

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Механіко – технологічний факультет

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

Охорона праці та біотехнічних систем у
тваринництві
(назва кафедри)

_____ Хмельовський В.С.
(підпис) (ПІБ)

« _____ » _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Удосконалення конструктивних та режимних параметрів дробарки
для пророщеного зерна»

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Гарант освітньої програми

_____ Братішко В.В.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

_____ Ачкевич О.М.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав

_____ Тищишин Павло Валентинович
(підпис) (ПІБ)

КИЇВ – 2026

Механіко-технологічний факультет

д.т.н., проф. _____ Хмельовський В.С.
(наук. ступ., вч. звання) (підпис) (ПІБ)
« » 2026 р.

Завдання прийняв до виконання _____ **Тищишин П. В.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Він складається з реферату, ілюстрацій, таблиць, 24 посилань, та 37 рисунків.

Ключові слова: проектування, дробарка, комбінована камера, пророщене зерно, зародок, молотки, ножі, продуктивність, однорідність, економічний ефект.

Дипломна робота присвячена удосконаленню конструктивних та режимних параметрів дробарки для пророщеного зерна з метою підвищення ефективності процесу подрібнення та отримання однорідної кормової маси для тваринництва.

У роботі проведено аналіз існуючих конструкцій подрібнювачів кормів та визначено їх основні недоліки при роботі з пророщеним зерном. Обґрунтовано необхідність використання комбінованого робочого органу, який забезпечує ефективне подрібнення як зернової частини, так і паростків. Для подрібнення зерна запропоновано використання молоткових елементів, а для подрібнення паростків - ріжучих ножів.

Актуальність теми. Ефективне функціонування сучасних тваринницьких комплексів безпосередньо залежить від щоденного забезпечення поголів'я високоякісними, біологічно цінними кормовими добавками, зокрема пророщеним зерном. Проте аналіз існуючих конструкцій подрібнювального обладнання виявив їхній спільний недолік нездатність якісно переробляти таку гетерогенну сировину через суттєву різницю в геометричних розмірах, вологості та фізико-механічних властивостях самого зерна та в'язкого, еластичного зародка. Це призводить або до недоподрібнення паростків, або до переподрібнення борошністої маси. Тому проектування адаптивного комбінованого обладнання є актуальним науково-технічним завданням.

Об'єкт дослідження - процес механічного подрібнення гетерогенної сільськогосподарської сировини (пророщеного зерна та зародків).

Предмет дослідження: конструктивно-технологічні параметри, кінематична схема та робочі органи подрібнювача з комбінованою камерою.

Метою дипломного проекту є: комплексне інженерне проектування нової енергоефективної конструкції дробарки, здатної забезпечити високу однорідність та заданий ступінь подрібнення неоднорідної біомаси.

Методи проектування та досліджень. У роботі використано системний підхід до інженерного проектування, розрахунки робочих процесів.

На основі вивчення анатомічної будови сировини обґрунтовано та реалізовано інноваційне інженерне рішення: суміщення двох різних типів робочих органів в одному робочому просторі.

ЗМІСТ

Вступ	6
1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ	8
1.1. Технічні пристрої для подрібнення зерна	8
1.2. Аналіз та технічні рішення для дробарок	9
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ПОДРІБНЮВАЧІВ	27
2.1. Загальні принципи конструкції та роботи подрібнювачів для пророщеного та висушеного зерна	27
2.2. Обґрунтування конструктивних параметрів дробарки	31
2.3. Визначення розмірів молотків	32
2.4. Обґрунтування кута заточування ножа	33
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОБАРКИ ПРОРОЩЕНОГО ЗЕРНА	36
3.1. Методика дослідження гранулометричного складу кормів	36
3.2. Визначення вологості пророщеного висушеного подрібненого зерна	38
3.3. Продуктивність дробарки пророщеного зерна	40
3.4. Загальний пристрій та принцип роботи запропонованої дробарки пророщеного висушеного зерна	43
4. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕРНА	49
4.1. Результат процесу подрібнення пророщеного зерна	49
4.2. Оцінка розміру подрібнених частинок	50
5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ	54
5.1 Техніко-економічний аналіз ефективності дробарки	54
5.2 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях при експлуатації проєктованого обладнання	59
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

ВСТУП

Зараз як рослинництво, так і тваринництво потребують нових і водночас простих і зрозумілих технологій та технічних рішень.

Мета роботи - розробка та удосконалення конструктивних і режимних параметрів дробарки для підвищення ефективності процесу подрібнення пророщеного зерна.

Завдання дослідження:

– провести аналіз існуючих конструкцій дробарок та способів подрібнення кормів;

– визначити особливості процесу подрібнення пророщеного зерна;

– з проєктувати удосконалену конструкцію робочого органу дробарки;

– обґрунтувати конструктивні та режимні параметри обладнання;

– оцінити ефективність запропонованої конструкції дробарки.

Об'єкт дослідження - технологічний процес подрібнення пророщеного зерна у дробарці.

Предмет дослідження - конструктивні та режимні параметри дробарки і їх вплив на якість та ефективність подрібнення пророщеного зерна.

Для отримання м'яса вирощують велику рогату худобу, птицю, а також свиней. На сьогоднішній день свинарство дуже розвинена галузь. Це вигідно за низкою показників. Насамперед, свині дуже швидко ростуть. Низьке відношення споживання корму на кілограм приросту ваги. Відрізняються свині високою плідністю та коротким часом відтворення. М'ясо свиней цінується за своїми смаковими якостями та поживними властивостями. М'ясо та сало добре перетравлюються на 95 і 98% відповідно.

У промисловому свинарстві свиням заборонено доступ до пасовищ, їх утримують у приміщенні та годують лише комбікормом. Забезпечення належного харчування тварин вимагає розуміння їхніх потреб та забезпечення їх необхідними поживними речовинами, мінералами та вітамінами.

Тварини еволюціонували, адаптуючись до різноманітних кормів, одним з яких є свіжа трава. Поживні речовини, що даються тваринам, діють цілісно, не як окремі поживні речовини, а як єдине ціле. Один недорогий спосіб збагатити комбікорми натуральними вітамінами це додавання пророщених зерен. [1]

Коли пророщені зерна дають окремо від кормової суміші, сильніші тварини споживатимуть більше, тоді як слабші тварини споживатимуть менше розрахованої кількості. Щоб забезпечити споживання всіма тваринами у вольєрі частки пророщеного зерна, пропорційної їхньому споживанню корму, необхідно додавати пророщені зерна до кормової суміші для створення змішаного корму. Пророщені зерна мають неоднорідну структуру, що складається з самого зерна та зародка; іншими словами, вони являють собою нерівномірні грудки. [2]

Середня довжина зародка становить 2,5-3 см, що більше за розмір частинок кормової суміші. Щоб створити кормову суміш на основі пророщених зерен, пророщені зерна необхідно подрібнити перед змішуванням з кормовою сумішшю.[3]

Для подрібнення неоднорідних матеріалів, таких як пророщені зерна, потрібні різні типи інструментів. Для подрібнення зерна використовується молоток, а для подрібнення зародка ніж.[4]

У питаннях подрібнення кормів автори застосовують різні підходи до комплексної оцінки технічних засобів та їхнього функціонування.

Складність подрібнення пророщеного зерна полягає в тому, що матеріал є неоднорідним середовищем і складається з щільнішого зернівки і менш щільного паростка, які відрізняються один від одного щільністю, твердістю, геометричними розмірами, структурою, швидкістю витання, коефіцієнтом парусності. Після подрібнення різних матеріалів необхідно отримати однакові за розміром частинки. Розробка технічних засобів, що забезпечують одержання з пророщеного зерна однорідної подрібненої маси, є важливим завданням.

Метою цього дослідження є підвищення ефективності подрібнення пророщених зерен шляхом оптимізації конструкції та технічних параметрів подрібнювача.[5]

Предмет дослідження: Процес подрібнення пророщеного зерна за допомогою робочого органу подрібнювача.

1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ

1.1 Технічні пристрої для подрібнення зерна

Основою комбікорму є правильно підготовлені зернові інгредієнти, а також різні кормові добавки та премікси. Технологічний процес приготування зернової частини комбікорму складається з низки операцій: відділення домішок від зерна, подрібнення зерна, подача окремих інгредієнтів у змішувач згідно з рецептурою, змішування та зважування отриманого комбікорму.[5]

Машини для подрібнення кормових інгредієнтів різняться за принципами роботи та випускаються як загального, так і спеціалізованих моделей. Під час роботи вальцювого млина сировина втягується в зазор між валками та подрібнюється. Валки обертаються з різною частотою. Кінцевий розмір продукту контролюється регулюванням зазору між валками. У кам'яному млині один валок обертається приводним блоком, а інший за рахунок тертя між матеріалом, що подрібнюється, та попереднім каменем. Цей метод подрібнення використовується в кам'яних млинах.[6]

Дробарки використовують подібну конструкцію, за винятком того, що вихідний матеріал розплющується в пластівці, а не перемелюється на борошно. Товщина отриманих пластівців залежить від зазору між подрібнювальними валками та вмісту вологи в продукті. Під час помелу зерна площа поверхні частинок збільшується. При потраплянні тварин у організм ці більші частинки взаємодіють зі шлунковим соком тварини, збільшуючи засвоєння поживних речовин порівняно з немеленими продуктами.

Годування продуктами помелу може призвести до шлунково-кишкових захворювань. Кінцевий розмір частинок продуктів помелу варіюється залежно від виду та віку тварини або птаха. Для свиней комбікорм повинен мати розмір частинок 0,9-1,4 мм, для птахів 1,8-2,5 мм, а для корму для великої рогатої худоби 1,0-1,9 мм. Оцінка продуктів помелу повинна враховувати не лише споживання енергії на помел та коефіцієнт помелу, але й наявність дрібних частинок (менше ніж 0,25 мм) у помеленому кормі. Надмірне помелювання корму збільшує енергоємність процесу. Для досягнення бажаного кінцевого розміру частинок зерно помелюють у млинах різних конструкцій. Якщо сировина містить великі фрагменти, її спочатку попередньо подрібнюють, а потім первинно подрібнюють.

Молоткові дробарки широко використовуються завдяки своїй простій конструкції та високій надійності. Молоткові дробарки використовуються для подрібнення зерна, шроту та макухи. Необхідний розмір частинок регулюється встановленням сит з різним діаметром отворів. Продуктивність дробарки значно варіюється залежно від вмісту вологи, міцності, пропускної здатності млина та енергоспоживання сировини. Однак молоткові дробарки мають і недоліки, зокрема можливість отримання нерівномірних розмірів частинок у подрібненому

продукті. Досягнення бажаного кінцевого розміру частинок вважається задовільним. [7]

Ячмінь слід подрібнювати таким чином, щоб залишок на ситі 0-0,2 мм був менше 10%. Щоб зменшити споживання енергії в процесі дроблення, конструкція камери дроблення та робочі компоненти дробарки повинні базуватися на фізико-механічних характеристиках матеріалу, що подрібнюється. Тривалість холостого ходу подрібнених частинок у камері дроблення повинна бути мінімізована. Для подрібнення продуктів з нерівномірною структурою потрібні різні робочі компоненти.

1.2 Аналіз та технічні рішення для дробарок

Кормоприготувальні установки працюють, впливаючи на кормові інгредієнти різними засобами, включаючи температуру, вологість, тиск та механічні методи наприклад, зусилля ножів, молотків тощо. Використання цих методів призводить до змін форми, розміру та фізико-механічних властивостей інгредієнтів, що використовуються у виробництві кормів.

Слід зазначити, що механічні методи є одним з основних методів підготовки інгредієнтів. Механічна підготовка інгредієнтів, така як подрібнення, збільшує загальну площу поверхні частинок корму, що дозволяє подальшій підготовці, такій як термічна обробка, повніше взаємодіяти з обробним середовищем та зменшити витрату теплоносіїв.

Для підготовки зерна до корму використовуються такі методи, як розплющування та подрібнення. Подрібнення зерна дає плоскі пластівці товщиною 0,5-1 мм. Ці пластівці мають вологість не менше 14%. Слід зазначити, що вологість не повинна перевищувати 14%, щоб зерно було придатним для зберігання або додавання до комбікорму для подальшого зберігання. Під час помелу зерна його механічно подрібнюють за допомогою молотків. Кінцевим продуктом після помелу є частинки розміром від кількох десятих міліметра до кількох міліметрів. Відмінною особливістю пророслих зерен є те, що вони складаються з самого зерна та зелених паростків. Слід зазначити, що для помелу зерен з вологістю 14% або менше використовується молоток для удару по зерну.

Сила удару та внутрішня напруга, що виникає в результаті цього, в матеріалі перевищують молекулярну когезію зерна, що призводить до руйнування продукту. Для помелу зеленої сировини використовується різання, і для цього використовуються ножі. [8]

На рисунку 1.1 показано класифікацію зернодробарок.



Рисунок. 1.1 - Класифікація агрегатів для дроблення пророщеного зерна

Описаний тут пристрій працює наступним чином: продукт завантажується в бункер для завантаження, під дією сили тяжіння він переміщується до конуса та розподіляється по його периферії. Потім він падає на диск, що приводиться в рух електродвигуном. [9]

Продукт взаємодіє зі штифтами на рухомому диску, що призводить до його подрібнення. Потім відцентрова сила проштовхує подрібнену масу через отвори в решітці.

Недоліком такої конструкції є те, що штифти розташовані далеко один від одного, що ускладнює отримання дрібнодисперсних зерен.

Зерновий млин працює наступним чином: електродвигун приводить у рух ротор 5 через клиноподібну ремінну передачу, на якій встановлені робочі елементи. Матеріал, що подрібнюється, подається в бункер 4, де він котиться по похилій площині та досягає центру прискорювального диска першого ступеня подрібнення. Відцентрова сила переміщує матеріал на прискорювальному диску від центру до периферії диска 7, де грудки 16 потім взаємодіють з молотом 8 та декою 9, що призводить до їх руйнування. Частинки, розсіяні з деки 9, також падають на рухомий молот. Подрібнення досягається шляхом послідовного проходження грудок через робочі елементи в кілька етапів.

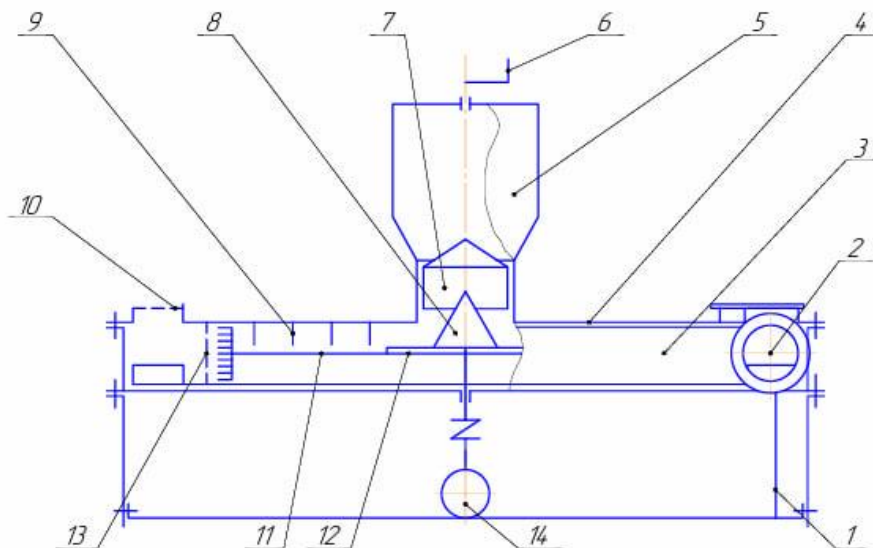


Рисунок. 1.2 - технологічна схема або конструктивне креслення дозувально-змішувального пристрою безперервної дії:

- 1 - Рама; 2 - Труба; 3 - Робоча камера; 4 - Кришка; 5 - Бункер; 6 - Привід;
 7 - Циліндрична оболонка; 8 - Конус; 9 - Штифт; 10 - Повітрозабірник;
 11 - Диск; 12 - Магнітне кільце; 13 - Решето; 14 - Електродвигун

У камері подрібнення подрібнений або частково подрібнений матеріал відкладається в проміжну купу. Прискорювальні диски 7 та молотки 8 створюють висхідний потік, який виштовхує подрібнений матеріал з камери подрібнення через верхній сепаратор 10 всередину корпусу 1. Грубі частинки, які не пройшли через сепаратор, потрапляють до центральної секції дроблення.

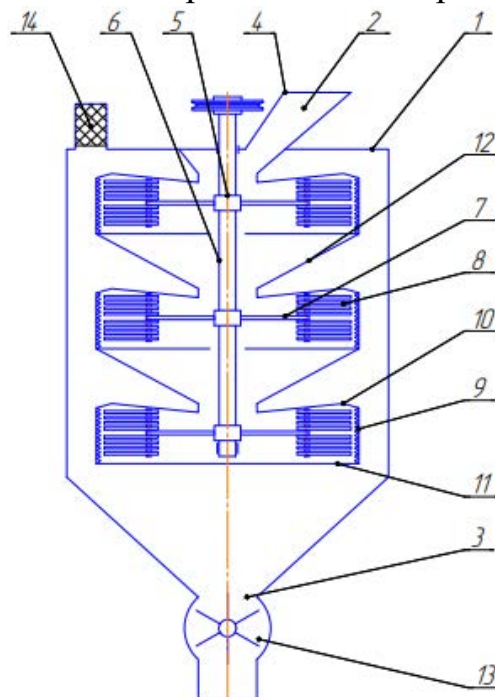


Рисунок 1.3 - Вертикальна багатоступінчаста дробарка молоткового типу

Центральна секція дроблення працює аналогічно верхній секції дроблення. Після аналогічного третього етапу подрібнений матеріал залишається на похилій поверхні та поступово скочується вниз. Потім він накопичується перед розвантажувальним отвором і виводиться з дробарки лопатевим живильником. Повітря всередині дробарки, яке містить подрібнений матеріал, проходить через фільтр і викидається в атмосферу. [10]

Під час дроблення матеріал надмірно подрібнюється, оскільки він проходить через кілька дробильних роторів. Це конструктивний недолік дробарки. При активації молотків на них прикладаються осьові навантаження, що призводить до передчасного зносу. Крім того, оскільки три ротори встановлені на одному валу, балансування ускладнюється, а вібрації посилюються.

Крім того, існують відцентрові ударні дробарки, в яких два ротори обертаються в протилежних напрямках і розташовані співвісно. Конструкція дробарки включає раму 1 (рисунок 1.4) опорну

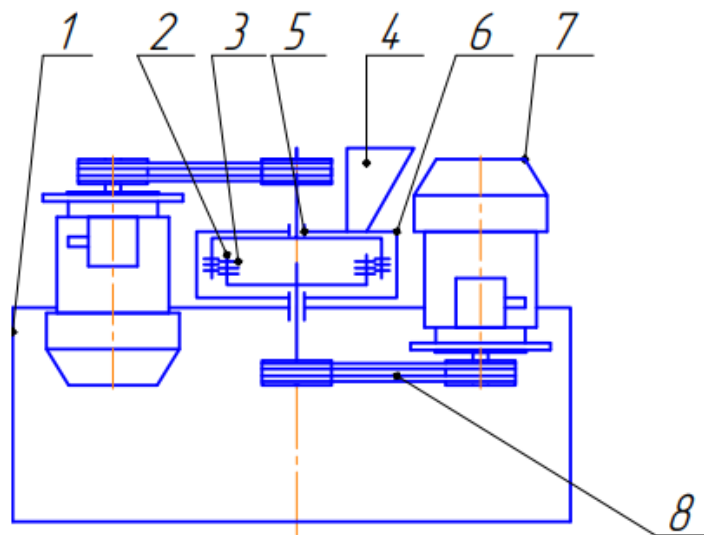


Рисунок 1.4 - Дробарка ударно-відцентрова

Робочими елементами є ротори 2 та 3, які обертаються в протилежних напрямках. Ротори встановлені з можливістю обертання з чотирма рядами молотків. Ротори встановлені в корпусі дробильної камери. Випускний отвір корпусу дробильної камери розташований тангенціально. Отвір для заповнення бункера виконаний у вигляді чотирисекційної щілини.

