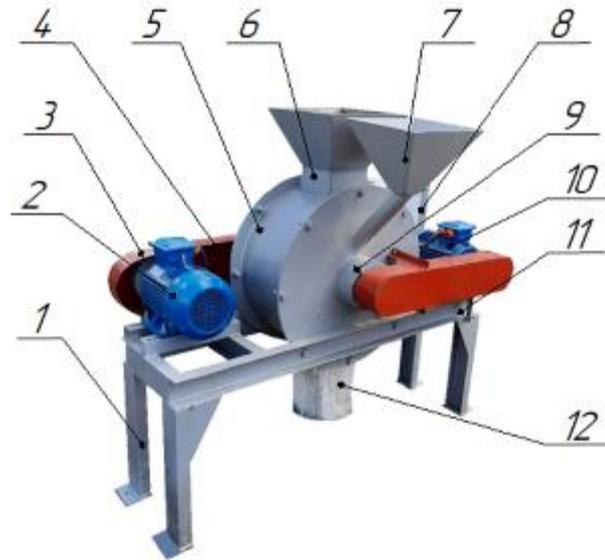


1 – центральний завантажувальний бункер; 2 – корпус дробильної камери;
3 – дека; 4 – вивантажувальне вікно.

Рисунок 3.1 – Дробильна камера експериментальної дробарки пророщеного зерна

З торців комбінованої дробильної камери встановлено довгий корпус із зовнішніми підшипниками та короткий корпус з підшипником для іншого кінця вала. Зовнішні підшипники захищені від пилу та дрібних частинок манжетами. У середині порожнистого вала розміщено внутрішній підшипник, який також закритий манжетою. У короткому корпусі внутрішнє кільце зовнішнього підшипника напресоване на короткий порожнистий вал, всередині якого

знаходиться ще один внутрішній підшипник, захищений манжетами. Внутрішнє кільце цього підшипника встановлене безпосередньо на суцільному валу, на якому закріплено другий ведений шків. Короткий порожнистий вал жорстко зв'язаний з барабаном із ножами.



1 – опора; 2 – електродвигун приводу зовнішнього барабана; 3 – захисний кожух; 4 – ремінна передача; 5 – дробильна камера; 6 – центральний бункер; 7 – боковий бункер; 8 – шафа керування; 9 – підшипниковий вузол; 10 – електродвигун приводу внутрішнього барабана; 11 – рама; 12 – вивантажувальний рукав.

Рисунок 3.2 – Експериментальна дробарка для подрібнення пророщеного зерна

У роботі дробарки матеріал з бункера через дозуючу заслінку надходить до комбінованої камери, де спочатку піддається ударній дії молотків, а потім додатково обробляється ножами. Після досягнення заданого ступеня подрібнення продукт проходить через отвори решета й виводиться з дробарки. Така схема дозволяє поєднати ударне дроблення та різання в одному апараті, зменшити енерговитрати та отримати більш однорідний гранулометричний склад подрібненого пророщеного зерна.

3.2 Результати експериментальних досліджень оцінки розміру подрібнених частинок

Кінцевий розмір частинок пророщеного зерна визначають зоотехнічними вимогами до кормів для свиней. Для цієї групи тварин прийнятним вважається інтервал розмірів частинок близько 0,9–1,4 мм.

На дослідній дробарці з обґрунтованими конструктивно-режимними параметрами виконано експериментальні дослідження з визначення частки частинок потрібного розміру, а також недоподрібненої та переподрібненої фракцій. Узагальнені результати подано на рисунку 4.18.

Якість подрібнення пророщеного зерна оцінювали за єдиною методикою: пророщену висушену пшеницю та ячмінь подрібнювали окремо, а відбір проб здійснювали після послідовного проходження продукту через дві ступені подрібнення – спочатку через барабан із молотками, потім через ножовий барабан.

На рисунку 3.3 наведено середній розмір частинок подрібненого пророщеного зерна ячменю та пшениці.

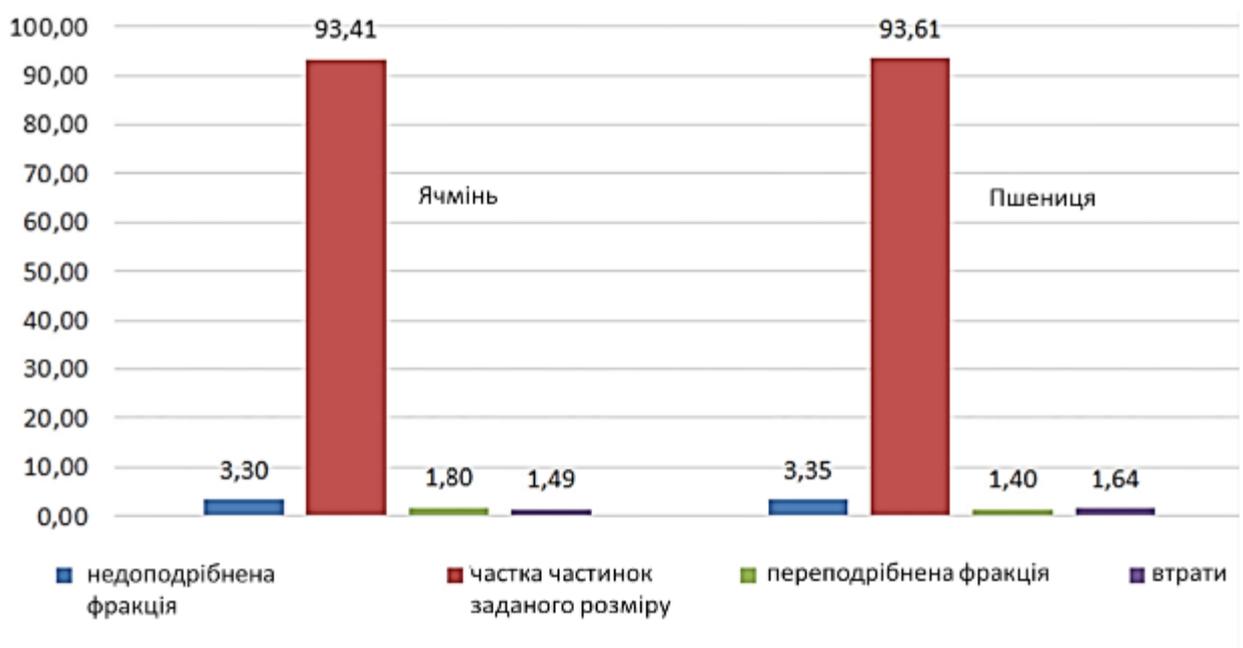


Рисунок 3.3 – Середній розмір частинок подрібненого пророщеного зерна

Під час подрібнення пророщеного висушеного ячменю пропускна здатність дробарки становила 515 кг/год. За результатами аналізу отримано:

- недоподрібнена фракція – 3,3 %;
- переподрібнена фракція – 1,8 %;
- частка частинок заданого розміру – 93,41 %;
- втрати – близько 1,49 %.

Для пророщеної висушеної пшениці пропускну здатність зафіксовано на рівні 522 кг/год. У цьому разі:

- недоподрібнена фракція становила 3,35 %;
- переподрібнена фракція – 1,4 %;
- частка частинок потрібного розміру – 93,61 %;
- втрати – близько 1,64 %.

Оцінку якості подрібнення виконували за результатами розсіювання на ситах, що дозволило розподілити частинки пророщеного зерна за фракціями та кількісно оцінити структуру помелу.

3.3 Результати експериментальних досліджень енергоємності процесу подрібнення та продуктивності дробарки

Дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів на показники роботи дробарки виконували із застосуванням методів планування експерименту та методики. Оцінювали вплив основних факторів на два ключові показники:

- енергоємність процесу подрібнення, кВт·год/т;
- продуктивність дробильної установки, т/год.

Вплив кута загострення ножа та модуля помелу на енергоємність

Поверхню відгуку енергоємності подрібнення пророщеного зерна від кута загострення ножа та модуля помелу, а також її двовимірні перерізи представлено на рисунку 3.4.

