

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття ступеня вищої освіти магістр
бакалавр, магістр

на тему: «Удосконалення процесу подрібнення та конструктивних параметрів
молоткових дробарок із системою сепарації»

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва
назва ОПП

спеціальності 133 Галузеве
машинобудування

код та найменування спеціальності

ступеня вищої освіти магістр групи 1

Резчик Михайло Євгенович

Прізвище та ініціали здобувача вищої освіти

Керівник: Левченко Ю. В.

Прізвище та ініціали керівника

Рецензент: Келемеш А. О.

Прізвище та ініціали рецензента

Полтава – 2026 рік

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ	11
1.1. Призначення молоткових дробарок у с/г виробництві	11
1.2. Вимоги до якості подрібненого продукту	14
1.3. Аналіз конструкцій молоткових дробарок	19
1.4. Системи сепарації в дробарках: решітна, пневмосепарація, комбіновані	27
Висновки до розділу 1	30
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ТА СЕПАРАЦІЇ	34
2.1. Теоретичні основи ударного подрібнення в молотковій дробарці	34
2.2. Вплив режимних параметрів на ефективність	36
2.3. Вплив конструктивних параметрів	39
2.4. Теоретичні основи сепарації продукту подрібнення	47
2.5. Обґрунтування критеріїв оцінки ефективності	52
Висновки до розділу 2	57
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ ІЗ СИСТЕМОЮ СЕПАРАЦІЇ	59
3.1. Вибір базової конструкції та її недоліки	59
3.2. Обґрунтування удосконалень	61
3.3. Опис удосконаленої конструкції дробарки із системою сепарації	
3.4. Розрахунок основних параметрів	63
3.5. Розрахунок приводу та енергетичних показників	67
Висновки до розділу 3	71
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ	73
4.1. Мета, завдання і план експерименту	73

4.2. Опис експериментальної установки та методики вимірювань

4.3. Дослідження впливу режимів на продуктивність та якість подрібнення

4.4. Дослідження ефективності системи сепарації

4.5. Визначення раціональних параметрів роботи дробарки

Висновки до розділу 4

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ 96

5.1. Заходи з охорони праці та безпеки 96

5.2. Оцінка екологічної ефективності 99

5.3. Розрахунок економічної ефективності 101

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 106

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 108

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному сільськогосподарському виробництві процеси подрібнення рослинної сировини та зернових матеріалів є важливими етапами підготовки кормів і технологічних сумішей. Якість подрібнення безпосередньо впливає на ефективність використання кормів, рівномірність змішування компонентів, продуктивність технологічних ліній, а також енергетичні витрати підприємства. Серед машин для подрібнення найбільш поширеними є молоткові дробарки, які характеризуються універсальністю застосування, відносною простотою конструкції та можливістю роботи з різними видами сировини.

Разом з тим, експлуатація молоткових дробарок супроводжується низкою проблем: підвищеною енергоємністю процесу, значним зношуванням робочих органів, утворенням пилу, нерівномірністю гранулометричного складу готового продукту, а також повторним переподрібненням частинок, що вже досягли необхідного розміру. Важливим напрямом підвищення ефективності роботи дробарок є удосконалення конструктивних параметрів та застосування систем сепарації, які забезпечують своєчасне відведення частинок заданої фракції, зменшуючи циркуляцію матеріалу в робочій камері, знижуючи енерговитрати та підвищуючи якість подрібнення.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження процесу подрібнення в молоткових дробарках та обґрунтування раціональних конструктивних параметрів робочих органів у поєднанні із системою сепарації, що забезпечить підвищення продуктивності та зниження питомих енергетичних витрат при збереженні необхідного гранулометричного складу продукту.

Метою кваліфікаційної роботи є удосконалення процесу подрібнення та обґрунтування конструктивних параметрів молоткової дробарки із системою сепарації для підвищення її продуктивності, покращення якості подрібненого продукту та зниження питомих енергетичних витрат.

Об'єктом дослідження є технологічний процес подрібнення зернової (або рослинної) сировини в молотковій дробарці.

Предметом дослідження є вплив конструктивних та режимних параметрів молоткової дробарки із системою сепарації на показники ефективності подрібнення, зокрема продуктивність, енергоємність і гранулометричний склад готового продукту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

Провести аналіз існуючих конструкцій молоткових дробарок та систем сепарації, визначити їх переваги, недоліки та основні напрями удосконалення.

Обґрунтувати теоретичні положення процесу ударного подрібнення та сепарації в робочій камері дробарки, визначити основні фактори, що впливають на ефективність.

Розробити та обґрунтувати конструктивну схему удосконаленої молоткової дробарки із системою сепарації, визначити основні конструктивні параметри.

Розробити програму та методику експериментальних досліджень, провести дослідження впливу режимних і конструктивних параметрів на показники роботи дробарки.

На основі отриманих результатів визначити раціональні параметри та режими роботи, а також виконати оцінку екологічного ефекту, заходів з охорони праці й економічної ефективності впровадження удосконаленої конструкції.

У роботі використано такі методи досліджень:

аналіз та узагальнення літературних і нормативних джерел;

теоретичні методи механіки та машинознавства для обґрунтування параметрів робочих органів;

експериментальні дослідження продуктивності, питомих енергетичних витрат і гранулометричного складу продукту;

методи статистичної обробки експериментальних даних, побудова залежностей та визначення раціональних параметрів.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропоновані конструктивні удосконалення молоткової дробарки із системою сепарації дозволяють:

підвищити продуктивність подрібнення;

зменшити питомі енергетичні витрати;

покращити якість готового продукту за рахунок стабільнішого гранулометричного складу;

знизити рівень пиловиділення та переподрібнення матеріалу;

підвищити ресурс роботи основних вузлів за рахунок зменшення циркуляції частинок у камері подрібнення.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. У роботі наведено аналітичні матеріали, результати теоретичних і експериментальних досліджень, а також обґрунтування ефективності запропонованих удосконалень.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Призначення молоткових дробарок у с/г виробництві

У сучасному сільськогосподарському виробництві подрібнення зернових та інших компонентів кормових сумішей є однією з ключових технологічних операцій, що забезпечує ефективне використання кормів у тваринництві. Відомо, що для отримання високих економічних показників у галузі тваринництва кормовий раціон повинен містити збалансований набір поживних речовин, що повністю задовольняє потреби організму тварин. Це досягається, зокрема, шляхом приготування повноцінних комбикормів, у структурі яких зернова частина є основним джерелом енергії та поживних компонентів. У зв'язку з цим виробництво комбикормів є важливим завданням агропромислового комплексу, а подрібнення зерна виступає найбільш відповідальною та енергоємною операцією у даному процесі

Значення операції подрібнення посилюється також тим, що частка кормів у загальних витратах на виробництво продукції тваринництва має тенденцію до зростання і може становити 60...75% собівартості. При цьому основні економічні втрати пов'язані не лише з вартістю кормів, а й із неоптимальним рівнем годівлі та нераціональними витратами кормових ресурсів. Отже, підвищення ефективності використання кормів потребує вдосконалення технологій та технічних засобів, а також ощадливого використання енергетичних ресурсів

Серед машин, що застосовуються для подрібнення фуражного зерна, найбільш поширеними є молоткові дробарки. Їх широке застосування у сільськогосподарському виробництві пояснюється універсальністю, можливістю роботи з різними культурами, відносною простотою конструкції, зручністю експлуатації та ремонтпридатністю. Молоткові дробарки використовуються як у складі комбикормових агрегатів, так і в автономному

режимі на фермах, у господарствах різних форм власності, а також на підприємствах з переробки зерна.

Основне функціональне призначення молоткових дробарок полягає у подрібненні зерна до необхідного гранулометричного складу, який визначається зоотехнічними вимогами та особливостями годівлі різних видів тварин. Від якості подрібнення залежать такі важливі показники, як засвоюваність кормів, рівномірність змішування компонентів комбікорму, стабільність технологічного процесу та кінцева ефективність виробництва. Саме тому в технічній літературі та наукових дослідженнях значна увага приділяється формуванню раціонального ступеня подрібнення, забезпеченню однорідності фракційного складу, зниженню частки пилоподібних частинок та мінімізації переподрібнення.

Окрім забезпечення заданої якості готового продукту, молоткові дробарки повинні характеризуватися достатньою продуктивністю, низькою питомою енергоємністю та стабільністю роботи. Питання енергоефективності має особливе значення, оскільки подрібнення зерна є однією з найбільш енергоємних операцій у технологічному циклі виробництва комбікормів. Тому актуальним є вдосконалення робочого процесу дробарок, спрямоване на зменшення витрат енергії та підвищення ефективності використання сировини

Значним напрямом підвищення ефективності роботи молоткових дробарок є вдосконалення систем подачі та сепарації продукту подрібнення.

У сучасних конструкціях все ширше застосовуються пневматичні системи завантаження, що дозволяють забезпечити рівномірність подачі матеріалу та поєднати процеси транспортування, подрібнення і часткового розділення за фракціями. У дослідженнях зазначається, що перспективним напрямом є оптимізація конструктивно-технологічних параметрів дробарок із пневматичною загрузкою та застосуванням сепараційних елементів, зокрема жалюзійних сепараторів, які сприяють стабілізації повітряного режиму та покращенню технологічних показників роботи

Таким чином, молоткові дробарки у сільськогосподарському виробництві виконують важливу функцію в технології приготування комбікормів, забезпечуючи необхідну ступінь подрібнення зерна та підготовку компонентів кормових сумішей. Удосконалення конструктивних параметрів і режимів роботи дробарок, а також застосування систем сепарації є актуальним напрямом, який дозволяє підвищити продуктивність, покращити якість готового продукту та знизити питомі енергетичні витрати.

Актуальні наукові дослідження у сфері удосконалення молоткових дробарок зосереджені на зниженні питомих енерговитрат, підвищенні продуктивності та стабілізації гранулометричного складу продукту шляхом керування процесами руху матеріалу і повітря в робочій камері. У кваліфікаційній роботі ця ідея реалізується через оптимізацію конструктивно-технологічних параметрів дробарки з пневматичною загрузкою та жалюзійним сепаратором, де ключовими факторами виступають повітряний режим, параметри вентилятора та узгодження їх із роботою молоткового ротора .

Один із найактуальніших напрямів – формування керованого повітряного потоку навколо зони подрібнення для зменшення переподрібнення та швидкого видалення кондиційного продукту. Зокрема, у сучасних роботах досліджують вплив тиску/розрідження та режиму циркуляції повітря навколо камери подрібнення на якість помелу й енерговитрати. Це напряму узгоджується з підходом роботи, де оптимізують повітряний режим і елементи, що його формують (вентилятор, “вхідне вікно”, додаткові лопатки тощо)

У 2025 р. опубліковано результати, де показано, що зміна повітряного режиму (через тиск) може бути ефективним важелем керування якістю та енергетичними показниками роботи зернової молоткової дробарки.

Поширюється застосування CFD для аналізу поля швидкостей/турбулентності, зон застою й рециркуляції частинок у робочій камері та в каналах аспірації. Такі роботи обґрунтовують конструктивні зміни, які підвищують рівномірність повітряного поля й, як наслідок, сприяють більш однорідному гранулометричному складу при нижчих енерговитратах.

Сучасні дослідження у галузі удосконалення молоткових дробарок дедалі більше орієнтовані не на формування узагальнених рекомендацій, а на параметричну оптимізацію окремих конструктивних вузлів. Зокрема, увага зосереджується на визначенні раціональних значень кута встановлення лопаток вентилятора, діаметра вхідного отвору, величини конструктивних зазорів, кількості та геометрії лопаток, а також на узгодженні цих параметрів із режимами роботи молоткового ротора та сепараційного елемента. Такий підхід реалізовано в експериментальній частині прикріпленої роботи, де послідовно досліджено вплив зазначених конструктивних факторів на формування повітряного режиму та основні показники ефективності роботи дробарки.

Окремий активний напрям – експериментальні дослідження, які впливають на споживану потужність, продуктивність, температуру помелу та розподіл частинок. Це важливо для твоєї теми, бо система сепарації/аспірації має підбиратися так, щоб дробарка стабільно працювала при змінних властивостях сировини.

Математичні моделі та статистична оптимізація (інколи ML/ANN) для прогнозу PSD та енерговитрат.

Зростає частка робіт, де будують регресійні/статистичні моделі або використовують ML-підходи для прогнозу гранулометричного складу (PSD) та енерговитрат залежно від режимів і параметрів. Це добре “підв’язується” до твого розділу 4, де в роботі прямо закладено статистичну обробку та оптимізацію параметрів.

Отже, актуальні дослідження спрямовані на керування траєкторіями частинок і повітряним режимом у дробарці, оптимізацію параметрів вентилятора/сепаратора та врахування властивостей зерна з метою зменшення переподрібнення, зниження питомих енерговитрат і стабілізації

1.2. Вимоги до якості подрібненого продукту

Якість подрібнення зерна є визначальним фактором ефективності процесу приготування комбікормів і безпосередньо впливає на продуктивність

тварин, засвоюваність поживних речовин та економічні показники господарства. У зв'язку з цим до подрібненого зернового продукту висувають комплекс вимог, які доцільно поділяти на зоотехнічні та технологічні.

Зоотехнічні вимоги спрямовані на забезпечення оптимального використання кормів організмом тварин. Вони визначаються видом тварин, віком, фізіологічним станом, а також способом годівлі та формою корму. У наукових дослідженнях підкреслюється, що подрібнення зерна є однією з найбільш відповідальних операцій у виробництві комбікормів, оскільки саме ступінь подрібнення визначає доступність поживних речовин і стабільність кормового раціону

До основних зоотехнічних вимог належать:

Рациональний гранулометричний склад продукту. Подрібнене зерно має містити переважно частинки заданого розміру, що відповідають потребам конкретної групи тварин. Надмірно грубі частинки знижують засвоюваність, а надмірно дрібні можуть викликати небажані наслідки (зокрема, подразнення дихальних шляхів, ризику при споживанні, підвищення запиленості).

Обмеження вмісту пилоподібної фракції. Пил у кормі знижує його поїдання, підвищує втрати при транспортуванні та роздачі, погіршує санітарно-гігієнічні умови, а також збільшує вибухо- та пожежонебезпеку.

Стабільність та однорідність помелу, що забезпечує рівномірний склад комбікорму й запобігає розшаруванню суміші.

Мінімізація термічного впливу на зерно. Підвищення температури в зоні подрібнення може призводити до небажаних змін у структурі поживних речовин, особливо при інтенсивному переподрібненні.

З огляду на зазначене, зоотехнічні вимоги формують базові критерії, які необхідно забезпечити при виборі режимів подрібнення, конструкції ротора, решета та системи сепарації.

Технологічні вимоги визначаються умовами функціонування комбікормових агрегатів, характеристиками подрібнюваного матеріалу та конструктивними особливостями дробарки. У роботі зазначається, що

подрібнення зерна є найбільш енергоємною операцією в технології приготування комбікормів, тому одним із ключових завдань є зниження енерговитрат за збереження необхідної якості продукту

До основних технологічних вимог належать:

Забезпечення заданої продуктивності дробарки при стабільній роботі технологічної лінії.

Низька питома енергоємність подрібнення (економне використання електроенергії).

Стійкість робочого процесу при зміні вологості зерна, його засміченості та фізико-механічних властивостей.

Відсутність переподрібнення частинок, що вже досягли потрібного розміру. Переподрібнення знижує продуктивність, збільшує споживання енергії, підвищує запиленість та прискорює зношування робочих органів.

Ефективне виведення готового продукту із зони подрібнення, що досягається конструкцією решета та застосуванням системи сепарації (решітної або пневматичної). У кваліфікаційній роботі цей напрям реалізовано через оптимізацію повітряного режиму дробарки та параметрів вентилятора і сепараційного вузла

Зниження запиленості повітря робочої зони, що є важливою вимогою не лише технологічною, але й санітарною та безпековою.

Показники контролю якості подрібнення

Відповідно до практики українських підприємств і вимог до технологічного контролю (зокрема у виробництві комбікормів), якість подрібнення зерна доцільно оцінювати за сукупністю показників:

Гранулометричний склад продукту (ситовий аналіз).

Вміст пилоподібної фракції.

Ступінь подрібнення та однорідність (частка основної фракції).

Продуктивність дробарки при заданих умовах.

Питома енергоємність процесу (кВт·год/т або МДж/т).

Таким чином, якість подрібнення зерна повинна відповідати зоотехнічним вимогам щодо гранулометричного складу, обмеження пилоподібної фракції та однорідності корму, а також технологічним вимогам щодо продуктивності, енергоефективності та стабільності робочого процесу. Врахування цих критеріїв є основою для подальшого теоретичного обґрунтування і експериментальної оптимізації параметрів молоткових дробарок із системою сепарації.

Під час обґрунтування вимог до якості подрібнення зерна та оцінки технологічних і безпекових показників доцільно спиратися на чинні нормативні документи України, які регламентують:

1) Вимоги до комбікормів і кормової сировини

Для опису загальних вимог до кормів, зернової сировини та комбікормів варто використовувати:

державні стандарти України (ДСТУ), що встановлюють вимоги до якості зерна як кормової сировини (вологість, домішки, засміченість, показники безпечності);

ДСТУ/технічні умови (ТУ) на комбікорми або кормові суміші, де регламентуються показники якості (у т.ч. допустимий вміст домішок, вимоги до однорідності, безпечності тощо);

ветеринарно-санітарні вимоги до кормів (у частині безпечності, забруднень, токсинів).

У магістерській зазвичай достатньо зазначити, що якість кормів має відповідати вимогам ДСТУ та/або ТУ підприємства.

2) Методи визначення гранулометричного складу (ситовий аналіз)

Для обґрунтування методики оцінки фракційного складу подрібненого продукту доцільно посилатися на:

ДСТУ щодо методів ситового аналізу сипких матеріалів (визначення гранулометричного складу методом просіювання);

стандарти, що регламентують вимоги до лабораторних сит (характеристики отворів, комплектність наборів, правила калібрування).

3) Нормативи з охорони праці та безпеки (пил, шум, вибухонебезпека)

Оскільки подрібнення зерна супроводжується пиловиділенням і шумом, а зерновий пил є потенційно вибухонебезпечним, доцільно використовувати нормативну базу за трьома напрямками:

а) Пил і санітарні норми

ДСанПіН та/або державні гігієнічні нормативи, що встановлюють допустимі концентрації пилу у повітрі робочої зони;

документи, які регламентують вимоги до вентиляції та аспірації на виробництві.

б) Шум і вібрація

державні санітарні норми щодо допустимих рівнів шуму на робочих місцях;

нормативи щодо вимірювання шуму і захисту працівників (включно із застосуванням ЗІЗ).

в) Пожежна та вибухова безпека

правила пожежної безпеки в Україні (загальні вимоги до виробничих приміщень);

нормативи з вибухозахисту (класифікація вибухонебезпечних зон, вимоги до електрообладнання, запобігання утворенню пилоповітряних сумішей);

ДБН щодо проектування виробничих приміщень, вентиляції, евакуації та протипожежних вимог.

Таким чином, вимоги до якості подрібнення зерна та безпечності процесу доцільно обґрунтовувати на основі чинних ДСТУ щодо кормової сировини та комбікормів, стандартів на методи ситового аналізу, а також санітарних і будівельних нормативів України щодо пилу, шуму та пожежо- і вибухонебезпеки.

1.3. Аналіз конструкцій молоткових дробарок

Молоткові дробарки належать до машин ударної дії, у яких руйнування зерна відбувається переважно внаслідок багаторазових ударів молотків по частинках та їх взаємодії з відбивальними поверхнями робочої камери. У кваліфікаційній роботі конструкції дробарок розглядаються в контексті підвищення ефективності подрібнення фуражного зерна, зокрема через оптимізацію конструктивно-технологічних параметрів та повітряного режиму (пневматична подача, вентилятор, жалюзійний сепаратор).