Ротори розташовані таким чином, що молотки, встановлені на зовнішньому роторі, входять у зазори між молотками внутрішнього ротора. Це забезпечує двоступеневе активне дроблення. Зовнішня опора ротора кріпиться до кришки камери дроблення, а внутрішня опора ротора кріпиться до опорної плити рами 1. Недоліком запропонованої конфігурації є необхідність високоточного вирівнювання барабанів. В іншому випадку молоти можуть зіткнутися один з одним, що може спричинити серйозні пошкодження. [11]

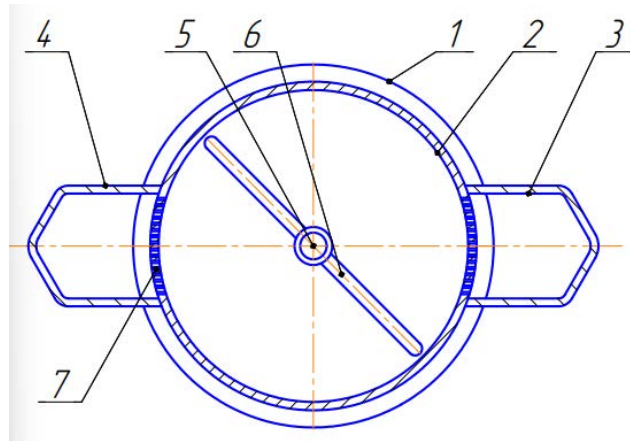


Рисунок 1.5 - дробарку кормів у розрізі вигляд зверху робочої камери.

На валу змонтовано ротор. Лопать встановлена нерухомо щодо ротора. Щоб запобігти попаданню сторонніх предметів, на обичайці встановлена кришка. Обичайка є циліндром, на утворюючому якого виконані отвори, які закриті знімними ґратами. Вивантажувальні патрубки розташовані за решітними вставками. Щоб унеможливити переподрібнення матеріалу отвори решіт мають різні діаметри.[12]

Робота дробарки здійснюється в такий спосіб. Вимикають привід та доводять частоту обертання робочого органу до номінального значення без навантажень. Після цього всередину дробильної камери подають матеріал, що подрібнюється. Відбувається взаємодія матеріалу з робочим органом та обичайкою в результаті продукт подрібнюють.

Недоліками конструкції є висока нерівномірність подрібнення матеріалу. Робочий орган виконаний у вигляді «планки», тому агрегат має високі питомі енерговитрати на подрібнення.

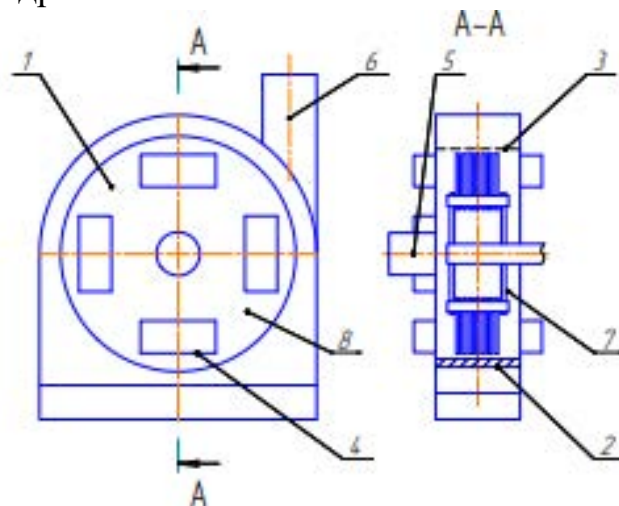


Рисунок 1.6 - Класичне обладнання для механічного подрібнення зерна:
1 - камера дробильна; 2 - дека; 3 - решето; 4 - камера вихрова; 5 - горловина завантажувальна; 6 - горловина вивантажувальна; 7 - ротор молотковий;
8 - бічна стінка.

Ротор молота взаємодіє з подрібненим матеріалом і створює потік повітря. Вихрові камери розташовані з обох боків дробарної камери та створюють потік повітря. Потік повітря, що створюється дробарним молотом, спрямований в іншому напрямку, ніж потік повітря, що створюється вихровими камерами. Дробарка працює наступним чином: у ненавантаженому стані активується механізм приводу дробарки. Коли ротор молота досягає заданої номінальної швидкості, подрібнений матеріал подається в неї. Коли подрібнений матеріал вивантажується з вихрової камери в напрямку, відмінному від напрямку руху молота, відбувається багаторазова взаємодія з молотом, що призводить до подрібнення. Після подрібнення до заданого розміру матеріал видаляється з дробарки через отвір у сітці. [13]

Процес виготовлення дробарки виглядає наступним чином: спочатку дробильний агрегат запускається в ненавантаженому стані. Після підтвердження того, що ротор досяг заданої робочої швидкості, подається матеріал, що підлягає подрібненню. При контакті з дробильними елементами матеріал набуває кінетичної енергії та під впливом відцентрової сили віддаляється від центру дробильної камери. Матеріал рухається вздовж стінки та різко зупиняється під кутом 90 градусів. Потім він змінює напрямок і падає на ротор, знову торкаючись ротора. Цей процес повторюється, доки подрібнені частинки не досягнуть заданого розміру. [14]

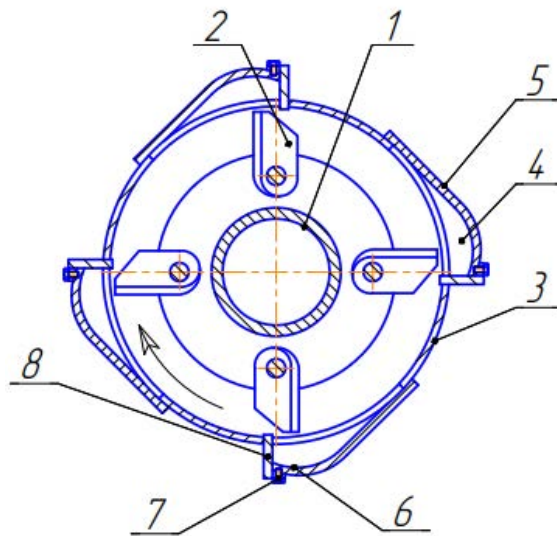


Рисунок 1.7 - Дробарка:

1 - ротор; 2 - робочий елемент; 3 - камера подрібнення; 4 - вихрова камера;
5 - стінка; 6 - кутова частина; 7 - шнек; 8 - стінка.

Недоліком дробарок є те, що коли матеріал стикається з дробильним елементом, він вилітає назовні під кутом, відмінним від 90° . Це означає, що матеріал не подрібнюється належним чином, а просто ковзає. Це призводить до збільшення витрат енергії, необхідної для подрібнення продукту. Під час

дроблення в кутах вихрової камери утворюються зони застою, де накопичується подрібнений продукт. В результаті подрібнений матеріал виводиться тангенціально з вихрової камери, а не до центру дробильної камери. Як наслідок, якість подрібненого матеріалу погіршується.

Дробарка складається з приводного блоку 1, клиноремінного приводного блоку 2, механізму подачі 3, що підвищує продуктивність, камери дроблення 4, бункера завантаження 5 та прямої труби 6. Камера дроблення має циліндричну форму. Ротор кільцевої дробарки показано на рисунку 1.9.

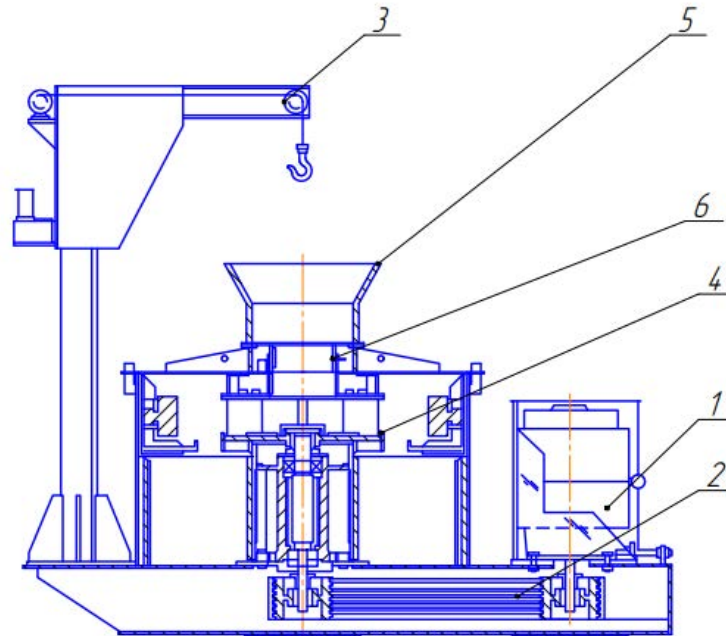


Рисунок 1.8 - Дробарка вертикальна EP0261913

На кожному кронштейні 7 встановлений молоток 8. Молоток 8 складається з восьмикутної голови, квадратного кріплення 9. Кріплення і голова молотка симетричні щодо осі симетрії, що утворює кут $\alpha = 5-150^\circ$ дотичної ротора 10.

Під час роботи, матеріал, що підлягає дробленню, безперервно подають у завантажувальний бункер 5 і далі через пряму трубку 6 і в центр ротора 10. Ротор 10 обертається зі швидкістю близько 900-1800 оборотів в хвилину. Матеріал викидається назовні у радіальному напрямку, матеріал прискорюється ротором і потрапляє до кишень 11.

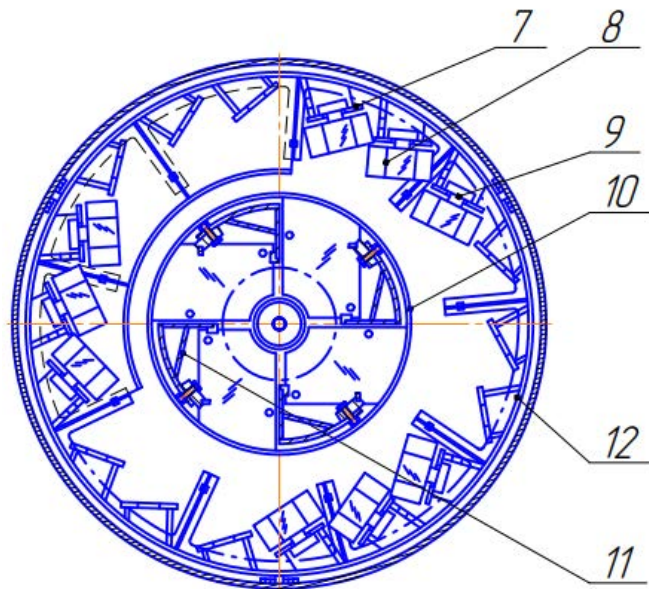


Рисунок 1.9 - Ротор дробарки з кільцем:

7 - кронштейн; 8 - молоток; 9 - кріплення; 10 - ротор; 11 - кишень; 12 - кільце

Матеріал викидається з кишень 11 назовні в бік молота 8. Подрібнений матеріал рухається під кутом приблизно $5 - 150^\circ$ до дотичної до ротора. Відхилення від тангенціальної траєкторії зумовлені нахилом подрібненого матеріалу в кишені 11 та коефіцієнтом тертя подрібненого матеріалу. Подрібнений матеріал викидається в радіальному напрямку. Кронштейни 7 встановлені в кільці 12 під таким кутом, що при перпендикулярному ударі молота 8 по подрібненому матеріалу траєкторія польоту подрібнених частинок становить приблизно 100° до дотичної до ротора. Таким чином, при перпендикулярному ударі молота по подрібненому матеріалу вся кінетична енергія молота передається матеріалу і лише невелика частина підведеної енергії витрачається на відбій. [15]

Недоліком розглянутої дробарки є те, що матеріал нерівномірно розподіляється по висоті камери дроблення, через що виникає неоднорідність процесу дроблення та робочих органів. У 1992 році компанія Okawa Koji розробила вертикальну дробарку, яку можна використовувати для подрібнення зерна та інших сипучих продуктів (рис. 1.10). Дробарка включає в себе вертикальний вал 1, встановлений в блоці підшипників живильника 3, розташованого у верхній центральній частині, і бункера 4.

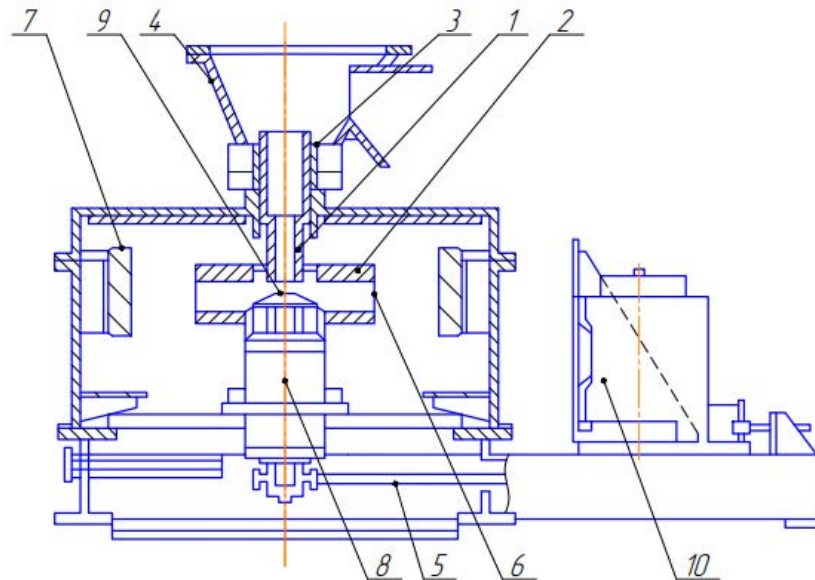


Рисунок 1.10 - Дробарка з вертикальним валом JP4110050:

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

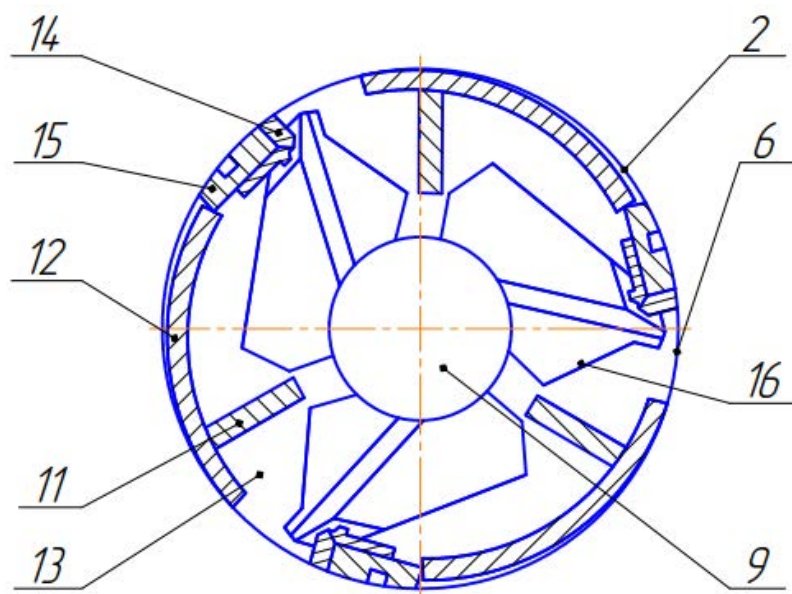


Рисунок 1.11 - Ротор

На нижньому диску ротора 2, виконані три лопаті 11 (рисунок 1.11), кути між якими рівні. Лопаті 11 встановлені на внутрішній поверхні стінок 12.

Працює дробарка в такий спосіб. Ротор 2 обертається з високою частотою на вертикальному валу, подрібнюваний матеріал подається з проковзування через матеріалу вивантажувальні вікна матеріал потрапляє на молотки 7 (рисунок 1.10). За рахунок цього, виникають внутрішні напруги і відбувається руйнування (подрібнення) подрібнюваного матеріалу. [16]

Недоліком розглянутої дробарки є можливе забивання внутрішньої частини ротора (між лопатями); необхідність високих швидкостей обертання ротора, щоб одержати гарантоване руйнування матеріалу. Звідси впливає висока енергоємність процесу подрібнення. Валкова дробарка складається з наступних складових частин. На рамі закріплені всі робочі та допоміжні елементи дробарки. До допоміжних елементів відносять електропривод, елементи передач, важелі, редуктор, лоток завантаження, елементи опор. До робочих елементів відносяться два валки: швидко рухається, між якими є зазор для потрапляння туди продукту. Валки взаємодіють між собою за допомогою зубчастої передачі. Зверху корпусу встановлений лоток, виконаний з можливістю коливання. Для спрощення вивантаження продукту до робочих органів лоток виконаний під невеликим кутом горизонталі. Корпус виконаний нерухомим. Усередині нього відбувається процес подрібнення продукту. Для того щоб при вібрації лотка не було передачі на фундамент, машина встановлена на віброізолюючі опори.

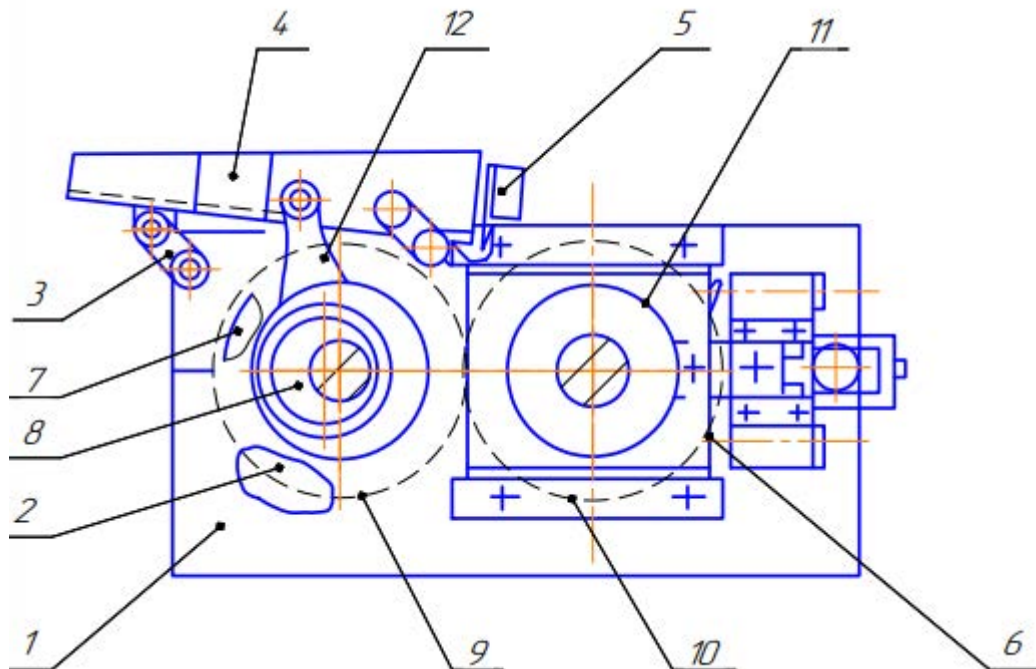


Рисунок 1.12 - Валкова дробарка:

1 - Корпус нерухомий; 2 - валок, що швидко рухається; 3 - важіль;
4 - завантажувальний лоток; 5 - відбивач; 6 - корпус рухомий; 7 - шків
приводний; 8 - ексцентрик; 9, 10 - передавальна пара шестерень; 11 - валок, що
обертається повільно; 12- важіль

Технологічний процес подрібнення протікає в такий спосіб. Подрібнений матеріал поміщають на лоток, якому примусово повідомляють коливальний рух за допомогою електродвигуна та системи важелів. За рахунок вібрації, що

повідомляється лотку, продукт по лотку переміщається від вищої точки до нижчої і, взаємодіючи з відбивачем, падає вниз. Продукт потрапляє у зазор між валками.

Електродвигун за допомогою редуктора здійснює обертання валків, які за рахунок різниці частоти обертання перетирають або плющують продукт. [17]

Процес виробництва дробарки виглядає наступним чином: спочатку матеріал, що підлягає подрібненню, подається в бункер. Магнітний очищувач видаляє металеві домішки та запобігає пошкодженню оброблюваних деталей. Потім зерно подається в обробну камеру через відкритий затвор. Зерно попередньо подрібнюється за допомогою нерухомого диска зі штифтами та обертового диска. Далі подрібнений матеріал потрапляє до блоку вторинного дроблення, де численними ударами молота подрібнюється до заданого розміру. Нарешті, він витісняється з обробної камери потоком повітря, що створюється вентилятором.