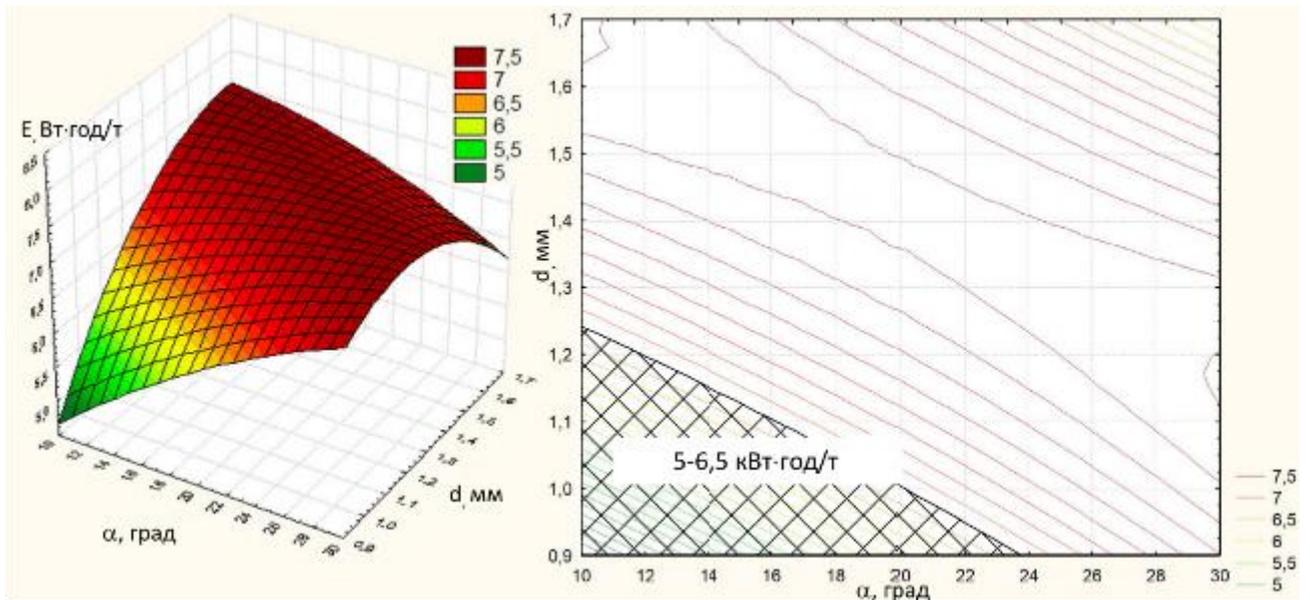


Рисунок 3.4 – Поверхня відгуку енергоємності подрібнення пророщеного зерна від кута загострення ножа α та модуля помелу d , та її двовимірні перерізи

Аналіз поверхні відгуку показує, що після подрібнення ножами енергоємність процесу змінюється в межах 5–6,5 кВт·год/т за модуля помелу 1–1,25 мм і кута загострення ножа 10–24°.

Встановлено, що на енергоємність істотно впливають обидва фактори – як модуль помелу, так і кут загострення ножа. Такий характер впливу добре узгоджується з теоретичними висновками, отриманими в розділі 2 під час розрахунку фізичного критерію оптимальності подрібнення.

Вплив кута загострення ножа та частоти обертання ножового барабана

Поверхню відгуку енергоємності подрібнення пророщеного зерна від кута загострення ножа та частоти обертання ножового барабана, а також її двовимірні перерізи наведено на рисунку 3.5.

За результатами аналізу виявлено, що мінімальні значення енергоємності лежать у діапазоні 5,76–7,2 кВт·год/т за частоти обертання ножового барабана 2520–2960 хв⁻¹ та кута загострення ножа 14–22°. Область оптимальних значень на двовимірному перерізі підтверджує взаємний вплив обох факторів на енергоємність процесу.

У діапазоні частоти обертання ножового барабана 2200–2600 хв⁻¹ вплив кута загострення ножа на енергоємність є незначним. Цей результат також

узгоджується з теоретичними висновками розділу 2 щодо фізичного критерію оптимальності подрібнення.

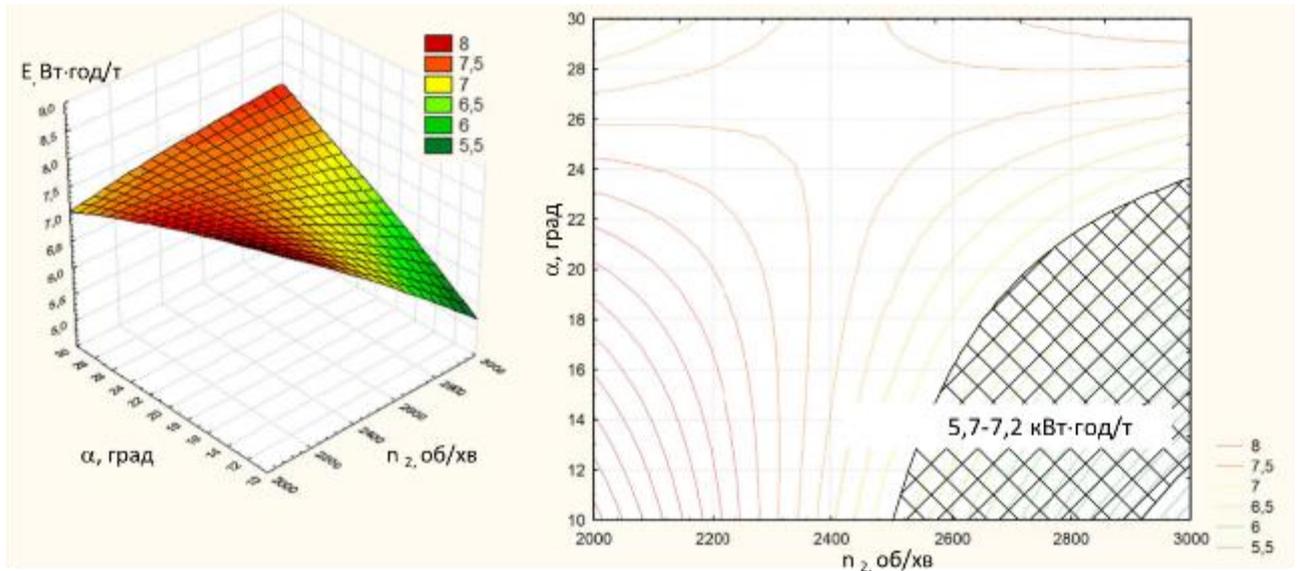


Рисунок 3.5 – Поверхня відгуку енергоємності подрібнення пророщеного зерна від кута загострення ножа та частоти обертання ножового барабана, та її двовимірні перерізи

Вплив частоти обертання барабанів на продуктивність дробарки

На рисунку 3.6 наведено поверхню відгуку продуктивності дробильної установки від частоти обертання дробильного (молоткового) та ножового барабанів, а також її двовимірні перерізи.

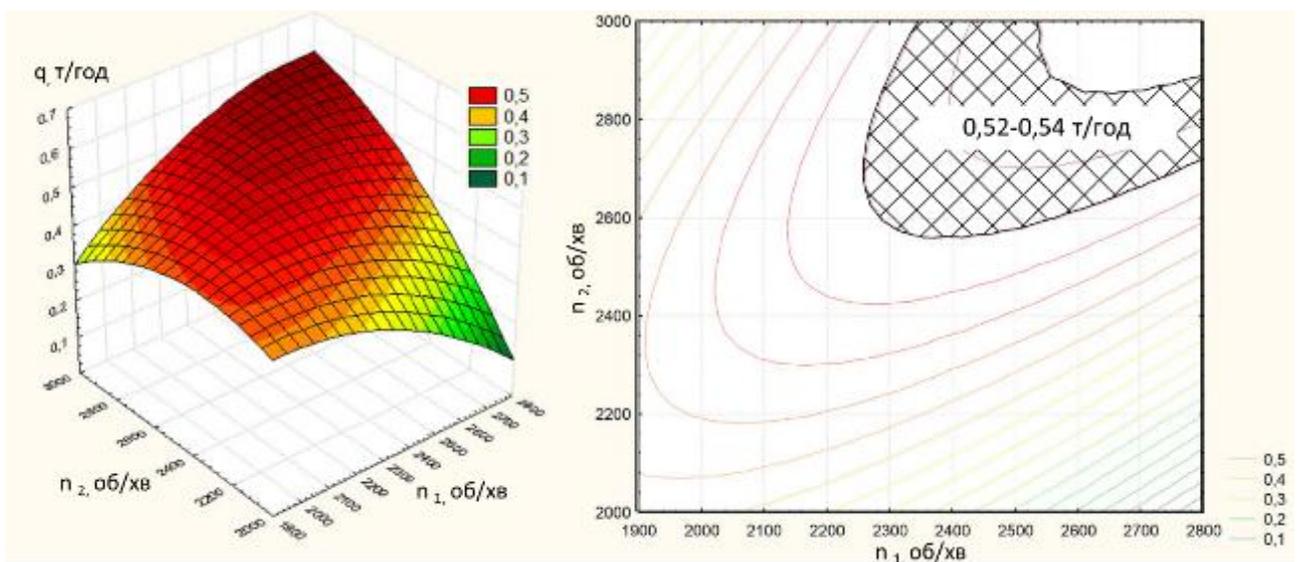


Рисунок 3.6 – Поверхня відгуку продуктивності дробильної установки від частоти обертання дробильного та ножового барабанів, та її двовимірні перерізи

Із рисунка видно, що частоти обертання обох барабанів впливають на продуктивність взаємопов'язано. Найвищі значення продуктивності – на рівні 0,52–0,54 т/год – досягаються за умов, коли:

- частота обертання дробильного (молоткового) барабана становить 2200–2600 хв⁻¹;
- частота обертання ножового барабана знаходиться в межах 2600–2850 хв⁻¹.