Ротор є базовим робочим органом, який визначає кінематику процесу та інтенсивність подрібнення. Найпоширеніші схеми — горизонтальний ротор із підвісними молотками у корпусі (робочій камері) з напрямними/деками та ситом. Важливими конструктивними характеристиками є діаметр і ширина ротора, кількість підвісів, жорсткість вузлів кріплення, балансування та забезпечення рівномірного завантаження матеріалом. У роботі акцентовано, що на робочий процес істотно впливають конструктивно-технологічні фактори, які визначають як якість подрібнення, так і енерговитрати.

Окремий сучасний напрям — інтеграція вентилятора/пневмосистеми з дробильною камерою для стабілізації транспорту матеріалу та відведення продукту. У дослідженні системно розглядається вплив параметрів вентилятора й повітряного тракту на роботу дробарки.

Молотки виконують функцію “ударних елементів” і зазвичай є:

- пластинчастими симетричними (поворотними, двосторонніми),
- із різними профілями кромки (для підвищення інтенсивності руйнування),
- зносостійкими (термообробка, наплавлення, зміцнені сталі).

Конструктивно молотки підвішують на осях/пальцях, що дозволяє їм відхилятися при ударі об сторонні включення (підвищення живучості). Для технології важливе узгодження молотків із режимом роботи ротора та системою

відведення продукту, щоб зменшувати переподрібнення і “зайву циркуляцію” матеріалу в камері.

Дека (або відбивальні плити/вкладиші) формує зону вторинного руйнування: частинки після удару молотком взаємодіють із відбивальною поверхнею, що підвищує ступінь подрібнення. Конструкції відрізняються: геометрією та розташуванням відбивальних елементів, наявністю змінних/регульованих плит, виконанням із зносостійких матеріалів.

Технологічно дека впливає на інтенсивність подрібнення та стабільність гранулометричного складу, а також на зношування і енергоємність.

Решето забезпечує селекцію частинок за розміром: продукт виходить із камери лише після проходження отворів заданого калібру. Це класичний конструктивний елемент, який визначає: кінцевий гранулометричний склад, продуктивність (через площу живого перерізу), схильність до забивання (особливо при підвищеній вологості/жирності сировини).

У практиці промислових ліній часто застосовують змінні решета різного калібру для різних рецептів комбікормів.

Привід ротора (електродвигун через муфту/ременну передачу) повинен забезпечувати стабільність частоти обертання під змінним навантаженням. Оскільки подрібнення є енергоємною операцією, у дослідженнях значну увагу приділяють енергетичній оцінці та шляхам зниження питомих витрат енергії через оптимізацію параметрів і режимів роботи. У кваліфікаційній роботі прямо передбачені розділи з енергетичною та економічною ефективністю модернізованої дробарки (як результат удосконалень).

Для сучасних конструкцій характерне поєднання подрібнення з пневмотранспортом і сепарацією. У кваліфікаційній роботі досліджується дробарка з пневматичною подачею та жалюзійним сепаратором, де послідовно оцінюють вплив параметрів вентилятора, “вхідного вікна”, зазорів і додаткових лопаток, а також узгодження цих параметрів із молотковим ротором.

Це дозволяє: стабілізувати повітряний режим, підвищити продуктивність, зменшити переподрібнення та пил, керовано відводити готову фракцію.

В Україні представлена низка виробників/постачальників молоткових дробарок для зерна та комбікормових ліній, зокрема:

«Продмаш-Дніпро» (молоткові дробарки для зерна, власне виробництво).

«ГК Біокопром» (молоткові дробарки/зернодробарки; у т.ч. нагнітаючі рішення).

«ТехноМашСтрой» (молоткові дробарки для різних матеріалів, у т.ч. зернових).

У світовій практиці для комбікормових заводів найчастіше фігурують:

Bühler — горизонтальні молоткові млини для грубого/тонкого подрібнення у виробництві кормів, із акцентом на високу окружну швидкість молотків і промислову вибухобезпеку ліній.

ANDRITZ Feed & Biofuel — лінійка молоткових млинів для різних режимів (від грубого до надтонкого подрібнення) на високій продуктивності.

CPM (Champion / Roskamp Champion) — промислові hammermills/рішення для кормової галузі, з можливістю налаштування під необхідний розмір частинок і продуктивність.

Таблиця 1.1 - Типові конструкції молоткових дробарок

Вузол / ознака	Типові рішення в українських виробників	Типові рішення у світових виробників
Компонування та орієнтація	Переважно горизонтальна компоновка; часто універсальні моделі “під різні культури/умови”.	Горизонтальні промислові молоткові млини з модульною компоновкою під конкретну лінію (кормозавод/премікс/гранул яція).
Ротор	Класичний ротор із підвісними молотками; конструкція орієнтована на простоту та ремонтпридатність.	Посилений ротор із підвищеною стабільністю/балансування м; увага до ресурсу, зниження вібрацій, стабільності режиму на тривалих циклах.
Молотки	Типово двосторонні (поворотні), стандартні форми; заміна — через	Широкий вибір профілів/матеріалів під цільовий PSD; рішення для

Вузол / ознака	Типові рішення в українських виробників	Типові рішення у світових виробників
	доступ до камери, часто ручна.	швидкої заміни/перестановки з мінімальними простоями; підвищена зносостійкість.
Дека / футерівка	Наявні відбивальні елементи/футерівка; інколи обмежені варіанти регулювання.	Оптимізована внутрішня геометрія камери; змінні зносостійкі елементи; конструкції, що зменшують “мертві зони” та переподрібнення.
Решето (сито)	Змінні решета, базові формати; швидка заміна залежить від моделі (часто потребує більше часу).	Швидкознімні решета/касети, зручні сервісні люки; акцент на швидкій переналадці під інший помел та стабільність фракцій.
Сепарація / аспірація	Часто: решето як основний “калібрувальний” елемент; аспірація може бути зовнішньою (циклон/фільтр) або спрощеною; у частини моделей — пневмозавантаження/пнеумо вивід.	Системна інтеграція з аспірацією та пиловловленням; керований повітряний режим, мінімізація пилу, рішення для стабільного відведення готової фракції (щоб зменшити переподрібнення).
Подача матеріалу	Гравітаційна подача або пневмоподача (в окремих виконаннях); регулювання подачі інколи простіше.	Дозована подача (часто через живильники/шлюзові затвори), стабільність завантаження як частина керування якістю помелу та енерговитратами.
Привід та енергоефективність	Стандартний електропривід (ременна/муфта); енергоефективність здебільшого досягається підбором решета/режиму.	Рішення для зниження питомих енерговитрат через оптимізацію аеродинаміки, траєкторій частинок, узгодження “млин–аспірація”; можливість інтеграції у системи моніторингу.
Обслуговування	Орієнтація на прості ремонти “в полі”; сервісні операції	Конструкції “під сервіс”: швидкий доступ, стандартизовані вузли,

Вузол / ознака	Типові рішення в українських виробників	Типові рішення у світових виробників
	можуть бути більш трудомісткими.	мінімізація простоїв, розрахунок на інтенсивну експлуатацію.
Безпека (пил, пожежа, вибух)	Базові заходи (кожухи, заземлення, аспірація за потреби); спеціальні вибухозахисні рішення — не завжди типові й залежать від комплектації лінії.	Часто закладаються комплексні рішення для пилової безпеки на рівні лінії: аспірація/фільтрація, вибухорозвантаження/ізоляція, протипожежні заходи, стандартизовані вимоги для промислових об'єктів.

Порівняння типових конструкцій молоткових дробарок українських і провідних світових виробників показує, що в обох випадках базовою є горизонтальна схема з молотковим ротором, декою та ситом як основним калібрувальним елементом. Водночас для українського сегмента характерною є орієнтація на конструктивну простоту, універсальність застосування та ремонтпридатність, що особливо важливо для фермерських і середніх господарств.

Світові виробники, навпаки, реалізують більш спеціалізовані рішення, які інтегруються в промислові комбікормові лінії та забезпечують стабільність режимів при тривалій безперервній роботі. Відмінності особливо помітні в організації обслуговування: у промислових млинах широко застосовуються швидкознімні решета, сервісні люки та конструкції, що мінімізують час заміни молотків і переналаштування. Важливим трендом світових рішень є системна інтеграція аспірації та пиловловлення як частини технологічного процесу, а не додаткового вузла.

Також значна увага приділяється формуванню керованого повітряного режиму для стабільного відведення готової фракції та зниження переподрібнення. У промислових лініях частіше закладаються комплексні заходи пожежної та вибухової безпеки, що пов'язано з підвищеними ризиками пилоповітряних сумішей.

Отже, сучасні підходи до удосконалення дробарок спрямовані на комплексну оптимізацію робочих органів, систем сепарації та повітряного режиму. Саме цей напрям є найбільш перспективним для підвищення продуктивності, енергоефективності та якості подрібнення зерна.

Залежно від організації робочого процесу в робочій камері розрізняють дробарки відкритого або закритого типів [62]. У дробарках відкритого типу матеріал із дробильної камери швидко видаляється, не замикаючи під час переміщення повного колового циклу. Основним механічним фактором процесу подрібнення є вільний удар молотка по шматках подрібнюваного матеріалу [62].

У дробарках закритого типу ротор повністю охоплений решетою і декою. Матеріал, що надходить у дробильну камеру, під час переміщення здійснює багаторазові кругові рухи, а подрібнення відбувається внаслідок багаторазового впливу молотків та стирання при проходженні частинок у середовищі рухомого шару [22].

Значне різноманіття існуючих дробарок та їх істотні відмінності як за конструктивними, так і за технологічними ознаками, зумовили необхідність їх класифікації. Класифікації дробарок зерна наведені багатьма авторами [20].

Згідно з [12, 18] існують такі схеми технологічного процесу подрібнювачів кормів: з відкритим циклом; з рециркуляцією; з рециркуляцією та наявністю накопичувальної ємності рециркуляту; з багатостадійною рециркуляцією.

Під час роботи дробарки за схемою з відкритим циклом решето встановлюють безпосередньо в дробильній камері; матеріал подрібнюється до заданого розміру, після чого видаляється. При цьому утворюється значна кількість пилоподібних частинок, а наявність циркулюючого навантаження в дробильній камері збільшує енерговитрати.

Зменшити утворення пилоподібних частинок можна шляхом організації робочого процесу в дробарці з рециркуляцією матеріалу. Рециркулянт після сепаратора направляється на додаткове подрібнення в дробильну камеру. Однак, оскільки в камеру дроблення разом з вихідним продуктом надходить і

рециркулянт, відбувається переподрібнення матеріалу. Цей недолік усувається при організації процесу, за якої вихідний та недоподрібнений продукти надходять у дробильну камеру по чергово за рахунок використання накопичувальної ємності рециркулянту. Недоліком даної схеми є порушення безперервності технологічного процесу.

Схема роботи дробарки з багатостадійною рециркуляцією дозволяє не змішувати вихідний продукт і рециркулянт у дробильній камері за рахунок її поділу по довжині на ряд паралельних секцій, а також використання кількох незалежних сепараторів.

Найбільшого поширення набули дробарки, що працюють за схемою відкритого циклу. Удосконалення робочого процесу дробарок даного типу здійснюється шляхом підвищення інтенсивності впливу робочих органів на вихідний матеріал і своєчасного відведення готового продукту з дробильної камери.

Ефективність впливу робочих органів підвищується за рахунок: збільшення їх окружної швидкості; використання молотків різної конфігурації; удосконалення профілю дек та колосникових решіток.

У дробильній камері, охопленій решетою, встановлено обичайку з напрямними елементами, виконаними у вигляді гребінки (рис. 1.1а). Зерно під дією молотків ковзає по решету, натрапляє на перемичку обичайки, при цьому великі частинки розколюються на її передній грані. Частина подрібнених частинок потрапляє під перемичку, де проходить через решето. Інша частина частинок потрапляє на напрямні елементи і ковзає по них у напрямі обертання ротора; при цьому дрібні частинки прослизують у зазор між зубцями гребінки, а великі потрапляють під дію набігаючих молотків [10].

У молотковій дробарці [9] для підвищення пропускної здатності та зменшення нерівномірності фракційного складу готового продукту решето в дробильній камері розміщено таким чином, що радіальний зазор між ним і молотками ротора безперервно зменшується за ходом обертання ротора, починаючи від розвантажувальної горловини, а товщина решета при цьому

відповідно збільшується (рис. 1.16). Недоліком даної дробарки є складність виготовлення такого решета та його висока металоємність.

Аналіз сучасних наукових досліджень і технічних рішень у галузі подрібнення зерна показує, що удосконалення молоткових дробарок здійснюється за кількома взаємопов'язаними напрямками, які охоплюють робочі органи, систему сепарації, повітряний режим, а також підвищення ресурсу та безпеки обладнання. При цьому домінує підхід, орієнтований на параметричну оптимізацію окремих вузлів із урахуванням їх впливу на продуктивність, енергоємність та якість фракційного складу продукту.

Одним із ключових напрямів є оптимізація параметрів ротора: його діаметра, ширини, кількості рядів підвісів, а також забезпечення рівномірного завантаження робочої камери. У дослідженнях наголошується, що конструктивно-технологічні фактори істотно визначають ефективність процесу подрібнення, оскільки вони впливають на інтенсивність ударної взаємодії, циркуляцію матеріалу та енергетичні витрати

Окремо досліджується вплив регулювання зазорів між молотками та відбивальними поверхнями на якість помелу.

У зв'язку з тим, що подрібнення зерна супроводжується утворенням пилу та шуму, дослідження і сучасні конструкції орієнтовані на ефективну аспірацію та пиловловлення; зменшення шумового навантаження; впровадження протипожежних і вибухозахисних рішень у складі технологічних ліній.

Решето є основним елементом, що визначає гранулометричний склад продукту, тому дослідження спрямовані на підбір форми отворів і “живого перерізу” решета; оптимізацію площі просіювання; зменшення забивання отворів; підвищення швидкості заміни решіт при переналаштуванні.

Сучасний підхід полягає у розгляді решета не лише як калібрувального елемента, що визначає граничний розмір частинок, а як функціональної складової системи керування циркуляцією продукту в робочій камері, яка впливає на тривалість перебування частинок у зоні подрібнення, інтенсивність переподрібнення та енергетичні показники процесу.

Окремим напрямом удосконалення є зниження вібраційного навантаження та підвищення стабільності роботи дробарки, що досягається шляхом динамічного балансування ротора і забезпечення необхідної жорсткості та надійності вузлів його кріплення. Це сприяє зменшенню нерівномірності навантажень, підвищенню довговічності підшипникових опор і загальному покращенню експлуатаційних показників обладнання.

У дослідженнях приділяється увага формуванню раціональної геометрії робочої камери, зокрема формі та розташуванню деки (відбивальних плит). Це дозволяє зменшити “мертві зони” та локальну рециркуляцію матеріалу; скоротити тривалість перебування частинок у камері; знизити переподрібнення та підвищити продуктивність.

Таким чином, основні напрями удосконалення молоткових дробарок охоплюють оптимізацію параметрів робочих органів, удосконалення решітної системи, введення сепараційних вузлів, а також керування повітряним режимом. Найбільш перспективним підходом є комплексна оптимізація, за якої конструктивні параметри ротора, вентилятора та сепаратора узгоджуються між собою для забезпечення заданої якості подрібнення при мінімальних енерговитратах.

1.4. Системи сепарації в дробарках: решітна, пневмосепарація, комбіновані

Ефективність роботи молоткових дробарок визначається не лише інтенсивністю процесу руйнування зерна, а й здатністю машини забезпечити своєчасне відведення готового продукту із зони подрібнення. Саме тому в сучасних конструкціях дробарок важливого значення набувають системи сепарації, які забезпечують розділення подрібненого матеріалу за розміром частинок та/або за їх аеродинамічними властивостями. Сепараційні системи спрямовані на зменшення переподрібнення, стабілізацію гранулометричного складу та зниження питомих енергетичних витрат.

У загальному вигляді системи сепарації в молоткових дробарках можна класифікувати на решітні, пневматичні та комбіновані.

Решітна сепарація є найбільш поширеним способом відбору продукту у молоткових дробарках. Її сутність полягає в тому, що вихід частинок із робочої камери відбувається лише після проходження через отвори решета заданого розміру. Таким чином решето виконує функцію калібрування продукту та формування кінцевого гранулометричного складу.

Основними перевагами решітної сепарації є:

- простота конструкції;
- технологічна надійність при роботі з сухим зерном;
- можливість оперативної зміни ступеня подрібнення шляхом заміни решета.

Разом з тим решітна система має певні недоліки:

- ризик забивання отворів решета (особливо при підвищеній вологості або засміченості матеріалу);
- підвищена циркуляція частинок у камері до моменту проходження через решето;
- переподрібнення кондиційного продукту, що збільшує енерговитрати та частку пилоподібної фракції.

Отже, решітна сепарація забезпечує контроль фракційного складу, однак у класичному виконанні не завжди гарантує мінімізацію переподрібнення та стабільність процесу при змінних властивостях зерна.

Пневматична сепарація базується на використанні повітряного потоку для транспортування та часткового розділення частинок подрібненого продукту. У таких системах повітря виконує подвійну функцію: забезпечує переміщення продукту з робочої камери; створює умови для відділення легких фракцій та пилу.

В дослідженнях цей напрям реалізовано через дослідження повітряного режиму дробарки зерна з пневматичною загрузкою та сепараційним елементом. Зокрема, експериментально оцінено вплив повітряного режиму на показники роботи дробарки з жалюзійним сепаратором

Ключовою особливістю пневматичних систем є те, що якість сепарації та стабільність роботи дробарки значною мірою залежать від параметрів вентилятора і повітряного тракту. Саме тому в роботі значну увагу приділено оптимізації конструктивних параметрів вентилятора: куту встановлення лопаток, геометрії вхідного отвору, зазорам, кількості додаткових лопаток та їх розмірам.

Перевагами пневмосепарації є: підвищення інтенсивності відведення готового продукту; зниження переподрібнення за рахунок скорочення часу перебування частинок у камері; можливість часткового відділення пилу та легких домішок; перспективність для інтеграції в технологічні лінії (пневмотранспорт).

До недоліків пневмосепарації належать: підвищена залежність процесу від аеродинамічних параметрів; потреба в узгодженні роботи вентилятора з ротором дробарки; ризик збільшення запиленості за відсутності ефективного пиловловлення.

Комбіновані системи сепарації поєднують переваги решітного калібрування та пневматичного відведення продукту. Найбільш поширеним рішенням є використання решета як основного елемента фракційного контролю у поєднанні з вентилятором, який забезпечує: стабільний винос продукту; підтримання повітряного режиму в камері; зменшення циркуляції частинок.

Окремим різновидом комбінованої сепарації є застосування жалюзійних сепараторів, що працюють на принципі розділення частинок за їх аеродинамічними характеристиками. У кваліфікаційній роботі дослідження повітряного режиму дробарки з жалюзійним сепаратором є одним із ключових напрямів експериментальної частини, що підтверджує актуальність цього конструктивного рішення.

Комбіновані системи вважаються найбільш перспективними, оскільки забезпечують стабільність гранулометричного складу; підвищення продуктивності; зниження енерговитрат; зменшення частки пилоподібної фракції; покращення умов експлуатації та інтеграцію в технологічні лінії.

Незважаючи на широке застосування молоткових дробарок у технологіях приготування комбікормів, існуючі конструкції не завжди забезпечують оптимальне поєднання продуктивності, енергоефективності та стабільної якості подрібнення. Це зумовлено як особливостями ударного механізму руйнування зерна, так і складністю керування рухом матеріалу та повітря в робочій камері. Аналіз літературних джерел і результатів сучасних досліджень свідчить, що основні проблеми пов'язані з переподрібненням, нестабільністю повітряного режиму, підвищеним зношуванням робочих органів і значними енерговитратами.

Висновки до розділу 1

Подрібнення зерна є однією з найбільш енергоємних операцій у виробництві комбікормів, що зумовлює необхідність пошуку конструктивних і технологічних рішень для зниження енерговитрат. У класичних дробарках значна частина енергії витрачається на повторні удари по частинках, які вже досягли необхідного розміру.