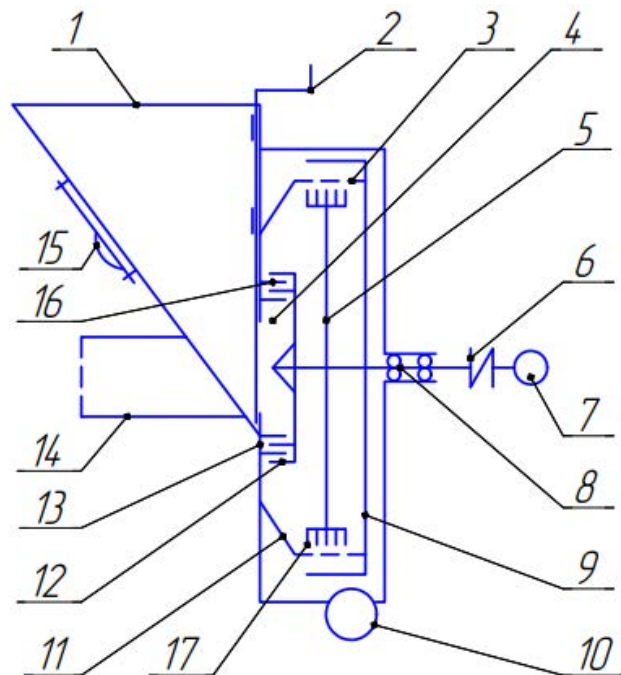


Рисунок 1.13 - Дробарка зерна:

- 1 - бункер; 2 - заслінка; 3 - решето; 4 - камера робоча; 5 - диск; 6 - муфта;
7-електродвигун; 8 - вузол підшипниковий; 9 - вентилятор; 10 - вихідний
патрубок; 11 - дефлектор; 12 - диск, що обертається; 13 - диск нерухомий;
14 - повітрозабірник; 15 - магнітний очищувач; 16 - штифт подрібнювальний;
17 - молоток

Процес виробництва подрібнювача виглядає наступним чином: матеріал, що подрібнюється, подається в бункер. Магнітний очищувач видаляє металеві домішки та запобігає пошкодженню рухомих частин. Далі зерно через отвір подається в робочу камеру. Продукт попередньо подрібнюється за допомогою нерухомого диска зі штифтами та обертового диска. Потім подрібнений матеріал потрапляє у вторинний подрібнювальний блок і стискається до заданого розміру

численними ударами молота. Нарешті, він виводиться з робочої камери потоком повітря, що створюється вентилятором. Недоліком є те, що штифт не може подрібнити пророслені паростки зерна до потрібного розміру, що призводить до нерівномірно подрібнених грудочок зерна.

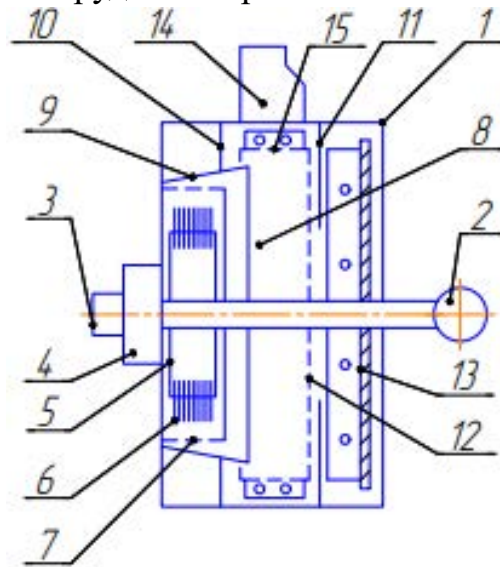


Рисунок 1.14 - Дробарка зерна із сепарацією:

- 1 - корпус; 2 - електродвигун; 3 - завантажувальний патрубок; 4 - магніт;
5 - камера дробильна; 6 - ротор з молотками; 7 - сито; 8 - камера сепарації;
9 - ребро жорсткості; 10, 11 - перегородка; 12 - сито; 13 - вентилятор;
14 - вивантажний патрубок; 15 - сито

Дробарка, зображена на рисунку, працює наступним чином: Зерно потрапляє в камеру дроблення 5 через вхід 3. Зерно подрібнюється взаємодією з молотом і проходить через сито 7. Потім матеріал проходить через армуючі ребра і потрапляє в розділювальну камеру 8. За допомогою вакууму, що створюється вентилятором, легкі домішки видаляються, проходячи через сито 12, а подрібнений матеріал виводиться з вихідного отвору 14 відцентровою силою через сито 15.

До недоліків можна віднести недоліки подачі в горизонтально розташований вхід та неможливість подрібнення таких матеріалів, як стебла, через конструкцію цього дробарного барабана.[18]

Дробарка працює наступним чином: Матеріал, що підлягає подрібненню, подається з вхідного отвору 14, потрапляє в розподільник і викидається на зовнішню периферію камери дроблення 5 відцентровою силою. Потім зерно подрібнюється молотом. Подрібнене зерно проходить через отвір сита 6 і падає на похилу поверхню 3 та виводиться з вихідного вікна 12 (рисунок 1.15).

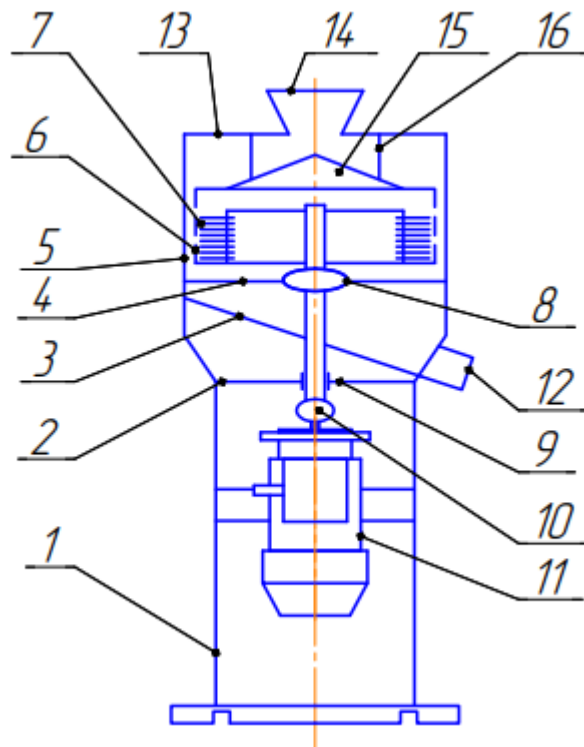


Рисунок 1.15 - Дробарка для зерна:

- 1 - рама; 2 - основа; 3 - скатна поверхня; 4 - спиця; 5 - камера дробильна;
 6 - решето; 7 - ротор з молотками; 8 - підшипниковий вузол; 9 - опора;
 10 - муфта; 11 - електродвигун; 12 - вікно вивантажене; 13 - кришка;
 14 - горловина завантажувальна; 15 - розподільник; 16 - напрямна

Дробарка працює наступним чином: матеріал, що підлягає подрібненню, подається у вхідний отвір 14, падає в розподільник, а потім викидається на зовнішній периметр дробильної камери 5 під дією відцентрової сили. Потім зерно подрібнюється молотками. Подрібнене зерно проходить через отвори сита 6 і падає на похилу поверхню 3, звідки видаляється через розвантажувальне вікно 12. Недоліком дробарки є те, що подрібнене зерно може накопичуватися на похилій поверхні, що може призвести до засмічення розвантажувального вікна. Оскільки на верхньому кінці вала, до якого закріплений дробильний барабан, немає опори, у валу виникає додатковий згинальний момент. Під час роботи це призводить до скорочення терміну служби конструкції. Молоткова дробарка для зерна виконує наступний технічний процес: зерно, що підлягає подрібненню, подається в бункер 1, як показано на рисунку 1.16.

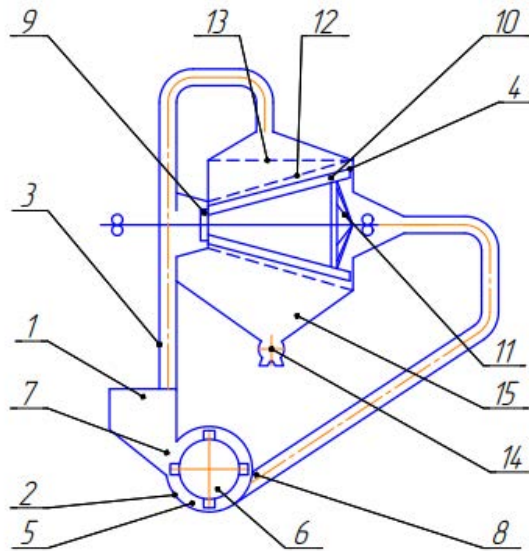


Рисунок 1.16 - Дробарка молоткова:

1 - бункер; 2 - корпус; 3 - трубопровід; 4 - роздільна камера; 5 - камера подрібнення; 6 - ротор; 7 - вікно завантажувальне; 8 - вікно розвантажувальне; 9 - диск; 10 - барабан бичовий; 11 - конус перфорований; 12 - решето; 13 - матеріал, що фільтрує; 14 - шлюзовий затвор; 15 - бункер

Після чого зерно подають через завантажувальне вікно 7 камеру подрібнення 5. Там за рахунок ударів молотками по зерну відбувається його руйнування. Потім за допомогою потоку повітря подрібнена маса трубопроводом прямує на лопаті розкидаючого конуса. За допомогою лопат продукт додатково обертається і направляється на перфоровану поверхню, виконану у формі конуса. Дроблене зерно, яке не пройшло через отвори 12, направляється в трубопровід 3 і повторне подрібнення. Матеріал, який пройшов отвори решета 12, направляється в бункер 15 і за допомогою шлюзового затвора 14 видаляється з дробарки.

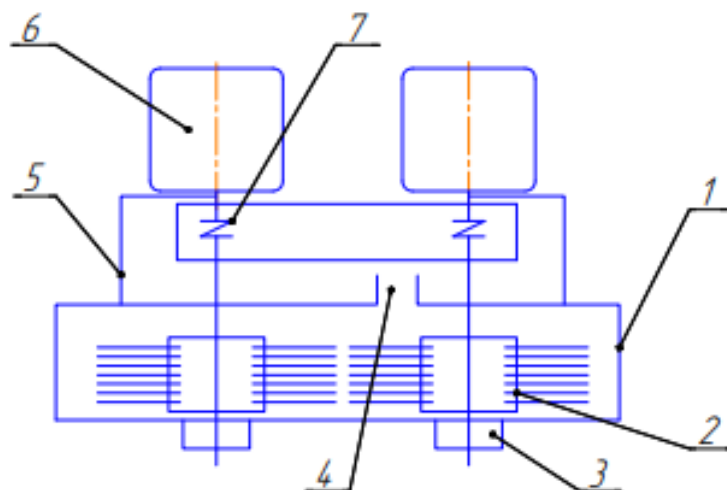


Рисунок 1.17 - Дробарка зерна:

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

Зернодробарка працює наступним чином: активується електродвигун 6, і подрібнювальний барабан 2 обертається через муфту 7. Потім зерно подається в подрібнювальну камеру через вхідний отвір 4. Зерно подрібнюється молотками, прикріпленими до подрібнювального барабана 2. Недоліком цієї подрібнювачі є те, що зерно, подрібнене в одному подрібнювальному барабані, може потрапляти в інший подрібнювальний барабан. Це призводить до подальшого подрібнення зерна, збільшуючи кількість пилу. В результаті збільшуються втрати та збільшується енергія, необхідна для подрібнення.

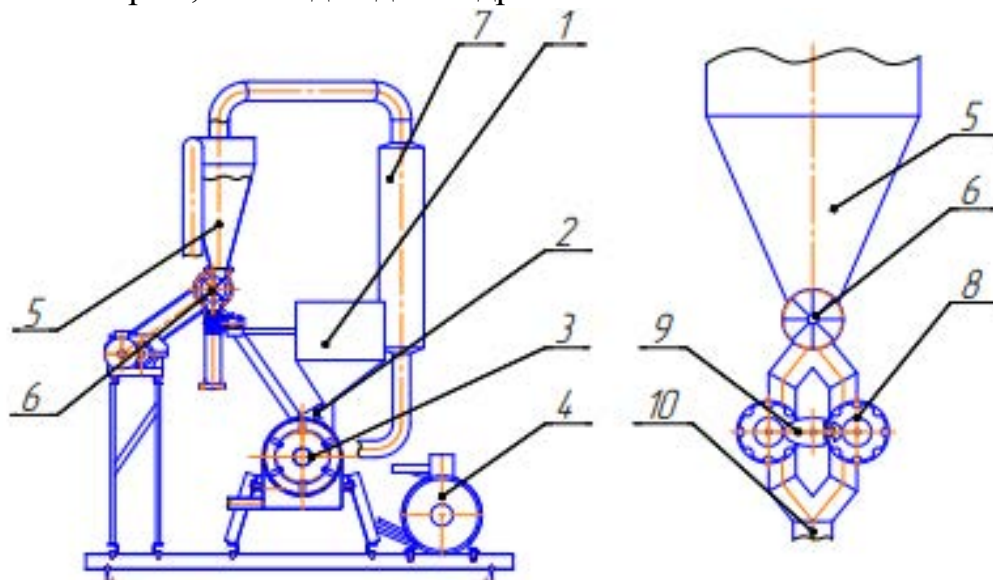


Рисунок 1.18 - Доробарка для пророщеного та висушеного зерна:
 1 - бункер; 2 - магнітний сепаратор; 3 - подрібнювальний барабан;
 4 - електродвигун; 5 - циклонний сепаратор; 6 - повітряний шлюз; 7 - корпус
 фільтра; 8 - активний ніж; 9 - контррізальний ніж; 10 - вивантажувальний жолоб

На рисунку 1.19 показано млин для подрібнення кормових сумішей, включаючи пророщене зерно.

Цей млин має дві подрібнювальні камери. Перша подрібнювальна камера має молоток і ніж, закріплені на шарнірах, тоді як друга подрібнювальна камера має лише ніж. Проросле зерно та частково проросле насіння подрібнюються в першій подрібнювальній камері, тоді як пророщене насіння подрібнюється в другій подрібнювальній камері. [20]

Недоліком цього млина є те, що оскільки подрібнювальні камери розділені, для переміщення подрібненого матеріалу з однієї камери в іншу потрібна енергія.

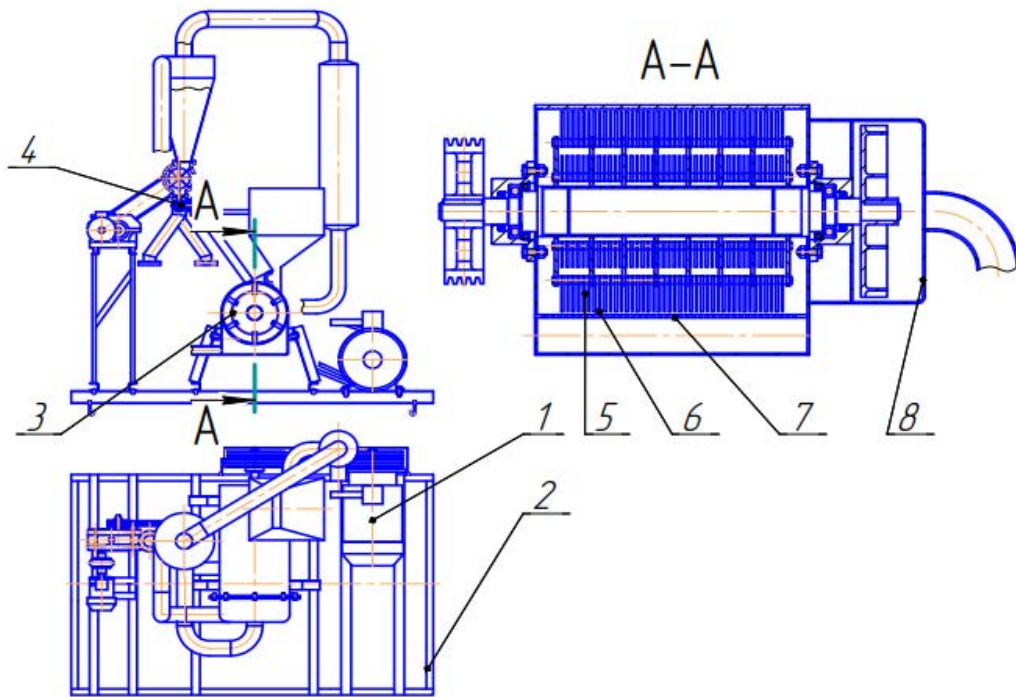


Рисунок 1.19 - Дробарка пророщеного висушеного зерна:

- 1 - електродвигун; 2 - рама; 3 - барабан дробильний; 4 - ножовий барабан;
5 - молотки; 6 – ножі; 7 - решето; 8 - вентилятор

Відомі та запропоновані в роботі й інші конструкції дробарок, але не всі вони можуть подрібнювати пророщені зерна через відсутність лопаті.

Аналіз подрібнювального обладнання показав, що найбільш підходящою конструкцією для подрібнення пророщених зерен є та, яка включає кілька типів подрібнювальних пристроїв, таких як молотки та ножі.

На основі цього огляду можна зробити такі висновки:

1. Для ефективного використання пророщеного зерна необхідна попередня обробка. Ці попередні обробки включають сушіння, подрібнення та змішування пророщеного зерна з кормовими сумішами.[21]

2. На жаль, наразі промисловість не виробляє подрібнювачів, здатних досягти необхідного ступеня подрібнення та високої однорідності пророщеного зерна, а також не існує жодних експериментальних моделей таких подрібнювачів.

3. Пророщене зерно характеризується неоднорідною структурою як за фізичними, так і за механічними властивостями та геометричними розмірами, що вимагає різних методів подрібнення для різних частин продукту. Зерна подрібнюють молотком, а пророщені частини зрізають ножем.

Проведений аналіз існуючих конструкцій і технологічних схем молоткових млинів та подрібнювачів чітко показав, що сучасний парк серійного кормоприготувального обладнання є практично непридатним для переробки гетерогенних матеріалів. Головна проблема полягає в тому, що такі матеріали поєднують у собі складові з кардинально різною щільністю, вологістю та

внутрішньою волокнистою структурою. Слідом за аналізом біомаси, пророщені зерна було визначено як один із найбільш складних і показових прикладів такої гетерогенної сировини.

Традиційні молоткові млини, що функціонують суто за принципом руйнування матеріалу вільним або обмеженим ударом, виробляють матеріали вкрай неоднорідної та нестабільної форми після подрібнення. Це зумовлено анатомічною специфікою пророщеного зерна: крихка борошниста частина (ендосперм) легко руйнується під дією ударних навантажень, тоді як пророслий зародок (паросток) володіє високою еластичністю і гнучкістю. Як наслідок, під ударами стандартних молотків паростки не подрібнюються, а лише зазнають пластичної деформації та зминання.

У спробах досягти кондиційного помелу на існуючому обладнанні оператори змушені впроваджувати заходи, які суттєво погіршують загальну ефективність процесу. Зокрема, використання сепарувальних сит з малими отворами критично збільшує час перебування матеріалу в камері подрібнення. Оскільки вологі та волокнисті частинки забивають перфорацію деки, зернова маса починає здійснювати багатократну циркуляцію в робочій зоні.

Це призводить до прогресуючого надмірного подрібнення кінцевого продукту, інтенсивного утворення пилу, замилювання робочих органів, збільшення втрат поживних речовин через перегрів маси, а також до стрімкого зростання питомого споживання енергії в процесі подрібнення. Таким чином, традиційний механічний удар не здатний забезпечити збалансоване руйнування компонентів із різними реологічними властивостями.

З огляду на виявлені технічні та технологічні суперечності, виникла гостра необхідність у створенні принципово нової конструкції робочої камери. Метою подальшого дослідження є суттєве підвищення загальної ефективності та якості процесу подрібнення пророщених зерен шляхом оптимізації конструкції камери подрібнювача та раціонального обґрунтування кінематичних і динамічних параметрів робочого процесу.

Для практичної реалізації поставленої мети та розв'язання виявлених інженерних проблем, у наступних розділах проекту необхідно виконати такі завдання дослідження.

Перевірити, деталізувати та обґрунтувати загальну конструкцію та блок-схему технологічного процесу подрібнювача. Дана схема повинна розроблятися з обов'язковим урахуванням гетерогенної структури пророщених зерен. Необхідно закласти такий принцип роботи, який дозволить розділити або гармонійно поєднати зони ударного впливу та швидкісного різання, що забезпечить своєчасну евакуацію кондиційного продукту з камери та попередить забивання сит.