Подальше підвищення частоти обертання барабанів є конструктивно ускладненим, зокрема через те, що обидва барабани мають спільну вісь обертання, а також через зростання динамічних навантажень і вимог до балансування.

3.4 Висновки

Застосування двох типів робочих органів – молотків і ножів – у дробарці для пророщеного зерна забезпечує високий ступінь однорідності продукту за гранулометричним складом, з часткою частинок потрібного розміру понад 93 % як для ячменю, так і для пшениці, при мінімальних втратах ($\approx 1,5$ %).

Процес подрібнення не впливає на вологість продукту: вміст води до та після подрібнення залишається на рівні близько 14 %, що дозволяє зберігати стабільні умови зберігання й подальшого використання корму.

Оптимальні конструктивно-режимні параметри дробильного та ножового барабанів (частота обертання, товщина молотків, діаметр барабана, крок між ножами, кут загострення) забезпечують модуль помелу пророщеного зерна в межах 1,2–1,3 мм, що відповідає зоотехнічним вимогам до кормів для свиней.

Енергоємність подрібнення ножами істотно залежить від модуля помелу, кута загострення ножа та частоти обертання ножового барабана; у раціональних режимах вона становить орієнтовно 5,8–7,2 кВт·год/т, що підтверджує відповідність експериментальних результатів теоретичним розрахункам.

Загальна продуктивність дробарки досягає 0,52–0,54 т/год за взаємно узгоджених частот обертання дробильного (2200–2600 хв⁻¹) та ножового (2600–2850 хв⁻¹) барабанів, а зниження ступеня подрібнення ростків супроводжується зростанням загальної енергоємності процесу з 8 до 9,35 кВт·год/т, що підкреслює важливість правильного вибору ступеня подрібнення.

4 Охорона праці

4.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі з подрібнювачем

Робота з подрібнювачами кормів, зокрема з дробарками для пророщеного зерна, належить до робіт підвищеної небезпеки, оскільки пов'язана з дією рухомих частин, електричного струму, підвищеного рівня шуму та вібрації, а також значної запиленості повітря робочої зони та можливого викиду частинок матеріалу з камери подрібнення. До обслуговування подрібнювача допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медичний огляд, не мають протипоказань до роботи в умовах шуму, вібрації та запиленості, пройшли вступний та первинний інструктаж, навчання безпечним прийомам роботи й перевірку знань з охорони праці, пожежної безпеки та електробезпеки. Оператор має бути забезпечений засобами індивідуального захисту – спецодягом і спецвзуттям, захисними окулярами або щитком, респіратором для роботи в запиленому середовищі, протишумовими навушниками чи вкладишами, а також рукавицями для виконання обслуговування обладнання у вимкненому стані.

Під час експлуатації подрібнювача устаткування повинно бути справним, заземленим, з неушкодженими кабелями та ізоляцією, а всі рухомі частини – ремінні передачі, вали, шківни, барабани – мають бути закриті захисними кожухами. Робоча зона навколо подрібнювача повинна бути вільною від сторонніх предметів, розсипаного зерна та інструменту, з достатньою вентиляцією для видалення пилу й недопущення утворення вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей. Освітленість повинна відповідати нормам для виробничих приміщень. Робота при знятих кожухах, несправних блокуваннях, відсутності заземлення, а також спроби очищення або регулювання обладнання на ходу категорично забороняються. Оператор подрібнювача повинен знати розташування засобів аварійної зупинки, електрощита із захисною апаратурою, первинних засобів пожежогасіння та аптечки, а також порядок дій у разі виникнення аварійних ситуацій.

4.2 Оцінка з точки зору охорони праці розробленого подрібнювача

Розроблений подрібнювач пророщеного висушеного зерна має комбіновану дробильну камеру з двома співвісними барабанами – молотковим і ножовим, окремими електродвигунами приводу та ремінними передачами, завантажувальними бункерами й вивантажувальним рукавом. Така конструкція формує комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких основними є дія рухомих частин, підвищені рівні шуму та вібрації, запиленість повітря в зоні завантаження та вивантаження продукту, можливість викиду частинок матеріалу через завантажувальний отвір за порушення режиму роботи, а також ризик ураження електричним струмом і загоряння пилоповітряної суміші в разі накопичення пилу та наявності джерел займання.

Водночас у конструкції передбачено низку рішень, спрямованих на підвищення безпеки експлуатації. Захисні кожухи над ремінними передачами та барабанами обмежують доступ оператора до небезпечних зон і запобігають потраплянню сторонніх предметів. Центральний і боковий бункери спроектовані так, щоб мінімізувати прямий контакт працівника з внутрішнім об'ємом дробильної камери, а вивантажувальний рукав дозволяє організувати відведення подрібненого продукту в закриту тару чи транспортний засіб, зменшуючи пилоутворення. Використання підшипникових вузлів із захисними манжетами знижує ризик заклинювання та перегріву, а конструкція подрібнювача дає можливість підключення місцевої витяжної вентиляції у зоні завантаження та вивантаження. За умови виконання вимог інструкції з охорони праці, застосування засобів індивідуального захисту та проведення регулярного технічного обслуговування розроблений подрібнювач може безпечно експлуатуватися в умовах кормоцеху чи тваринницького підприємства без створення надмірного ризику для здоров'я й безпеки оператора.

4.3 Проект інструкції з охорони праці оператора подрібнювача

1. Загальні положення

1.1. До роботи в якості оператора подрібнювача допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медичний огляд, навчання з охорони праці, інструктаж і перевірку знань.

1.2. Оператор повинен знати будову, принцип дії подрібнювача, призначення органів керування, правила безпечної експлуатації та пожежної безпеки.

1.3. Оператор зобов'язаний користуватися виданими засобами індивідуального захисту: спецодягом, спецвзуттям, захисними окулярами, респіратором, протишумовими засобами, рукавицями.

1.4. Під час роботи оператор повинен дотримуватися правил внутрішнього трудового розпорядку, не допускати присутності сторонніх осіб у небезпечній зоні обладнання.

1.5. Оператор несе персональну відповідальність за дотримання вимог охорони праці, збереження обладнання та безпеку інших працівників у зоні обслуговування подрібнювача.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Одягти спецодяг і ЗІЗ, перевірити, щоб одяг не мав звисаючих частин, шнурків, розстібнутих манжет.

2.2. Оглянути робоче місце, прибрати сторонні предмети, розсипаний матеріал, забезпечити вільний доступ до проходів і аварійних виходів.

2.3. Перевірити:

цілісність електрокабелів, відсутність оголених проводів;

наявність і справність заземлення;

надійність кріплення та цілісність захисних кожухів на ремінних передачах і барабанах;

справність органів керування, у тому числі кнопок «Пуск», «Стоп» та аварійної зупинки.

2.4. Переконатися в наявності й справності вогнегасника та аптечки першої допомоги поблизу робочого місця.

2.5. Перевірити відсутність сторонніх предметів у завантажувальному бункері та в зоні дробильної камери.

2.6. Зробити пробний пуск подрібнювача без завантаження: оцінити відсутність стороннього шуму, вібрації, ударів, іскріння.

3. Вимоги безпеки під час роботи

3.1. Завантаження пророщеного зерна здійснювати через завантажувальні бункери рівномірно, не допускаючи перевантаження машини.

3.2. Забороняється:

працювати при знятих або пошкоджених захисних кожухах;
нахилитися над завантажувальним отвором, заглядати всередину дробильної камери під час роботи;

очищати, регулювати, підтягувати ремені, усувати несправності при увімкненому обладнанні;

торкатися руками та інструментом рухомих частин.

3.3. У разі появи стороннього шуму, вібрації, запаху перегрітого ізоляційного матеріалу, іскор чи диму необхідно негайно зупинити подрібнювач кнопкою «Стоп» або аварійною зупинкою, відключити живлення і повідомити керівника.

3.4. Під час роботи слід контролювати:

рівень завантаження бункера;
стан вивантажувального рукава та відсутність його засмічення;
рівень запиленості повітря та, за необхідності, вмикати місцеву витяжну вентиляцію.

3.5. Пересуватися в зоні розміщення подрібнювача обережно, не наступати на розсипаний матеріал, щоб уникнути падіння.

3.6. При перерві в роботі понад 15 хвилин подрібнювач слід зупинити, відключити живлення, закрити завантажувальний отвір.

4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.1. Зупинити подрібнювач у штатному порядку, дочекатися повної зупинки барабанів і ремінних передач.

4.2. Відключити обладнання від електромережі (автомат, рубильник) і вивісити попереджувальний плакат «Не вмикати – працюють люди».

4.3. Провести очистку завантажувального бункера, дробильної камери та вивантажувального рукава від залишків продукту, використовуючи щітки та скребки, не застосовуючи металеві предмети, що можуть викликати іскроутворення.