У решітних системах вихід частинок із камери обмежується проходженням через отвори решета, внаслідок чого матеріал може тривалий час циркулювати в зоні подрібнення. Це призводить до збільшення частки пилоподібної фракції, зниження однорідності продукту та погіршення його зоотехнічної цінності.

Ефективність роботи дробарки істотно змінюється при коливаннях вологості зерна, його засміченості та фізико-механічних характеристик. У таких умовах збільшується ризик забивання решіт, нерівномірного завантаження та зниження продуктивності.

Тривале перебування матеріалу в камері, інтенсивна циркуляція частинок та наявність домішок призводять до прискореного зношування молотків, деки, решета і корпусних елементів. Це спричиняє збільшення витрат на технічне обслуговування та простої обладнання.

повітряного режиму, що негативно впливає на ефективність роботи системи сепарації та показники дробарки в цілому.

Класичні решітні схеми не забезпечують достатнього відділення кондиційної фракції на ранніх етапах процесу, що сприяє переподрібненню. Тому актуальним є впровадження додаткових сепараційних елементів, здатних відокремлювати продукт за аеродинамічними характеристиками та забезпечувати кероване відведення матеріалу.

Аналіз існуючих конструкцій і сучасних досліджень дозволяє виділити такі ключові напрями удосконалення молоткових дробарок:

- оптимізація конструктивних параметрів ротора та робочих органів.

Доцільним є обґрунтування раціональних параметрів ротора, молотків, деки та решета, які забезпечують ефективне руйнування зерна при мінімізації переподрібнення та зношування. При цьому особлива увага приділяється параметричному підходу, за якого досліджуються конкретні геометричні та кінематичні фактори, що впливають на показники процесу.

- удосконалення решітної системи та керування циркуляцією продукту.

Решето доцільно розглядати не лише як калібрувальний елемент, а як складову системи керування тривалістю перебування частинок у зоні подрібнення. Це дозволяє зменшувати переподрібнення та стабілізувати фракційний склад.

- розвиток систем пневматичної подачі та сепарації. Одним із найбільш перспективних напрямів є застосування пневматичних систем, які забезпечують інтенсифікацію відведення продукту, зменшення пиловиділення та підвищення продуктивності. У роботі доведено актуальність оптимізації повітряного режиму дробарки з вентилятором та жалюзійним сепаратором, де ключовими параметрами виступають геометрія і режим роботи вентилятора;

- впровадження комбінованих сепараційних систем. Поєднання решітної та пневматичної сепарації дозволяє підвищити якість продукту та знизити енерговитрати. Жалюзійні сепаратори та інші повітряні елементи дають змогу відокремлювати фракції за аеродинамічними властивостями, зменшуючи переподрібнення кондиційного продукту.

- оптимізація конструкції вентилятора та повітряного проходу. У сучасних дослідженнях вентилятор розглядається як один із визначальних вузлів дробарки із пневматичною загрузкою, оскільки він формує повітряний потік, який впливає на транспортування матеріалу, ефективність сепарації та запиленість. У кваліфікаційній роботі експериментально досліджено вплив кута установки лопаток, геометрії вхідного отвору, зазорів, кількості додаткових лопаток та інших параметрів на повітряний режим і показники роботи дробарки

Отже, основні недоліки існуючих конструкцій молоткових дробарок пов'язані з переподрібненням продукту, підвищеною енергоємністю, зношуванням робочих органів та недостатньо керованим повітряним режимом. Найбільш перспективним напрямом підвищення ефективності є комплексне удосконалення процесу подрібнення шляхом оптимізації конструктивних параметрів ротора і вентилятора та впровадження систем сепарації, які забезпечують стабільне відведення готової фракції та зниження питомих енергетичних витрат. Саме ці положення визначають актуальність досліджень, спрямованих на удосконалення молоткових дробарок із системою сепарації та обґрунтування їх раціональних конструктивних параметрів.

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ТА СЕПАРАЦІЇ

2.1. Теоретичні основи ударного подрібнення в молотковій дробарці

Процес подрібнення зерна в молоткових дробарках належить до процесів механічного руйнування матеріалу внаслідок дії ударних навантажень. Основним робочим органом дробарки є ротор із підвісними молотками, які при обертанні здійснюють багаторазові удари по частинках зерна. Руйнування відбувається в робочій камері за рахунок комплексу механізмів: удару молотка по зернині, удару зернини об деку або елементи корпусу, а також взаємних зіткнень частинок між собою. У результаті формується фракційний склад продукту, який залежить від конструктивних і режимних параметрів дробарки.

Зерно як біологічний матеріал має складну структуру, що включає оболонку, ендосперм і зародок. При ударному навантаженні в зернині виникають напруження, які перевищують межу міцності матеріалу, внаслідок чого утворюються тріщини та відбувається руйнування. На інтенсивність руйнування впливають: фізико-механічні властивості зерна (міцність, пружність, вологість); форма і маса молотків; швидкість удару; характер контакту (удар по плоскій або кромковій поверхні).

Основною енергетичною характеристикою удару є кінетична енергія молотка, яка визначається його масою та швидкістю руху. Чим більша швидкість молотка, тим більша енергія передається частинці зерна, а отже — тим вища інтенсивність руйнування.

Швидкість руху молотків у зоні контакту визначається окружною швидкістю ротора. Вона є однією з ключових величин, що визначає ефективність подрібнення. Окружна швидкість молотка визначається залежністю:

$$v = \pi D n$$

Де v – окружна швидкість молотків, м/с;

D — діаметр ротора, м;

n — частота обертання ротора, s^{-1} (або об/с).

Зі збільшенням окружної швидкості зростає інтенсивність руйнування зерна та зменшується середній розмір частинок, однак одночасно підвищуються енерговитрати, рівень шуму, запиленість та зношування молотків і деки. Таким чином, вибір швидкості обертання ротора має здійснюватися з урахуванням вимог до фракційного складу та енергоефективності.

Енергія, яка передається зернині при ударі, залежить від кінетичної енергії молотка:

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

де E – енергія удару, Дж;

m – маса молотка (або його ефективної частини), кг;

v — швидкість удару, м/с.

У реальному процесі лише частина енергії молотка витрачається безпосередньо на руйнування зерна, тоді як значна частина переходить у тепло, шум, деформацію елементів конструкції та переміщення частинок у камері. Тому підвищення ефективності дробарки пов'язане з раціональним використанням енергії удару та зменшенням втрат, зокрема через зниження переподрібнення.

У молоткових дробарках решето виконує функцію калібрування продукту. Частинки залишають робочу камеру лише після проходження отворів решета, що призводить до циркуляції матеріалу в камері подрібнення. З одного боку, це забезпечує необхідний ступінь подрібнення, а з іншого — може спричиняти переподрібнення кондиційної фракції, збільшення частки пилоподібних частинок і підвищення енерговитрат.

Саме тому сучасні підходи до удосконалення дробарок передбачають введення систем сепарації та оптимізацію повітряного режиму, які забезпечують швидке відведення готової фракції і скорочують час перебування частинок у зоні подрібнення. У кваліфікаційній роботі цей підхід реалізовано через дослідження

повітряного режиму дробарки з жалюзійним сепаратором, де оцінюється вплив конструктивних параметрів вентилятора і повітряного проходу на показники роботи дробарки

Таким чином, теоретичні основи ударного подрібнення в молотковій дробарці визначаються кінематикою руху молотків, енергетикою ударної взаємодії та закономірностями циркуляції частинок у робочій камері. Рациональний вибір режимних і конструктивних параметрів (швидкість ротора, форма і маса молотків, геометрія камери, параметри решета) дозволяє забезпечити необхідний гранулометричний склад при мінімальних енерговитратах. Перспективним напрямом підвищення ефективності є поєднання ударного подрібнення із системою сепарації та керуванням повітряним режимом, що забезпечує стабільне відведення готового продукту та зниження переподрібнення

2.2. Вплив режимних параметрів на ефективність

Ефективність процесу ударного подрібнення в молотковій дробарці визначається сукупністю конструктивних і режимних параметрів. До основних режимних факторів належать частота обертання ротора, інтенсивність подачі матеріалу та вологість зерна, оскільки саме вони безпосередньо впливають на кінетику руйнування частинок, циркуляцію продукту в робочій камері, гранулометричний склад готового продукту, енергоємність процесу та стабільність роботи обладнання. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що удосконалення робочого процесу дробарок здійснюється шляхом підвищення інтенсивності впливу робочих органів на матеріал і своєчасного відведення готового продукту з дробильної камери, що нерозривно пов'язано з режимами роботи машини.

Частота обертання ротора визначає окружну швидкість молотків, а отже — енергію ударної взаємодії з частинками зерна. Зі збільшенням частоти обертання:

- підвищується інтенсивність руйнування зерна;
- зменшується середній розмір частинок готового продукту;
- зростає частка дрібної та пилоподібної фракції.

Разом з тим надмірне підвищення частоти обертання призводить до:

- збільшення питомих енерговитрат;
- зростання запиленості та шуму;
- прискореного зношування молотків, деки та решета;
- підвищення ймовірності переподрібнення кондиційної фракції.

Таким чином, частота обертання ротора є одним із ключових параметрів, що потребує раціонального вибору залежно від вимог до фракційного складу продукту та енергоефективності.

Подача матеріалу визначає ступінь завантаження дробильної камери та режим роботи дробарки. При недостатній подачі:

- робоча камера заповнена неповністю;
- зростає частка “холостого” споживання енергії на обертання ротора;
- збільшується переподрібнення через надмірну тривалість перебування частинок у камері.

При надмірній подачі:

- погіршується умова вільного удару молотків;
- зменшується інтенсивність подрібнення;
- збільшується нерівномірність гранулометричного складу;
- можливе забивання решета, зниження продуктивності та нестабільність процесу.

Відомо, що при роботі дробарки за схемою відкритого циклу циркуляція матеріалу в дробильній камері збільшує енерговитрати, а ефективність процесу значною мірою залежить від організації своєчасного відведення готового продукту. Тому подача матеріалу має узгоджуватися з пропускною здатністю решета та можливостями системи сепарації.

Вологість зерна є одним із найважливіших факторів, що впливає на його фізико-механічні властивості та характер руйнування при ударі. Зі збільшенням вологості:

- підвищується пластичність зерна;
- зменшується крихкість оболонки та ендосперму;
- погіршується руйнування за механізмом крихкого розколювання.

У результаті при підвищеній вологості:

- зростає енергоємність подрібнення;
- зменшується продуктивність;
- збільшується ймовірність забивання решіт;
- погіршується стабільність гранулометричного складу.

Для сухого зерна, навпаки, характерна більш крихка структура, що сприяє руйнуванню при ударі, але при цьому зростає утворення дрібної фракції та пилу.

Отже, вологість є фактором, який суттєво змінює оптимальні режими роботи дробарки та повинен враховуватися при виборі конструктивних параметрів і системи сепарації.

У дробарках із пневматичним завантаженням і системою сепарації важливе значення має узгодження режимів роботи ротора, подачі матеріалу та параметрів повітряного потоку. У кваліфікаційній роботі експериментально досліджено роботу дробарки зерна з жалюзійним сепаратором, а також вплив параметрів вентилятора на повітряний режим і показники ефективності роботи дробарки. Зокрема, оцінено вплив кута установки лопаток, параметрів вхідного отвору та додаткових лопаток вентилятора на формування повітряного потоку і робочі показники

Таким чином, для забезпечення стабільної якості помелу та зниження енерговитрат необхідно розглядати режимні параметри не ізольовано, а у взаємозв'язку з системою сепарації, яка визначає швидкість виведення кондиційного продукту із дробильної камери.

Отже, частота обертання ротора, подача матеріалу та вологість зерна є ключовими режимними параметрами, що визначають ефективність роботи молоткової дробарки. Їх раціональний вибір забезпечує необхідний гранулометричний склад, високу продуктивність і мінімальні питомі енерговитрати. Перспективним напрямом підвищення ефективності є узгодження режимних параметрів із конструктивними параметрами вентилятора та сепараційного вузла, що дозволяє стабілізувати повітряний режим і забезпечити своєчасне відведення готового продукту

2.3. Вплив конструктивних параметрів

Ефективність роботи молоткової дробарки визначається не лише режимними параметрами (частота обертання, подача, властивості матеріалу), а й конструктивними особливостями робочих органів і системи транспортування та сепарації продукту. Конструктивні параметри формують умови ударної взаємодії, інтенсивність руйнування, характер циркуляції частинок у робочій камері та швидкість відведення готового продукту. Саме тому сучасні дослідження орієнтовані на параметричну оптимізацію окремих вузлів дробарки та узгодження їхньої роботи в єдиній технологічній системі.

У кваліфікаційній роботі такий підхід реалізовано шляхом експериментального дослідження впливу конструктивних параметрів вентилятора і повітряного тракту на повітряний режим та технологічні показники дробарки з жалюзійним сепаратором. Це дозволяє розглядати конструкцію дробарки як комплекс, де робочі органи, система подачі та сепарації мають бути взаємно узгоджені.

Переваги: підвищення повного тиску вентилятора при тих самих геометричних розмірах; стабілізація повітряного потоку та зменшення пульсацій; можливість підвищення ефективності сепарації (краще відведення кондиційної фракції); потенційне зменшення енерговитрат при правильно підібраній геометрії; краща робота в системах із підвищеним аеродинамічним опором.

Недоліки: ускладнення конструкції колеса та зростання вимог до точності виготовлення; підвищення металоємності й вартості; складніше балансування ротора вентилятора; можливе збільшення забруднення (осідання пилу) у зоні додаткових лопаток; при неузгоджених параметрах додаткова лопатка може підвищувати втрати і знижувати ККД.

Ротор із підвісними молотками є основним елементом, що визначає інтенсивність ударного подрібнення. До конструктивних параметрів ротора, які найбільше впливають на показники процесу, належать: діаметр ротора; ширина робочої зони; кількість рядів підвісів і молотків; маса молотків та їх конфігурація; характер підвіски (жорстка/шарнірна); рівномірність розподілу молотків по довжині ротора.

Зі збільшенням діаметра ротора при незмінній частоті обертання підвищується окружна швидкість молотків, що збільшує енергію удару та сприяє інтенсифікації руйнування зерна. Разом з тим надмірне збільшення діаметра може призводити до підвищення енерговитрат, зростання динамічних навантажень і потреби у більш потужному приводі.

Форма молотків впливає на характер контакту з частинкою зерна, інтенсивність руйнування та співвідношення фракцій у готовому продукті. Удосконалення молотків зазвичай спрямоване на підвищення ефективності руйнування при зменшенні утворення пилоподібної фракції та підвищенні ресурсу робочих органів.

Дека та внутрішня геометрія камери визначають умови вторинного руйнування частинок після удару молотком. У молоткових дробарках зерно руйнується не лише в момент первинного удару, а й при взаємодії з

відбивальними поверхнями, де виникає додатковий ефект розколювання та стирання.

До основних конструктивних факторів, пов'язаних із декою, належать: форма та профіль відбивальної поверхні; розташування деки відносно траєкторії руху молотків; величина зазору між молотками та декою; матеріал і зносостійкість елементів.

Раціональний вибір геометрії камери та параметрів деки дозволяє зменшити “мертві зони”, скоротити циркуляцію матеріалу, стабілізувати процес та знизити переподрібнення.

Решето є конструктивним елементом, який визначає кінцевий розмір частинок і забезпечує вихід продукту з робочої камери. Основними параметрами решета є: розмір і форма отворів; площа просіювання (живий переріз); товщина решета; характер розташування в камері (кут, охоплення ротора); величина радіального зазору між молотками і решетом.

Зменшення розміру отворів забезпечує тонший помел, однак призводить до зростання циркуляції матеріалу в камері, збільшення енерговитрат і ймовірності забивання решета. Збільшення площі просіювання сприяє підвищенню продуктивності та скороченню часу перебування частинок у зоні подрібнення.

У наукових джерелах також описуються конструктивні рішення, спрямовані на зменшення нерівномірності фракційного складу, зокрема застосування решіт зі змінним радіальним зазором уздовж траєкторії руху ротора, що дозволяє підвищити пропускну здатність, однак ускладнює виготовлення і збільшує металоємність конструкції.

Схема (рис. 1.1)	Конструктивна ідея	Очікуваний ефект	Недолік / обмеження
		фракції; зменшення переподрібнення	
б – а.с. №1604466	Варіант організації сепарувальних поверхонь у дробильній камері для прискороного відведення продукту	Зменшення циркуляції продукту; підвищення пропускної здатності	Недостатньо даних у тексті дисертації для конкретизації конструктивних деталей
в – а.с. №152608	Розміщення решіт не лише по периферії, але й у торцевих поверхнях корпусу	Прискорення евакуації готового продукту; зменшення переподрібнення	Зниження ефективності ударної дії (матеріал ковзає по решету); крупні частинки концентруються біля решета та зменшують його пропускну здатність; ризик потрапляння цілих зерен при збільшенні отворів
г – барабан- вентилятор + вихрова камера	Інтеграція вентилятора (барабанного типу) та вихрової камери для формування потоку і відведення продукту	Прискорений відвід подрібненого продукту; часткове поєднання транспортування і сепарації	Підвищення енергоспоживання при неузгодженості параметрів; залежність ефективності від повітряного режиму
д – а.с. №282042	Схема удосконалення сепарації/відведення продукту через зміну розташування сепарувальних поверхонь	Скорочення часу перебування частинок у зоні подрібнення	Відсутній деталізований опис у тексті дисертації (лише посилання на схему)
е – а.с. №520128	Конструктивний варіант прискороного відведення продукту з дробильної камери	Підвищення продуктивності; зменшення переподрібнення	Недостатньо інформації для точного опису; можливе ускладнення конструкції

Схема (рис. 1.1)	Конструктивна ідея	Очікуваний ефект	Недолік / обмеження
ж – а.с. №1076140	Конструктивний варіант удосконалення робочого процесу (керування циркуляцією та відводом продукту)	Підвищення стабільності фракційного складу; інтенсифікація відведення	У дисертації схема наведена без деталізованого аналізу конструкції
з – а.с. №1329820	Схема вдосконалення сепарувального вузла або руху продукту в камері	Підвищення ефективності відведення готової фракції	Відсутній текстовий опис у даному фрагменті; наведено лише як типова схема
и – а.с. №1412808	Конструктивне рішення для удосконалення процесу подрібнення та організації руху продукту	Зменшення переподрібнення; підвищення ефективності процесу	У дисертації подано лише бібліографічне посилання на а.с., без конструктивного розбору

Аналіз схем, наведених у табл. 2.1, показує, що більшість конструктивних рішень спрямовані на скорочення циркуляції матеріалу в дробильній камері та прискорення відведення кондиційної фракції шляхом зміни організації решітної поверхні або використання повітряного потоку. Найбільш перспективними є підходи, що поєднують керування рухом продукту та комбіновану сепарацію, оскільки саме вони забезпечують зниження переподрібнення і підвищення стабільності якості подрібнення.

Для дробарок, що працюють у складі технологічних ліній, важливим напрямом є удосконалення системи пневматичного завантаження, транспортування та сепарації продукту. У таких конструкціях повітряний потік впливає на: рівномірність подачі зерна; характер циркуляції частинок у камері; швидкість відведення готової фракції; запиленість і санітарні умови експлуатації.

У кваліфікаційній роботі ключовим є дослідження дробарки зерна з жалюзійним сепаратором, де оцінено вплив параметрів вентилятора на повітряний режим та показники роботи. Зокрема, розглядається вплив кута

установки лопаток, параметрів вхідного отвору, зазорів, кількості та геометрії додаткових лопаток. Це свідчить про те, що система повітряного транспортування і сепарації є не допоміжним, а функціонально визначальним елементом сучасної дробарки, який потребує оптимізації нарівні з ротором і решетом.

У процесі роботи вентилятора лопатки, встановлені на диску колеса радіально, контактують із повітряно-продуктовим потоком, унаслідок чого зношуються. Тому їхню товщину K з умов надійності та конструктивних міркувань прийнято рівною 6 мм, а кількість лопаток $m = 6$.