Розробити комплексну математичну модель робочого процесу комбінованої камери. Математичний апарат повинен враховувати динамічний

баланс сил, кутову швидкість ротора, а також чіткі конструктивні параметри системи, зокрема кількість молотків та ножів, встановлених на відповідних барабанах. Крім того, в межах моделювання необхідно аналітично перевірити та обґрунтувати оптимальний кут заточування ножа, оскільки саме геометрія різальної кромки визначає якість розділення волокнистого паростка без ефекту його розмивання.

Спроекувати технічні креслення дробарки відповідно до розрахункових параметрів. Графічна частина проєкту повинна включати повний пакет конструкторської документації: від загального вигляду установки до складальних креслень комбінованої камери та деталювання її робочих органів (молотків, ножів, валів та сит). Спроектвані креслення мають відповідати всім чинним стандартам ЕСКД.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ПОДРІБНЮВАЧІВ

2.1 Загальні принципи конструкції та роботи подрібнювачів для пророщеного та висушеного зерна

Після розгляду різних конструкцій подрібнювачів було виявлено, що для подрібнення різнорідних матеріалів, таких як пророщені зерна, потрібні різні типи робочих елементів, такі як молотки та ножі. Існуючі молоткові млини мають недолік у вигляді наявності лише одного типу робочого елемента та двох подрібнювальних камер, розташованих на певній відстані одна від одної. Тому матеріал, що подрібнюється, необхідно транспортувати з однієї подрібнювальної камери до іншої, що споживає додаткову енергію. Крім того, використання двох приводних механізмів для живлення робочих елементів ускладнює конструкцію, збільшуючи витрату металу та вартість.[23]

Метою цього подрібнювача є покращення однорідності кінцевого розміру частинок пророщених зерен після подрібнення за допомогою різних робочих елементів: молотків у зовнішньому барабані та ножів у внутрішньому барабані. Це усуває необхідність транспортування матеріалу між подрібнювальними барабанами. Крім того, розташування подрібнювальних барабанів в одній камері на одній осі зменшує споживання енергії під час процесу подрібнення.

Запропоновано систему для подрібнення пророщеного зерна. Ця система складається з камери подрібнення, бункера для подрібненого матеріалу та рами, в якій розташований дозуючий клапан, розташований під нею. Бункер, дозуючий клапан та труби закріплені на торці камери подрібнення. Усередині камери подрібнення встановлено два типи робочих елементів: молотки та ножі (рис. 2.1).

Розпірні втулки кріпляться до штифтів між молотками. Молотки обертаються встановлені на зовнішньому барабані, а ножі – на внутрішньому. Барабани розташовані співвісно. Подрібнювальний барабан оснащений двома приводними механізмами. Усередині камери подрібнення розташовані дека та сита..

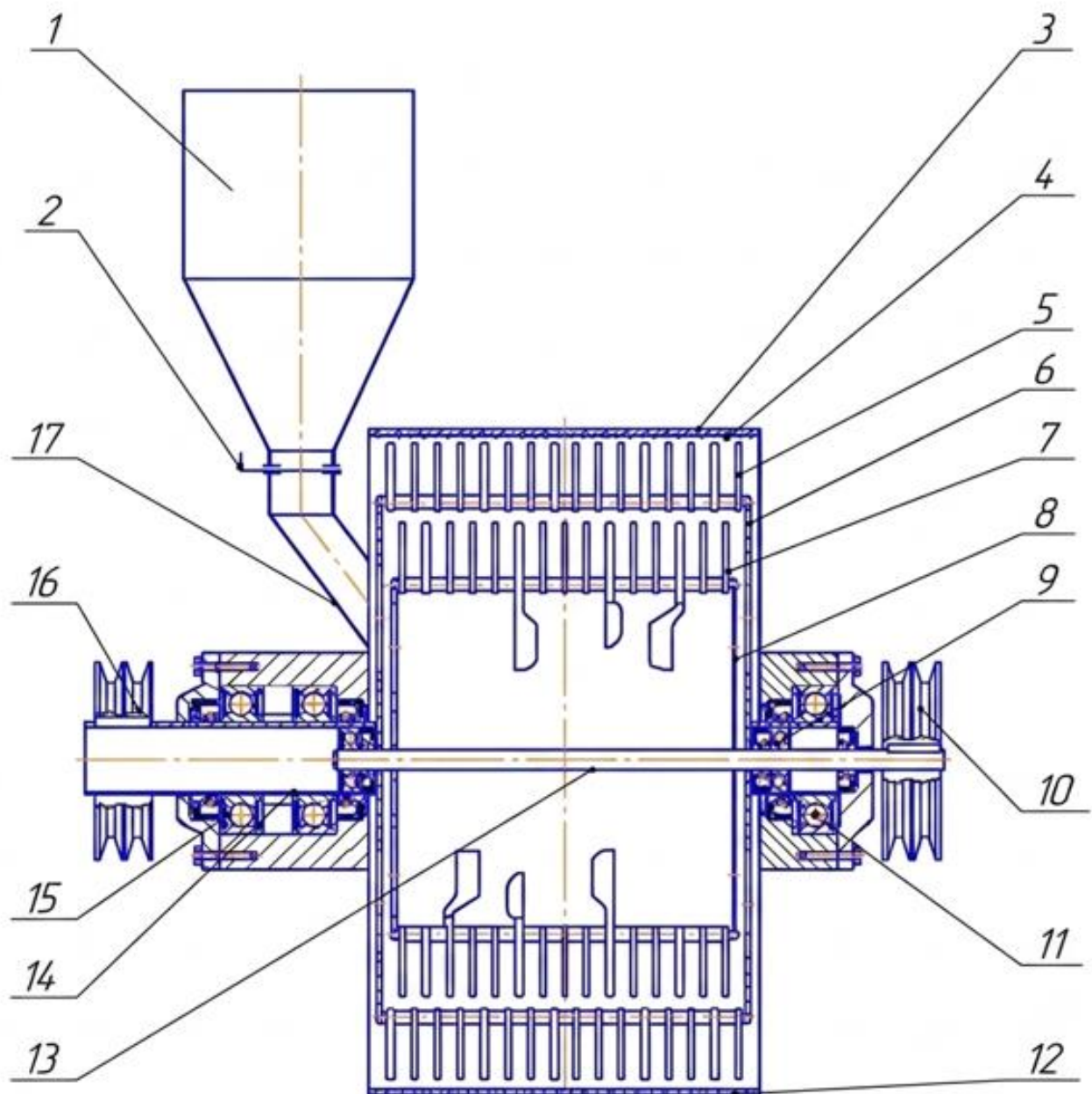


Рисунок 2.1 - Комбінована дробильна камера:

1 - бункер завантажувальний; 2 - сланця дозуюча; 3 - камера дробильна комбінована; 4 - дека; 5 - молоток; 6 - зовнішній дробильний барабан; 7 - ніж; 8 - ножовий барабан; 9 - внутрішній підшипник; 10 - шків; 11 - зовнішній підшипник; 12 - решето; 13 - вал внутрішній; 14 - вал зовнішній; 15 - зовнішній підшипник; 16 - шків; 17 – труба

З метою вдосконалення процесу подрібнення пророщеного зерна подану дробарку розглядають як окрему технічну систему (рис. 2.2).

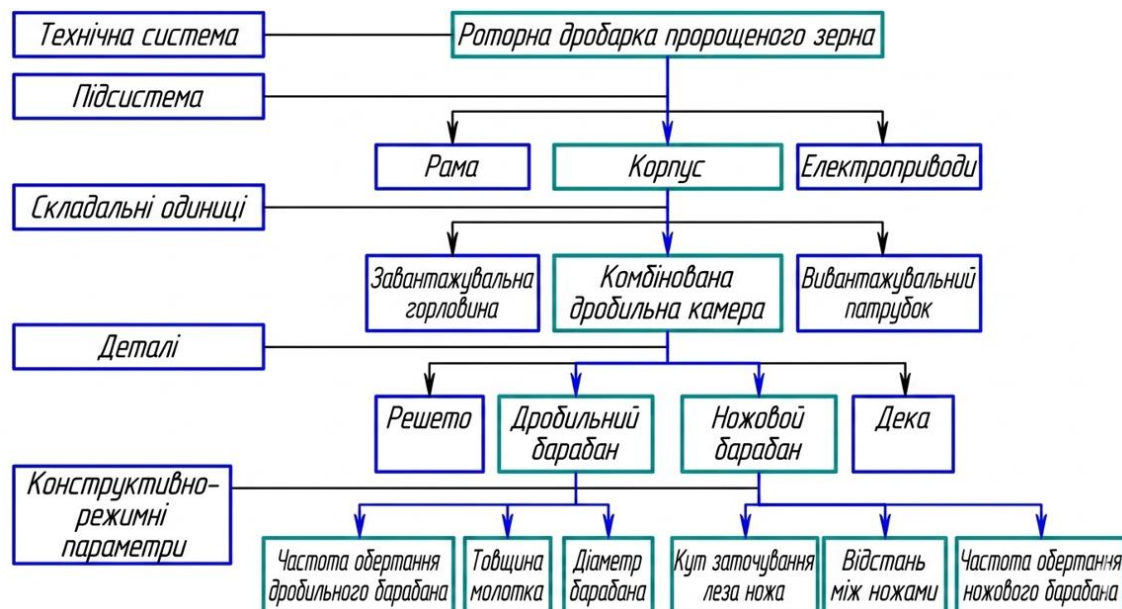


Рисунок 2.2 - Блок - схема основних елементів дробарки

Конструкція дробарки, яка має розроблену композитну камеру дроблення, складається з підсистемних та складальних елементів. Конструктивні та робочі параметри дробильного барабана та ріжучого барабана суттєво впливають на якість дроблення пророщених зерен.

Унікальною особливістю процесу подрібнення зародків є те, що продукт, що подрібнюється, має структуру неоднорідної форми та щільності: коротку зернівку з прикріпленим зародком різної довжини та щільності. Тому значення енергії під час процесу подрібнення залежатимуть від взаємодії між шліфувальним елементом та об'єктом, що подрібнюється.

Згідно з технологією, на подрібнення вводиться висушене пророщене зерно, яке по суті являє собою дві слабо зв'язані одиниці з різними властивостями зернівку та зародок. При першій взаємодії з шліфувальним елементом зернівка відділяється від зародка, і продукт по суті перетворюється на трифазну структуру: повітря, зернівка та зародок. Тому при подрібненні необхідно враховувати різні властивості зернівки та зародка.

Найоптимальнішим методом подрібнення таких продуктів є використання системи молоткового млина. Ця система розділяє продукт на два потоки (шари), і кожен відокремлений, однорідний продукт потрібно подрібнювати окремо. Цей удосконалений метод зменшує загальні енергетичні витрати на подрібнення продукту та підвищує продуктивність обладнання.

Для розділення процесу подрібнення на кожному етапі можна використовувати конструкцію складної подрібнювальної камери. Її кінематична схема показана на рисунку 2.3. Процес роботи цієї подрібнювальної камери виглядає наступним чином: Зерно рухається по похилій трубі. Після виходу з труби зерно направляється до центру подрібнювальної камери. Обертовий барабан, оснащений молотками та ножами, створює повітряний потік, який

підхоплює пророщене зерно та направляє його від центру до периферії з постійною швидкістю V_M .

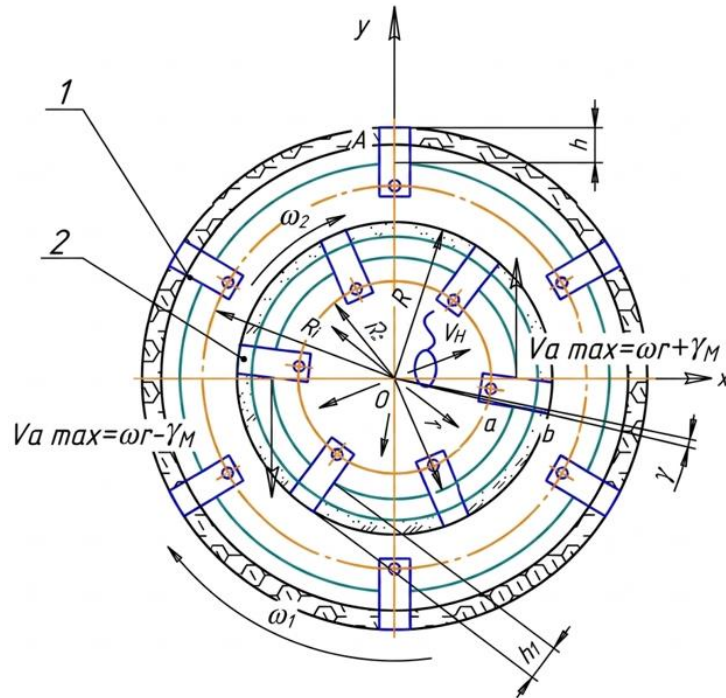


Рисунок 2.3 - Кінематична схема комбінованої дробильної камери:

1 - молоток; 2 - нож; γ - центральний кут між радіусами; $r = Oa$ - радіус внутрішньої ріжучої кромки; 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 - верх ножа; h - довжина робочої частини молотків; h_1 - довжина робочої частини ножів

Пророщене зерно вдаряється об лопаті та розщеплюється на дві частинки, різні за масою та розміром, але з однаковою початковою швидкістю. Отже, кожна з цих частинок має різну початкову кінетичну енергію, яку необхідно витратити для подолання сил опору потоку повітря.

Кінетичну енергію зерна можна визначити виразом

$$E_1 = \frac{m_1 v^2}{2} \quad (2.1)$$

де m_1 - маса зернівки, кг;

v - швидкість руху паростка, м/с.

Енергія, що витрачається на переміщення зернівки при подоланні сил опору повітря, може бути визначена за виразом:

$$E_2 = \frac{m_2 v^2}{2} \quad (2.2)$$

де m_2 - маса паростка, кг;

v - швидкість руху паростка, м/с

Енергія, що витрачається на переміщення зернівки при подоланні сил опору повітря може бути визначена за виразом:

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

де F_1 - сила опору повітря руху зернівки, Н;

X_1 - максимальна відстань, яка здатна подолати зернівку, м.

Енергія, що витрачається на переміщення паростка при подоланні сил опору повітря, може бути визначена за виразом:

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

де F_2 - сила опору повітря руху паростка, Н;

X_2 - максимальна відстань, яка здатна подолати паросток, м.

За умовою $m_1 > m_2$, $E_1 > E_2$.

Опір потоку повітря пропорційний проекції поперечного перерізу частинки, перпендикулярної до потоку повітря. Оскільки площа фронтальної поверхні зерна менша за площу поверхні паростка, $F_1 < F_2$.

Тоді $F_1 X_1 > F_2 X_2$ цього максимальна відстань, яку здатна подолати зернівка визначимо за виразом:

$$X_1 > \frac{F_2 X_2}{F_1} \quad (2.5)$$

Як наслідок $X_1 > X_2$.

Тому частинки з меншою площею поверхні та більшою вагою долають більші відстані або рухаються до зовнішнього краю барабана.

Важчі частинки з високою кінетичною енергією утворюють зовнішній шар і взаємодіють із зовнішньою системою молота, тоді як легші, довші частинки з низькою кінетичною енергією утворюють внутрішній шар і взаємодіють із внутрішньою системою ножів. Таким чином, продукти з кількома шарами подрібнюються в одній шліфувальній камері.

2.2 Обґрунтування конструктивних параметрів дробарки

Найважливішими параметрами при розрахунку дробильного барабана є геометричні розміри дробильного барабана та ножового дробильного барабана, а також кількість рухомих частин у кожному з них.

Для розрахунку дробарки необхідно знати початкові та кінцеві розміри матеріалу, що подрібнюється, його фізичні та механічні властивості, а також типи рухомих частин у машині.

Розрахунок об'єму дроблення починається з геометричних розмірів камери дроблення та дробильного барабана. Об'єм обробки дробарки за секунду пов'язаний з питомим навантаженням на дробильний барабан наступним рівнянням:

$$q' = q_p / (DL) \quad (2.6)$$

Дробильні установки, що застосовуються у сільському господарстві мають питомі навантаження від 2 до 6 кг/см². Такий розкид значень пояснюється швидкістю молотків, тобто. частотою обертання дробильних барабанів. Верхня межа питомого навантаження характерна для молотків, що працюють із швидкостями 65-75 м/с.

Довжину дробильного барабана можна визначити за допомогою виразу $L=D/k$. Враховуючи цей вираз, діаметр дробильного барабана можна визначити за формулою:

$$D = \sqrt{kq / q'} \quad (2.7)$$

Формулу можемо записати у вигляді:

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

Коефіцієнт А вибирають залежно від типу подрібнюючого барабана, тобто. відношення великої півосі еліпсоїда до малої.

2.3. Визначення розмірів молотків

Працюючи молотки взаємодіють із зерном, тобто. молоток теж отримує опір з боку продукту, що подрібнюється. Щоб у процесі роботи молоток не передавав удари на вісь кріплення і далі на корпуси підшипників дробильної камери повинно дотримуватися співвідношення:

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

де c - відстань від осі кріплення молотка до центру ваги;

l - відстань від осі кріплення до краю молотка;

ρ_0 - радіус інерції молотка щодо осі кріплення.

Якщо молоток пластинчастий на якому виконано один технологічний отвір, відстань можна розрахувати за формулою:

$$c = (a^2 + b^2) / (6a) \quad (2.10)$$

де a - довжина молотка, м;

b - ширина молотка, м.

Якщо працюють пластинчастим молотком, але у якого два отвори, відстань z можна знайти з виразу:

$$c = -\left(\frac{A}{2}\right) + \sqrt{(A^2 / 4) + B}, \quad (2.11)$$

Щоб зробити розрахунок врівноважених на удар молотків та дисків, дотримуються такої послідовності. Необхідно визначити розміри l і R_{II} , застосувавши вираз:

$$R_{II} = 2,25l, \quad (2.12)$$

$$l = \frac{9}{4}R_{II} = \frac{4}{9}[(D / 2) - l], \quad (2.13)$$

Звідси $l=0,154D$ і $R_{II}=0,346D$

Якщо розрахунковий діаметр барабана D менший за сорок сантиметрів, то довжину барабана потрібно приймати більше, ніж $l = 0,2D$, або молотки будуть короткими і не зможуть виконувати повне подрібнення продукту. Розміри молотка і ножа, а саме довжину a і ширину молотка врівноваженого на удар, необхідно вважати, з урахуванням $a=1,5$, $l=0,23D$ и $b=(0,4-0,5)$, $a=0,1D$.

Діаметр отвору в молотку або ножі для кріплення на пальці встановлюють з урахуванням міцності матеріалу ножа (молотка). Діаметр пальця складає 16-18 мм.

2.4 Обґрунтування кута заточування ножа

При реалізації різних технологічних процесів у промисловості та в сільському господарстві, наприклад, при попередній обробці та підготовці компонентів до змішування, необхідно проводити подрібнення продуктів.

Подрібнювані матеріали можуть бути органічного та неорганічного походження і істотно мати відмінності за своїми фізико-механічними та міцнісними властивостями.

Продукти рослинного походження характеризуються розкидом фізико-механічних властивостей, які залежать в основному від вологості матеріалу, а також форми поперечного перерізу об'єкта, що руйнується. Тому для забезпечення ефективності технологічного процесу та зниження енерговитрат необхідно ув'язувати конструктивні параметри подрібнювача зі структурними та фізико-механічними властивостями продукту.

Однак у першому наближенні безпосередньо процес різання можна ідеалізувати, як процес різання плоского шару продукту ножом, напрям різання якого перпендикулярно площині продукту. Нижче наведено результати теоретичних досліджень процесу різання на основі теорії про витрати енергії на різання.

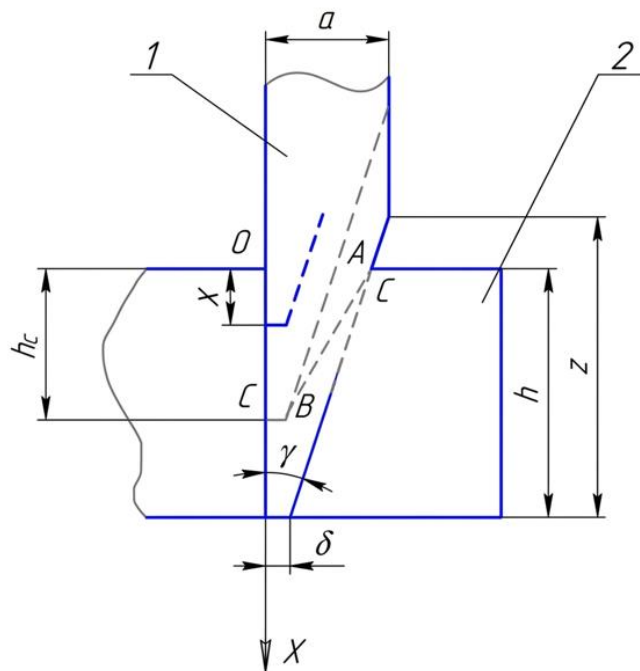


Рисунок 2.4 - Схема різання ножу:

a - товщина ножа; h - висота шару матеріалу, що розрізається; z - довжина ділянки заточування ножа; γ - кут заточування; δ - товщина ріжучої кромки; h_c - переміщення ножа до моменту максимального стиснення матеріалу; x - поточне переміщення ножа; 1 - ніж; 2 - матеріал

Запропоновано метод розрахунку геометричних параметрів ножа на основі мінімальних витрат на різання плоского шару виробу.