4.4. Прибрати робоче місце, видалити розсипаний матеріал, пил, відходи.

4.5. Зняти ЗІЗ, оглянути їх стан, за потреби здати на очищення чи заміну.

4.6. Повідомити керівника про виявлені несправності або недоліки в роботі обладнання.

5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

5.1. У разі травмування працівника негайно зупинити подрібнювач, відключити електроживлення, надати першу медичну допомогу та викликати медичного працівника.

5.2. У разі пожежі (загоряння пилу, ізоляції проводів, матеріалу) використати наявні засоби пожежогасіння (вогнегасник, пісок), повідомити керівництво та, за потреби, викликати пожежну службу.

5.3. При ураженні електричним струмом звільнити потерпілого від дії струму, дотримуючись власної безпеки, і надати першу медичну допомогу.

5.4. У випадку руйнування захисних огорожень, розриву ременів, заклинювання барабанів негайно зупинити обладнання, відключити електроживлення, огородити небезпечну зону та викликати відповідального спеціаліста.

4.4 Висновки

У розділі охорони праці розглянуті загальні вимоги безпеки при роботі з подрібнювачами кормів та проведено оцінку умов праці операторів розробленого подрібнювача пророщеного зерна. Визначено основні небезпечні та шкідливі фактори – рухомі частини, шум, вібрація, запиленість, ризик ураження електричним струмом, можливість загоряння пилоповітряної суміші.

Запропоновані конструктивні рішення (захисні кожухи, закриті бункери, вивантажувальний рукав, можливість підключення витяжної вентиляції, застосування підшипникових вузлів закритого типу) сприяють підвищенню рівня безпеки при експлуатації подрібнювача. Розроблено проєкт інструкції з охорони праці для оператора, який встановлює вимоги безпеки до, під час і після роботи, а також порядок дій у аварійних ситуаціях.

Дотримання вимог інструкції, своєчасне технічне обслуговування обладнання та застосування засобів індивідуального захисту забезпечують безпечну експлуатацію подрібнювача пророщеного зерна в умовах кормоцеху та тваринницького підприємства.

5 Техніко-економічна оцінка

Як видно з таблиці 5.1, для порівняльної економічної оцінки взято два варіанти подрібнювального обладнання: серійну дробарку-аналог та розроблений подрібнювач пророщеного зерна з комбінованою дробильною камерою. Вихідні дані для обох варіантів сформовано з урахуванням однакового річного обсягу переробки сировини $R=210$ т/рік, однакової кількості обслуговуючого персоналу (один оператор) та сучасних значень годинної тарифної ставки й тарифу на електроенергію. При цьому встановлена потужність приводу у розробленого подрібнювача менша (0,9 кВт проти 1,1 кВт у аналога), а капітальні вкладення – нижчі, що вже на стадії вихідних припущень свідчить про його потенційно вищу енерго- та ресурсоощадність.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для економічної оцінки роботи подрібнювачів

№	Показник	Одиниця	Подрібнювач-аналог	Розроблений подрібнювач
1	Продуктивність	т/год	0,15	0,18
2	Встановлена потужність приводу	кВт	1,10	0,90
3	Балансова вартість / капітальні вкладення	грн	16 500	14 700
4	Річний обсяг переробки сировини	т/рік	210	210
5	Кількість обслуговуючого персоналу	осіб	1	1
6	Годинна тарифна ставка	грн/год	48	48
7	Коефіцієнт нарахувань на заробітну плату	–	1,22	1,22
8	Тариф на електроенергію	грн/кВт·год	9,1	9,1
9	Нормативний коефіцієнт ефективності	–	0,15	0,15

У таблиці 5.2 наведено результати розрахунку питомих експлуатаційних та приведених витрат для обох варіантів. Питомі витрати на оплату праці при роботі з розробленим подрібнювачем становлять 325,3 грн/т, що менше, ніж у дробарки-аналога (390,4 грн/т), завдяки вищій продуктивності машини. Аналогічна тенденція спостерігається і за статтею витрат на електроенергію: 45,5 грн/т у розробленого подрібнювача проти 66,7 грн/т у базового варіанта. Зменшення встановленої потужності та підвищення продуктивності забезпечують суттєве зниження енерговитрат у перерахунку на 1 т подрібненого продукту.

Таблиця 5.2 – Результати розрахунку економічної ефективності подрібнювачів

№	Показник	Одиниця	Подрібнювач-аналог	Розроблений подрібнювач
1	Питомі витрати на оплату праці	грн/т	390,4	325,3
2	Питомі витрати на електроенергію	грн/т	66,7	45,5
3	Питомі амортизаційні відрахування	грн/т	7,5	5,5
4	Питомі витрати на ремонт та обслуговування	грн/т	7,8	6,5
5	Загальні питомі експлуатаційні витрати	грн/т	472,4	382,8
6	Питомі приведені витрати	грн/т	484,2	393,3
7	Зниження питомих експлуатаційних витрат	грн/т	-	89,6
8	Зниження питомих приведених витрат	грн/т	-	90,9
9	Річна економія експлуатаційних витрат	грн/рік	-	18 816
10	Річний економічний ефект (за приведеними витратами)	грн/рік	-	19 100
11	Орієнтовний строк окупності капітальних вкладень	років	-	0,78

Сумарні питомі експлуатаційні витрати для розробленого подрібнювача становлять 382,8 грн/т, що на 89,6 грн/т менше, ніж у дробарки-аналога (472,4 грн/т). Навіть з урахуванням нормативу ефективності капітальних вкладень питомі приведені витрати для нового подрібнювача (393,3 грн/т) істотно нижчі, ніж для базового варіанта (484,2 грн/т). Це забезпечує річний економічний ефект порядку 19 тис. грн за прийнятого обсягу переробки 210 т/рік. Орієнтовний строк окупності капітальних вкладень у розробленого подрібнювача складає близько 0,78 року, що свідчить про високу економічну доцільність впровадження запропонованої конструкції в виробничі умови кормоцехів та тваринницьких підприємств.

Загальні висновки

У дипломній роботі розглянуто, теоретично обґрунтовано та експериментально перевірено конструктивно-режимні параметри подрібнювача пророщеного зерна з комбінованою дробильною камерою, що поєднує дію молотків і ножів. На основі виконаних досліджень за п'ятьма розділами можна зробити такі узагальнені висновки.

За результатами аналітичного огляду (розділ 1) встановлено, що існуючі молоткові дробарки, призначені переважно для подрібнення сухого зерна, не забезпечують необхідної однорідності помелу пророщеного зерна, яке має неоднорідну структуру (зернівка + росток). Відзначено недоліки у вигляді широкого гранулометричного складу, значної частки переизмельченої фракції, підвищеної енергоємності процесу та відсутності спеціалізованих промислових подрібнювачів саме для пророщеного зерна. Обґрунтовано доцільність застосування комбінованих робочих органів (молотки + ножі) та розробки спеціалізованої конструкції подрібнювача.

У розділі 2 розроблено конструкцію та теоретичні основи роботи подрібнювача пророщеного зерна. Запропоновано подрібнювач із комбінованою дробильною камерою, у якій на одній осі розміщено зовнішній молотковий барабан для подрібнення зернівок та внутрішній ножовий барабан для різання ростків. Побудовано структурну схему технічної системи, сформульовано систему критеріїв оптимізації (модуль помелу, ступінь подрібнення зернівки та ростків, енергоємність процесу, продуктивність) і розроблено математичні моделі продуктивності та енергетичних витрат окремо для шарів дії молотків і ножів. Запропоновано методику розрахунку геометричних параметрів ножів за критеріями мінімальної роботи різання та надійності руйнування волокнистої структури ростків.

У розділі 3 створено та обґрунтовано експериментальну базу досліджень. Описано конструкцію дослідної установки та розробленого подрібнювача, схему навантаження, систему вимірювання електричних і технологічних параметрів, а також методику визначення гранулометричного складу, модуля помелу,

енергоємності та продуктивності. Застосовано методи планування багатofакторного експерименту для оцінки впливу основних конструктивно-режимних параметрів (частоти обертання барабанів, товщини молотків, відстані між ножами, кута загострення леза, частки ростків у суміші) на показники процесу подрібнення.

Результати експериментальних досліджень підтвердили ефективність розробленої конструкції. Показано, що застосування двох типів робочих органів дає змогу отримати високий ступінь однорідності помелу пророщеного ячменю та пшениці: частка фракції заданого розміру перевищує 93 %, при цьому недоподрібнена фракція становить близько 3,3–3,35 %, а переизмельчена – 1,4–1,8 %, втрати не перевищують 1,5–1,6 %. Встановлено, що енергоємність подрібнення ножами за раціональних режимів (модуль помелу 1,0–1,25 мм, частота обертання ножового барабана 2520–2960 хв⁻¹, кут загострення ножа 12–22°) становить орієнтовно 5,8–7,2 кВт·год/т. Виявлено взаємний вплив частот обертання молоткового та ножового барабанів на загальну продуктивність подрібнювача: максимальна продуктивність на рівні 0,52–0,54 т/год досягається при $n_1 \approx 2200\text{--}2600$ хв⁻¹ та $n_2 \approx 2600\text{--}2850$ хв⁻¹. Показано, що збільшення ступеня подрібнення ростків сприяє зниженню енергоємності їх подрібнення, а вологість продукту до і після подрібнення зберігається на рівні близько 14 %, що важливо з точки зору зберігання корму.