Аналіз роботи радіальних вентиляторів показує [21], що при малій кількості лопаток ($m=4\dots6$) тиск, продуктивність і коефіцієнт корисної дії є невисокими внаслідок зростання градієнта тиску по профілю лопатки та циркуляції потоку в міжлопаткових каналах. При цьому створюваний тиск є пропорційним числу лопаток (рис. 2.2).

Збільшення кількості лопаток колеса «пилового» вентилятора пов'язане з підвищенням опору та загромождженням міжлопаткових каналів. Тому встановлення залежності характеристик вентилятора, що працює в умовах високої концентрації продукту в потоці, від кількості лопаток та їхньої довжини є важливим і необхідним [34].

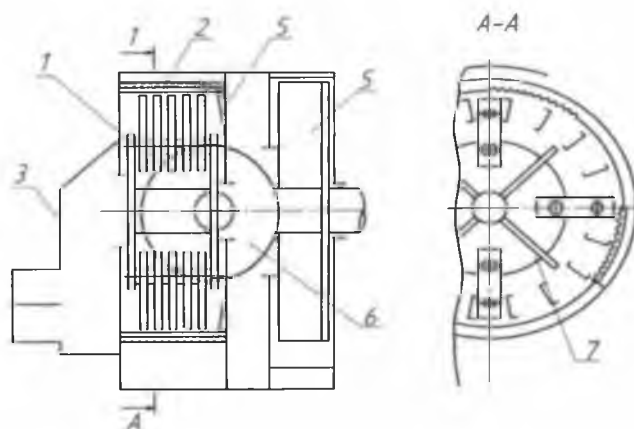


Рис. 2.7. Схема зернодробарки: 1 – молотковий ротор; 2 – дека; 3 – сепаратор; 4 – колесо вентилятора; 5 – жалюзійне решето; 6 – вхідний отвір корпуса вентилятора; 7 – лопатка ротора.

Для вивчення процесу руху повітряно-продуктового потоку вздовж прямої радіальної лопатки абсолютну швидкість руху C_c з певними припущеннями розкладають на дві складові [41, 107]: переносну C_{u2} , спрямовану по дотичній до кола в розглянутій точці, та відносну C_{r2} , спрямовану вздовж лопатки (рис. 2.3).

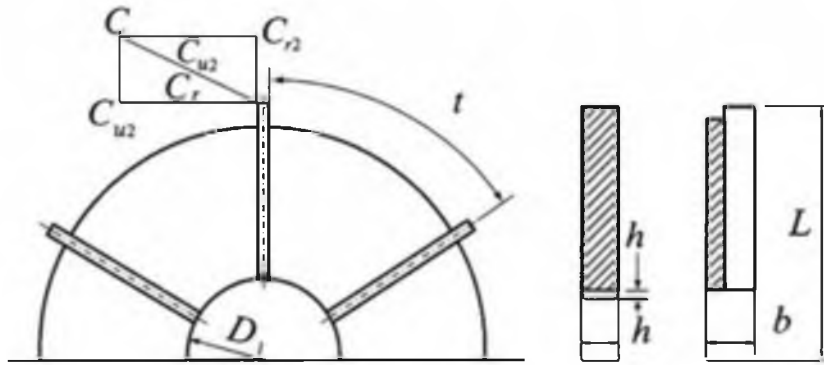


Рисунок 2.3 – Схема лопатевого колеса вентилятора.

Конструктивні параметри молоткової дробарки діють не ізольовано, а у взаємозв'язку. Наприклад, зміна параметрів решета впливає на циркуляцію матеріалу та вимоги до повітряного режиму; зміна форми молотків змінює інтенсивність руйнування і швидкість утворення дрібної фракції; параметри вентилятора впливають на відведення продукту та стабільність роботи сепаратора.

Тому найбільш перспективним напрямом є комплексна оптимізація, за якої параметри ротора, молотків, решета, вентилятора та сепараційного вузла підбираються узгоджено для забезпечення заданої якості подрібнення при мінімальних енерговитратах.

Отже, конструктивні параметри молоткової дробарки істотно визначають ефективність процесу подрібнення, оскільки вони впливають на енергію ударної взаємодії, циркуляцію частинок, умови проходження через решето та швидкість відведення готового продукту. Сучасні дослідження підтверджують доцільність параметричної оптимізації не лише ротора, молотків і решета, але й елементів

повітряного тракту, вентилятора та сепаратора, оскільки саме повітряний режим є одним із ключових факторів стабільної роботи дробарки із системою сепарації

2.4. Теоретичні основи сепарації продукту подрібнення

Сепарація продукту подрібнення в молоткових дробарках є необхідною складовою технологічного процесу, оскільки саме вона визначає момент виходу частинок із робочої камери, стабільність гранулометричного складу, рівень переподрібнення та енергоефективність роботи машини. У сучасних конструкціях сепараційний процес розглядається не як допоміжна операція, а як функціональний елемент керування робочим процесом дробарки, який забезпечує своєчасне відведення кондиційної фракції та повернення недоподрібненого продукту в зону інтенсивного руйнування.

Залежно від принципу розділення частинок у дробарках застосовуються решітні, повітряні (пневматичні) та комбіновані системи сепарації. У кваліфікаційній роботі експериментальна частина побудована на дослідженні повітряного режиму дробарки зерна з жалюзійним сепаратором, що підкреслює актуальність повітряної сепарації як одного з ключових напрямів удосконалення

Решітна сепарація (калібрування) є найбільш поширеним способом відбору продукту в молоткових дробарках. Її сутність полягає в тому, що частинки можуть покинути дробильну камеру лише після проходження отворів решета. Таким чином, решето визначає граничний розмір частинок готового продукту та забезпечує стабільність помелу.

Процес проходження частинок через решето залежить від таких факторів: розміру та форми отворів решета; площі просіювання (живого перерізу); товщини решета; радіального зазору між молотками та решетом; швидкості руху частинок у приповерхневому шарі; інтенсивності циркуляції матеріалу в робочій камері.

Решітна сепарація є ефективною при роботі з сухим зерном, однак у багатьох випадках супроводжується підвищеним переподрібненням через

тривале перебування кондиційних частинок у камері. Крім того, при підвищеній вологості або наявності домішок може виникати забивання отворів, що знижує продуктивність і стабільність процесу.

Таким чином, решітна сепарація забезпечує надійне калібрування продукту, але не завжди гарантує мінімальні енерговитрати та низький рівень утворення пилоподібної фракції.

Повітряна сепарація базується на розділенні частинок у повітряному потоці залежно від їх маси, розміру, форми, густини та аеродинамічного опору. У загальному вигляді повітряна сепарація реалізується через створення повітряного потоку, який транспортує частинки і водночас забезпечує їх часткове розділення за аеродинамічними характеристиками.

Фізично процес повітряної сепарації визначається співвідношенням сил, що діють на частинку в потоці: сила тяжіння; сила опору повітря; інерційні сили; (за потреби) підйомна сила.

Для дрібних і легких частинок сила опору повітря є відносно більшою, тому вони швидше захоплюються потоком і виносяться із зони подрібнення. Для великих і важких частинок домінує сила тяжіння та інерція, що зумовлює їх повернення в зону подрібнення або затримку у камері.

Отже, повітряна сепарація дозволяє скорочувати час перебування кондиційної фракції в дробильній камері; зменшувати переподрібнення; підвищувати продуктивність; знижувати запиленість (за наявності системи пиловловлення).

Одним із перспективних конструктивних рішень для повітряної сепарації є застосування жалюзійного сепаратора, у якому розділення відбувається при проходженні повітряно-продуктової суміші через систему напрямних елементів (жалюзі). Така конструкція створює умови для розділення частинок за їх інерційними та аеродинамічними властивостями.

У кваліфікаційній роботі жалюзійний сепаратор є ключовим елементом технологічної схеми дробарки, а дослідження повітряного режиму здійснюється саме для забезпечення його ефективної роботи. Це свідчить про те, що

сепараційний вузол має розглядатися як функціонально рівнозначний робочим органам подрібнення, оскільки він визначає умови відведення продукту та стабільність гранулометричного складу.

Ефективність повітряної сепарації суттєво залежить від параметрів повітряного потоку, який формується вентилятором та повітряним трактом.

Використання як поверхні сепарації жалюзійного решета в дробильній камері впливає на формування повітряного потоку молотковим ротором. Тому було досліджено вплив ряду факторів, що стосуються конструкції жалюзійних решіт, які можуть бути встановлені як з обох боків, так і з одного боку молоткового ротора. До таких факторів належать площа живого перерізу решіт, довжина створок, їх кількість та зазор між створками. Раніше виконані дослідження свідчать про той чи інший ступінь впливу зазначених факторів на аеродинамічні характеристики дробарки. Наявність у досліджуваній дробарці вентилятора суттєво впливає на аеродинаміку дробильної камери.

На першому етапі оцінювали вплив довжини створок решета b , яка змінювалася від 45 до 90 мм, кількості створок N (36 і 60 шт.) та площі живого перерізу $S_{\text{ж}}$, що дорівнювала 10800 і 12900 мм² (рис. 4.24). Зазор між створками прийняли рівним 4 мм. Випробування проводили при роботі дробарки за прямооточною та противоточною схемою (рис. 4.25).



Рис. 4.24. Жалюзійні решета з площею живого перерізу:

а – $S_{\text{ж}}=12900$ мм²; б - $S_{\text{ж}}=10800$ мм²; в – $S_{\text{ж}}=10800$ мм² (зазор між створками 4 мм).

Ці параметри визначають витрату повітря, швидкість потоку та його розподіл у робочій зоні. Відповідно, вони впливають на швидкість відведення готового продукту; ступінь винесення дрібної фракції; умови повернення недоподрібнених частинок; загальну стабільність роботи дробарки.

Таким чином, керування повітряним режимом є одним із основних інструментів підвищення ефективності сепарації в дробарках із пневматичним завантаженням і жалюзійним сепаратором.

Комбінована сепарація передбачає поєднання решітного калібрування з повітряним відведенням продукту. У таких системах решето забезпечує контроль граничного розміру частинок, а повітряний потік прискорює виведення кондиційної фракції та зменшує циркуляцію матеріалу в робочій камері.

Перевагами комбінованої сепарації є: підвищення продуктивності дробарки; зниження питомих енерговитрат; зменшення утворення пилоподібної фракції; стабілізація фракційного складу продукту; покращення умов експлуатації (зниження запиленості робочої зони).

Саме тому сучасні дослідження і практичні розробки спрямовані на створення конструкцій, у яких параметри ротора, решета, вентилятора і сепараційного вузла узгоджуються між собою для забезпечення оптимального режиму роботи.

Отже, сепарація продукту подрібнення є визначальним елементом технологічного процесу в молоткових дробарках, оскільки вона впливає на циркуляцію матеріалу в робочій камері, якість гранулометричного складу та енергоефективність. Решітна сепарація забезпечує надійне калібрування, однак може супроводжуватися переподрібненням і підвищеними енерговитратами. Повітряна сепарація дозволяє інтенсифікувати відведення продукту та зменшити переподрібнення, але потребує оптимізації повітряного режиму. Найбільш перспективним підходом є комбінована сепарація, у якій решето та повітряний потік працюють як єдина система, а ефективність її функціонування визначається раціональними конструктивними параметрами вентилятора і сепаратора.

2.5. Обґрунтування критеріїв оцінки ефективності

Для об'єктивної оцінки ефективності роботи молоткової дробарки необхідно застосовувати систему критеріїв, які відображають як технологічний результат подрібнення, так і витрати ресурсів, пов'язані з реалізацією процесу. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що подрібнення зерна є однією з найбільш енергоємних операцій у технології приготування комбикормів, тому ключовим завданням є забезпечення заданої якості продукту при мінімальних енерговитратах

З огляду на це, критерії ефективності доцільно формувати з урахуванням зоотехнічних і технологічних вимог до якості подрібнення, а також конструктивних особливостей дробарки із системою сепарації.

Першочерговим критерієм ефективності є відповідність готового продукту заданим вимогам до гранулометричного складу. Оскільки у виробництві комбикормів важливо забезпечити стабільний розмір частинок і мінімізувати вміст пилу, основними показниками якості подрібнення є:

Гранулометричний склад продукту (фракційний склад). Оцінюється методом ситового аналізу та характеризує частку основної (кондиційної) фракції, а також вміст грубої і пилоподібної фракцій. Підвищення частки кондиційної фракції свідчить про раціональну організацію процесу та ефективність сепарації.

Ступінь подрібнення та однорідність продукту. Однорідність характеризує стабільність процесу та якість технологічного налаштування дробарки. Нерівномірність фракційного складу, як правило, пов'язана з переподрібненням або недостатнім подрібненням частини матеріалу.

Вміст пилоподібної фракції. Пилоподібні частинки є небажаними з точки зору зоотехнічних вимог і техніки безпеки, оскільки вони погіршують поїдання корму, сприяють втратам при транспортуванні та підвищують запиленість і вибухонебезпеку. Зниження вмісту пилу є важливим критерієм удосконалення процесу подрібнення.

Другим ключовим критерієм є продуктивність дробарки, яка визначає можливість використання машини в складі технологічної лінії.

Основними показниками є: годинна продуктивність (масова подача подрібненого продукту); стабільність продуктивності при зміні властивостей зерна (вологість, засміченість); відсутність технологічних відмов (забивання решета, нестабільність відведення продукту).

Для дробарок із системою сепарації продуктивність істотно залежить від ефективності відведення готового продукту та повітряного режиму, який формується вентилятором і повітряним проходом.

Оскільки подрібнення є енергоємною операцією, одним із найважливіших критеріїв є енергетична ефективність. У практиці оцінювання дробарок застосовують: питому енергоємність процесу подрібнення (витрати електроенергії на одиницю маси подрібненого продукту). Зменшення питомої енергоємності при збереженні якості помелу є основною ознакою ефективного удосконалення. Енергетичний коефіцієнт ефективності (співвідношення між технологічним результатом і витратами енергії).

Рівняння Бернуллі для відносного руху повітря в міжлопатковому просторі робочого колеса вентилятора базується на принципі Даламбера, де враховуються сили інерції (відцентрова сила). Це рівняння є фундаментальним для аеродинамічного розрахунку турбомашин.

$$P_1 + \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} - \frac{\rho \cdot u_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} - \frac{\rho \cdot u_2^2}{2} + \Delta P_{loss} \quad (2.1)$$

P – статичний тиск повітря в даній точці, Па;

w – відносна швидкість повітря (швидкість руху повітря відносно лопаток колеса), м/с.

u – переносна (окружна) швидкість колеса, м/с

($u = \omega r$, де ω – кутова швидкість, r – радіус).

ρ – густина повітря, кг/м³.

ΔP_{loss} — втрати тиску на подолання гідравлічного опору в міжлопатковому каналі.

Перше доданок у рівнянні (2.1) відображає зміну питомого тиску за рахунок дії відцентрових сил. Друге доданок характеризує зміну динамічного тиску на вході та виході з колеса. Третє доданок зумовлене дифузорним ефектом, що виникає внаслідок розширення міжлопаткових каналів.

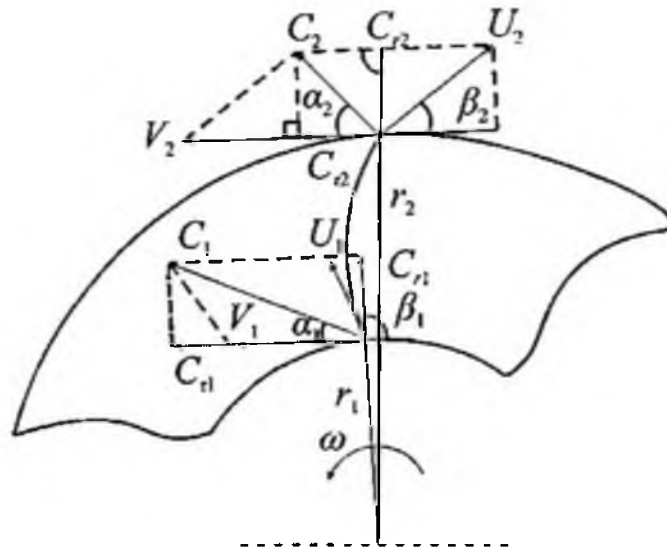


Рисунок 2.6. Швидкості потоку під час руху по лопатці вентилятора: β_1, β_2 – кути між дотичною до кола колеса та напрямком відносної швидкості; α_1, α_2 – кути між переносними та абсолютними швидкостями; U_1, U_2 – переносні швидкості на вході та виході каналу.

Витрату повітря, що проходить через вентилятор, визначимо за рівнянням:

$$Q_2 = 2\pi r_2 b_2 C_{r2}, \quad (2.1)$$

Де Q_2 – витрата повітря на виході з колеса вентилятора;

r_2 – радіус вихідного перерізу колеса;

b_2 – ширина лопаток у вихідному перерізі колеса;

C_{r2} – радіальна складова абсолютної швидкості на виході з колеса.

У вентиляторних установках, як правило, нехтують стисливістю повітряного потоку, тому справедливим є рівність:

$$Q_1 = Q_2.$$

Тоді витрату можна виразити через вхідні характеристики потоку:

$$Q_1 = 2\pi r_1 b_1 C_{r1}, \quad (2.2)$$

Де Q_2 – витрата повітря на вході з колеса вентилятора;

r_2 – радіус вхідного перерізу колеса;

b_2 – ширина лопаток на вході в колесо;

C_{r2} – радіальна складова абсолютної швидкості на вході з колеса.

У роботі зазначається, що удосконалення конструктивно-технологічних параметрів дробарки спрямоване, зокрема, на зниження енерговитрат при забезпеченні необхідних показників роботи. Для дробарок із пневматичною подачею та сепараційним вузлом важливим є введення критеріїв, які відображають якість роботи системи сепарації. До них доцільно віднести: ефективність відведення кондиційної фракції (швидкість і повнота виносу готового продукту); ступінь повернення недоподрібнених частинок у зону подрібнення; стабільність повітряного режиму; зниження запиленості в зоні дробарки (за умови аспірації та пиловловлення).

У кваліфікаційній роботі підкреслюється значущість впливу конструктивних параметрів вентилятора (кут установки лопаток, параметри вхідного отвору, зазори, кількість додаткових лопаток) на повітряний режим і технологічні показники роботи дробарки з жалюзійним сепаратором.

Попередні експериментальні дослідження щодо визначення кута встановлення лопаток вентилятора установки показали, що найкращі показники забезпечує крильчатка з радіальними лопатками.

Однак застосування в якості лопаток сталевих кутників 40×40 мм робить крильчатку більш металоємною, а також призводить до загромождження простору на вході потоку в міжлопаткові канали.

Було випробувано крильчатки зміненої конструкції з лопатками, виготовленими з пластин товщиною 6 мм і шириною 40 мм. Вибір металу товщиною 6 мм зумовлений необхідністю підвищення ресурсу лопаток. У свою чергу, товщина лопаток істотно впливає на коефіцієнт прозорості решітки колеса.

Для комплексної оцінки доцільно враховувати також експлуатаційні показники, які впливають на практичну доцільність впровадження удосконалень: зношування молотків, деки, решета (ресурс робочих органів); надійність та безвідмовність роботи дробарки; рівень вібрацій і шуму; зручність технічного обслуговування (швидкість заміни решета та молотків).

Хоча ці показники можуть не бути основними критеріями оптимізації, вони є важливими для оцінки загального ефекту від удосконалення конструкції.

Таким чином, ефективність роботи молоткової дробарки із системою сепарації доцільно оцінювати за сукупністю критеріїв, що включають: показники якості подрібнення (гранулометричний склад, вміст пилу, однорідність), продуктивність, питому енергоємність, а також показники ефективності сепарації та стабільності повітряного режиму. Комплексний підхід до оцінювання дозволяє обґрунтовано визначати раціональні конструктивні параметри робочих органів, вентилятора та сепараційного вузла, що є основою для подальшої оптимізації процесу подрібнення

Висновки до розділу 2

Процес подрібнення зерна в молоткових дробарках є складним багатофакторним процесом ударної дії, у якому руйнування матеріалу відбувається внаслідок ударів молотків, взаємодії частинок з декою та корпусними елементами, а також взаємних зіткнень частинок у робочій камері.