Запропоновано критерії оцінки оптимальних параметрів різання. До них належать фізичний критерій оптимальності, заснований на загальній відносній роботі, виконаній під час різання, математичний критерій оптимальності, заснований на геометричних параметрах ножа та виробу, що ріжеться, відносний критерій щодо мінімальних витрат енергії під час різання, фізичний критерій та критерій щодо фізичного стиснення.

Теоретичні дослідження з оптимізації конструктивних параметрів ножа під час різання виявили наступне: На фізичний критерій впливають як кут заточування, так і товщина леза ножа, але товщина леза є більш важливим фактором. На надійність процесу різання виробу на основі математичного критерію впливають як кут заточування, так і товщина леза ножа. Теоретичний мінімум спостерігається при товщині леза 2 мм та куті заточування 220° . З точки зору мінімізації споживання енергії під час різання, рекомендується товщина леза 0,05 мм, а з точки зору надійності процесу різання на основі математичного критерію, рекомендується кут шліфування до 220° . Витрати на стиск зростають зі збільшенням товщини леза та кута шліфування. Товщина леза має найбільший вплив. Мінімальне значення фізичного критерію A2 спостерігається, коли товщина леза становить 0,05 мм, а кут шліфування 140° .

Висновки по розділу:

Запропоновано методику розрахунку геометричних параметрів ножа за мінімальними витратами енергії на різання плоского шару продукту.

У результаті теоретичних досліджень встановлено, що на ефективність різання найбільше впливає товщина ріжучої кромки ножа. Також значення мають кут заточування та товщина леза. Мінімальні енерговитрати спостерігаються при товщині ріжучої кромки 0,05 мм, а найбільш надійний процес різання забезпечується при куті заточування ножа до 22° .

Дослідження показали, що зі збільшенням товщини ріжучої кромки та кута заточування зростають витрати енергії на стиснення продукту. Найменші значення енерговитрат отримано при товщині кромки 0,05 мм і куті заточування 14° .

Встановлено, що загальна продуктивність дробарки визначається сумарною роботою окремих робочих органів, а енерговитрати складаються із затрат на різання та дроблення матеріалу.

Розрахунки показали, що рекомендована кількість ножів на ножовому барабані повинна становити 62-68 штук при частоті обертання $2640-2950 \text{ хв}^{-1}$ і товщині ножів 1,9-2,7 мм.

Також встановлено, що при продуктивності дробарки 510–520 кг/год, ступені подрібнення пророщеного зерна 10-23 одиниці та частоті обертання ножового барабана $2470-2800 \text{ хв}^{-1}$ мінімальна енергоємність процесу становить 4-6 кВт·год/т.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОБАРКИ ПРОРОЩЕНОГО ЗЕРНА

3.1. Методика дослідження гранулометричного складу кормів

Пророщене подрібнене зерно є сипучою масою, тому прийнято оцінювати класи фракцій за їхніми середніми геометричними розмірами і відсотковий вміст кожної фракції середніх геометричних розмірів від загальної маси продукту.

Середні розміри подрібненого пророщеного зерна визначали за допомогою ситового розсіву.

Розрахунок середньозваженого діаметра частинок виконують за формулою:

$$d = (d_1 p_1 + d_2 p_2 + d_n p_n) / 100, \quad (3.1)$$

де d_1 - середній розмір отворів сита, мкм;

p_n - подрібнена маса на ситі.

Ефективність використання концентрованих кормів у тваринницьких господарствах та на птахофабриках безпосередньо корелює з якістю їхнього механічного оброблення, а саме з гранулометричним складом готового продукту. Мелений корм, призначений для різних статевих-вікових груп тварин або сільськогосподарської птиці, вимагає суворого дотримання різних, чітко регламентованих розмірів частинок.

Наприклад, для молодняку птиці в перші дні вирощування необхідний дрібний помел сировини, тоді як для великої рогатої худоби надмірне подрібнення є технологічно недопустимим, оскільки воно викликає серйозні порушення травлення у шлунково-кишковому тракті та призводить до зниження продуктивності.

З огляду на це, сучасні кормоприготувальні млини та дробарки проектується з можливістю динамічної зміни модуля подрібнення в межах заданого технологічного діапазону. Для практичного досягнення різного гранулометричного складу і розмірів частинок у млинах використовують змінні деки, класифікатори або грохоти (сита) з потрібним діаметром та геометрією робочих отворів.

Проте, як показує практика проектування та експлуатації подрібнювачів, модуль подрібнення є усередненим геометричним показником. Оскільки цей модуль визначає лише інтегральний лінійний розмір подрібненого зерна, він не може повноцінно та об'єктивно оцінити загальну продуктивність млина, якість протікання процесу в робочій камері, а також енергетичну ефективність обладнання.

Мелений корм для різних груп тварин або птиці вимагає різних розмірів частинок. Тому млини можуть змінювати модуль подрібнення в межах заданого діапазону. Для досягнення різних розмірів частинок млини використовують

змінні грохоти з потрібним діаметром отвору. Оскільки модуль подрібнення визначає лише геометричний розмір подрібненого зерна, він не може об'єктивно оцінити продуктивність млина. Тому для повного розуміння продуктивності млина використовуються й інші критерії оптимізації. Під час дослідження фракціонування подрібненого зернового корму всередині сита слід звертати увагу на вміст мінімальної та максимальної фракцій. Спроба максимально повно подрібнити зерно часто призводить до отримання надмірно подрібненого продукту. Це відбувається тому, що подрібнені грудки не видаляються вчасно з камери подрібнення. Використання грохотів з високим коефіцієнтом стирання збільшує ризик проходження підземного зерна через отвір..

Дробарка, описана у цій статті, була використаний для подрібнення пророслого зерна.

Отриманий подрібнений матеріал був проаналізований. Як показано на рисунку 3.1, окремі зразки були взяті з подрібненого пророслого зерна та пропущені через експериментальне сито. Це сито складалося з вібраційного пристрою з герметичною основою, встановленою на платформі, та сит з різним діаметром отворів 0,5, 1, 1,5, 2 та 2,5 мм (знизу вгору). Щоб запобігти втраті зерна під час роботи, верхнє сито було закрите. Крім того, щоб запобігти падінню сита під час роботи, його було закріплено замком. Робота сита починалася з розміщення зважених пророслих зерен на верхньому ситі. Кришку закривали, і сито працювало 10 хвилин. Після просіювання отриману подрібнену масу видаляли з кожного сита, а потім визначали її масу з точністю до 0,01 г. Після визначення маси подрібненого зерна в кожній фракції та знаючи початкову масу проби, визначали відсотковий вміст кожної окремої фракції.

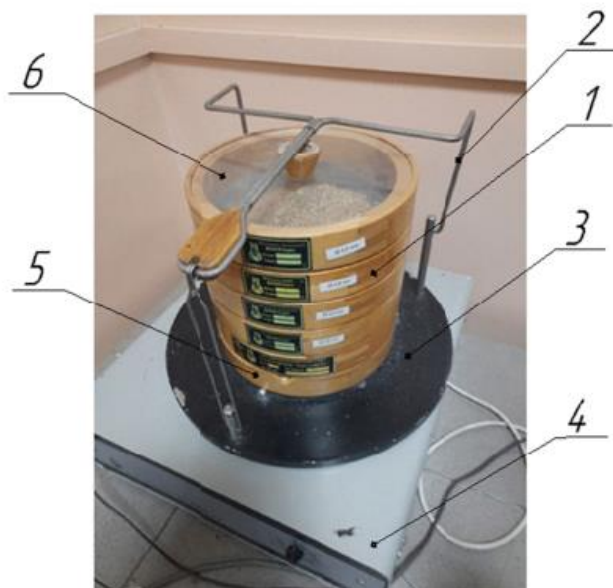


Рисунок 3.1 – Розсів:

1 - решето; 2 - замок; 3 - платформа рухлива; 4 - корпус розсіву; 5 - тарілка; 6 - кришка

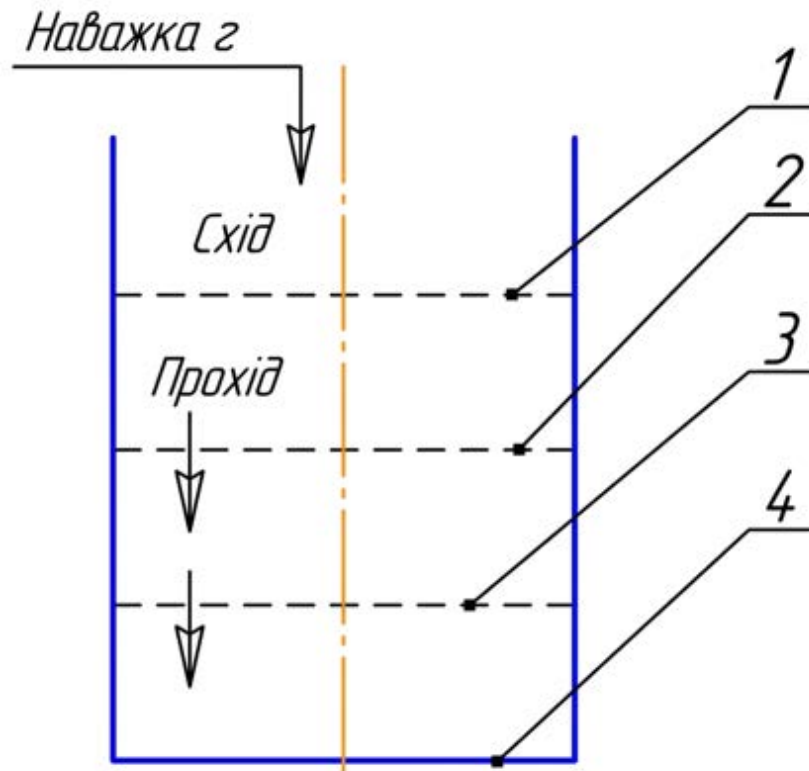


Рисунок 3.2 - Схема роботи розсіву:
1,2,3 - решето; 4 - тарілка

3.2 Визначення вологості пророщеного висушеного подрібненого зерна

Вміст води в подрібненому зерні вимірювали наступним чином: брали зразок пророщеного та висушеного зерна, а потім зразок пророщеного, висушеного та подрібненого зерна поміщали у мірний циліндр вологоміра. Об'єм пророщеного зерна, поміщеного в циліндр, встановлювали на рівні 25 відсотків від загального об'єму мірного циліндра вологоміра.

У технологічних процесах переробки, зберігання та безпосереднього подрібнення зерна одним із найважливіших фізико-механічних параметрів, що визначає енергоємність розмелювання та якість готового продукту, є його вологість. Для оперативного та точного контролю цього показника в лабораторних умовах застосовують експрес-методи вимірювання за допомогою цифрових діелектричних вологомірів. В основі роботи таких приладів покладено вимірювання діелектричної проникності аналізованого матеріалу залежно від вмісту в ньому вільної та зв'язаної води.

Практична реалізація процесу вимірювання вологості вихідної сировини (наприкладі пшениці та ячменю) за допомогою лабораторного вологоміра виконується у суворій послідовності відповідно до розробленого інженерного регламенту:

Етап відбору та первинної підготовки проби: З досліджуваної партії зерна виділяють середню пробу, очищають її від сторонніх грубих домішок та сміття. Далі здійснюють ретельне візуальне оцінювання стану поверхні зернівок.

Завантаження та ущільнення матеріалу: Очищене зерно обережно засипають у спеціальну вимірювальну ємність (миску) приладу. Для мінімізації похибки вимірювання, викликані наявністю повітряних міжзернових проміжків (пористості шару), необхідно забезпечити максимальну щільність укладання матеріалу. З цією метою, щоб зерно якомога щільніше та рівномірніше прилягало до внутрішньої робочої поверхні камери та до центрального вимірювального електрода, миску з пробом кілька разів акуратно струшували вручну. Такий прийом дозволяє стабілізувати об'ємну масу (натуру) зерна всередині вимірювального простору. Після ущільнення миску повторно досипали зерном безпосередньо до самих країв, зрізаючи надлишок за допомогою лінійки.

Герметизація вимірювального об'єму: Після повного заповнення робочої камери миску накривали захисною технологічною кришкою зі вбудованим гвинтовим притискачем. Кришку щільно та до упору закручували за годинниковою стрілкою. Ця операція є критично важливою, оскільки вона дозволяє створити фіксований тиск усередині камери, що остаточно стабілізує геометрію розташування зернівок відносно центрального електрода та виключає вплив зовнішньої вологості повітря на фінальний результат дослідження.

Програмне налаштування та активація приладу: Після завершення механічного етапу підготовки переходять до електронного керування вологоміром. Натисканням клавіш керування активують інтегровану систему приладу та переходять до головного вікна інтерфейсу. У цифровому меню користувача послідовно вибирають відповідний градувальний алгоритм (калібрувальну криву) для конкретної культури. Спочатку вибирали значення, що відповідає фізико-хімічним константам пшениці, а під час проведення наступної серії дослідів значення для ячменю. Таке розділення є обов'язковим, оскільки структура оболонок, форма та хімічний склад цих культур суттєво відрізняються, що безпосередньо впливає на електрофізичні параметри вимірювання. Після верифікації обраної культури вмикали пристрій на виконання безпосереднього аналізу.

Фіксація та аналіз результатів: Протягом кількох секунд мікропроцесорна система вологоміра здійснює сканування проби, вимірює ємнісний або омичний опір шару сировини, проводить температурну компенсацію та автоматичний перерахунок отриманих електричних величин у відсотки вологості. Через кілька секунд на рідкокристалічному екрані приладу в реальному часі відображалось точне цифрове значення вологості досліджуваного зерна.

Вологомір Wile 65 представлений з чашею наповненою пророщеним подрібненим зерном представлений на рис 3.3.

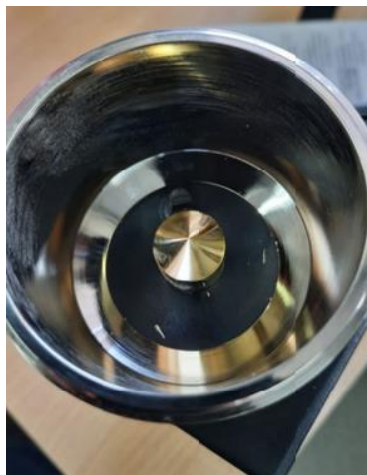


Рисунок 3.3 - Вологомір Wile 65

Щоб зерно щільніше прилягало до центрального електрода, миску кілька разів струшували. Потім миску наповнювали зерном до країв. Після цього миску накривали кришкою та щільно закручували. Далі в меню вибирали значення пшениці, потім ячменю, і вмикали пристрій. Через кілька секунд на екрані відображалось значення вологості зерна.

3.3 Продуктивність дробарки пророщеного зерна

Для повної оцінки ефективності розроблених конструкторських рішень комбінованої камери, що поєднує молоткові та ножові робочі органи, критично важливим є точне визначення її фактичної експлуатаційної продуктивності. Проведення цього етапу досліджень вимагає суворого дотримання послідовності технологічних операцій для забезпечення достовірності даних, виключення випадкових похибок та запобігання аварійним ситуаціям.

Процес визначення годинної продуктивності подрібнювального вузла складається з трьох послідовних етапів: підготовчого (пусконаладжувального), основного (експлуатаційного) та аналітичного.

Перед початком безпосереднього подавання пророщеного зерна в камеру подрібнення обов'язково виконується комплекс регламентних робіт на холостому ходу установки:

Візуальний та механічний контроль: Проводять ретельний огляд зовнішнього вигляду дробарки, перевіряють цілісність корпусу, надійність різьбових з'єднань станини та герметичність ущільнювачів кришки. Після цього вручну прокручують головний вал, щоб плавно повернути дробильний барабан та ножовий барабан. Це дозволяє переконатися у відсутності заїдань, сторонніх предметів у камері, а також підтвердити справність підшипникових вузлів та легкість ходу робочих органів.

Перевірка клінопасової передачі: Оцінюють ступінь правильного натягу приводного ремня. Оптимальний натяг є критичним, оскільки недостатній натяг

призведе до проковзування паса під навантаженням і зниження обертів ротора, а надмірний - викликає перегрів підшипників електродвигуна.

Стабілізація теплового стану: Переконаються, що ручний дозувальний клапан бункера повністю закритий. Після цього здійснюють почерговий пуск двигунів: спочатку активують дробильний (молотковий) барабан, а через 2-3 хвилини, після виходу його на номінальну частоту обертання, вмикають ножовий барабан. Рознесення пуску в часі дозволяє знизити сумарні пускові струми в електричній мережі. У такому стані холостого ходу дробарку залишають працювати на 15-20 хвилин для припрацювання вузлів та стабілізації теплового режиму змазки в підшипниках.

Після завершення тестового прогону переходять до безпосередніх випробувань під навантаженням: Заздалегідь підготовлене та зважене пророщене зерно завантажують у приймальний бункер. Плавним рухом відкривають регульовальний дозувальний клапан, забезпечуючи рівномірне самопливне подавання матеріалу безпосередньо в зону дроблення комбінованої камери. Під час роботи оператор зобов'язаний безперервно стежити за поточним значенням сили струму на пультовому амперметрі. Оскільки вологий матеріал створює підвищений опір, показники амперметра не повинні перевищувати номінальних значень, вказаних у паспорті електродвигуна, що дозволяє запобігти перевантаженню та аварійному вимкненню привода через перегрів обмоток. Процес безперервного подрібнення триває рівно 1 годину (3600 секунд) за таймером. Після закінчення цього часу закривають дозувальний затвор, вибирають залишки продукту з камери, зупиняють дробарку та за допомогою електронних ваг вимірюють точну вагу всього отриманого під завантажувальним патрубком подрібненого матеріалу.

Крім кількісної оцінки (продуктивності), найважливішим критерієм ефективності комбінованого робочого органу є якісна характеристика отриманого корму. Після завершення процесу подрібнення виникає технологічна необхідність детально оцінити структурно-морфологічний склад подрібненого пророщеного зерна: його лінійні розміри, фракційне співвідношення, а також стан і геометрію країв частинок (безпосередньо зруйнованих зернівок та зрізаних паростків). Це необхідно для верифікації того, що ножовий барабан саме перерізає еластичні паростки, а не розминає їх.

Для реалізації цих досліджень через делікатність та малі розміри об'єктів використовуються методи оптичної мікроскопії: Калібрувальне визначення геометричних розмірів часток. Для точного вимірювання лінійних розмірів подрібнених частинок ендосперму та довжини шматочків паростків використовують лабораторний оптичний мікроскоп, оснащений спеціальною вимірювальною шкалою (сіткою), представлений на рисунку 3.4. Метод полягає в суміщенні лінійних меж частинки з поділками окуляр-мікрометра, які попередньо відкалібровані за допомогою об'єкт-мікрометра для конкретного

оптичного збільшення. Це дозволяє зафіксувати точні габарити часток у міліметрах або мікрометрах з мінімальною похибкою.

Аналіз структурного складу та мікрогеометрії зрізу країв. Для детального дослідження якісних характеристик зрізу країв паростків, виявлення зон деформації та оцінки ступеня збереження анатомічної структури клітин у зоні розділення використовують бінокулярний дослідницький мікроскоп високого класу Levenhuk 950T DARK Series Microscopes (рисунок 3.4). Завдяки можливості роботи у світлому та темному полі, цей прилад забезпечує високий контраст зображення вологих біологічних тканин зерна без їхнього попереднього фарбування.