У розділі 5 економічно обґрунтовано доцільність впровадження розробленого подрібнювача. На основі оновлених сучасних цінових показників (вартість обладнання, тариф на електроенергію, заробітна плата) встановлено, що питомі експлуатаційні витрати при використанні розробленого подрібнювача становлять близько 382–383 грн/т, тоді як для дробарки-аналога – близько 472 грн/т. Питомі приведені витрати для нового подрібнювача також нижчі (орієнтовно 393 грн/т проти 484 грн/т у аналога), що забезпечує річний економічний ефект на рівні ≈ 19 тис. грн за обсягу переробки 210 т/рік. Орієнтовний строк окупності капітальних вкладень у розроблену машину становить менше одного року (приблизно 0,8 року), що підтверджує економічну доцільність її впровадження у виробництво.

Бібліографія

1. Lardy, G. P. (2017). Feeding value of sprouted grains (AS-647). North Dakota State University Extension.
2. Sharif, M., Hussain, A., & Subhani, M. (2013). Use of sprouted grains in the diets of poultry and ruminants. *Paripex – Indian Journal of Research*, 2(10), 4–7.
3. Benincasa, P., Falcinelli, B., Lutts, S., Stagnari, F., & Galieni, A. (2019). Sprouted grains: A comprehensive review. *Nutrients*, 11(2), 421.
4. Ikram, A., Saeed, F., Afzaal, M., Imran, A., Niaz, B., Tufail, T., & Anjum, F. M. (2021). Nutritional and end-use perspectives of sprouted grains: A comprehensive review. *Food Science & Nutrition*, 9(8), 4617–4632.
5. Ali, H. S., Miah, A. G., Sabuz, S. H., Asaduzzaman, M., & Salma, U. (2019). Dietary effects of hydroponic wheat sprouted fodder on growth performance of turkey. *Research in Agriculture, Livestock and Fisheries*, 6(1), 101–110.
6. Arif, M., Iram, A., Fayyaz, M., Arain, M. A., Riaz, A., & Rehman, A. (2023). Feeding barley and corn hydroponic-based rations improved digestibility and performance in Beetal goats. *Journal of King Saud University – Science*, 35, 102457.
7. Alharthi, A. S., Attia, Y. A., Al-Shami, K. M., et al. (2022). Effects of feeding different levels of sprouted barley on performance of growing lambs. *Veterinary Sciences*, 9(1), 15.
8. Kim, J. Y., Lee, H. G., Lee, S., et al. (2023). Effects of sprouted barley with different cultivation stages on in vitro rumen fermentation and nutrient degradability. *Applied Sciences*, 14(1), 364.
9. Baye, W., Eshetu, M., & Mengesha, Y. (2024). Effect of hydroponic barley fodder on growth performance, carcass yield and quality of broiler chickens. *Heliyon*, 10(x), e09940.
10. Sneath, R., & McIntosh, F. (2003). Review of hydroponic fodder production for beef cattle. Queensland Department of Primary Industries.
11. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). Sprouting grains for livestock feed. FAO / Access Agriculture factsheet.

12. Lyu, Z., Wang, B., Liu, J., Liu, S., & Fan, P. (2020). Size reduction in feed technology and methods for determining, expressing, and predicting particle size: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 261, 114347.
13. Vukmirović, Đ., Čolović, R., Rakita, S., Brlek, T., Đuragić, O., & Solà-Oriol, D. (2017). Importance of feed structure (particle size) and feed form in pig nutrition: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 233, 133–144.
14. Lancheros, J. D., & Stein, H. H. (2020). Effects of particle size reduction, pelleting, and extrusion on the nutritional value of ingredients and diets fed to pigs: A review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 11, 15.
15. Kiarie, E., & Mills, A. (2019). Role of feed processing on gut health and function in pigs and poultry: Conundrum of optimal particle size and hydrothermal regimens. *Frontiers in Veterinary Science*, 6, 19.
16. Liermann, W., Berk, A., Südekum, K.-H., & Homolka, P. (2019). Effect of cereal type and particle size on performance and digestibility in fattening pigs. *Czech Journal of Animal Science*, 64(1), 18–26.
17. Jo, Y. Y., Kim, H. S., Kim, J. H., et al. (2021). Influence of feed form and particle size on growth performance and nutrient digestibility in weaning pigs. *Animal Bioscience*, 34(6), 1004–1012.
18. Joël, M., et al. (2020). Effects of particle size, processing and blending of cereals on performance of broiler chickens. *Poultry Science*, 99(9), 4640–4653.
19. Matyushev, V. V., Chaplygina, I. A., Semenov, A. V., & Belyakov, A. A. (2021). The influence of germinated grain mix on the quality of extruded fodder. *Journal of World's Poultry Research*, 11(2), 252–258.
20. Black, J. L., et al. (2022). Effects of germination on the energy value of cereal grains for livestock. *Animal Production Science*, 62(x), 183–195.

ДОДАТКИ

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
 Кафедра механізації виробничих процесів у тваринництві

Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів обладнання для підготовки зерна до згодовування

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МГМ-3-24
 Макаров Віталій Олександрович

Керівник: PhD, старший викладач
 Білоус Ілля Михайлович

Дніпро 2019

Мета і задачі досліджень

Метою дипломної роботи є підвищення ефективності подрібнення пророщеного зерна шляхом обґрунтування конструктивно-режимних параметрів подрібнювача з комбінованою дробильною камерою, розроблення його конструкції, перевірки працездатності в умовах експерименту та оцінки економічної доцільності впровадження.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

- виконати аналітичний огляд існуючих способів і технічних засобів подрібнення зерна та встановити їхні можливості й обмеження щодо подрібнення пророщеного зерна;
- розробити конструкцію подрібнювача з комбінованою дробильною камерою, у якій поєднано молотковий і ножовий барабани, та обґрунтувати вибір основних конструктивних параметрів;
- побудувати теоретичні залежності для оцінки продуктивності, енергоємності та якості подрібнення в шарах дії молотків і ножів, визначити раціональні параметри робочих органів (товщину молотків, кут загострення та геометрію ножів, відстань між ножами, діаметр барабанів, частоти їх обертання);
- створити та описати експериментальну установку, розробити методику проведення багатofакторних досліджень, визначення гранулометричного складу, модуля помелу, енергоємності та продуктивності подрібнювача;
- провести серію експериментальних досліджень, встановити вплив основних конструктивно-режимних параметрів на показники подрібнення пророщеного зерна, визначити оптимальні діапазони їх зміни;
- виконати техніко-економічне обґрунтування застосування розробленого подрібнювача в технологічних лініях підготовки кормів порівняно із серійною дробаркою-аналогом.

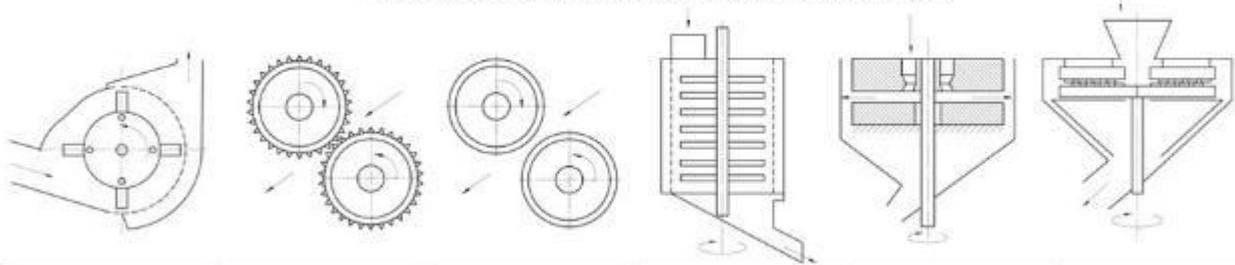
Аналіз стану питання

Способи подрібнення зерна



а - роздавлення; б - сколювання; в - розламування; г - перетирання; д - вільний удар; е - стиснений удар; е - різання; ж - розпилювання