Встановлено, що ефективність ударного подрібнення істотно залежить від режимних параметрів роботи дробарки, насамперед частоти обертання ротора, інтенсивності подачі матеріалу та вологості зерна, які визначають інтенсивність руйнування, гранулометричний склад продукту, енергоємність процесу та стабільність роботи обладнання.

Обґрунтовано, що конструктивні параметри робочих органів (ротора, молотків, деки, решета) визначають умови формування ударного навантаження, циркуляцію частинок у камері та момент виходу готової фракції, а тому є

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ ІЗ СИСТЕМОЮ СЕПАРАЦІЇ

3.1. Вибір базової конструкції та її недоліки

Для проведення теоретичних та експериментальних досліджень, а також подальшого удосконалення процесу подрібнення зерна, необхідно обґрунтовано обрати базову конструкцію молоткової дробарки, яка буде використана як прототип. Вибір базової моделі повинен відповідати меті роботи та забезпечувати можливість реалізації конструктивних змін, пов'язаних із впровадженням системи сепарації та оптимізацією параметрів робочих органів.

У кваліфікаційній роботі як базовий варіант розглядається молоткова дробарка зерна з пневматичною подачею, у складі якої використовується вентилятор для формування повітряного потоку та транспортування продукту. Така конструкція є доцільною для сучасних технологічних ліній приготування комбікормів, оскільки дозволяє поєднати процеси завантаження, подрібнення, часткового відведення продукту та аспірації.

Вибір дробарки з пневматичною подачею як базової конструкції обґрунтовується тим, що ефективність процесу подрібнення значною мірою визначається не лише ударною дією молотків, але й умовами відведення готового продукту. Саме тому в роботі акцент зроблено на дослідженні та оптимізації повітряного режиму дробарки, а також на використанні жалюзійного сепаратора, який забезпечує додаткове розділення продукту за аеродинамічними властивостями. Разом з тим базова конструкція молоткової дробарки, навіть за наявності пневматичного транспортування, має низку суттєвих недоліків, що знижують її технологічну та енергетичну ефективність.

Основні недоліки базової конструкції

Переподрібнення кондиційної фракції.

У дробильній камері частинки, що вже досягли необхідного розміру, можуть тривалий час залишатися в зоні подрібнення до моменту їх відведення.

Це призводить до збільшення частки пилоподібної фракції, погіршення однорідності гранулометричного складу та підвищення енерговитрат.

Нестабільність повітряного режиму та залежність від параметрів вентилятора.

При пневматичній подачі та відведенні продукту основні технологічні показники роботи дробарки істотно залежать від витрати повітря, тиску та розподілу потоку в камері. У роботі доведено, що на повітряний режим впливають такі параметри, як кут установки лопаток, геометрія вхідного отвору, зазори та кількість додаткових лопаток вентилятора. За неоптимальних значень цих параметрів можливе погіршення відведення продукту та зниження продуктивності.

Нерівномірність фракційного складу готового продукту.

Внаслідок складної циркуляції матеріалу в робочій камері та неоднорідності умов подрібнення (локальні зони підвищеної або зниженої інтенсивності) готовий продукт може мати нестабільний фракційний склад. Це особливо критично для комбікормового виробництва, де необхідна висока однорідність компонентів.

Підвищена питома енергоємність процесу.

Подрібнення зерна є однією з найбільш енергоємних операцій у виробництві комбікормів. У базовій конструкції значна частина енергії витрачається на циркуляцію матеріалу та повторні удари по частинках, які вже є кондиційними.

Зношування робочих органів та підвищені витрати на обслуговування.

Переподрібнення і циркуляція матеріалу спричиняють інтенсивне зношування молотків, деки, решета та елементів корпусу, що знижує ресурс машини та збільшує витрати на ремонт і простої.

У процесі подрібнення утворюється значна кількість дрібної фракції, що збільшує запиленість повітря. За відсутності ефективної аспірації та пиловловлення це погіршує умови праці, підвищує ризик пожежної та вибухової небезпеки.

Таким чином, вибір базової конструкції молоткової дробарки з пневматичною подачею є обґрунтованим, оскільки вона відповідає сучасним технологічним вимогам комбікормового виробництва та дозволяє реалізувати удосконалення, пов'язані з керуванням повітряним режимом і впровадженням сепараційного вузла. Разом з тим наявні недоліки базової конструкції — переподрібнення, нестабільність повітряного режиму, нерівномірність помелу та підвищена енергоємність — визначають необхідність оптимізації конструктивних параметрів вентилятора, робочих органів та системи сепарації, що і становить основний зміст подальших досліджень.

3.2. Обґрунтування удосконалень

Удосконалення процесу подрібнення зерна в молоткових дробарках повинно забезпечувати підвищення продуктивності, зниження питомих енерговитрат та стабілізацію гранулометричного складу готового продукту. Аналіз теоретичних положень (розділ 2) та недоліків існуючих конструкцій (розділ 1) показав, що основними проблемами класичних молоткових дробарок є переподрібнення кондиційної фракції, нерівномірність фракційного складу, нестабільність повітряного режиму, підвищена запиленість та значні енерговитрати. Особливо актуальним є питання своєчасного відведення готового продукту з дробильної камери, оскільки саме затримка кондиційних частинок у зоні подрібнення призводить до збільшення циркуляційного навантаження і зростання енергоємності процесу.

У кваліфікаційній роботі удосконалення робочого процесу дробарки реалізовано через поєднання ударного подрібнення з пневматичним транспортуванням та сепарацією, що дозволяє керувати відводити продукт із робочої камери. Зокрема, проведено дослідження повітряного режиму дробарки зерна з жалюзійним сепаратором, а також визначено вплив конструктивних параметрів вентилятора на формування повітряного потоку та показники роботи дробарки. Це підтверджує доцільність удосконалення конструкції саме за

рахунок оптимізації параметрів системи повітряного тракту та сепараційного вузла.

Основна ідея удосконалення полягає у формуванні такої конструкції дробарки, за якої: кондиційна фракція виводиться з робочої камери максимально швидко; недоподрібнений продукт повертається в зону інтенсивного руйнування; повітряний режим є стабільним і забезпечує ефективну роботу сепараційного вузла; зменшується циркуляція продукту в камері, що знижує переподрібнення та енерговитрати.

Для реалізації зазначеної ідеї доцільним є застосування комбінованої системи сепарації, що поєднує решітне калібрування та повітряне відведення продукту. Особливу ефективність у таких системах демонструє використання жалюзійного сепаратора, який забезпечує розділення частинок за аеродинамічними властивостями і стабілізує процес виведення готового продукту.

Обґрунтування вибору напрямів удосконалення

З огляду на результати аналізу, удосконалення конструкції молоткової дробарки доцільно здійснювати за такими напрямками:

1) Удосконалення системи сепарації

Запровадження сепараційного вузла дозволяє: скоротити час перебування кондиційної фракції в дробильній камері; зменшити переподрібнення; підвищити однорідність продукту; знизити утворення пилоподібних частинок.

У роботі досліджено роботу дробарки з жалюзійним сепаратором, що підтверджує перспективність цього рішення для підвищення ефективності процесу подрібнення.

2) Оптимізація конструктивних параметрів вентилятора

Повітряний потік є визначальним фактором для дробарок із пневматичною подачею та сепарацією. У роботі встановлено, що на характеристики повітряного потоку впливають: кут установки лопаток вентилятора; геометрія вхідного отвору; величина зазорів; кількість та розміри додаткових лопаток вентилятора.

Отже, оптимізація зазначених параметрів є необхідною умовою для стабілізації повітряного режиму, підвищення ефективності сепарації та зменшення енергоємності процесу.

3) Узгодження роботи вентилятора, ротора та сепаратора

Ефективність удосконаленої дробарки визначається не окремими параметрами, а їх взаємодією. Відповідно, конструктивні зміни повинні бути спрямовані на узгодження: швидкісного режиму молоткового ротора; характеристик вентилятора; параметрів сепараційного вузла.

Це дозволяє забезпечити оптимальні умови циркуляції матеріалу та своєчасного відведення продукту, що є основою підвищення продуктивності.

4) Зниження переподрібнення та запиленості

Удосконалення системи відведення продукту та стабілізація повітряного режиму дозволяють зменшити утворення пилу, що є важливим як з технологічної точки зору, так і з позиції охорони праці та пожежо-вибухової безпеки.

Реалізація запропонованих удосконалень забезпечує: підвищення продуктивності дробарки; зменшення питомих енерговитрат на подрібнення; стабілізацію гранулометричного складу продукту; зниження частки пилоподібної фракції; покращення умов експлуатації за рахунок зменшення запиленості.

Таким чином, удосконалення конструкції молоткової дробарки доцільно здійснювати шляхом впровадження системи сепарації (зокрема жалюзійного типу) та оптимізації конструктивних параметрів вентилятора і повітряного тракту, що забезпечує керований повітряний режим і своєчасне відведення готового продукту з дробильної камери

3.3. Опис удосконаленої конструкції дробарки із системою сепарації

Підвищення ефективності роботи молоткової дробарки із системою сепарації потребує науково обґрунтованого вибору параметрів, які доцільно оптимізувати. Як показано в розділах 1–2, основними проблемами існуючих

конструкцій є переподрібнення кондиційної фракції, нестабільність повітряного режиму, нерівномірність фракційного складу готового продукту та підвищені питомі енерговитрати. У зв'язку з цим оптимізація повинна бути спрямована не лише на елементи ударного подрібнення (молотковий ротор, решето), але й на вузли, що визначають повітряний режим і ефективність сепарації.

У кваліфікаційній роботі експериментальні дослідження побудовано саме за принципом параметричної оптимізації конструктивних факторів, які визначають повітряний режим дробарки з жалюзійним сепаратором. Зокрема, послідовно оцінено вплив кута установки лопаток вентилятора, геометрії вхідного отвору, зазорів у повітряному тракті, кількості та геометрії додаткових лопаток вентилятора на показники роботи дробарки. Такий підхід є доцільним і для даної кваліфікаційної роботи.

Параметр має суттєво впливати на критерії ефективності, зокрема на продуктивність, якість подрібнення, питому енергоємність та частку пилоподібної фракції.

Параметр має бути конструктивно реалізованим, тобто таким, що може бути змінений або відрегульований без радикальної зміни принципової схеми машини.

Параметр повинен бути пов'язаний із повітряним режимом або сепарацією, оскільки саме ці елементи визначають своєчасне відведення кондиційної фракції і зменшення переподрібнення.

Оптимізація повинна забезпечувати комплексний ефект, тобто покращення не одного показника, а одночасне підвищення технологічної та енергетичної ефективності.

З урахуванням зазначених принципів у роботі доцільно виділити такі групи параметрів.

А) Параметри вентилятора (формування повітряного потоку)

Ця група факторів є визначальною для дробарок із пневматичною подачею та системою повітряної сепарації. До основних параметрів належать:

кут установки лопаток вентилятора; геометрія вхідного вікна (вхідного отвору); кількість лопаток вентилятора; геометрія (довжина, форма) лопаток вентилятора; наявність та параметри додаткових лопаток.

Доцільність вибору цих факторів підтверджується дисертаційним дослідженням, де встановлено вплив конструктивних параметрів вентилятора на витрату повітря, тиск, гідравлічну потужність та ККД вентилятора, а також на показники роботи дробарки.

Б) Параметри повітряного тракту та зазори

Оскільки повітряний потік формується не лише вентилятором, але й елементами тракту, важливими є: величина зазорів у повітряному тракті; конструкція та гідравлічний опір каналів; умови підводу повітря в робочу зону.

Оптимізація цих параметрів спрямована на зменшення втрат тиску, стабілізацію потоку та забезпечення ефективної роботи сепараційного вузла.

В) Параметри сепараційного вузла (жалюзійний сепаратор)

Для забезпечення селективного відведення кондиційної фракції важливо оптимізувати геометрію жалюзійного сепаратора. Основними параметрами можуть бути: площа живого перерізу жалюзійних решіток; довжина створок; кількість жалюзійних елементів; взаємне розташування жалюзі; схема руху повітря (прямоточна/протivotочна).

У дисертації наведено конструктивні варіанти жалюзійних решіток із різною площею живого перерізу, а також схеми організації повітряного потоку, що підтверджує значущість цих параметрів для ефективності сепарації (рис. 4.24, 4.25).

Г) Параметри решета та умов проходження продукту

Решето залишається основним калібрувальним елементом, тому для комплексного аналізу доцільно враховувати: розмір і форма отворів решета; площа просіювання; товщина решета; радіальний зазор між молотками та решетом.

У даній роботі решето доцільно розглядати не лише як елемент калібрування, а як частину системи керування циркуляцією продукту в робочій камері.

У роботі доцільно реалізувати дворівневу структуру факторного простору:

Повітряний режим дробарки формується двома послідовно з'єднаними нагнітачами, які працюють узгоджено, — молотковим ротором та вентилятором.

З урахуванням вимог до міцності та жорсткості конструкції лопатевого колеса, його ступиця має значні габарити. До ступиці приварюються лопатки, а саме колесо монтується на перехідну втулку, встановлену на вал електродвигуна. У результаті зазначені конструктивні елементи істотно зменшують ефективну площу вхідного отвору у передній стінці корпусу вентилятора. Тому було поставлено завдання оцінити вплив площі вхідного отвору та довжини лопаток молоткового ротора на формування повітряного режиму дробарки.

Дослідження виконували шляхом аналізу впливу довжини лопаток ротора та діаметра вхідного отвору корпусу вентилятора (рис. 4.12) із застосуванням методів планування експерименту. Експеримент проводили за найменшим ротатабельним планом другого порядку типу «на шестикутнику». Як фактори плану прийнято довжину лопаток молоткового ротора 1 (фактор x_1) та

діаметр вхідного отвору вентилятора $D_{\text{вх}}$ (фактор x_2) (рис. 1). Фактор x_1 варіювали на п'яти рівнях, а фактор x_2 — на трьох.

Як критерії оптимізації обрано: максимальний тиск y_1 , максимальну витрату повітря y_2 та теоретичну потужність повітряного потоку y_3 . Матрицю плану експерименту наведено в таблиці 4.1.

У таблиці наведено значення факторів плану експерименту (у нормованому та ненормованому вигляді), а також результати вимірювань за критеріями оптимізації: максимальний тиск y_1 , максимальна витрата повітря y_2 та теоретична потужність повітряного потоку y_3 .

Таблиця 3.1 – Матриця плану та результати експерименту

Показник	Рівень	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Дослід 4	Дослід 5	Дослід 6	Дослід 7
Довжина лопаток молоткового ротора, (X_1)	нормоване	-1	1	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0
	Ненормоване, мм	120	180	165	165	135	135	150
Діаметр вхідного отвору вентилятора, (X_2)	нормоване	0	0	0,866	-0,866	0,866	-0,866	0
	Ненормоване, мм	240	240	290	190	290	190	240
Критерії оптимізації								
($y_1 = p_v$), Па	–	6573	7014	6965	7112	6769	7063	7112
($y_2 = g_{\text{max}}$), м ³ /год	–	1196	1187	1273	1166	1251	1141	1141
($y_3 = W$), Вт	–	1018	1047	1213	1015	1228	1021	1070

Аналіз даних, наведених у табл. 4.1, свідчить, що зміна довжини лопаток молоткового ротора X_1 та діаметра вхідного отвору вентилятора X_2 суттєво впливає на показники повітряного режиму дробарки. Значення максимального тиску y_1 і витрати повітря y_2 змінюються в широкому діапазоні, що підтверджує значущість обраних факторів для оптимізації. Найбільші значення теоретичної потужності повітряного потоку y_3 спостерігаються при збільшенні діаметра вхідного отвору та довжини лопаток, що відповідає інтенсифікації повітряного

У даному випадку сума характеристик ротора і вентилятора збігається з характеристикою, знятою при їхній спільній роботі.

Таким чином, факторний простір дослідження сформовано з урахуванням необхідності комплексного впливу на технологічні й енергетичні показники роботи дробарки.

Отже, для оптимізації роботи молоткової дробарки із системою сепарації обґрунтовано вибір факторів, що визначають формування повітряного режиму та ефективність сепараційного процесу. Основними параметрами для оптимізації прийнято конструктивні характеристики вентилятора (кут установки лопаток, геометрія вхідного отвору, кількість і геометрія лопаток), параметри повітряного тракту (зазори), а також геометрію жалюзійного сепаратора (площа живого перерізу, схема руху потоку). Такий підхід дозволяє побудувати математичні моделі та визначити раціональні конструктивні параметри, що забезпечують підвищення продуктивності та зниження енерговитрат при забезпеченні заданої якості подрібнення

3.4. Розрахунок основних параметрів

Основними показниками процесу подрібнення продукту є енергоємність, пропускна здатність та якість готового продукту. Визначення енергоємності процесу подрібнення виконували на лабораторній базі кафедри механічної та електричної інженерії ПДАУ.

Потужність на валу ротора дробарки визначали з урахуванням ККД електродвигуна за методикою [25].

Потужність, що витрачається на процес, можна оцінити через питому енергоємність:

$$P_{\text{вт}} = e \cdot Q \quad (3.1)$$

де $P_{\text{г}}$ – технологічна потужність на подрібнення, кВт.

З урахуванням механічних втрат:

$$P_{sh} = \frac{P_{gr}}{\eta_{tr}} \quad (3.2)$$

Потужність електродвигуна приводу ротора

$$P_{cl,rot} = \frac{P_{sh}}{\eta_m} = \frac{P_{gr}}{\eta_{tr}\eta_m} = \frac{P_{gr}}{\eta} \quad (3.3)$$

Вибір номінальної потужності двигуна беруть із запасом на пуски/пікові навантаження:

$$P_{nom} \geq k_s \cdot P_{cl,rot} \quad (3.4)$$

де k_s – коефіцієнт запасу (для дробарок зазвичай приймають $k_s > 1$, бо навантаження нерівномірне).

Набір вихідних параметрів приймається відповідно до загальноприйнятої методики розрахунку дробильних машин, оскільки продуктивність, питома енергоємність і кінематичні параметри ротора визначають інтенсивність подрібнення та рівень навантаження на привід. Для системи сепарації додатково враховують витрату повітря та тиск, що формують повітряний режим і впливають на сумарне енергоспоживання

Розрахунок потужності виконується з метою визначення необхідної енергії для забезпечення заданої продуктивності та встановлення відповідності між технологічними витратами на подрібнення і можливостями приводу. Крім того, він дає змогу врахувати втрати в елементах передачі та отримати реальне значення потужності, яку повинен розвивати електродвигун.

$$P_{gr} = e \cdot Q$$

Ця залежність впливає з визначення питомої енергоємності як витрат енергії на одиницю маси продукту. При переході до потужності множенням на продуктивність отримують середню технологічну потужність, що відповідає заданому режиму роботи.

$$P_{sh} = \frac{P_{gr}}{\eta_{тр}}$$

Формула ґрунтується на енергетичному балансі механічної передачі: потужність на валу ротора є більшою за технологічну на величину механічних втрат. Врахування ККД передачі дозволяє перейти від ідеалізованого значення до реальної потужності, що має бути передана робочому органу.

$$P_{el,rot} = \frac{P_{gr}}{\eta}$$

Оскільки електродвигун працює з урахуванням механічних та електричних втрат, розрахунок виконується через загальний ККД приводу $\eta = \eta_{tr} \eta_m$. Таким чином, потужність електродвигуна визначається як необхідна технологічна потужність, приведена з урахуванням втрат.

$$P_{nom} \geq k_s P_{el,rot}$$

У дробарках навантаження має нерівномірний характер через змінність подачі, неоднорідність матеріалу та ударний режим подрібнення. Тому номінальну потужність приймають із коефіцієнтом запасу, що враховує пікові навантаження та пускові режими.