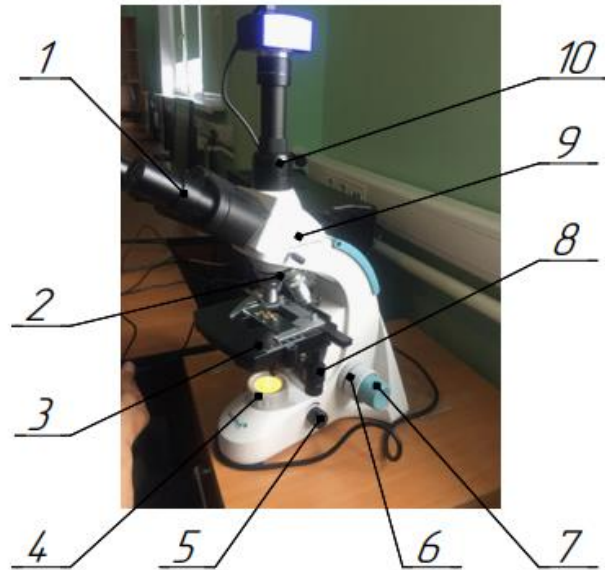


Рисунок 3.4 - Levenhuk 950T DARK Series Microscopes:

1 - окуляр; 2 - пристрій револьверний; 3 - столик предметний; 4 - лампа; 5 - регулятор яскравості підсвічування; 6 - ручка грубого фокусування; 7 - ручка тонкого фокусування; 8 - переміщення столика по горизонталі; 9 - насадка окулярна; 10 - третя окулярна трубка

Під час аналізу мікроструктури на мікроскопі Levenhuk 950T особлива увага звертається на характер руйнування: рівний, чистий зріз паростка свідчить про високу гостроту та правильну кутову швидкість спроектованих ножів, тоді як розірвані або розчавлені краї вказували б на наявність дефектів у кінематиці камери чи неправильно підібраний зазор між робочими органами. Отримані мікрофотографії зрізів фіксуються за допомогою цифрової камери мікроскопа та заносяться до бази даних проекту для подальшого аналізу. Нами було відібрано зразки пророщеного зерна та пророщеного подрібненого зерна. Зразки по черзі поміщали предметне скло під мікроскоп, потім робили знімки. Після цього аналізували отримані знімки.

3.4. Загальний пристрій та принцип роботи запропонованої дробарки пророщеного висушеного зерна

Розглянувши різні конструкції дробарок можна відзначити, що для подрібнення неоднорідних матеріалів, одним з яких є пророщене зерно, потрібно використовувати різні види робочих органів, такі як молотки та ножі..

Існуючі конструкції молоткових дробарок мають такі недоліки як один тип робочих органів, дві дробильні камери, розташовані на певній відстані один від одного. Виникає необхідність транспортувати матеріал, що подрібнюється від однієї камери подрібнення до іншої, а це супроводжується додатковими витратами енергії.

Завдання запропонованої дробарки підвищення однорідності подрібненої маси пророщеного зерна, у тому числі зернівки та паростків за рахунок роботи молотків, розташованих на зовнішньому барабані та ножів, розташованих на внутрішньому барабані. Виключення додаткового транспортування матеріалу, що подрібнюється між барабанами, що подрібнюються.. Зниження енергоємності процесу подрібнення рахунок розміщення дробильних барабанів у одній камері однією осі.

Дробарка складається з окремих вузлів: бункера, під яким встановлено дозуючий клапан. Бункер з'єднаний з камерою дроблення за допомогою подавальної труби, яка встановлена латерально відносно камери дроблення. Камера дроблення встановлена на рамі. Всередині камери дроблення встановлено два барабани, причому барабани мають спільну вісь обертання. На зовнішньому барабані шарнірно встановлені молотки, а на внутрішньому - ножі. Між молотами на штифтах встановлені проставки. Всередині камери дроблення нерухомо встановлені агрегат та грохот.

Збоку на торцях комбінованої дробильної камери 3 (рисунок 3.5) встановлені довгий корпус із зовнішніми підшипниками і короткий корпус із зовнішнім підшипником. Від сторонніх частинок зовнішній підшипник закритий манжетами. Усередині порожнього валу встановлений внутрішній підшипник, закритий манжетою.

У короткому корпусі внутрішнє кільце зовнішнього підшипника надіто на короткий порожнистий вал. Усередині короткого порожнього валу встановлений внутрішній підшипник, захищений від сторонніх частинок манжетами.

Внутрішнє кільце внутрішнього підшипника вдягнене на вал. На валу закріплений другий ведений шків. Короткий порожнистий вал закріплений до барабана з ножами.

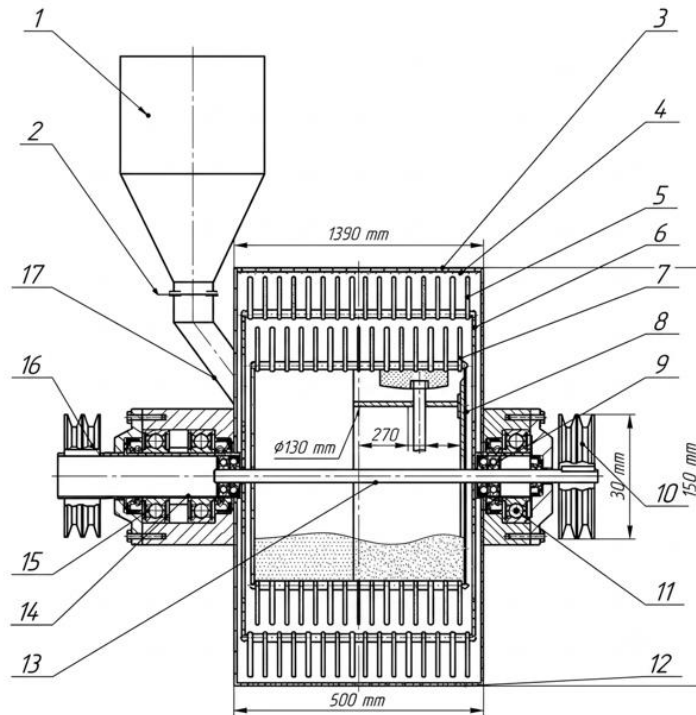


Рисунок 3.5 - Комбінована дробильна камера:

1 - завантажувальний бункер; 2 - заслінка дозуюча; 3 - камера дробильна комбінована; 4 - дека; 5 - молоток; 6 - зовнішній дробильний барабан; 7 - ніж; 8 - ножовий барабан; 9 - внутрішній підшипник; 10 - шків; 11 - зовнішній підшипник; 12 - решето; 13 - вал внутрішній; 14 - зовнішній вал; 15 - зовнішній підшипник; 16 - шкіф; 17 - труба падаюча

Робота дробарка пророщеного зерна відбувається так. За допомогою магнітного пускача вмикаємо один дробильний барабан з молотками. Після того як дробильний барабан вийшов на робочу частоту обертання, аналогічно запускаємо другий привід для ножового барабана. Після того як ножовий барабан набрав робочою частоту обертання в завантажувальний бункер, завантажуюмо пророщене зерно. За допомогою дозуючої заслінки подаємо пророщене зерно через магнітний сепаратор у дробильну камеру. Подачу пророщеного зерна здійснюємо з бункера за допомогою падаючої труби в центр комбінованої дробильної камери.

Пророщене зерно є сполученими зернівками і паростком, які відразу після взаємодії з робочими органами відокремлюються одне від одного.

барабани, Що обертаються, направляють повітряний потік від центру до периферії комбінованої дробильної камери. Зернівки та паростки будуть рухатися від центру до периферії комбінованої дробильної камери і, послідовно, взаємодіяти з двома типами робочих органів, спочатку з ножами, потім з молотками. Пророщене зерно потрапляє всередину, одразу підхоплюється робочими органами та масі повідомляється відцентрова сила. За рахунок різних

фізико-механічних властивостей щільніші зернівки виявляються далі від центру, а менш щільні паростки будуть знаходитися ближче до центру.

Запропонована дробарка дозволяє підвищити однорідність подрібненої маси пророщеного зерна, а саме зерна та зародка, шляхом використання двох типів робочих елементів: молотків та ножів, призначених для подрібнення зерна та зародка. У цьому випадку молотки встановлені на зовнішньому барабані, а ножі на внутрішньому. Знизити енергоємність процесу дроблення можна, розмістивши дробильні барабани на одному валу. На рисунку 3.6 показано камеру подрібнення млинка для пророщеного зерна.

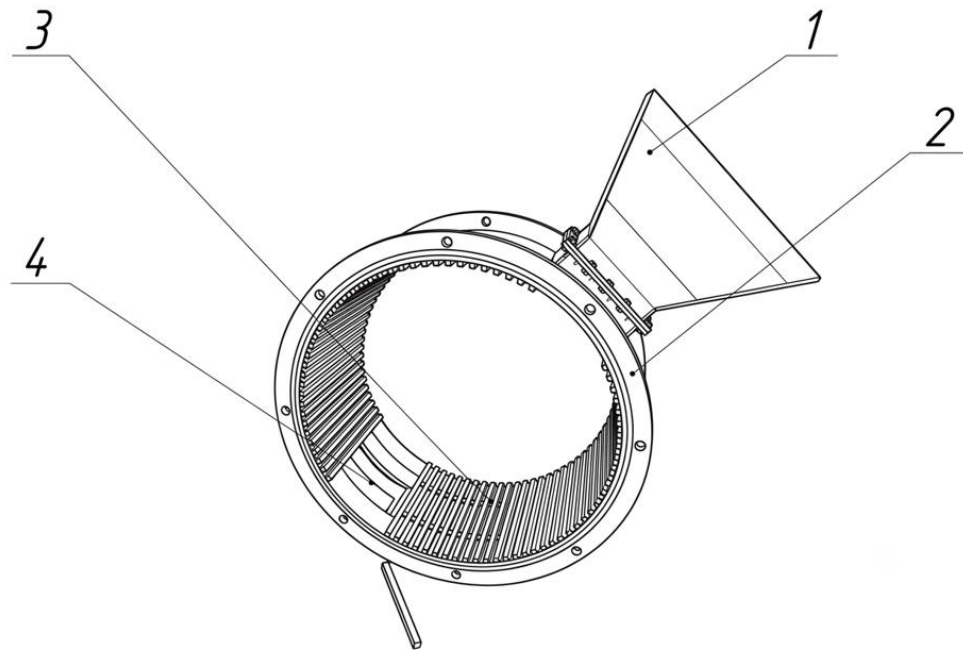


Рисунок 3.6 - Дробильна камера нашої установки для пророщеного зерна
1 - завантажувальний бункер; 2 - корпус камери дробильної; 3 - дека;

Отже, зерно взаємодіє з молотками, прикріпленими до зовнішнього барабана, а паростки з ножами, прикріпленими до внутрішнього барабана. Зернові грудочки взаємодіють з молотками, доки не стануть меншими за діаметр отвору сита. Потім грудочки проходять через отвір сита та видаляються з камери помелу. Далі замість зерна подаються подрібнені паростки, які під впливом відцентрової сили проходять через отвір сита.

На рисунку 3.7 представлена дробарка пророщеного зерна.

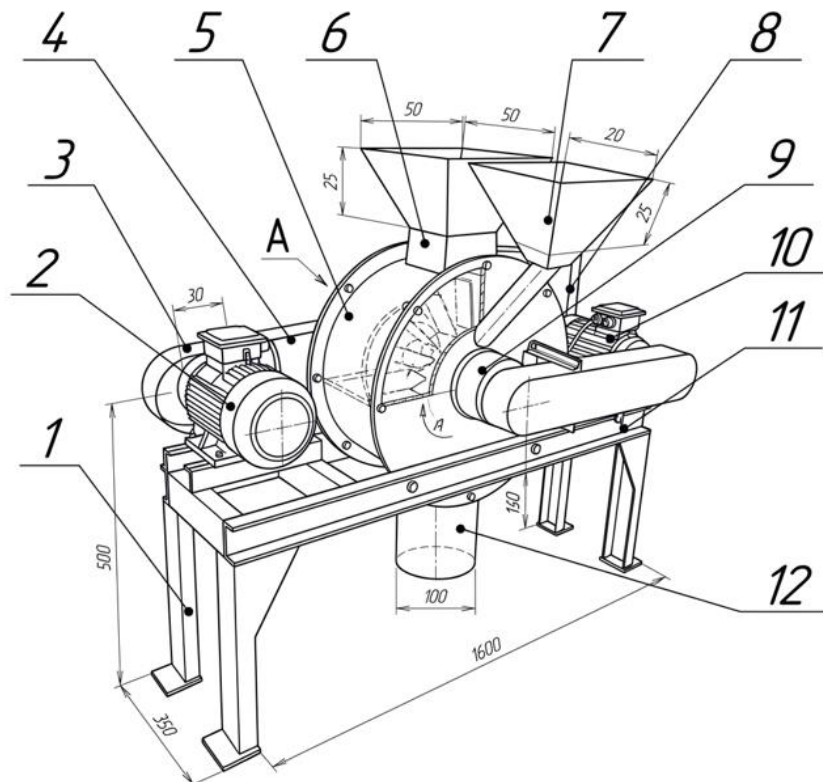


Рисунок 3.7 - Дробарка для пророщеного зерна:

1 - опора; 2 - електродвигун; 3 - захисний кожух; 4 - ремінний привід; 5 - камера дроблення; 6 - центральний контейнер; 7 - бічні контейнери; 8 - шафа керування; 9 - підшипниковий вузол; 10 - електродвигун для приводу внутрішнього барабана; 11 - рама; 12 - розвантажувальна гільза

Для керування процесом дробарки використовується електричне коло, як показано на рисунку 3.8.

Електричне коло працює наступним чином. Живлення трифазного кола можна візуально визначити за допомогою індикаторної лампи 1. Коли контакти вимикача 2 замкнуті, електричний струм подається на контактори. Схема керування активується за допомогою вимикача 3. Це призводить до подачі струму до кнопок 7 та 8, які запускають електродвигуни 13 та 6. При натисканні кнопки 7 електричний струм подається на котушку 9, яка замикає контакти контактора 15, і тим самим напруга подається на електродвигун 13, який обертає барабан з молотами за годинниковою стрілкою.

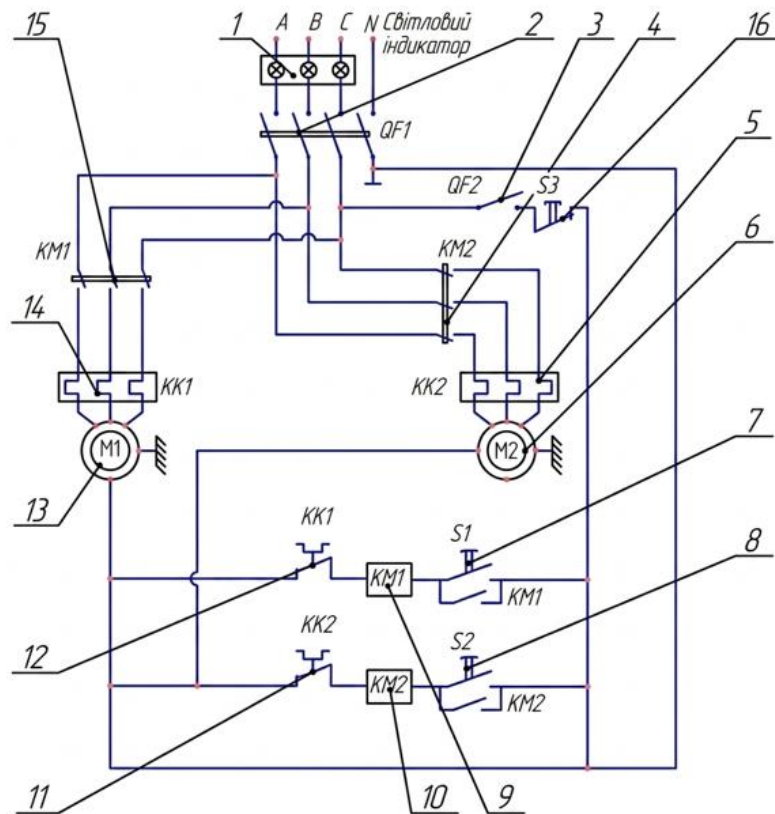


Рисунок 3.8 - Схема керування дробаркою пророщеного зерна:

1 - світловий індикатор; 2, 3 - пакетний вимикач; 4, 15 - контактор; 5, 14 - теплове реле; 6, 13 - електродвигун; 7, 8 - контакти; 9, 10 - котушка; 11, 12 - контакти; 16 - контакти

Кожні 2-3 хвилини натискайте кнопку 8, що активує котушку 10. Це замикає контактор 4 і подає напругу для запуску електродвигуна 6, який обертає ножовий барабан за годинниковою стрілкою. Щоб уникнути високих пускових струмів в електричній системі, електродвигуни необхідно вмикати послідовно, спочатку один, потім через 2-3 хвилини інший. Через 2-3 хвилини після ввімкнення другого електродвигуна, коли буде забезпечена стабільна робота, матеріал, що підлягає подрібненню, можна подавати в комбіновану камеру дроблення за допомогою дозуючого клапана. Після подрібнення маси отримали продукт, який можна було досліджувати згідно з цією методикою.

Після обробки молотками подрібнюються лише зерна, залишаючи зародки практично недоторканими. Тому неможливо виготовити добре перемішану кормову суміш з таких пророщених зерен.

На цьому зображенні показано рух подрібнених пророщених зерен з камери дроблення до резервуара для зберігання. У камері дроблення працюють молотки та ножі.

Подрібнення пророщеного зерна в комбінованій дробильній камері двома типами робочих органів, а саме молотками та ножами можемо подрібнювати зернівки та паростки, отримуючи близькі кінцеві розміри 1-1,4 мм..

Методи оцінки гранулометричного складу подрібненого матеріалу пророщеного зерна, щільності подрібненого матеріалу пророщеного зерна, вмісту вологи в пророщеному та висушеному подрібненому матеріалі, енергетичного показника подрібнювача під час подрібнення пророщеного зерна, продуктивності подрібнювача пророщеного зерна та структури подрібненого матеріалу пророщеного зерна..

Виявлено, що основними факторами, що впливають на коефіцієнт подрібнення під час подрібнення пророщених зерен за допомогою молота з шліфувальним валком, є такі: n_d - частота обертання дробильного барабана, хв^{-1} ; h_M - товщина молотка, м; D_B - діаметр барабана, м. Встановлено, що найбільш значущими факторами, що впливають на модуль помелу пророщеного зерна при подрібненні ножами в барабані, є: n_H - частота обертання ножового барабана, хв^{-1} ; b_H - відстань між ножами, мм; γ_H - кут заточування леза ножа.

4. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕРНА

4.1 Результат процесу подрібнення пророщеного зерна

Вимірювання параметрів визначальних енергоємність процесу подрібнення проводилося у відповідності до методики.

Однофазний струм у трифазній мережі двигуна, що приводить у рух ножовий барабан, без навантаження, становив 4,9 А. Основна напруга живлення мережі становила 380В. Активну потужність, споживану мережею, розраховували за такою формулою. При $\cos\varphi = 0,8$ активна потужність становила 2,58 кВт.

Згідно з результатами вимірювань, однофазний струм трифазної мережі двигуна, що приводить у рух барабан молота, на холостому ходу становив 5,1 А. Основна напруга живлення мережі становила 380 В. Розрахункове споживання активної потужності з мережі при $\cos\varphi = 0,8$ становило 2,68 кВт.

Сила струму в одній фазі трифазної мережі на електродвигуні, який приводить в роботу ножовий барабан в режимі робочого навантаження склала 7,3 А, розрахункова споживана з мережі активна потужність при лінійному напрузі 380В склала 3,84кВт. Сила струму в одній фазі трифазної мережі на електродвигуні, який приводить в роботу молотковий барабан становила 7,5А, розрахункова споживана з мережі активна потужність при лінійній напрузі 380В і $\cos\varphi = 0,8$ склала 3,949 кВт.

Загальне споживання енергії в процесі подрібнення зародка, включаючи зародок і зернівку, було розраховано на рівні $67,0 \pm 8,3$ кВт/год за допомогою наведеної вище формули.

Споживання енергії в процесі пророщування в млині було оцінено на основі ступеня подрібнення пророщеного зародка і зернівки, а також частки зародка і зернівки в загальній масі.

На рисунку 4.1 показано зв'язок між споживанням енергії та ступенем подрібнення в процесі подрібнення.