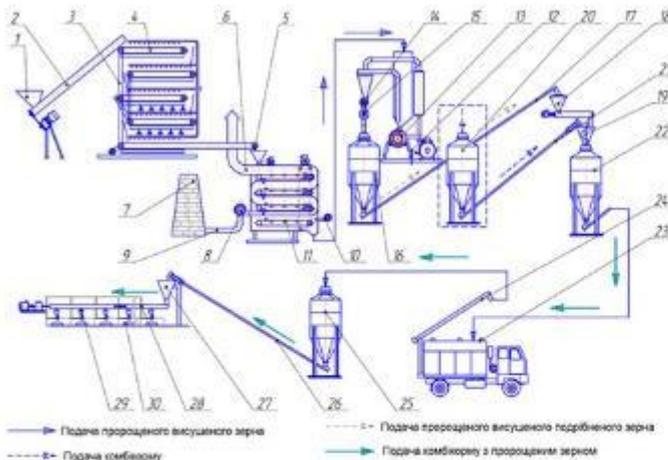
Класифікація машин для подрібнення зерна



Молоткова дробарка	Вальцевий станок	Плющильний станок	Бічева машина	Жорновий постав	Дисковий подрібнювач
вільний удар	роздавлення	роздавлення	вільний удар	роздавлення	сколювання
перетирання	перетирання	-	перетирання	перетирання	різання, роздавлення

■ - основний спосіб подрібнення □ - супутні способи подрібнення

Аналіз стану питання



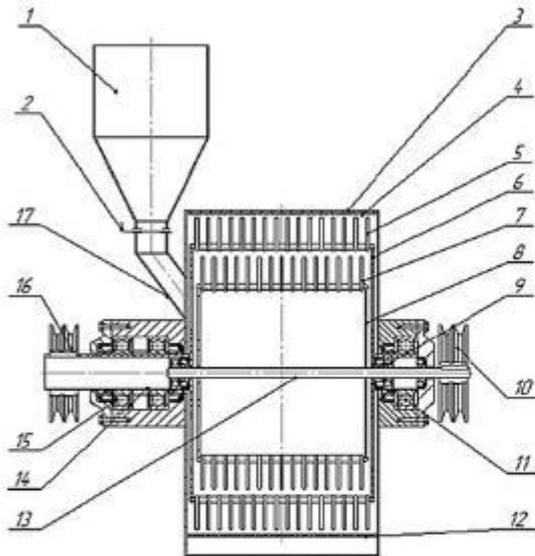
1 - бункер завантажувальний; 2 - шнек подаючий; 3 - конвеєр для пророщування зерна; 4 - транспортер стрічковий; 5 - бункер; 6 - конвеєрна сушарка; 7 - топкова; 8 - вентилятор агента сушіння; 9 - трубопровід агента сушіння; 10 - вентилятор холодного повітря; 11 - нижній транспортер; 12 - дробарка; 13 - дробильна камера; 14 - шлюзовий затвор; 15 - апарат вторинного подрібнення; 16 - бункер для пророщеного зерна; 17 - спіральний транспортер; 18 - дозатор; 19 - змішувач; 20 - бункер для комбікорму; 21 - спіральний транспортер; 22 - бункер готової суміші; 23 - автомобіль; 24 - шнек; 25 - бункер; 26 - спіральний транспортер; 27 - бункер-накопичувач; 28 - тросово-шайбовий транспортер; 29 - змішувач-роздавач; 30 - годівниця.

Рисунок 1 - Схема технологічної лінії пророщування та введення в комбікорм пророщеного зерна.



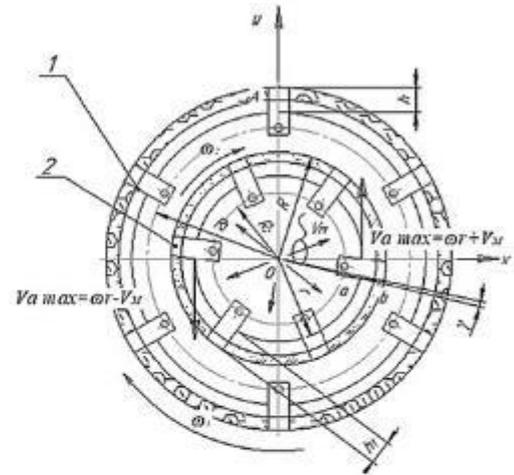
Рисунок 2 - Класифікація дробарок пророщеного зерна

Теоретичні дослідження



1 – завантажувальний бункер; 2 – дозувальна заслінка; 3 – комбінована дробильна камера; 4 – дека; 5 – молоток; 6 – зовнішній дробильний барабан; 7 – ніж; 8 – внутрішній дробильний барабан; 9 – внутрішній підшипниковий вузол; 10 – шків; 11 – зовнішній підшипниковий вузол; 12 – решето; 13 – внутрішній вал; 14 – зовнішній вал; 15 – шків; 16 – подаюча труба

• Рисунок 3 – Комбінована дробильна камера.



1 – молоток; 2 – ніж; γ – центральний кут між радіусами; r – поточний радіус (від центра барабана); R – радіус зовнішньої ріжучої кромки; R_2 – радіус кріплення ножів; R_3 – радіус кріплення молотків; ω_1 – кутова швидкість барабана з молотками; ω_2 – кутова швидкість барабана з ножами; a – основа ножа; b – вершина ножа; h – довжина робочої частини молотків; h_1 – довжина робочої частини ножів.

Рисунок 4 – Кінематична схема комбінованої дробильної камери

5

Теоретичні дослідження

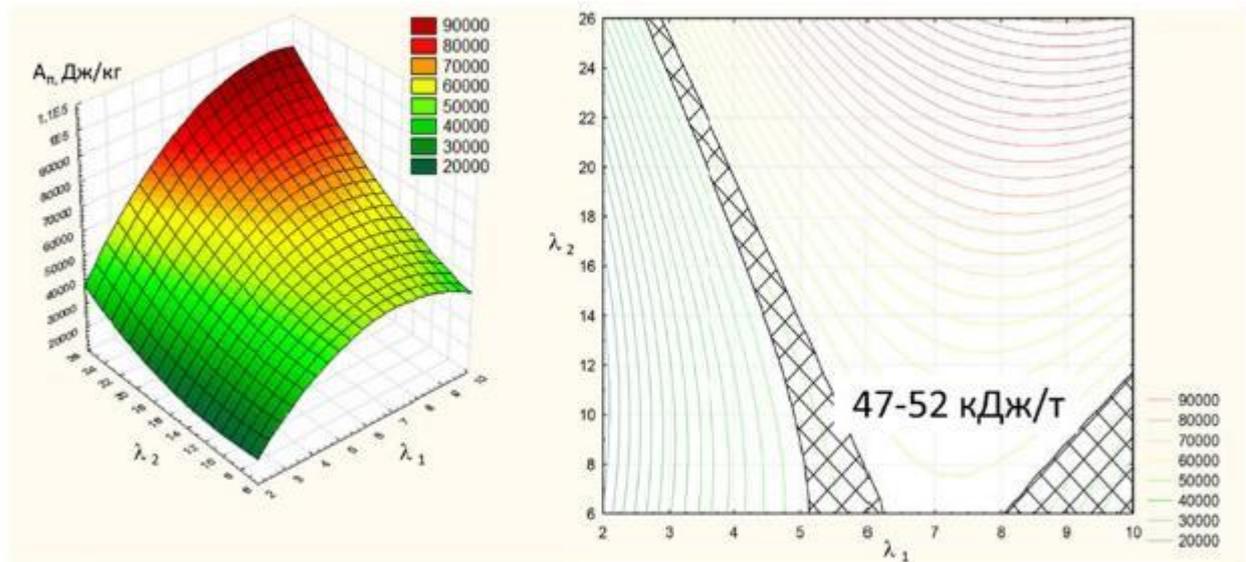


Рисунок 5 – Залежність питомих витрат енергії від ступеня подрібнення зерна λ_1 та паростків λ_2