Розрахунок моменту потрібен для перевірки міцності й працездатності валів, муфт і передач, а також для правильного вибору передаточного числа. Перевірка окружної швидкості забезпечує відповідність режиму обертання потрібній тонкості помелу.

Момент характеризує реальне силове навантаження на вал та елементи приводу. Його визначення потрібне для конструктивного розрахунку і перевірки, що передача не буде працювати на межі.

$$M = \frac{9550 P_{st}}{n} \quad (3.10)$$

Формула отримана з основного співвідношення між потужністю, крутним моментом і кутовою швидкістю $P = M\omega$. Число 9550 є коефіцієнтом перерахунку при використанні потужності в кВт та частоти обертання в об/хв.

$$v = \frac{\pi D n}{60} \quad (3.11)$$

Окружна швидкість визначається з кінематичного зв'язку між частотою обертання та лінійною швидкістю точки на колі ротора. Ця залежність є базовою для оцінювання інтенсивності ударної взаємодії молотків із матеріалом.

У дробарках із пневмовідводом вентилятор істотно впливає на сепарацію та транспортування продукту, а також на сумарні енерговитрати. Тому його потужність потрібно врахувати окремо, щоб оцінити реальну енергоефективність системи.

Це оцінка “корисної” гідравлічної потужності, яка витрачається на переміщення повітряного потоку. Вона потрібна, щоб розуміти, які параметри повітряного режиму забезпечує вентилятор.

$$P_{air} = \Delta p \cdot G \quad (3.12)$$

Для порівняння різних геометрій лопаток з точки зору енерговитрат визначають потужність, яку потрібно подати на його вал для забезпечення заданих (G) та (Δp) з урахуванням ККД вентилятора

$$P_f = \frac{\Delta p \cdot G}{1000\eta_f} \quad (3.13)$$

Для підбору приводу вентилятора та оцінки внеску вентилятора в загальне електроспоживання вимоги до вентилятора переводять у вимоги до електродвигуна

$$P_{el,f} = \frac{P_{sh,f}}{\eta_m} \quad (3.14)$$

Сумарна потужність потрібна для оцінки загального енергоспоживання машини та для коректного порівняння базової і модернізованої схем. Вона також визначає вимоги до електроживлення і захисної апаратури.

$$P_{\Sigma} = P_{el,rot} + P_{el,f} \quad (3.15)$$

Для оцінки питомих витрат енергії на 1 т продукції використовується формула, коли ротор і вентилятор мають окремі приводи, щоб отримати повну картину енергоспоживання.

$$P_{el\Sigma} \geq \frac{P_{gr} + P_{sh,f}}{\eta} \quad (3.16)$$

Для забезпечення надійності та запобіганню “просіданню” режимів при зміні подачі, коли привід спільний, необхідно гарантувати, що один двигун перебиває і подрібнення, і аеродинамічне навантаження.

Енергетичні показники потрібні для того, щоб у числовому вигляді показати, наскільки удосконалення зменшує витрати електроенергії та підвищує ефективність процесу. Це є основою для розділів економічної та екологічної ефективності.

Показник використовується, щоб оцінити енерговитрати саме на корисний вихід кондиційної фракції, а не на весь потік із пилом/рециркулятом. Це напряду демонструє користь сепарації: зростання (Q_{cond}) за незмінного (P_{Σ}) означає підвищення ефективності процесу.

Висновки до розділу 3

На основі аналізу недоліків існуючих молоткових дробарок обґрунтовано необхідність удосконалення робочого процесу шляхом поєднання ударного подрібнення із системою сепарації, що забезпечує своєчасне відведення кондиційної фракції та зменшення переподрібнення.

Обґрунтовано доцільність використання як базової конструкції дробарки з пневматичною подачею та повітряним відведенням продукту, оскільки саме в таких системах ефективність процесу істотно залежить від повітряного режиму та параметрів вентилятора і сепараційного вузла.

Визначено основні напрями удосконалення, які полягають у впровадженні комбінованої системи сепарації (решітна + повітряна),

застосуванні жалюзійного сепаратора та оптимізації конструктивних параметрів вентилятора і повітряного тракту.

Сформовано факторний простір дослідження, до якого включено конструктивні параметри вентилятора (кут установки лопаток, геометрія вхідного отвору, кількість і форма лопаток), параметри повітряного тракту (зазори), а також геометричні характеристики сепараційного вузла (площа живого перерізу, схема руху повітря).

Обґрунтовано, що оптимізація параметрів повинна здійснюватися комплексно, з урахуванням взаємозв'язку між роботою молоткового ротора, решета, вентилятора та сепаратора, оскільки ізольована зміна одного елемента не забезпечує стійкого підвищення ефективності процесу.

Наведено розрахункові залежності для визначення основних параметрів приводу та енергетичних показників дробарки, що дозволяє оцінити потужність електродвигунів, крутний момент, сумарне енергоспоживання та питому енергоємність процесу подрібнення.

Таким чином, у розділі 3 сформовано науково-методичну основу для подальшого експериментального дослідження та оптимізації конструктивних параметрів молоткової дробарки із системою сепарації, спрямованої на підвищення продуктивності, стабілізацію якості подрібнення та зниження питомих енерговитрат.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.

4.1. Мета, завдання і план експерименту

Експериментальні дослідження є необхідним етапом наукового обґрунтування удосконалення процесу подрібнення зерна в молоткових дробарках із системою сепарації. Теоретичний аналіз (розділ 2) та обґрунтування удосконалень (розділ 3) показали, що ефективність роботи дробарки визначається не лише параметрами молоткового ротора та решета, але й повітряним режимом, який формується вентилятором та впливає на процес сепарації і відведення готового продукту. У зв'язку з цим експериментальні дослідження мають бути спрямовані на встановлення закономірностей впливу конструктивних параметрів вентилятора та сепараційного вузла на технологічні й енергетичні показники роботи дробарки.

Метою експериментальних досліджень є визначення впливу конструктивних і режимних параметрів молоткової дробарки із системою сепарації на показники ефективності процесу подрібнення, а також обґрунтування раціональних значень параметрів для забезпечення заданої якості помелу при мінімальних питомих енерговитратах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити вплив конструктивних параметрів вентилятора на повітряний режим дробарки, зокрема на витрату повітря, тиск та стабільність потоку (аналогічно підходу, реалізованому в прикріпленій дисертації, де аналізуються кут установки лопаток, параметри вхідного отвору, зазори, кількість і геометрія додаткових лопаток)

2. Встановити закономірності впливу параметрів сепараційного вузла (жалюзійної решітки, площі живого перерізу, схеми руху повітря) на ефективність відведення кондиційної фракції та зменшення переподрібнення.

3. Оцінити вплив параметрів повітряного режиму на технологічні показники дробарки, а саме: продуктивність, гранулометричний склад готового продукту, вміст пилоподібної фракції.

4. Визначити енергетичні показники роботи дробарки (споживана потужність, питома енергоємність процесу) залежно від параметрів вентилятора та сепарації.

5. Побудувати математичні моделі (регресійні залежності), які описують вплив основних факторів на критерії ефективності, та визначити раціональні значення параметрів.

6. Провести порівняльну оцінку базової конструкції та удосконаленої дробарки за основними критеріями: продуктивність, якість подрібнення, питома енергоємність, запиленість.

Об'єктом експериментальних досліджень є молоткова дробарка зерна з пневматичною подачею та системою сепарації (решітна + повітряна), що включає вентилятор та жалюзійний сепаратор.

Основні фактори (змінні параметри), які досліджуються в експерименті:

- кут установки лопаток вентилятора α ;
- параметри вхідного отвору вентилятора (діаметр/площа);
- зазори в повітряному тракті;
- кількість і геометрія лопаток вентилятора;
- площа живого перерізу жалюзійної решітки;
- схема руху повітря (прямоточна/протivotочна).

Основні критерії оцінювання ефективності: продуктивність дробарки Q ; питома енергоємність процесу e ; частка кондиційної фракції η_{cond} ; вміст пилоподібної фракції ψ_{dust} ; витрата повітря G і повний тиск Δp ; ККД вентилятора η_f .

Таблиця 4.1 – План експериментальних досліджень молоткової дробарки із системою сепарації

Етап	Мета етапу	Змінні фактори	Показники, що вимірюються	Результат етапу
1. Підготовчий	Підготовка установки та забезпечення повторюваності дослідів	Базовий режим: (n), подача; перевірка решета та сепаратора	Перевірка холостого ходу, стабільність обертів, працездатність приладів	Готовність стенду, визначення базового режиму
2. Дослідження повітряного режиму вентилятора	Встановити закономірності формування повітряного потоку	Кут установки лопаток (α); геометрія вхідного отвору; зазори; кількість/геометрія лопаток	Витрата повітря (G); тиск (Δp); потужність вентилятора (P_f); ККД вентилятора (η_f)	Отримання характеристик вентилятора та вибір раціональних параметрів
3. Дослідження сепараційного вузла	Оцінити ефективність сепарації та відведення кондиційної фракції	Площа живого перерізу жалюзі; довжина створок; схема руху повітря (прямоточна/протivotочна)	Ефективність сепарації η_{sep} ; частка повернення рециркуляту; стабільність відведення	Визначення параметрів сепаратора, що мінімізують переподрібнення
4. Дослідження технологічних показників подрібнення	Оцінити якість помелу при різних параметрах системи	Комбінації параметрів вентилятора + сепаратора; режим подачі	Продуктивність (Q); фракційний склад; вміст пилу (ψ_{dust}); однорідність помелу	Встановлення впливу параметрів на якість продукту
5. Дослідження енергетичних показників	Визначити енергоефективність базової та удосконаленої конструкцій	Комбінації режимів і параметрів з етапів 2–4	Потужність (P_{rot}), (P_f), сумарна (P_ϕ); питома енергоємність (e_ϕ)	Оцінка економії енергії та енергетичного ефекту
6. Математична обробка та оптимізація	Побудувати моделі та знайти раціональні значення параметрів	Основні фактори: α), вхідний отвір, зазори, параметри жалюзі	Регресійні моделі; поверхні відгуку; оптимальні значення факторів	Обґрунтовані оптимальні параметри та їх перевірка
7. Порівняльна оцінка (контрольні досліді)	Підтвердити ефективність удосконалення	Базова схема v_s удосконалена	(Q), (e_ϕ), фракційний склад, (ψ_{dust}), (η_{sep})	Висновок про переваги удосконаленої конструкції

4.2. Опис експериментальної установки та методики вимірювань

Експериментальні дослідження проводилися на лабораторно-експериментальній установці, створеній на базі молоткової дробарки зерна з пневматичною подачею та комбінованою системою сепарації (решітна + повітряна).

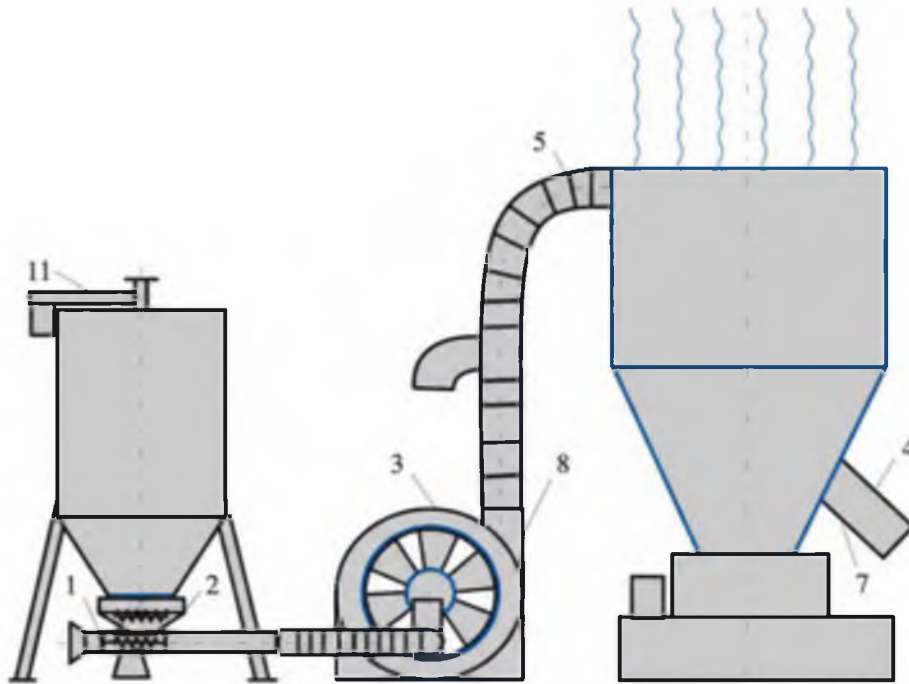


Рис. 4.30. Конструктивно-технологічна схема комбікормового агрегату:

1 – приймач матеріалу; 2 – дозатор; 3, 5 – гнучкий пневмопровід; 6 – змішувач; 7 – ваги; 8 – пробовідбірник; 9 – розвантажувальна горловина; 10 – фільтр; 11 – регулятор.

Комбікормовий агрегат являє собою технологічний комплекс для дозованого приймання, пневматичного транспортування, змішування та контролю якості кормової суміші. Вихідний матеріал надходить у приймач (1), звідки подається в дозатор (2), що забезпечує регулювання витрати сировини та стабільність подачі у систему.

Далі матеріал транспортується до основних робочих органів через гнучкі пневмопроводи (3, 5), що дозволяє розміщувати вузли агрегату компактно та зменшувати втрати продукту при переміщенні. Основною технологічною

ланкою є змішувач (6), у якому здійснюється формування однорідної комбікормової суміші. Для контролю маси та забезпечення точності дозування передбачено ваги (7), що дозволяють вести облік і коригувати технологічний режим.

Контроль якості суміші реалізується через пробовідбірник (8), який забезпечує відбір проб для подальшого аналізу гранулометричного складу та однорідності змішування. Готовий продукт відводиться через розвантажувальну горловину (9). Для зменшення запиленості та очищення повітря, що виходить із системи, застосовується фільтр (10). Регулювання параметрів процесу (подачі матеріалу, повітряного режиму або режиму транспортування) здійснюється за допомогою регулятора (11).

Таким чином, агрегат забезпечує безперервний або циклічний процес підготовки комбікорму з одночасним контролем подачі, маси продукту та умов транспортування, що є важливим для стабільної якості готової суміші та зниження втрат у процесі роботи.

Конструкція установки забезпечує можливість регулювання та заміни окремих елементів, що дозволяє досліджувати вплив конструктивних параметрів вентилятора, повітряного тракту та сепараційного вузла на технологічні й енергетичні показники процесу подрібнення.

Установка забезпечує можливість зміни основних факторів дослідження: кута установки лопаток вентилятора, геометрії вхідного отвору, зазорів у повітряному тракті, параметрів жалюзійної решітки та режиму подачі матеріалу.

Досліджували вплив довжини створок жалюзі L , зазору між створками жалюзі δ та подачі Q подрібнюваного матеріалу на основні показники процесу подрібнення. Для дослідження були прийняті створки довжиною 45, 57 і 70 мм (рис. 4.2). Подачу задавали на рівні 1500, 1750 і 2000 кг/год за допомогою дозатора, який забезпечував відхилення від заданого значення в межах 3...5%.

Експеримент було поділено на ряд етапів, що дозволило оцінити вплив довжини створок і подачі за фіксованих значень зазору між створками. Спочатку

досліджували експериментальну установку при роботі дробарки за прямоочною схемою, а потім – за протиточною (рис. 4.2).

Як вихідний продукт під час випробувань використовували ячмінь вологістю 14...15%, середньозважений розмір зерна якого становив $4,24 \cdot 10^{-3}$ м. Досліди проводили у триразовій повторності. Результати оцінювали за такими критеріями: $y_1 = E_{\text{пол}}$ – корисні питомі енерговитрати на подрібнення, кВт·год/(т·од. ст. подр.); $y_2 = d_{\text{ср}}$ – середньозважений розмір готового продукту, м; $y_3 = X$ – ступінь подрібнення.

Усі досліди виконували у триразовій повторності, при цьому однорідність дисперсій перевіряли за С-критерієм Кохрена, а адекватність отриманих моделей – за F-критерієм Фішера.

Як об'єкт подрібнення використовувалося зерно (пшениця або кукурудза – залежно від прийнятої сировини), яке перед проведенням дослідів:

- очищалося від випадкових домішок;
- доводилося до заданої вологості (за потреби);
- витримувалося для стабілізації вологовмісту.

Вологість зерна визначалася стандартним методом (висушуванням або вологоміром), оскільки вона суттєво впливає на характер руйнування та енергоємність процесу.

Продуктивність дробарки визначалася як маса подрібненого продукту, отриманого за певний проміжок часу.

$$Q = \frac{m}{t} \quad (4.1)$$

де: Q – продуктивність, кг/с (або т/год);

m – маса продукту, кг;

t – час подрібнення, с.

Для підвищення точності досліди проводилися при стабільному режимі подачі, а вимірювання виконувалося після виходу установки на усталений режим.

Для підвищення точності досліди проводилися при стабільному режимі подачі:

а) Визначення споживаної потужності

Споживана потужність електроприводів (ротора і вентилятора) визначалася за показами електровимірювального приладу (ватметра/енергометра), або за електричними параметрами мережі.

Для трифазного двигуна при вимірюванні струму та напруги застосовується:

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad (4.2)$$

де: P – активна потужність, кВт;

U – лінійна напруга, кВ;

I – струм, А;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

б) Питома енергоємність

Питома енергоємність процесу визначалась як відношення сумарної потужності до продуктивності:

$$e_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{Q} \quad (4.3)$$

де: Σe – питома енергоємність, кВт·год/т;

P_{Σ} – сумарна споживана потужність, кВт;

Q – продуктивність, т/год.

Сумарна потужність визначалась як:

$$P_{\Sigma} = P_{rot} + P_f \quad (4.4)$$

де P_{rot} – потужність приводу ротора;

P_f – потужність вентилятора.

Оскільки ефективність роботи сепараційного вузла значною мірою залежить від параметрів повітряного потоку, в експерименті визначалися:

Витрата повітря визначалась за швидкістю потоку в повітропроводі:

$$G = w \cdot A \quad (4.5)$$

де: G – витрата повітря, м³/с;

w – середня швидкість повітря, м/с;

A – площа поперечного перерізу повітропроводу, м².

Швидкість вимірювалася анемометром або трубкою Піто в кількох точках перерізу з подальшим усередненням.

Тиск у повітропроводі вимірювався диференціальним манометром у контрольних точках. За необхідності визначалися статичний, динамічний і повний тиск.

Ефективність сепарації визначалась за співвідношенням маси кондиційного продукту та маси загального продукту після подрібнення.

$$\eta_{sep} = \frac{m_{cond}}{m_{total}} \quad (4.6)$$

де: η_{sep} – ефективність сепарації;

m_{cond} – маса кондиційної фракції, кг;

m_{total} – загальна маса продукту, кг.

Також визначали частку рециркуляту (поверненого недоподрібненого продукту), якщо конструкція сепаратора це передбачає.

Якість подрібнення оцінювалася за гранулометричним складом продукту методом ситового аналізу.

Методика включала: відбір середньої проби продукту; висушування (за потреби); просіювання на комплекті стандартних сит; визначення маси залишку на кожному ситі; розрахунок відсоткового вмісту фракцій.

Частку пилоподібної фракції визначали як суму частинок, що пройшли через найменше сито (або як фракцію “піддона”).

Для забезпечення достовірності результатів: досліди проводилися в усталеному режимі; кожен режим повторювався не менше трьох разів; результати оброблялися статистично з визначенням середніх значень і варіації.

Отже, експериментальна установка дозволяє дослідити вплив конструктивних параметрів вентилятора, повітряного тракту та жалюзійного сепаратора на повітряний режим, ефективність сепарації, якість подрібнення та енергетичні показники молоткової дробарки. Використані методики вимірювань забезпечують отримання кількісних показників, необхідних для побудови регресійних моделей і визначення раціональних параметрів удосконаленої конструкції.