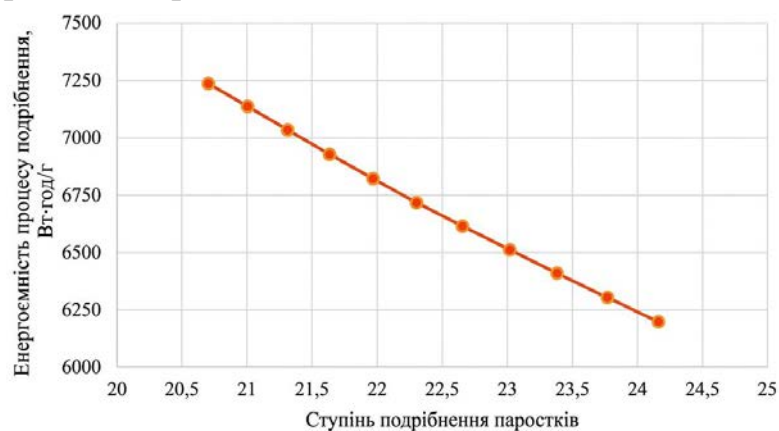


Рисунок 4.1. Залежність енергоємності процесу подрібнення від ступеня подрібнення

Згідно із залежністю, наведеною на рисунку 4.2, енергоспоживання процесу подрібнення зменшиться з 7,23 до 6,2 кВт·год за умови підтримки продуктивності дроблення на рівні 0,52 т/год та збільшення ступеня подрібнення продукту з 20,71 до 24,17. Це пояснюється тим, що процес подрібнення можна розглядати як поділ тіла на частини, в результаті чого утворюються нові частинки з більшою площею поверхні. Отже, зі збільшенням площі утвореної поверхні енергоспоживання процесу подрібнення зменшується.

Інверсне виливання проводилося в промивалці в відповідності з методикою. До шихти процесу змішування порцелянового агруту додавали пластифікат масової частки

Інверсне виливання продукту до вмісту пластичних частинок 14%, збільшення порцеляного агруту не вплине на пластичність в межах 5%, тому зміни проведення вакуумного виливання тора можна віднести до зміни вакуумного процесу.

Інверсне виливання виконали проведення в відповідності з методикою. Продукцію результатів інверсного виливання порцеляного агруту представили в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Щільність пророщеного зерна

Назва продукту	Щільність, кг/м ³
Пророщений висушений ячмінь	570-590
Пророщений, висушений та подрібнений ячмінь	465-485
Пророщена висушена пшениця	585-610
Пророщена, висушена та подрібнена пшениця	510-535

Дослідження з оцінки продуктивності дробарки пророщеного зерна проводили відповідно до методики. Перед включенням дробарки, оцінили її зовнішній стан, переконалися у вільному прокручуванні молоткового та ножового барабанів від зусилля руки, закрили заслінку дозуючу і з інтервалом 3 хвилини включили електродвигуни для приводу молоткового та ножового барабанів. Без навантаження дробарка працювала 20 хвилин, після цього завантажили пророщене зерно в бункер дробарки і відкриттям заслінки, що дозує, подавали в камеру подрібнення. Потім після процесу подрібнення маса через напрямну потрапляла в накопичувальну ємність. Продуктивність дробарки за результатами експерименту становила 510 - 525 кг/год.

4.2 Оцінка розміру подрібнених частинок

Ефективність згодовування концентрованих добавок та їхня біологічна конверсія в організмі сільськогосподарських тварин безпосередньо визначаються дисперсністю готового продукту. Кінцевий розмір частинок подрібненого

пророщеного зерна не є довільною величиною, а суворо визначається чинними вимогами галузі тваринництва до структури корму для кожної конкретної статеві-вікової групи тварин. Порушення цих вимог у будь-який бік призводить або до зниження засвоюваності поживних речовин, або до додаткових енергетичних витрат на переробку.

Згідно з чинними зоотехнічними та літературними даними, під час використання пророщеного зерна як високоцінного збалансованого корму (або біологічно активної добавки), оптимальний середній розмір частинок подрібненого продукту повинен становити строго 0,9-1,4 мм. Саме такий діаметр часток забезпечує максимальний доступ ферментів шлункового соку до поживних речовин ендосперму, не викликаючи при цьому патологічних змін у слизовій оболонці органів травлення тварин.

Використовуючи розроблений у даному проєкті подрібнювач, у конструкції якого закладено оптимальні геометричні, конструкційні та робочі параметри, з'явилася можливість практичного досягнення вказаного кондиційного діапазону. Під час проведення серії лабораторних досліджень за допомогою ситового класифікатора було чітко визначено та диференційовано частинки потрібного (цільового) розміру, а також суміжні фракції, які умовно класифікувалися як підземні (дрібні, пилоподібні частки, що пройшли крізь нижні сита) та надземні (крупні, недоподрібнені частки, які залишилися на верхніх рівнях сепарації).

Дослідження проводилися на двох основних видах фуражної сировини, які найчастіше використовуються для вітамінізації раціонів. Пророщену висушену пшеницю та ячмінь подрібнювали окремо за однакових кінематичних режимів роботи обладнання, що дозволило порівняти вплив структурно-механічних властивостей кожної культури на якість помелу. Окреме подрібнення є критично важливим, оскільки ячмінь, на відміну від пшениці, має жорстку квіткову оболонку, яка вимагає додаткового інтенсивного стирання та зрізання.

Безпосередній відбір проб частинок подрібненого пророщеного зерна для подальшого лабораторного аналізу проводили безпосередньо на вихідному патрубку машини, після завершення повного циклу переробки. Процес руйнування біомаси відбувався в межах розробленого двоступеневого безперервного процесу подрібнення.

На першому ступені сировина потрапляла в зону дії молоткового барабана, де за рахунок динамічного та руйнівного удару молотків відбувалося дезінтегрування крихкої борошнистої частини (ендосперму) зернівки. Одразу після цього матеріал безперервно переміщувався на другий ступінь у зону дії ножового барабана. На цьому етапі відбувалося швидкісне перерізання еластичних, гнучких паростків та волокнистих оболонок, які через свою високу в'язкість не змогли зруйнуватися під дією першого (молоткового) ступеня.

Така послідовна комбінація механічних впливів в одному робочому просторі дозволила стабілізувати процес переробки вологої сировини. Проведені

заміри та відбори проб підтвердили, що саме завдяки двоступеневому принципу роботи розробленої дробарки вдається отримати максимальний вихід цільової фракції в межах 0,9-1,4 мм, суттєво знизивши відсоток утворення відходів у вигляді підземних (пилоподібних) часток.

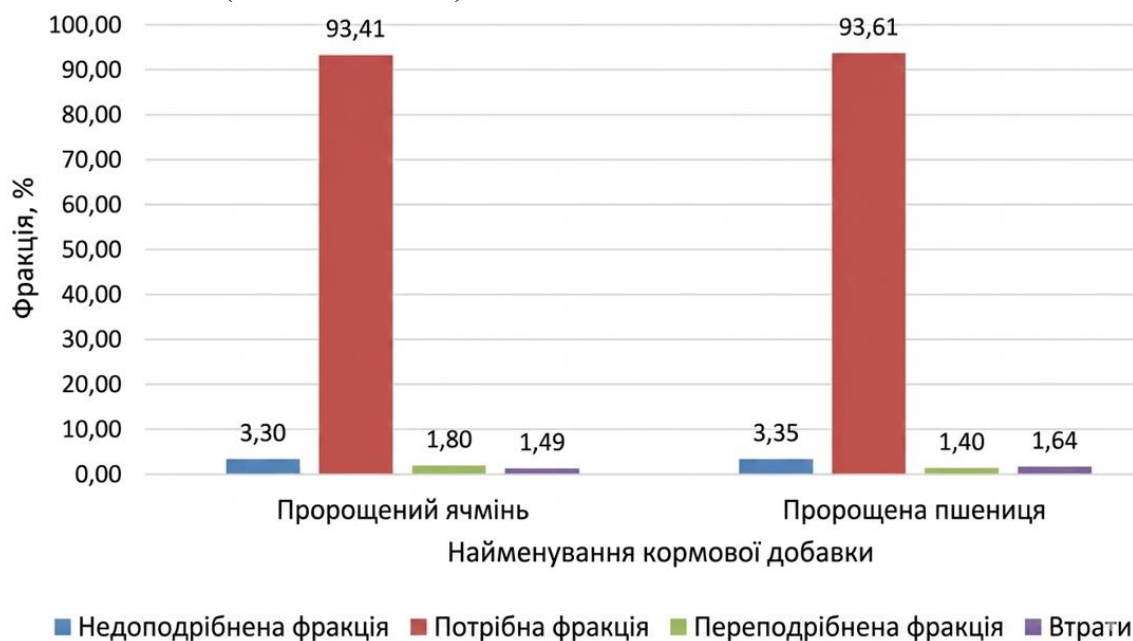


Рисунок 4.2 - Середній розмір часток подрібненого пророщеного зерна

При подрібненні висушеного ячменю пророщеного пропускну здатність у дробарки зареєстрували на позначці 515 кг/год. Аналізуючи якісні показники роботи зазначимо, що нездрібнена фракція склала 3,3%, переподрібнена фракція 1,8%, необхідна фракція 93,41%, втрати вийшли близько 1,49%.

При подрібненні висушеної пророщеної пшениці пропускну здатність у дробарки зареєстрували на позначці 522 кг/год. Аналізуючи якісні показники роботи відзначимо, що нездрібнена фракція склала 3,35%, переподрібнена фракція 1,4%, необхідна фракція 93,61%, втрати вийшли близько 1,64%.

Для оцінки якості процесу помелу пророщеного ячменю для розподілу частинок використовували сито.

Розміри частинок пророщених, подрібнених зерен ячменю та пшениці представлені в таблицях 4.2 та 4.3 відповідно.

Таблиця 4.2 - Розмір частинок пророщеного подрібненого зерна ячменю

Діаметр отворів решета, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Відсотковий вміст частинок	3,20	47,20	45,00	1,40	1,90

Розподіл фракційного складу частинок подрібненого пророщеного зерна ячменю порешетам представлено на рисунку 4.9.

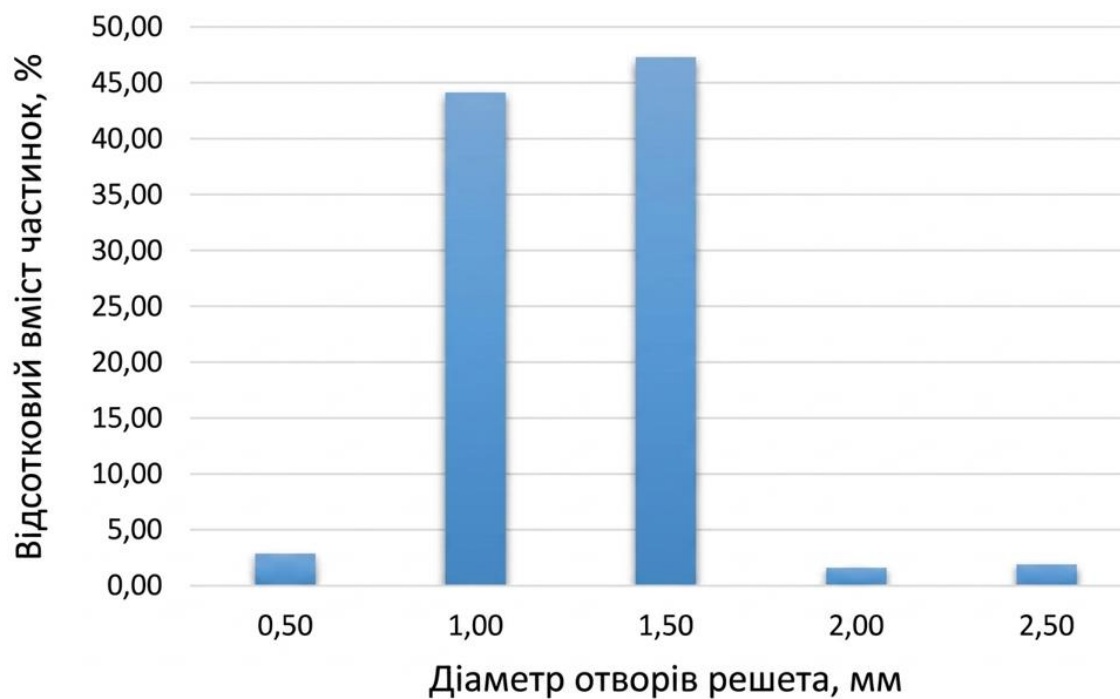


Рисунок 4.3 - Розподіл фракційного складу частинок подрібненого пророщеного зерна ячменю по решетах

Таблиця 4.3 - Розмір частинок пророщеного подрібненого зерна пшениці

Діаметр отворів решета, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Відсотковий вміст частинок	2,90	44,20	47,40	1,50	1,85

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Техніко-економічний аналіз ефективності дробарки

Багато експертів вказують на корисні властивості пророщеного зерна. Пророщене зерно можна використовувати як цінну кормову добавку для стад тварин, що утримуються в приміщенні. Однак дослідження не виправдали витрати на підготовку пророщеного зерна до годівлі. Одним з найбільш енергоємних технічних завдань є подрібнення. Немає даних, що порівнюють технічні системи, що використовуються для подрібнення звичайного зерна з пророщеним. Пророщене зерно як кормову добавку можуть використовувати як дрібні фермери, що вирощують десятки тварин, так і великі фермери, що вирощують десятки тисяч тварин. Тому необхідна кількість пророщеного зерна буде відрізнятися. Для оптимальної роботи млина необхідно знати переробну потужність, робочу потужність та враховувати фактори безпеки. Якщо переробна потужність та потужність використовуваного млина значно відхиляються від розрахованих номінальних значень, з одного боку, можуть бути витрачені невідповідно великі інвестиції на придбання обладнання, а з іншого боку, це також є проблемою, оскільки малопотужний агрегат не зможе виконати задану робочу потужність..

Для економічного обґрунтування експлуатації подрібнювача в таблиці 5.1 наведено марки, технічні характеристики та цінові показники запропонованих двоступеневих подрібнювачів зародків. Показники вартості розраховані на основі цін на початок 2024 року. У розрахунках використовуються початкові умови, що включають загальну кількість жому, яку необхідно додати до корму тваринам. Цей грудку пророщеного зерна необхідно подрібнити протягом певного періоду часу. У цьому випадку можна вирішити виробничі проблеми, підібравши продуктивність обладнання.

Таблиця 5.1 - Марки дробарок і їх показники

№	Показники	Варіанти				
		Пропонована	КДУ-2	КДУ-2А	КД-2	КДУ-2
1	Потужність електроприводу, кВт	8	12,5	22	30	30
2	Продуктивність, кг/год	552	920	1700	2500	3000
3	Вартість обладнання, грн	98000	152000	187000	252000	257000
4	Вартість обладнання в залежності від потужності електроприводів, грн/кВт	13066,67	12160	8500	8400	8566,667
5	Питома потужність обладнання, залежно від продуктивності, грн. ч/кг	0,014	0,014	0,013	0,012	0,010

Щоб порівняти дробарки, проаналізували їх питомі показники. Питомі показники вартості дробарок залежно від їхньої продуктивності зображені на рисунку 5.1.

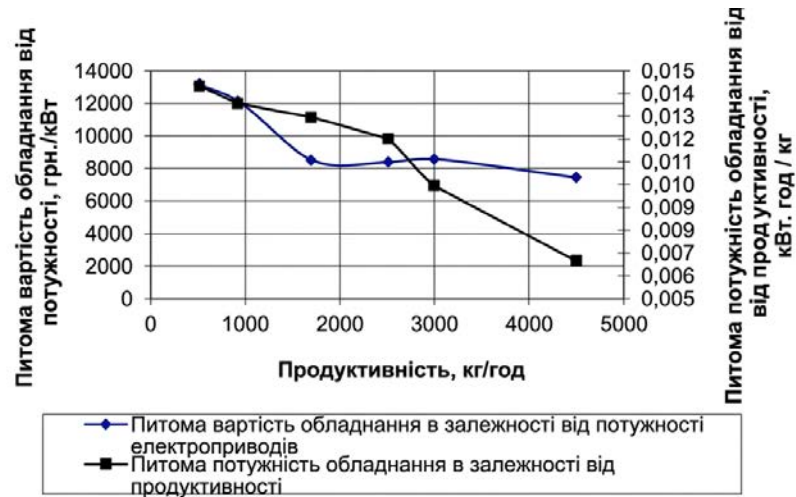


Рисунок 5.1 - Віддалені показники вартості дробарки в залежності від продуктивності

Добові експлуатаційні витрати, що забезпечують роботу дробарки пророщеного зерна, визначили за виразом:

$$E = E_{\text{вит}} + A_1 + P_1 + 3П + C_3, \quad (5.1)$$

де $E_{\text{вит}}$ - витрати електроенергії на дроблення пророщеного зерна, грн;

A - відрахування на амортизацію дробарки пророщеного зерна, грн;

P - відрахування на ремонт дробарки пророщеного зерна, грн;

$3П$ - заробітна плата робітникам, зайнятим на роботі та обслуговуванні дробарки пророщеного зерна, грн;

C_3 - вартість зерна, грн.;

Час роботи дробарки розрахуємо за формулою:

$$T_{\text{д}} = \frac{G_2}{W_{\text{д}}}, \quad (5.2)$$

де G_2 - добова потреба пророщеного зерна, кг;

$W_{\text{д}}$ - виробляє кількість дробарки, кг/год.

Витрати електроенергії для роботи дробарки пророщеного зерна:

$$E_{\text{ДР}} = M_{\text{де}} \cdot T_{\text{ДР}} \cdot C_{\text{зл}}, \quad (5.3)$$

де $M_{\text{де}}$ - загальна потужність електродвигунів, що виконують процес дроблення пророщеного зерна, кВт;

$T_{ДР}$ - час роботи електродвигунів під час виконання процесу дроблення, год;

$C_{эл}$ - вартість електроенергії, грн./кВт-год.

Витрати на амортизацію дробарки пророщеного зерна визначимо за виразом:

$$A = \frac{B_c \cdot H_a}{100} \cdot \frac{T_0}{T_r}, \quad (5.4)$$

де H_A - норма відрахувань на амортизацію, %;

B_c - балансова вартість машини, грн;

T_0 - час роботи машини на операції, год;

T_r - річне завантаження агрегату, год;

Розрахуємо витрати на ремонт дробарки пророщеного щерну застосувавши вираз:

$$P = \frac{B_c \cdot H_p}{100 \cdot T_i} \cdot \frac{G_{доб}}{W_c}, \quad (5.5)$$

де B_c - балансова вартість машини, грн;

H_p - норма відрахувань на ремонт обладнання, %;

T_i - річне завантаження агрегату, година;

W_c - продуктивність агрегату за 1 годину змінного часу, кг/год.;

$G_{доб}$ - добове завантаження обладнання, кг.

Годинну ставку оператора розрахуємо за виразом:

$$\tau = \frac{ЗП_{\min} \cdot k_m \cdot k_0}{H_t}, \quad (5.6)$$

де $ЗП_{\min}$ - мінімальний розмір оплати праці, грн.;

k_m - коефіцієнт з оплати праці;

k_0 - галузевий підвищуючий коефіцієнт;

H_t - місячний годинний фонд робочого часу.

Фонд оплати праці виділимо за виразом:

$$ЗП_{1,2map} = \tau_{1,2mc} \cdot T_0, \quad (5.7)$$

де T_0 - час роботи на цій операції.

Розрахуємо витрати на оплату праці:

$$ЗП = Ч_i \cdot ЗП_{map} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4, \quad (5.8)$$

де $Ч_i$ - кількість обслуговуючого персоналу, чол.

K_1 - коефіцієнт, що враховує доплати за продукцію;

K_2 - коефіцієнт, що враховує доплати за продукцію;

K_3 - коефіцієнт, що враховує оплату відпустки;

K_4 - нарахування на заробітну плату.

Річний економічний ефект визначимо за формулою:

$$E_{річн} = T_{річн} (E_{31} - E_{32}), \quad (5.9)$$

де $T_{річн}$ - річний час роботи дробарки, доби;

E_{31} - експлуатаційні витрати в дробарці, що застосовується, грн./т.;

E_{32} - експлуатаційні витрати у пропонованій дробарці, грн./т.

Для визначення добових експлуатаційних витрат під час роботи запропонованої дробарки з комбінованою дробильною камерою підставимо отримані значення формулу (5.1).