6

Теоретичні дослідження

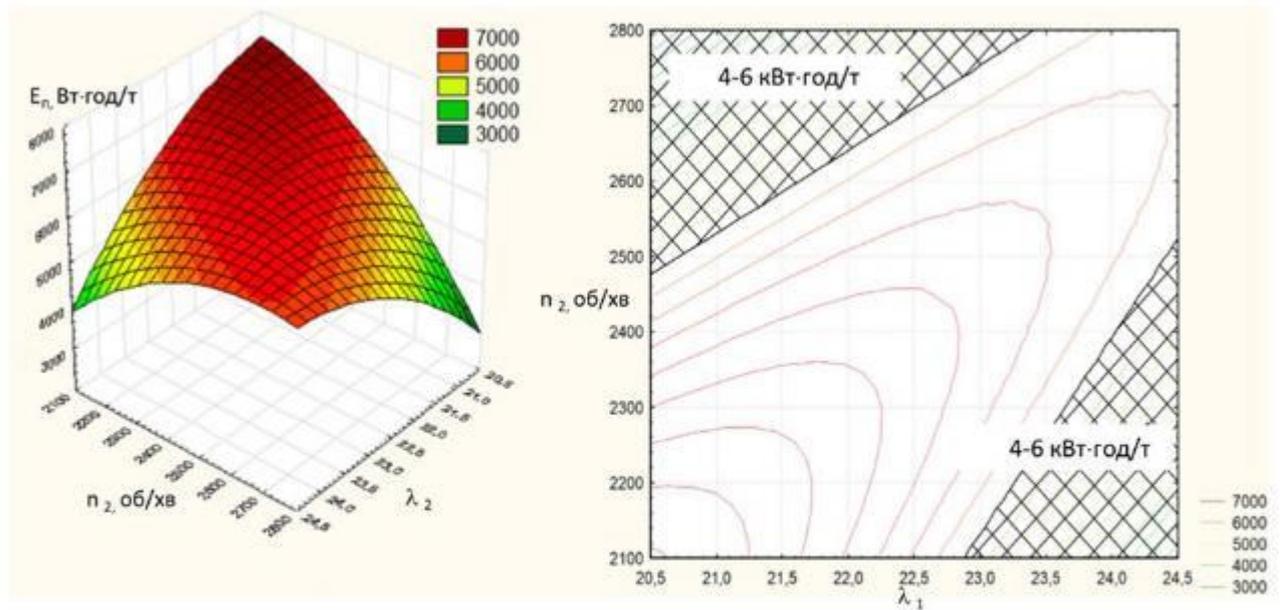
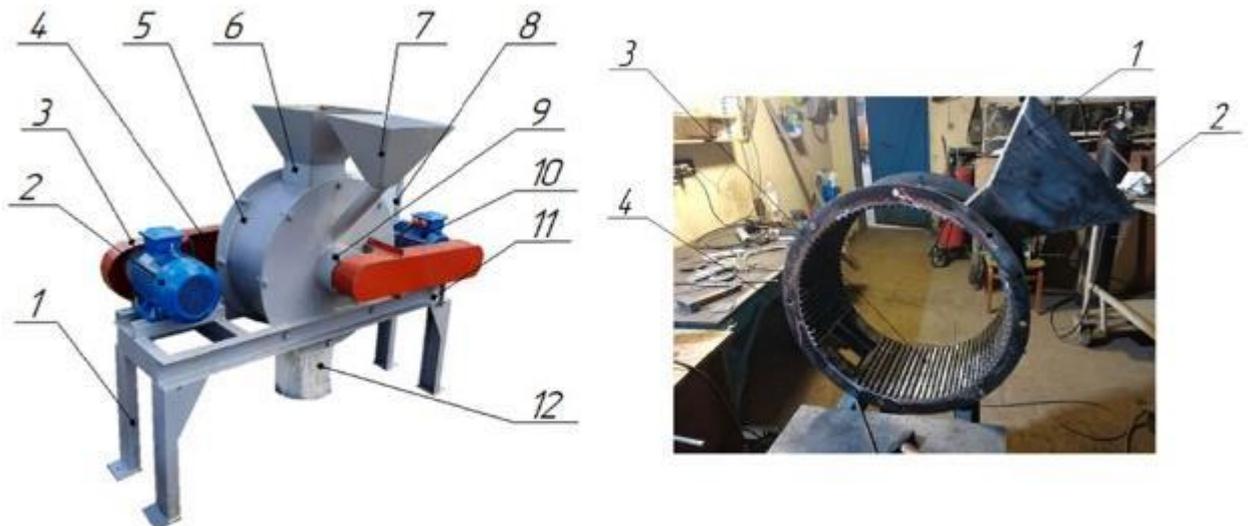


Рисунок 6 – Залежність питомих витрат енергії від ступеня подрібнення паростків λ_2 та частоти обертання ножового барабана n_2

7

Експериментальні дослідження



1 – опора; 2 – електродвигун приводу зовнішнього барабана; 3 – захисний кожух; 4 – ремінна передача; 5 – дробильна камера; 6 – центральний бункер; 7 – боковий бункер; 8 – шафа керування; 9 – підшипниковий вузол; 10 – електродвигун приводу внутрішнього барабана; 11 – рама; 12 – вивантажувальний рукав.

Рисунок 7 – Експериментальна дробарка для подрібнення пророщеного зерна

1 – центральний завантажувальний бункер; 2 – корпус дробильної камери; 3 – дека; 4 – вивантажувальне вікно.
Рисунок 8 – Дробильна камера експериментальної дробарки пророщеного зерна

8

Експериментальні дослідження

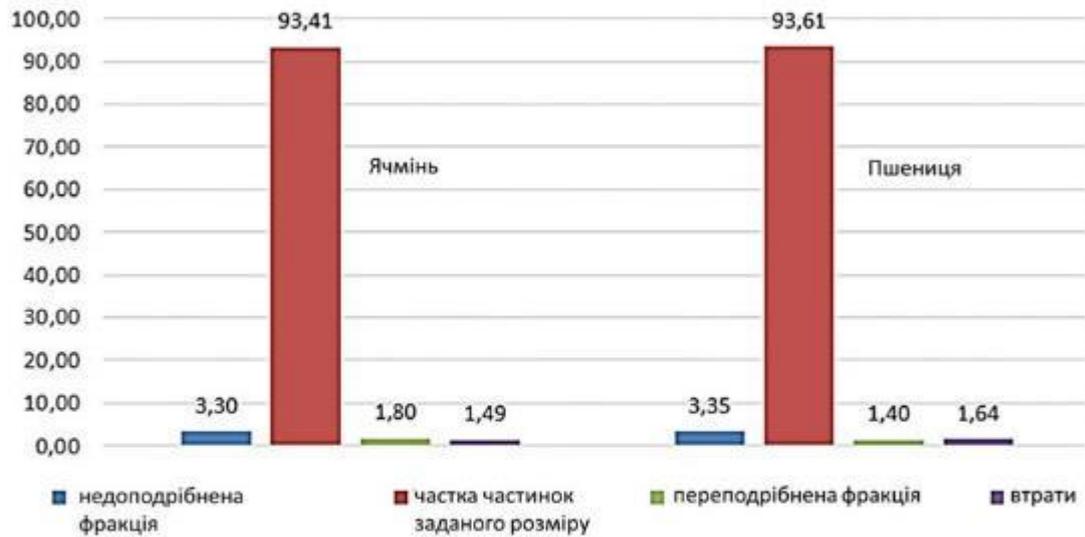


Рисунок 9 – Середній розмір частинок подрібненого пророщеного зерна

9

Експериментальні дослідження

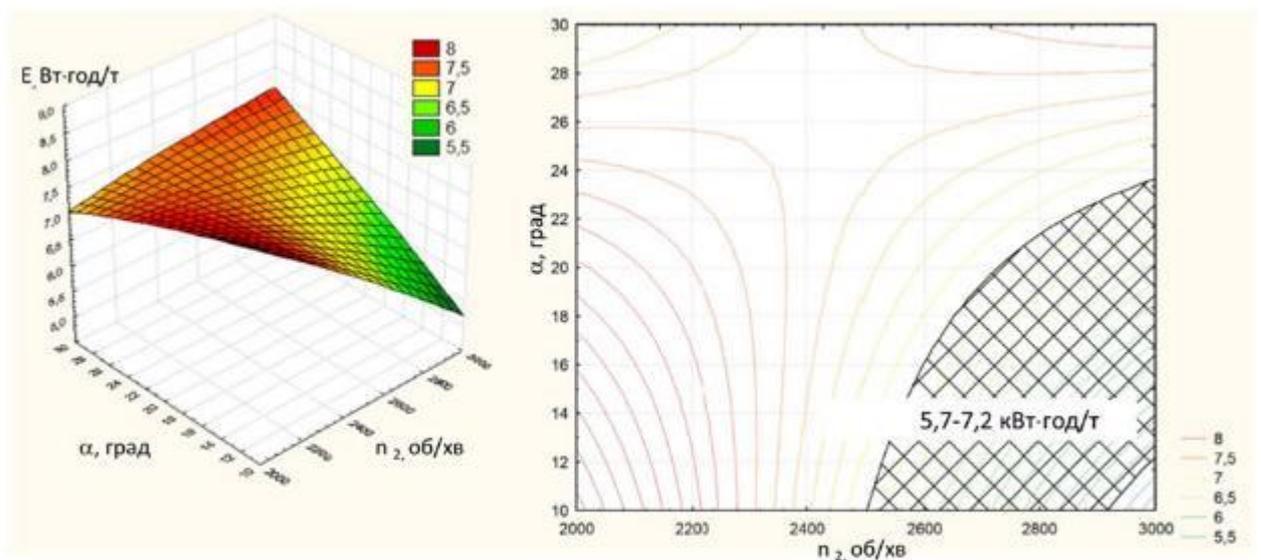


Рисунок 10 – Поверхня відгуку енергоємності подрібнення пророщеного зерна від кута загострення ножа та частоти обертання ножового барабана, та її двовимірні перерізи