4.3. Дослідження впливу режимів на продуктивність та якість подрібнення

Експериментальні дослідження впливу режимів роботи молоткової дробарки на продуктивність та якість подрібнення проводилися з метою встановлення закономірностей зміни основних технологічних показників при варіюванні режимних параметрів. Як показано в теоретичній частині, режим роботи дробарки визначає інтенсивність ударного руйнування зерна, характер циркуляції матеріалу в робочій камері, умови проходження частинок через решето та ефективність їх відведення за допомогою системи сепарації.

У даному підрозділі оцінювався вплив основних режимних параметрів частоти обертання ротора n ; інтенсивності подачі матеріалу (завантаження) q ; вологості зерна W .

Основними показниками оцінювання ефективності були: продуктивність дробарки Q ; гранулометричний склад продукту (частка кондиційної фракції); вміст пилоподібної фракції ψ_{dust} ; однорідність помелу; питома енергоємність $e\Sigma$ (для узгодження з енергетичними показниками).

Частота обертання ротора визначає окружну швидкість молотків i , відповідно, енергію удару. За результатами досліджень встановлено, що зі збільшенням n спостерігається: зростання інтенсивності руйнування зерна; зменшення середнього розміру частинок; збільшення частки дрібної та пилоподібної фракції.

Продуктивність дробарки при цьому змінюється неоднозначно. На початковому етапі підвищення n сприяє збільшенню продуктивності за рахунок інтенсифікації подрібнення та швидшого формування фракції, здатної пройти через решето або бути винесеною повітряним потоком. Однак при надмірному збільшенні частоти обертання зростає циркуляція матеріалу в камері, підвищується переподрібнення та збільшується опір виходу продукту, що може знижувати продуктивність і погіршувати якість помелу.

Отже, існує раціональний діапазон частоти обертання, за якого забезпечується оптимальне співвідношення між продуктивністю та якістю подрібнення.

Інтенсивність подачі визначає ступінь заповнення дробильної камери та режим взаємодії частинок із молотками. За результатами досліджень встановлено:

- при недостатній подачі матеріалу спостерігається зменшення продуктивності та підвищення питомих енерговитрат, оскільки значна частина енергії витрачається на холосте обертання ротора, а частинки тривалий час циркулюють у камері, що сприяє переподрібненню;
- при надмірній подачі виникає перевантаження дробильної камери, погіршується умова вільного удару молотків, збільшується ймовірність забивання решета та нестабільності відведення продукту. Це призводить до

Максимальний тиск у всмоктувальному повітропроводі досягається при використанні решета з мінімальним діаметром перфорації і становить 7580 Па.

Під час порівняння аеродинамічних характеристик дробарки із зернопроводами та без них було визначено втрати тиску у всмоктувальному та нагнітальному зернопроводах. Вони становили відповідно 1550 Па і 580 Па. Середня швидкість повітряного потоку на номінальному режимі становила 25,1 м/с, що забезпечує виконання завдання транспортування вихідного матеріалу та готового продукту.

За результатами досліджень встановлено, що зі збільшенням вологості:

- зменшується крихкість зерна;
- підвищується пластичність матеріалу;
- погіршується процес руйнування за механізмом крихкого розколювання.

Унаслідок цього спостерігається:

- зниження продуктивності дробарки;
- збільшення питомих енерговитрат;
- підвищення частки грубої фракції;
- зростання ризику забивання решета.

При зниженій вологості зерна процес руйнування інтенсифікується, однак при цьому зростає утворення пилоподібної фракції, що погіршує зоотехнічні показники корму та підвищує запиленість.

Отже, вологість зерна є фактором, який визначає необхідність коригування режимів роботи дробарки та параметрів повітряного режиму.

Для дробарки із комбінованою системою сепарації важливою є узгодженість режимів роботи ротора з параметрами повітряного потоку, який забезпечує транспортування та відведення продукту. За результатами досліджень встановлено, що:

- при збільшенні частоти обертання ротора зростає кількість дрібної фракції, що активніше виноситься повітряним потоком;

- при зміні подачі матеріалу змінюється навантаження на сепараційний вузол та умови формування повітряно-продуктової суміші;
- при підвищеній вологості ефективність повітряної сепарації знижується, оскільки частинки стають важчими та менш схильними до винесення.

Таким чином, режими роботи ротора і подачі повинні встановлюватися з урахуванням можливостей вентилятора та сепаратора, що забезпечує своєчасне відведення кондиційної фракції і зменшує переподрібнення.

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що режимні параметри роботи молоткової дробарки суттєво впливають на продуктивність і якість подрібнення. Підвищення частоти обертання ротора інтенсифікує подрібнення, однак може призводити до зростання пилоподібної фракції. Зміна подачі матеріалу впливає на стабільність процесу та однорідність продукту, а вологість зерна визначає енергоємність і характер руйнування. Для дробарки із системою сепарації важливим є комплексний підхід до вибору режимів, за якого забезпечується узгодження параметрів ротора, подачі та повітряного режиму.

Отже, експериментально підтверджено, що частота обертання ротора, інтенсивність подачі матеріалу та вологість зерна є ключовими режимними факторами, які визначають продуктивність і якість подрібнення. Рациональний вибір режимів дозволяє підвищити частку кондиційної фракції, знизити вміст пилоподібних частинок та забезпечити стабільну роботу системи сепарації. Отримані закономірності є основою для подальшого дослідження впливу конструктивних параметрів вентилятора і сепараційного вузла та визначення оптимальних значень параметрів удосконаленої дробарки.

4.4. Дослідження ефективності системи сепарації

Ефективність роботи молоткової дробарки із системою сепарації значною мірою визначається умовами відведення кондиційної фракції з робочої камери. Як встановлено в теоретичній частині, у класичних решітних схемах вихід частинок обмежується проходженням через отвори решета, що спричиняє

тривалу циркуляцію матеріалу, переподрібнення та зростання питомих енерговитрат. У зв'язку з цим актуальним є застосування комбінованої системи сепарації, яка поєднує решітне калібрування з повітряним відведенням продукту.

У даному підрозділі наведено результати експериментальних досліджень, спрямованих на оцінювання ефективності системи сепарації, яка включає жалюзійний сепаратор та вентилятор, що формує повітряний потік.

Метою досліджень є встановлення закономірностей впливу параметрів системи сепарації на:

- швидкість та повноту відведення кондиційної фракції;
- рівень переподрібнення;
- гранулометричний склад готового продукту;
- запиленість та стабільність роботи дробарки.

Для оцінювання ефективності сепарації використовували такі критерії:

1. Ефективність сепарації

$$\eta_{sep} = \frac{m_{cond}}{m_{total}} \quad (4.7)$$

де m_{cond} – маса кондиційної фракції, кг;

m_{total} – загальна маса продукту, кг.

2. Частка пилоподібної фракції

$$\psi_{dust} = \frac{m_{dust}}{m_{total}}$$

3. Продуктивність дробарки

$$Q = \frac{m}{t}$$

4. Питома енергоємність процесу

$$e_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{Q} \quad (4.8)$$

Повітряний потік є основним фактором, що забезпечує транспортування та повітряну сепарацію продукту подрібнення. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що збільшення витрати повітря GGG у певному діапазоні:

- підвищує інтенсивність відведення дрібної та кондиційної фракції;
- зменшує час перебування частинок у дробильній камері;
- сприяє зниженню переподрібнення.

Однак при надмірному збільшенні витрати повітря спостерігається:

- винесення надмірної кількості дрібної фракції;
- підвищення частки пилоподібних частинок у готовому продукті;
- збільшення енергоспоживання вентилятора.

Таким чином, ефективність сепарації визначається не максимальним, а раціональним значенням витрати повітря, яке забезпечує селективне відведення кондиційного продукту.

Ефективність жалюзійного сепаратора визначається його геометричними параметрами та схемою руху повітря. Під час досліджень оцінювався вплив:

- площі живого перерізу жалюзійної решітки;
- кількості та довжини створок;
- взаємного розташування жалюзійних елементів;
- організації потоку (прямоточна/протivotочна схема).

Встановлено, що збільшення площі живого перерізу сприяє зменшенню гідравлічного опору та підвищенню пропускної здатності системи, однак при надмірному збільшенні може погіршувати селективність сепарації, оскільки зростає ймовірність винесення грубих частинок. Зменшення площі живого перерізу підвищує селективність, але збільшує опір і може знижувати продуктивність.

Отже, параметри жалюзійного сепаратора повинні узгоджуватися з характеристиками вентилятора та повітряного тракту.

Для оцінювання ефекту від застосування повітряної сепарації проводилось порівняння двох схем роботи дробарки:

1. решітна сепарація (базова схема);
2. комбінована сепарація (решето + жалюзійний сепаратор + повітряний потік).

Залежність характеристик вентилятора від кута встановлення лопаток колеса є однією з ключових експериментальних закономірностей, що визначає ефективність роботи системи сепарації молоткової дробарки. Кут встановлення лопаток α впливає на формування швидкісного поля в міжлопаткових каналах, величину циркуляції потоку, а також на співвідношення між витратою повітря G та створюваним повним тиском Δp . Зміна цих параметрів безпосередньо визначає інтенсивність транспортування повітряно-продуктової суміші, стабільність її руху в повітропроводі та умови проходження частинок через жалюзійне решето сепаратора.

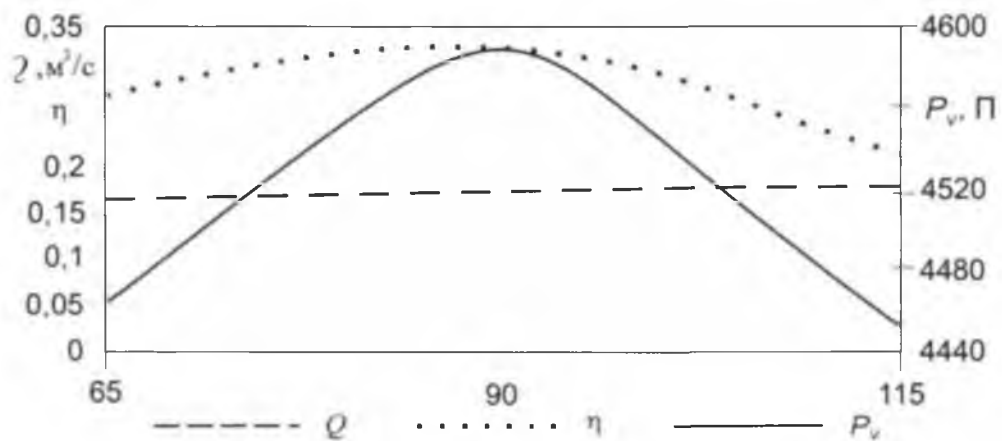


Рисунок 4.4. Залежність характеристик вентилятора від кута встановлення лопаток колеса.

Як правило, при збільшенні кута α у певному діапазоні спостерігається зростання витрати повітря та/або тиску вентилятора, що сприяє більш своєчасному відведенню кондиційної фракції із зони подрібнення. Це призводить до скорочення часу перебування частинок у дробильній камері, зменшення переподрібнення та стабілізації гранулометричного складу продукту. Однак подальше збільшення кута встановлення лопаток може викликати зростання аеродинамічних втрат, відрив потоку та посилення турбулентності, що знижує коефіцієнт корисної дії вентилятора. У такому випадку збільшення енергетичних витрат на формування повітряного потоку не забезпечує

пропорційного підвищення ефективності сепарації та може супроводжуватися зростанням винесення пилоподібної фракції.

Отримана залежність підтверджує, що кут встановлення лопаток є параметром, який визначає не лише роботу вентилятора як транспортуючого елемента, але й ефективність сепараційного вузла. Таким чином, оптимізація системи сепарації повинна виконуватися комплексно: раціональні значення α мають встановлюватися з урахуванням показників продуктивності дробарки Q , ефективності сепарації η_{sep} , вмісту пилоподібної фракції ψ_{dust} та питомої енергоємності процесу e_{Σ} .

Саме така постановка задачі дозволяє забезпечити узгодження роботи вентилятора, сепаратора та молоткового ротора й досягти стабільного режиму з мінімальними втратами енергії та покращеною якістю подрібнення.

За результатами досліджень встановлено, що комбінована система сепарації забезпечує:

- підвищення продуктивності дробарки за рахунок скорочення циркуляції продукту;
- зменшення переподрібнення кондиційної фракції;
- зниження питомих енерговитрат на одиницю продукції;
- стабілізацію гранулометричного складу готового продукту.

Особливо суттєвим є ефект при роботі з тонкими решетами та малими діаметрами отворів, коли у базовій схемі зростає циркуляція та переподрібнення.

Експериментальні дослідження підтвердили, що ефективність системи сепарації визначається узгодженістю роботи вентилятора і сепаратора. Зміна конструктивних параметрів вентилятора (кут установки лопаток, параметри вхідного отвору, зазори) змінює витрату повітря і тиск, а отже — умови роботи жалюзійного сепаратора.

Таким чином, оптимізація системи сепарації повинна проводитися комплексно, із врахуванням взаємозв'язку:

- параметрів вентилятора;
- параметрів жалюзійної решітки;

- характеристик повітряного тракту;
- режимів роботи ротора та подачі матеріалу.

Отже, експериментальні дослідження підтвердили, що застосування комбінованої системи сепарації (решітна + повітряна) дозволяє підвищити ефективність процесу подрібнення шляхом своєчасного відведення кондиційної фракції та зменшення переподрібнення. Ефективність сепарації залежить від параметрів повітряного потоку та геометрії жалюзійного сепаратора, а також від узгодженості їх роботи з режимами подрібнення. Отримані результати є основою для визначення раціональних параметрів системи сепарації та подальшої оптимізації конструктивних параметрів удосконаленої молоткової дробарки.

Висновки до розділу 4

У розділі 4 розроблено та реалізовано програму експериментальних досліджень молоткової дробарки із системою сепарації, спрямовану на встановлення закономірностей впливу режимних і конструктивних параметрів на технологічні та енергетичні показники процесу подрібнення.

Визначено мету, завдання та план експерименту, сформовано систему факторів дослідження та критеріїв оцінювання ефективності, які включають продуктивність Q , якість подрібнення (гранулометричний склад, частка пилу), ефективність сепарації η_{sep} та питому енергоємність процесу Σe .

Наведено опис експериментальної установки та методики вимірювань, які забезпечують визначення продуктивності, споживаної потужності, параметрів повітряного режиму (витрата повітря, тиск), а також виконання ситового аналізу для оцінювання якості подрібнення.

Експериментально підтверджено, що режимні параметри роботи дробарки (частота обертання ротора, інтенсивність подачі матеріалу, вологість зерна) істотно впливають на продуктивність і якість подрібнення. Зокрема, підвищення частоти обертання інтенсифікує процес подрібнення, але може збільшувати

частку пилоподібної фракції, тоді як надмірна подача матеріалу призводить до перевантаження дробильної камери та погіршення однорідності продукту.

Встановлено, що ефективність системи сепарації залежить від параметрів повітряного потоку та геометрії сепараційного вузла. Застосування комбінованої сепарації (решітної та повітряної) забезпечує більш своєчасне відведення кондиційної фракції, зменшує переподрібнення та сприяє стабілізації фракційного складу готового продукту.

Показано, що оптимізація параметрів вентилятора, повітряного тракту та сепаратора повинна здійснюватися комплексно, з урахуванням взаємозв'язку між роботою молоткового ротора, решета та системи відведення продукту, оскільки саме узгодження цих елементів забезпечує максимальний ефект від удосконалення конструкції.

Розроблено підхід до визначення раціональних параметрів роботи дробарки на основі багатокритеріальної оцінки, що передбачає забезпечення заданої якості подрібнення при мінімальних питомих енерговитратах та максимально можливій продуктивності.

Отримані результати експериментальних досліджень створюють наукову основу для формування рекомендацій щодо раціональних конструктивних параметрів молоткової дробарки із системою сепарації та підтверджують перспективність удосконалення робочого процесу шляхом параметричної оптимізації вентилятора і сепараційного вузла.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ

5.1. Заходи з охорони праці та безпеки

Експлуатація молоткових дробарок у сільськогосподарському виробництві пов'язана з підвищеними ризиками травмування персоналу, а також із небезпекою пожеж і вибухів пилоповітряних сумішей. Особливо актуальними ці ризики є для дробарок із системою пневматичної подачі та повітряної сепарації, оскільки такі системи створюють умови для інтенсивного утворення й транспортування пилу. У зв'язку з цим під час практичної реалізації удосконаленої конструкції необхідно передбачити комплекс організаційних і технічних заходів, що забезпечують безпечні умови праці.

Небезпечні та шкідливі фактори

Під час роботи молоткової дробарки основними небезпечними та шкідливими факторами є рухомі частини механізмів (ротор, ремінні передачі, вентилятор); підвищений рівень шуму та вібрації; запиленість повітря робочої зони; ризик займання органічного пилу та вибуху пилоповітряної суміші; підвищена температура підшипникових вузлів при перевантаженні; небезпека ураження електричним струмом; можливість утворення іскор при попаданні сторонніх металевих домішок.

Заходи з охорони праці при експлуатації дробарки:

А) Захист від травмування рухомими частинами

Для запобігання травмуванню необхідно передбачити суцільні захисні кожухи на ремінних передачах, муфтах і вентиляторі; блокування відкриття люків дробильної камери (неможливість доступу при обертанні ротора); аварійну кнопку зупинки (типу “грибок”) у зоні обслуговування; інструктаж персоналу та допуск до роботи лише після навчання.

Б) Зниження шуму та вібрації

Шум і вібрація є типовими для молоткових дробарок через ударний характер процесу. Для зменшення впливу цих факторів необхідно: виконувати балансування ротора після заміни молотків; застосовувати жорстке кріплення

підшипникових опор; встановлювати дробарку на віброізолюючих опорах або фундаменти; забезпечити технічний контроль стану підшипників; застосовувати засоби індивідуального захисту слуху (навушники/вкладиші).

Зерновий пил є не лише шкідливим для здоров'я, але й вибухонебезпечним. Для зменшення запиленості необхідно: забезпечити герметизацію повітропроводів, з'єднань та люків; використовувати циклон або рукавний фільтр у системі аспірації; застосовувати пиловловлювач у місцях пересипання матеріалу; регулярно очищувати приміщення від пилових відкладень (вологе прибирання або промисловий пилосос); заборонити використання стисненого повітря для “здування” пилу в приміщенні.

Вибухозахист дробарки та системи сепарації

А) Причини вибухонебезпеки

У процесі подрібнення зерна утворюються дрібнодисперсні частинки, які при певній концентрації в повітрі утворюють вибухонебезпечну пилоповітряну суміш. Джерелами запалювання можуть бути: іскри від удару металевих домішок об молотки/деку; перегрів підшипників; електростатичні заряди на повітропроводах; коротке замикання в електрообладнанні; відкритий вогонь або куріння.

Б) Технічні заходи вибухозахисту

Для зниження ризику вибуху пилу необхідно передбачити: магнітний уловлювач на лінії подачі зерна (захист від металевих домішок); заземлення корпусу дробарки, вентилятора, циклонів та повітропроводів для зняття статичної електрики; антистатичні вставки або матеріали у гнучких з'єднаннях повітропроводів; стабільний повітряний режим, який не допускає накопичення пилу в камері та повітропроводах; контроль температури підшипників (періодичний або автоматичний) для запобігання перегріву; використання вибухорозрядних панелей або клапанів на аспіраційних фільтрах (за потреби та залежно від продуктивності); виключення можливості рециркуляції пилу у приміщення без фільтрації.

В) Організаційні заходи вибухозахисту: проведення регулярного очищення повітропроводів і фільтрів від пилових відкладень; контроль за відсутністю сторонніх предметів у бункері; заборона виконання зварювальних робіт поблизу працюючого обладнання; заборона куріння в робочій зоні.

Пожежна безпека

А) Джерела пожежної небезпеки

Пожежна небезпека при роботі дробарки зумовлена: накопиченням пилю та його осіданням на електродвигунах і кабельних лініях; можливим перегрівом підшипників; тертям при перевантаженні ротора; коротким замиканням у системі електроживлення.