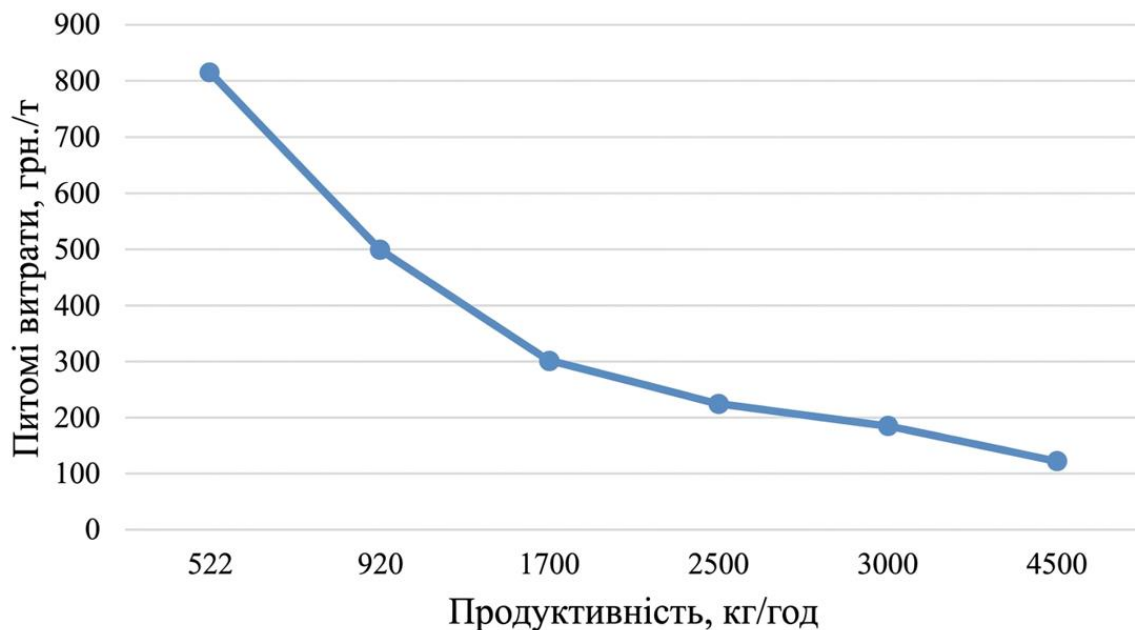


Рисунок 5.2 - Залежність видалених експлуатаційних витрат від продуктивності, молоткової дробарки

Залежність питомих експлуатаційних витрат від продуктивності молоткової дробарки з урахуванням вартості пророщеного зерна..

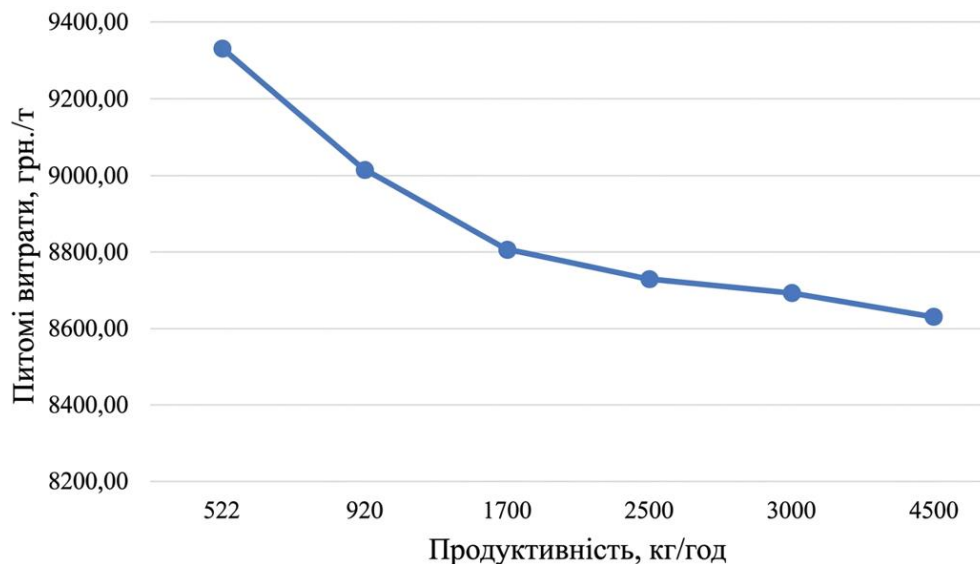


Рисунок 5.3 - залежність питомих витрат від продуктивності молоткової дробарки з урахуванням вартості пророщеного зерна

З графіка можна дійти невтішного висновку, що з продуктивності, запропонованої дробарки з комбінованою дробильною камерою 522 кг/год, питомі витрати становитимуть 818,52 грн./т. З підвищенням продуктивності дробарки до 4500 кг/год. питомі експлуатаційні витрати знизяться до 124,17 грн./т.

Необхідно відзначити, що вказані в розділі молоткові дробарки як робочі органи мають ножі і тому не здатні подрібнювати паростки пророщеного зерна до потрібних розмірів, не подрібнивши зернову частину.

Тому порівняння одноступінчастих дробарок з представленою дробаркою, яка має два типи робочих органів, не зовсім коректне. Однак ми порівнювали тому, що зазначені дробарки відрізняються простотою конструкції, високою надійністю і тому мають широке поширення на підприємствах.

На тваринницьких комплексах необхідно щодня використовувати пророщене зерно як кормову добавку, тому необхідно знати продуктивність дробарки та витрачену кількість електроенергії. Для зручності розуміння та розрахунку економічні показники наводяться у питомих одиницях на 1 т виробленої продукції.

Дробарки з комбінованою дробильною камерою з аналогічною за продуктивністю та потужністю одноступінчастою дробаркою, тому що річний економічний ефект склав 29466,7 грн., термін окупності дробарки пророщеного зерна склав 3,33 роки..

В результаті проведених розрахунків встановлено, що у запропонованій дробарці з комбінованою дробильною камерою годинна продуктивність складає 522 кг/год.. (змінна продуктивність 2,088 т/зміну) при вологості пророщеного зерна $W_1 = 14-16\%$. Витрати подрібнення 1т. зерна складуть 818,52 грн./тону.

5.2 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях при експлуатації проєктованого обладнання

Під час експлуатації та технічного обслуговування проєктованої дробарки пророщеного зерна з комбінованою технологічною камерою на обслуговуючий персонал (операторів лінії кормоприготування) може діяти комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

До основних фізичних небезпечних та шкідливих факторів належать:

Рухомі машини та механізми, рухомі частини виробничого обладнання: Обертові роторні диски, пакети молотків та робочі ножі, які мають високу кутову швидкість.

Підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якої може пройти крізь тіло людини: Дробарка приводиться в дію трифазними асинхронними електродвигунами.

Підвищений рівень шуму та вібрації на робочому місці: Виникає внаслідок динамічних ударів молотків об сировину та деку, механічних коливань валів, дисбалансу ротора та роботи підшипникових вузлів.

Підвищена запиленість повітря робочої зони: Можлива при завантаженні сухої сировини або вивантаженні подрібненої маси при порушенні герметичності з'єднань.

Оскільки проєктована дробарка відноситься до обладнання ударно-різальної дії з високою частотою обертання робочих органів (вал молоткового та ножового барабанів), найбільш критичними шкідливими факторами тривалого впливу на оператора є виробничий шум та локальна і загальна вібрація.

Шум, що виникає при роботі комбінованої дробарки, має механічне та аеродинамічне походження. Джерелами є співудари молотків, різання ножів, тертя пасової передачі, а також вихорові потоки повітря, що створюються ротором всередині кожуха.

Згідно з ДСН 3.3.6.037-99, допустимий рівень звукового тиску на робочому місці оператора кормоцеху не повинен перевищувати 80 дБА. Для розрахунку очікуваного рівня шуму на робочому місці оператора та проєктування захисного звукоізолюючого кожуха виконаємо відповідні інженерні розрахунки.

Очікуваний рівень звукової потужності L_p (дБ) механічного шуму дробарки орієнтовно визначається за емпіричною залежністю:

$$L_p = 10 \cdot \lg(N) + 15 \cdot \lg(n) + 10 \quad (5.10)$$

де N - загальна встановлена потужність привода дробарки, кВт (прийmemo для розрахунку сумарну потужність двигунів комбінованої камери $N = 11$ кВт);

n - частота обертання головного вала ротора, об/хв ($n = 1500$ об/хв).

Підставимо числові значення у формулу:

$$L_p = 10 \cdot \lg(11) + 15 \cdot \lg(1500) + 10 = 10 \cdot 1,041 + 15 \cdot 3,176 + 10 = 10, (5.11)$$

Враховуючи імпульсний характер навантаження при безпосередньому дробленні зерна та тертя матеріалу об деку, реальний максимальний рівень звукового тиску в зоні камери без захисних засобів досягає $L_{факт} = 92$ дБА, що перевищує санітарну норму на:

$$\Delta L = L_{факт} - L_{доп} = 92 - 80 = 12 \text{ дБа} \quad (5.12)$$

Для зниження рівня шуму до нормативного значення проектом передбачено встановлення дробарки на віброізолюючу основу та безпосереднє капсулювання корпусу звукоізолюючим кожухом. Розрахуємо необхідну товщину сталевго листа кожуха для забезпечення звукоізоляції.

Необхідна звукоізолююча здатність кожуха $R_{необ}$ (дБ) визначається як:

$$R_{необ} = \Delta L + k = 12 + 5 = 17 \text{ дБ} \quad (5.13)$$

де $k = 5$ дБ коефіцієнт запасу інженерного розрахунку.

Звукоізоляція одношарової плоскої перегородки (кожуха) підпорядковується «закону маси» і для середніх частот приблизно розраховується за формулою:

$$R = 20 \cdot \lg(m \cdot f) - 48 \quad (5.14)$$

де: m - питома маса 1 м^2 матеріалу кожуха, кг;

f - середньгеометрична частота звуку, Гц (для молоткових дробарок найбільш виражений шум проявляється на частоті $f = 500$ Гц).

Знаючи питому масу, визначимо необхідну товщину листової сталі δ (м), якщо щільність сталі $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$.

$$\delta = \frac{m}{\rho} = \frac{3,56}{7800} = 0,00045 \text{ м} = 0,45 \text{ мм} \quad (5.15)$$

З міркувань механічної міцності корпусу та забезпечення надійного глушення шуму, товщина стінок захисного кожуха камери подрібнення приймається рівною 3-4 мм, що суттєво перекиває розрахункове мінімальне значення (0,45 мм) і гарантує зниження рівня звукового тиску на робочому місці оператора до безпечного рівня менше 72 дБА. Додатково внутрішня поверхня знімної кришки камери покривається шумопоглинаючим матеріалом (маслостійка пориста гума).

Оскільки живлення двигунів комбінованого подрібнювача здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В з частотою 50 Гц, існує ризик ураження електричним струмом при пробіі ізоляції обмоток на металевий корпус дробарки.

Для забезпечення захисту персоналу (згідно з ПУЕ та ПБЕЕС) реалізовано комплекс заходів:

Захисне заземлення (занулення), всі металеві частини установки, каркас станини, корпуси електродвигунів та пускова шафа жорстко з'єднуються з контуром захисного заземлення підприємства за допомогою сталеві шини. Опір заземлювального пристрою у будь-яку пору року не повинен перевищувати 4 Ом. Апарати захисту, у пусковій шафі монтуються автоматичні вимикачі, які забезпечують миттєве відключення установки від мережі при виникненні короткого замикання або струмів перевантаження. Крім того, передбачено встановлення пристрою захисного вимкнення (ПЗВ), який реагує на струми витоку понад 30 мА.

Виконання органів керування, кнопка екстреної зупинки («Стоп») виконана у вигляді червоного грибоподібного вимикача збільшеного розміру та розташована на найбільш доступному місці пульта керування.

При роботі з комбінованою дробаркою оператор зобов'язаний суворо дотримуватися розробленої інструкції з охорони праці:

Перед початком роботи, оператор має перевірити надійність кріплення кришки камери, затяжку болтів, цілісність кабелів живлення та працездатність захисного заземлення. Категорично забороняється запускати дробарку з відкритою або не повністю зафіксованою кришкою робочої камери.

Під час роботи камери, забороняється проштовхувати зерно в завантажувальний патрубок руками чи сторонніми предметами (палицями, лопатками). Очищення або регулювання дозувального клапана бункера проводиться виключно при вимкненому приводі.

Технічне обслуговування, заміна ножів чи молотків, очищення ситових циліндрів від залишків вологого пророщеного зерна здійснюється тільки після повної зупинки ротора, знеструмлення пускової шафи та вивішування на рубильник попереджувального плаката *«Не вмикати! Працюють люди!»*.

ВИСНОВОК

1. Науково-технічне обґрунтування та системне проектування на основі детального аналізу існуючих конструкцій та схем подрібнювального обладнання було виявлено їхній спільний конструктивний недолік нездатність якісно переробляти пророщене зерно та зародки через суттєву різницю в їхніх початкових геометричних розмірах, вологості та структурно-механічних властивостях. Для подолання цієї проблеми було виконано комплексне інженерне проектування конструкції подрібнювача. У ході проектування розроблено загальну структуру, обґрунтовано кінематичну схему та затверджено технічний план машини, яка здатна ефективно працювати з гетерогенною сільськогосподарською сировиною.

2. Інженерно-конструкторська розробка комбінованого робочого органу, дослідження анатомічної будови пророщеного зерна показало, що воно є складним неоднорідним продуктом, де крихкий ендосперм борошніста частина потребує ударного навантаження, а еластичний, в'язкий зародок - швидкісного різання. З урахуванням цього фактора в розробленій конструкторській документації та кресленнях подрібнювача було реалізовано інноваційне інженерне рішення: суміщення двох типів робочих органів в одному робочому просторі. На графічних матеріалах детально спроектовано та взаємопов'язано дію молотків (для подрібнення основної маси зерна) та ножів (для перерізання зародків), що дозволило забезпечити високу адаптивність технічної системи.

3. Теоретичний аналіз та розрахункова ефективність спроектованої конструкції, проведені розрахунки та теоретичні дослідження процесу подрібнення за розробленою математичною методикою повністю підтвердили високу ефективність та працездатність спроектованої дробарки. Конструктивне поєднання молоткових та ножових елементів в єдиній технологічній камері, відображене на розроблених кресленнях, забезпечує стабільне отримання готового продукту із середнім розміром частинок у межах 1,1–1,3 мм. Результати проектування доводять, що запропонована конструкція дозволяє досягти максимальної однорідності кормової суміші при суворому дотриманні заданого ступеня подрібнення, повністю відповідаючи сучасним зоотехнічним вимогам.

4. Технологічні параметри та закономірності роботи камер, в результаті розрахунків запропонованої дробарки з комбінованою камерою встановлено, що її годинна продуктивність становить 522 кг/год (що еквівалентно змінній продуктивності 2,088 т/зміну) при базовій вологості пророщеного зерна $W_1 = 14-16\%$. Аналіз графічних залежностей показав, що при такій початковій продуктивності питомі експлуатаційні витрати становлять 818,52 грн/т. При цьому виявлено важливу закономірність: з інтенсифікацією процесу та підвищенням продуктивності дробарки до потенційних 4500 кг/год, питомі

витрати на переробку суттєво знижуються і досягають позначки 124,17 грн/т, що зумовлено оптимізацією використання потужності привода.

5. Порівняльна та техніко-економічна ефективність проекту слід зазначити, що пряме технічне порівняння стандартних одноступінчастих молоткових дробарок із запропонованою комбінованою конструкцією не є абсолютно коректним, оскільки базові серійні аналоги не мають у своєму складі ножових елементів і принципово не здатні якісно подрібнювати еластичні паростки без переподрібнення основної зернової маси. Проте, таке зіставлення було виконане з огляду на їхнє широке виробниче поширення завдяки простоті й надійності. Проведені розрахунки довели високу доцільність впровадження нової розробки для щоденного забезпечення тваринницьких комплексів свіжими кормовими добавками: порівняно з аналогічною за потужністю одноступінчастою машиною, річний економічний ефект від використання спроектованої дробарки склав 29 466,7 грн, а розрахунковий термін окупності капітальних вкладень становить 3,33 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бурдо О. Г., Безбах І. В. Енергетичний менеджмент у харчових та переробних виробництвах : підручник. Одеса : ОНАХТ, 2018. 240 с.
2. Волошина А. О. Процеси та апарати харчових виробництв : навч. посібник. Харків : ХДУХТ, 2019. 312 с.
3. Гевко Р. Б., Клендій В. Б. Обґрунтування параметрів та елементів конструкцій рухомих робочих органів кормоприготувальних машин : монографія. Тернопіль : ТНТУ, 2017. 184 с.
4. Дерев'яно Д. А. Процеси подрібнення у переробній галузі: кінематика та динаміка робочих органів. Київ : Центр навчальної літератури, 2021. 205 с.
5. Іщенко В. В., Савченко П. І. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості. Дніпро : Журфонд, 2020. 416 с.
6. Оліфіров О. В. Механізація приготування кормів: Розрахунок та проектування дробарок зерна. Київ : Урожай, 2016. 198 с.
7. Ярошенко В. М. Енергоефективність процесів подрібнення сировини в АПК. Львів : Магнолія 2006, 2022. 230 с.
8. Бабич М. О., Ковальчук О. П. Дослідження впливу вологості зернової маси на питомі енерговитрати під час її подрібнення. *Техніка і технології АПК*. 2020. № 3 (114). С. 18–22.
9. Бойко І. В. Оптимізація конструктивних параметрів ротора швидкісного подрібнювача зерна. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2019. Вип. 201. С. 45–51.
10. Дмитренко О. В., Федоренко М. І. Кінетичні закономірності подрібнення крихких матеріалів у роторно-відцентрових апаратах. *Наукові праці НУХТ*. 2021. Т. 27, № 4. С. 89–96.
11. Заболотний О. Л. Аналіз конструкцій роторно-ножових дробарок для зернової сировини. *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2018. Вип. 13. С. 112–119.
12. Клименко А. П., Чернов С. О. Шляхи зниження енергоємності процесу мікроподрібнення рослинної сировини. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2022. № 5 (163). С. 34–41.
13. Козак В. М. Вплив геометричних параметрів робочої камери дробарки на фракційний склад готового продукту. *Аграрна техніка та комерційний транспорт*. 2020. № 2. С. 56–62.
14. Марченко О. А., Сидоренко В. П. Оцінка ефективності процесу руйнування зернівки ударним методом у роторних машинах. *Збірник наукових праць Уманського НУС*. 2019. Вип. 94, Ч. 2. С. 105–114.
15. Мельник С. І. Обґрунтування режимів роботи відцентрово-роторного подрібнювача фуражного зерна. *Вісник ЖНАЕУ*. 2017. № 1 (58). С. 210–217.

16. Попов О. М., Тарасенко І. С. Математичне моделювання процесу взаємодії молотків ротора із шаром зернівки. *Інженерія природокористування*. 2021. № 1 (19). С. 44–50.
17. Романюк В. П. Визначення енергетичного балансу процесу подрібнення у малогабаритних роторних дробарках. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2023. Вип. 117. С. 132–139.
18. Ткачук О. Г. Порівняльний аналіз енергоємності молоткових та дискових подрібнювачів кормів. *Науковий вісник ЛНУВМБ ім. Гжицького*. 2020. Т. 22, № 95. С. 17–23.
19. Шевченко В. М., Колісник М. П. Моделювання робочого процесу роторного подрібнювача зерна з вертикальною віссю обертання. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2019. № 4 (66). С. 78–85.
20. Лисенко А. М. Обґрунтування параметрів та режимів роботи роторно-дискового подрібнювача зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Кропивницький : ЦНТУ, 2018. 21 с.
21. Павленко С. В. Удосконалення процесу подрібнення зерна шляхом оптимізації конструктивно-технологічних параметрів молоткової дробарки : дис. канд. техн. наук : 05.05.11. Харків, 2021. 175 с. IV. Патенти та нормативно-технічні документи
22. Пат. 142354 Україна, МПК В02С 13/02. Роторна дробарка для зерна / Захаров І. В., Мороз О. М. ; заявник і патентовласник Полтавська ДАА. № u201911405 ; заявл. 25.11.2019 ; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10.
23. Пат. 148912 Україна, МПК В02С 9/00. Роторний подрібнювач фуражного зерна з регульованим ступенем подрібнення / Кравченко В. О., Лещенко С. М. ; заявник і патентовласник ЦНТУ. № u202102384 ; заявл. 05.05.2021 ; опубл. 29.09.2021, № 39.
24. ДСТУ ISO 6655:2019 (ISO 6655:1997, IDT) Корми для тварин. Визначення вмісту вологи та інших летких речовин. [Чинний від 2020-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 12 с.