10

Експериментальні дослідження

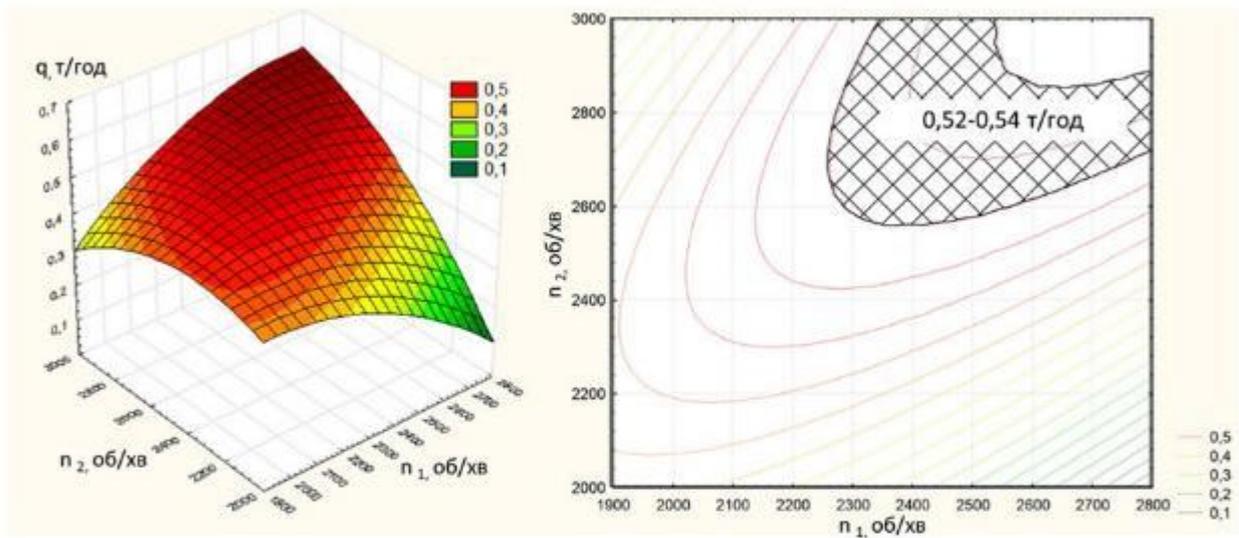


Рисунок 11 – Поверхня відгуку продуктивності дробильної установки від частоти обертання дробильного та ножового барабанів, та її двовимірні перерізи

11

Охорона праці

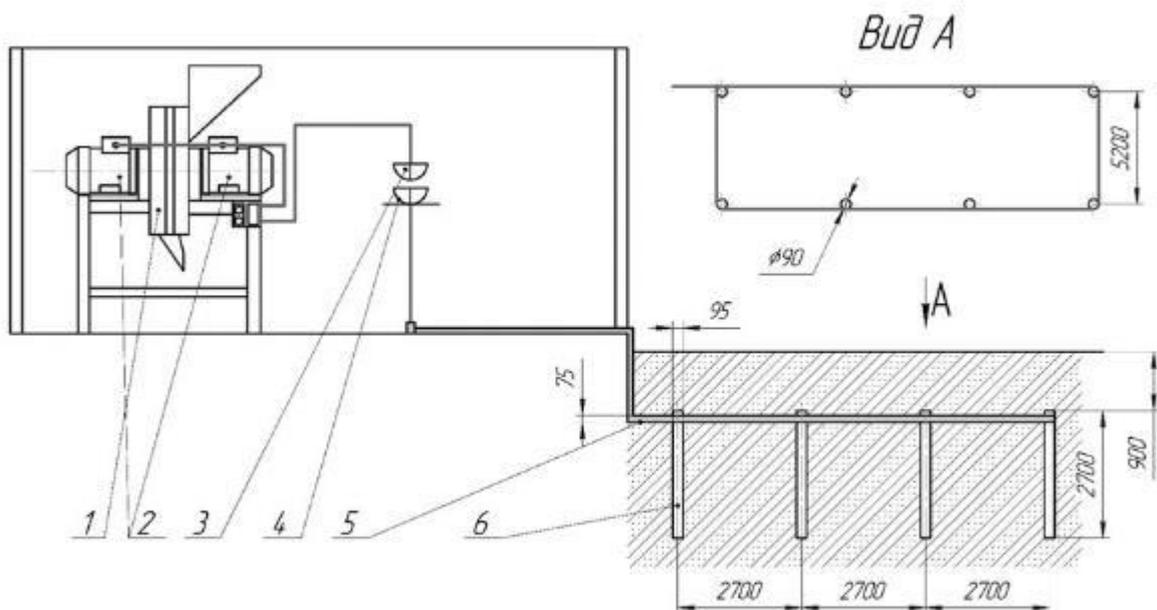


Схема контурного захисного заземлення подрібнювача: 1 - подрібнювач; 2 – електродвигун; 3 – триполюсна електрична вилка; 4 – триполюсна розетка; 5 – горизонтальна смуга; 6 – вертикальний заземлювач

12

Показники економічної ефективності

№	Показник	Одиниця	Подрібнювач -аналог	Розроблений подрібнювач
1	Питомі витрати на оплату праці	грн/т	390,4	325,3
2	Питомі витрати на електроенергію	грн/т	66,7	45,5
3	Питомі амортизаційні відрахування	грн/т	7,5	5,5
4	Питомі витрати на ремонт та обслуговування	грн/т	7,8	6,5
5	Загальні питомі експлуатаційні витрати	грн/т	472,4	382,8
6	Питомі приведені витрати	грн/т	484,2	393,3
7	Зниження питомих експлуатаційних витрат	грн/т	-	89,6
8	Зниження питомих приведених витрат	грн/т	-	90,9
9	Річна економія експлуатаційних витрат	грн/рік	-	18 816
10	Річний економічний ефект (за приведеними витратами)	грн/рік	-	19 100
11	Орієнтовний строк окупності капітальних вкладень	років	-	0,78

Загальні висновки

- У дипломній роботі розглянуто, теоретично обґрунтовано та експериментально перевірено конструктивно-режимні параметри подрібнювача пророщеного зерна з комбінованою дробильною камерою, що поєднує дію молотків і ножів. На основі виконаних досліджень сформульовано такі узагальнені висновки. За результатами аналітичного огляду встановлено, що існуючі молоткові дробарки, призначені для сухого зерна, не забезпечують необхідної однорідності помелу пророщеного зерна з неоднорідною структурою «зернівка + росток». Виявлено широкий гранулометричний склад, значну частку переизмельченої фракції, підвищену енергоємність процесу та відсутність спеціалізованих промислових подрібнювачів для пророщеного зерна. Обґрунтовано доцільність застосування комбінованих робочих органів (молотки та ножі) і створення спеціальної конструкції машини.
- Розроблено подрібнювач із комбінованою дробильною камерою, у якій на одній осі розміщено зовнішній молотковий барабан для подрібнення зернівки та внутрішній ножовий барабан для різання ростків. Побудовано структурну схему технічної системи, сформульовано критерії оптимізації (модуль помелу, ступінь подрібнення зернівки й ростків, енергоємність, продуктивність), розроблено математичні моделі продуктивності й енергетичних витрат для шарів дії молотків і ножів, а також методику розрахунку геометричних параметрів ножів за критеріями мінімальної роботи різання та надійності руйнування волокнистої структури ростків.
- Створено експериментальну базу досліджень: описано конструкцію подрібнювача та дослідної установки, схему навантаження, вимірвальну систему й методику визначення гранулометричного складу, модуля помелу, енергоємності та продуктивності. Використано методи планування багатofакторного експерименту для оцінки впливу частоти обертання барабанів, товщини молотків, відстані між ножами, кута загострення леза та частки ростків у суміші на показники процесу.
- Експериментально підтверджено ефективність розробленої конструкції. Використання молотків і ножів забезпечує високу однорідність помелу пророщеного ячменю та пшениці: частка фракції заданого розміру перевищує 93 %, недоподрібнена фракція становить близько 3,3 %, переизмельчена – до 1,8 %, втрати не перевищують 1,6 %. За раціональних режимів (модуль помелу 1,0–1,25 мм, частота обертання ножового барабана 2520–2960 хв⁻¹, кут заточки 12–22°) енергоємність подрібнення ножами становить близько 5,8–7,2 кВт·год/т. Максимальна продуктивність 0,52–0,54 т/год досягається при частотах обертання $n_1 = 2200\text{--}2600$ хв⁻¹ (молотковий барабан) і $n_2 = 2600\text{--}2850$ хв⁻¹ (ножовий барабан). Вологість продукту до і після подрібнення зберігається на рівні ≈14 %, що важливо для зберігання корму.
- Економічна оцінка показала доцільність впровадження розробленого подрібнювача. Питомі експлуатаційні витрати становлять близько 382–383 грн/т проти ≈472 грн/т у дробарки-аналога, питомі приведені витрати – ≈393 грн/т проти ≈484 грн/т. Річний економічний ефект за обсягу переробки 210 т/рік становить близько 19 тис. грн, орієнтовний строк окупності капітальних вкладень – менше одного року (–0,8 року), що підтверджує техніко-економічну ефективність запропонованого подрібнювача.