Б) Технічні заходи пожежної безпеки

Для запобігання пожежам необхідно: забезпечити справність автоматів захисту та правильний підбір перерізу кабелів; застосовувати тепловий захист електродвигуна (реле перевантаження); забезпечити наявність вогнегасників у зоні установки (порошкових або вуглекислотних); не допускати перегріву вузлів тертя (підшипники, муфти); передбачити швидку зупинку установки при аварійних режимах.

В) Вимоги до приміщення

Приміщення, де розміщено дробарку, повинно мати достатню вентиляцію; мати освітлення, що відповідає вимогам безпеки; бути очищеним від пилю та легкозаймистих матеріалів; мати вільні евакуаційні проходи.

Для забезпечення електробезпеки необхідно: застосовувати захисне заземлення всіх металевих корпусів; використовувати пристрої захисного відключення (за потреби); забезпечити захист кабелів від механічних пошкоджень; виконувати технічне обслуговування електрообладнання згідно з регламентом.

Засоби індивідуального захисту:

Персонал під час роботи з дробаркою повинен застосовувати: респіратор або маску від пилю; захисні окуляри; протишумові навушники; рукавиці; спецодяг та спецвзуття.

Запропоновані заходи з охорони праці, пожежної безпеки та вибухозахисту забезпечують безпечну експлуатацію молоткової дробарки із системою сепарації. Основна увага приділена зменшенню запиленості, попередженню утворення вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей, усуненню джерел запалювання та забезпеченню захисту персоналу від механічних, електричних і акустичних небезпек.

5.2. Оцінка екологічної ефективності

Екологічна ефективність удосконалення молоткової дробарки із системою сепарації оцінюється за сукупністю показників, що характеризують вплив обладнання на умови праці та навколишнє середовище. Для процесу подрібнення зерна основними екологічно значущими чинниками є запиленість повітря, викиди пилу в атмосферу, рівень шуму та вібрації, а також енергоспоживання, яке опосередковано впливає на обсяги викидів парникових газів через споживання електроенергії.

Запропоновані конструктивні удосконалення (оптимізація параметрів вентилятора, повітряного тракту та жалюзійного сепаратора) спрямовані на стабілізацію повітряного режиму, підвищення ефективності відведення продукту та зменшення утворення пилоподібної фракції. Це забезпечує комплексний екологічний ефект.

До основних факторів впливу на довкілля та виробниче середовище належать: утворення пилу в зоні дроблення та транспортування продукту; винос пилу повітряним потоком із системи сепарації при недостатній фільтрації; шум та вібрація, які погіршують умови праці і можуть впливати на прилеглі виробничі приміщення; енергоспоживання, що визначає непрямі викиди CO₂ (через генерацію електроенергії); Відходи та втрати продукту, пов'язані з переподрібненням або осіданням пилу.

Основним екологічним результатом удосконалення є зниження запиленості та скорочення утворення пилоподібної фракції. Це пояснюється тим, що комбінована система сепарації забезпечує своєчасне відведення кондиційної

фракції, що зменшує тривалість перебування частинок у робочій камері; зменшення переподрібнення, яке є головним джерелом надлишкового пилю; стабілізацію повітряного режиму, що знижує неконтрольоване винесення пилю.

У результаті зменшується концентрація пилю в повітрі робочої зони; навантаження на аспіраційні фільтри; ризик утворення вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей.

Екологічний ефект також проявляється через зменшення питомих енерговитрат процесу. Питома енергоємність визначається:

Удосконалення конструкції спрямоване на те, щоб зменшити циркуляцію продукту в камері; підвищити пропускну здатність сепараційного вузла; знизити переподрібнення. Це дозволяє отримати менші питомі витрати енергії на одиницю готового продукту, а отже — зменшити непрямі викиди CO₂.

Для орієнтовної оцінки непрямих викидів застосовують:

При традиційних схемах подрібнення надмірна циркуляція та переподрібнення сприяють утворенню надлишкової пилоподібної фракції; осіданню пилю на поверхнях; втратам продукту при транспортуванні.

Завдяки удосконаленню системи сепарації: скорочується кількість дрібного пилю, що осідає у приміщенні; зменшуються втрати кормового продукту; покращуються санітарні умови виробничої зони.

Удосконалення конструктивних елементів, пов'язаних із балансуванням ротора, жорсткістю вузлів кріплення та стабілізацією навантаження, сприяє зменшенню вібраційного навантаження; зниженню нерівномірності роботи дробарки; покращенню акустичних умов.

Хоча шум є характерним для ударного подрібнення, стабільний режим і зменшення переподрібнення сприяють певному зниженню пікових шумових навантажень.

Отже, удосконалення процесу подрібнення та конструктивних параметрів молоткової дробарки із системою сепарації забезпечує екологічний ефект, який проявляється у зменшенні утворення пилоподібної фракції, зниженні запиленості повітря робочої зони, скороченні втрат продукту та підвищенні

енергоефективності процесу. Стабілізація повітряного режиму та підвищення ефективності сепарації дозволяють знизити навантаження на аспіраційні системи, зменшити ризики вибухонебезпечних ситуацій та покращити санітарно-гігієнічні умови експлуатації обладнання.

5.3. Розрахунок економічної ефективності

Вихідні дані

Даними кваліфікаційної роботи передбачено проект потокової лінії виробництва комбікормів з розробкою молоткової дробарки продуктивністю 6 т/год.

Вихідні дані для розрахунку передбачені завданням і зібрані на ТОВ «Лохвицький комбікормовий завод» приведені в таблиці 5.1

Розрахунок одноразових капітальних витрат

Вартість придбання обладнання визначається за формулою

$$K = K_0 + K_T + K_C + K_{\text{ПР}} + K_M \quad (5.1)$$

де K_0 - вартість придбання обладнання

базовий варіант: $K_1 = 49500$ грн; розрахунковий варіант: $K_2 = 45000$ грн.

K_T - транспортні витрати (5% від вартості обладнання)

$$K_T = K_0 \cdot 0,05 \quad (5.2)$$

базовий варіант $K_{T1} = 49500 \cdot 0,05 = 2475$ грн;

розрахунковий варіант $K_{T2} = 45000 \cdot 0,05 = 2250$ грн.

K_C - заготівельна складність (1,25% від вартості обладнання)

$$K_C = K_0 \cdot 0,0125 \quad (5.3)$$

базовий варіант $K_{C1} = 49500 \cdot 0,0125 = 618,75$ грн.

розрахунковий варіант $K_{C2} = 45000 \cdot 0,0125 = 562,5$ грн.

Таблиця 5.1 Вихідні дані

Показники	Кількість
Вартість придбання запроєктованої молоткової дробарки для зерна А1-ДМ2Р-22В, грн.	45000
Вартість придбання порівнювальної молоткової дробарки для зерна А1-ДМ2Р-75М, грн.	49500
Норма амортизаційних відрахувань, % від вартості обладнання	15
Річний фонд роботи обладнання, діб.	240
Потужність двигунів на обладнанні, кВт*год:	
- Базовий варіант	75
- Розрахунковий варіант	75
Тариф за 1 кВт*год., грн..	1,03
Коефіцієнт використання обладнання	0,8
Кількість робочих змін	2
Амортизаційні відрахування, % до вартості обладнання	15,0
Витрати на поточний ремонт, % від суми амортизації	50,0
Транспортні витрати, % до вартості придбання обладнання	5,0
Заготівельно-складські витрати, % до вартості придбання обладнання	1,25
Проектні роботи, % до вартості придбання обладнання	4,0
Монтажні роботи, % до вартості придбання обладнання	20,0
Продуктивність обладнання, т/год.:	
- Базовий варіант	5,0
- Розрахунковий варіант	6,0
Тривалість зміни, год.	12

$K_{\text{ПР}}$ - проекти роботи (4% від вартості обладнання)

$$K_{\text{ПР}} = K_0 \cdot 0,04 \quad (5.4)$$

базовий варіант $K_{\text{ПР1}} = 49500 \cdot 0,04 = 1980$ грн.

розрахунковий варіант $K_{\text{ПР2}} = 45000 \cdot 0,04 = 1800$ грн.

$K_{\text{М}}$ - монтажні роботи (20% від вартості обладнання)

$$K_{\text{М}} = K_0 \cdot 0,2 \quad (5.5)$$

базовий варіант $K_{\text{М1}} = 49500 \cdot 0,2 = 9900$ грн.

розрахунковий варіант $K_{\text{М2}} = 45000 \cdot 0,2 = 9000$ грн.

Підставляємо дані у формулу (5.1)

базовий варіант $K_1 = 49500 + 2475 + 618,75 + 1980 + 9900 =$

64473,75 грн.

розрахунковий варіант $K_2 = 45000 + 2250 + 562,5 + 1800 + 9000 = 58612,5$ грн.

Розрахуємо річний обсяг виробництва:

$$Q = q \cdot n_{зм} \cdot t_{зм} \cdot P_{п} \cdot k \quad (5.6)$$

де q - годинна продуктивність дробарки, т;

$n_{зм}$ – кількість робочих змін;

$t_{зм}$ – тривалість роботи обладнання за зміну, год.;

$P_{п}$ - робочий період, діб.

k – коефіцієнт використання обладнання

$$Q_1 = 5 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 240 \cdot 0,8 = 23040 \text{ т}$$

$$Q_2 = 6 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 240 \cdot 0,8 = 27648 \text{ т}$$

Визначимо питомі капітальні вкладення на 1 т

$$K_{п} = \frac{K}{Q} \quad (5.7)$$

базовий варіант $K_{п1} = \frac{64473,75}{23040} = 2,798$ грн.

розрахунковий варіант $K_{п2} = \frac{58612,5}{27648} = 2,119$ грн.

Розрахунок зміни поточних витрат

Витрати електроенергії:

$$V_{ЕЛ.} = \frac{(N_{ДВ} * T * K_{ЕБ} * K_{ИТ} * Ц_{Е})}{\cos} \quad (5.8)$$

де $N_{ДВ}$ - сумарна потужність вилучених встановлених або вилучених двигунів;

$$N_{ДВ1} = 75 \text{ кВт.}$$

$$N_{ДВ2} = 75 \text{ кВт.}$$

T - час роботи двигуна;

$$T = 12 * 2 * 240 = 5760 \text{ год.}$$

$K_{ЕБ}$ - коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі заводу; $K_{ЕБ} = 1,06$.

$K_{\text{ИТ}}$ - коефіцієнт використання потужності устаткування; $K_{\text{ИТ}} = 0,8$.

\cos - коефіцієнт корисної дії електродвигуна; $\cos = 0,9$.

Отже, витрати електроенергії:

$$\text{базовий варіант } V_{\text{ЕЛ.1}} = \frac{75 \cdot 5760 \cdot 1,06 \cdot 0,8 \cdot 1,03}{0,9} = 419251,2 \text{ грн.}$$

на 1т $419251,2/23040=18,197$ грн.

$$\text{розрахунковий варіант } V_{\text{ЕЛ.2}} = \frac{75 \cdot 5760 \cdot 1,06 \cdot 0,8 \cdot 1,03}{0,9} = 419251,2 \text{ грн.}$$

на 1т $419251,2/27648=15,164$ грн.

Витрати на амортизацію обладнання:

$$A = \frac{\Phi \cdot N_A}{100} \quad (5.9)$$

де Φ - вартість обладнання; $\Phi = K$

N_A - річна норма амортизаційних відрахувань; $N_A = 15\%$

$$\text{базовий варіант } A_1 = \frac{64473,75 \cdot 15}{100} = 9671,063 \text{ грн. на 1т } 9671,063/23040 = 0,419 \text{ грн.}$$

$$\text{розрахунковий варіант } A_2 = \frac{58612,5 \cdot 15}{100} = 8791,875 \text{ грн. на 1т } 8791,875/27648 = 0,318 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт:

$$V_{\text{П.Р.}} = A \cdot 0,5 \quad (5.10)$$

$$\text{базовий варіант } V_{\text{П.Р.1}} = 9671,063 \cdot 0,5 = 4835,532 \text{ грн. на 1т } 4835,532/23040 = 0,209 \text{ грн.}$$

$$\text{розрахунковий варіант } V_{\text{П.Р.2}} = 8791,875 \cdot 0,5 = 4395,938 \text{ грн. на 1т } 4395,938/27648 = 0,159 \text{ грн.}$$

Витрати по змінних статтях калькуляції приведені в таблиці 5.2

Таблиця 5.2 Витрати по змінних статтях калькуляції

Статті витрат	Базовий варіант	Розрахунковий варіант	Зміни
Витрати електроенергії	18,197	15,164	-3,033
Амортизація обладнання	0,419	0,318	-0,101
Витрати на поточний ремонт	0,209	0,159	-0,05
Всього	18,825	15,641	-3,184

Визначення основних показників економічної ефективності

Визначимо річний економічний ефект за формулою

$$E_p = ((C_1 + E_n \cdot K_{п1}) - (C_2 + E_n \cdot K_{п2})) \cdot Q_2 \quad (5.11)$$

де C_1 ; C_2 - собівартість продукції відповідно базовий і розрахунковий варіант;

$K_{п1}$; $K_{п2}$ – питомі капітальні вкладення відповідно базовий і розрахунковий варіант;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності; $E_n = 0,15$;

Q_2 – розрахунковий обсяг виробництва продукції.

$E_p = ((18,825 + 0,15 \cdot 2,798) - (15,641 + 0,15 \cdot 2,119)) \cdot 27648 = 90847,18$ грн. = 90,85 тис. грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано аналіз сучасного стану подрібнення зерна в молоткових дробарках та встановлено, що основними проблемами існуючих конструкцій є переподрібнення кондиційної фракції, підвищене утворення пилу, нестабільність повітряного режиму, нерівномірність гранулометричного складу та значні питомі енерговитрати.

Обґрунтовано, що найбільш перспективним напрямом підвищення ефективності молоткових дробарок є не локальні зміни окремих деталей, а комплексна оптимізація конструктивних параметрів вузлів, які визначають циркуляцію продукту та процес його відведення, зокрема вентилятора, повітряного тракту та сепараційного елемента.

Встановлено, що система сепарації повинна розглядатися як функціональна частина процесу подрібнення, оскільки вона визначає тривалість перебування частинок у робочій камері, рівень переподрібнення та кінцеву якість продукту. Найбільш ефективним є застосування комбінованої схеми сепарації, яка поєднує решітне калібрування з повітряним відведенням продукту.

Виконано теоретичне обґрунтування впливу режимних параметрів (частоти обертання ротора, інтенсивності подачі матеріалу та вологості зерна) на продуктивність, якість подрібнення і енергоємність процесу. Показано, що для забезпечення заданого фракційного складу необхідним є узгодження режимів роботи ротора з можливостями системи сепарації.

Розроблено принципи вибору факторів оптимізації та сформовано факторний простір дослідження, який включає конструктивні параметри вентилятора (кут установки лопаток, геометрія вхідного отвору, кількість і форма лопаток), параметри повітряного тракту (зазори), а також геометричні характеристики сепараційного вузла (площа живого перерізу, схема руху повітря).

Виконано розрахунок приводу та енергетичних показників молоткової дробарки, визначено основні залежності для оцінювання споживаної потужності,

крутного моменту та питомої енергоємності процесу, що дозволяє обґрунтувати вибір електроприводу і здійснювати порівняння базової та удосконаленої конструкцій.

Розроблено програму експериментальних досліджень, визначено мету, завдання, план експерименту, а також систему показників оцінювання ефективності, яка включає продуктивність, гранулометричний склад продукту, частку пилоподібної фракції, ефективність сепарації та питому енергоємність.

Наведено опис експериментальної установки та методики вимірювань, які забезпечують визначення технологічних, енергетичних та аеродинамічних параметрів роботи дробарки, зокрема витрати повітря, тиску в повітряному тракті, споживаної потужності та показників якості подрібнення за результатами ситового аналізу.

Експериментально підтверджено, що режими роботи дробарки істотно впливають на продуктивність та якість подрібнення, а ефективність сепарації визначається параметрами повітряного потоку та геометрією сепараційного вузла. Показано, що оптимальний повітряний режим забезпечує підвищення продуктивності та зниження переподрібнення при збереженні заданого фракційного складу.

Запропоновано підхід до визначення раціональних параметрів роботи дробарки на основі багатокритеріальної оцінки, що передбачає мінімізацію питомих енерговитрат при забезпеченні заданої якості подрібнення, ефективності сепарації та стабільності робочого процесу.

Оцінено екологічну ефективність удосконалення, яка проявляється у зниженні утворення пилоподібної фракції, зменшенні запиленості робочої зони, скороченні втрат продукту та зниженні непрямих викидів, пов'язаних зі зменшенням питомого енергоспоживання.

Розроблено комплекс заходів з охорони праці, пожежної безпеки та вибухозахисту для молоткової дробарки з пневматичною системою транспортування і сепарації, що забезпечує безпечну експлуатацію обладнання та зниження ризиків, пов'язаних із пилоповітряними сумішами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 2420-94. Зернодробарки молоткові. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994. 14 с.
2. ДСТУ 4603:2006. Комбікорми повнораціонні для сільськогосподарської птиці. Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 22 с..
3. ДСТУ EN 60335-2-102:2014. Прилади побутові та аналогічні електричні. Безпека. Частина 2-102. Додаткові вимоги до приладів, що працюють на газовому, рідкому та твердому паливі та мають електричні з'єднання. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 28 с..
4. ДСанПіН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ: МОЗ України, 1999. 24 с..
5. Алієв Є. Б. Розвиток наукових основ процесів механіко-пневматичної сепарації насіння зернових культур: дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11. Глеваха, 2021. 415 с..
6. Брагінець М. В. Підвищення ефективності процесу подрібнення зерна в молотковій дробарці з деково-решітною поверхнею : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Глеваха, 2015. 172 с..
7. Войтюк Д. Г., Барановський В. М., Булгаков В. М. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку. Київ: Вища освіта, 2005. 559 с..
8. Герасимчук А. А. Механізація приготування кормів. Навчальний посібник. Житомир: ЖНАЕУ, 2016. 240 с..
9. Голуб Г. А., Марус О. А. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів молоткової дробарки зерна. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2018. Вип. 22. С. 112–121..
10. Демидко М. Є., Осіпов Ю. П. Молоткові дробарки для сільського господарства. Дніпро: Пороги, 2009. 156 с..

11. Іпатов О. С. Аналіз повітряного режиму молоткових дробарок з пневматичним вивантаженням продукту. *Наукові праці ОНАХТ*. 2014. Т. 46, Вип. 1. С. 118–123..
12. Кравчук В. І. Техніко-технологічне оновлення агропромислового комплексу України. Дослідницьке: ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого», 2010. 148 с..
13. Купчук І. М. Обґрунтування параметрів вібраційно-дискового подрібнювача коренебульбоплодів : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Вінниця, 2018. 214 с..
14. Мельник В. І. Енергозберігаючі технології та машини для приготування кормів. Харків: ХНТУСГ, 2011. 305 с..
15. Панченко О. М., Савченко В. В. Пневмотранспортні системи сільськогосподарського призначення. Київ: Урожай, 2012. 192 с..
16. Ревенко І. І. Процеси та обладнання для подрібнення кормів. Теорія і практика. Суми: Університетська книга, 2014. 288 с..
17. Тіщенко Л. М. Пневмовисівні системи посівних машин. Харків: Міськдрук, 2010. 216 с..
18. Федоренко В. Ф. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Київ: Основа, 2013. 320 с..
19. Шеченко І. А. Теоретичні основи пневматичного транспортування та сепарації зернових матеріалів. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2015. Вип. 159. С. 45–52..
20. Ялпачик Г. С. Технологічне обладнання підприємств з переробки продукції рослинництва. Мелітополь: Люкс, 2010. 412 с..
21. Buhler Group. Hammer Mill DFZC: High-capacity grinding for the feed and food industries. URL: <https://www.buhlergroup.com/> (дата звернення: 11.02.2026)..
22. ANDRITZ Feed & Biofuel. Grinding solutions for animal feed production. URL: <https://www.andritz.com/> (дата звернення: 11.02.2026)..