

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

рівня вищої освіти «Магістр» на тему:

**Обґрунтування конструкційно-технологічних
параметрів молоткової дробарки зерна**

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-1-24
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Лускань Максим Сергійович

Керівник: _____ Дудін Володимир Юрійович

Рецензент: _____ Потеруха Борис Тарасович

Дніпро 2024

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(позва кафедри)

доцент

(позва посади)

Дудіп В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«24» жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

_____ Лукашко Максиму Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів молоткової дробарки зерна

керівник роботи: Дудіп Володимир Юрійович, к.т.п., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

« 24 » жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025 р.

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

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз стану питання і завдання дослідження. 2. Теоретичне обґрунтування параметрів молоткового подрібнювача. 3. Експериментальні дослідження. 4. Охорона праці. 5. Економічна оцінка розробленого подрібнювача. Загальні висновки. Бібліографічний список

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

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|----------------------|---|----------------|------------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| 1-5 Нормоконтроль | Дудін В.Ю., доцент Івлєв В.В., доцент | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання: 24.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

_____ (підпис)

Лускань М.С.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Дудін В.Ю.

_____ (прізвище та ініціали)

Лускань М.С. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів молоткової дробарки зерна /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Дипломна кваліфікаційна робота включає вступ та п'ять змістовних розділів, у яких здійснено комплексне удосконалення конструкції молоткової дробарки для подрібнення кормових матеріалів. В ході дослідження проведено аналітичний огляд існуючих технічних рішень, виконано техніко-технологічне обґрунтування вибору основних параметрів та розроблено конструкцію дослідного зразка малогабаритного подрібнювача з використанням монолітних ударних молотків, що забезпечують підвищення надійності, ресурсу роботи та стабільності якісних показників подрібнення.

Окрему увагу приділено питанням охорони праці та техніки безпеки при експлуатації дробильного обладнання на кормоцехах. Наведено рекомендаційні заходи щодо мінімізації виробничих ризиків, зниження травмонебезпечних факторів, підвищення ергономічності та безпечних умов праці обслуговуючого персоналу.

Також виконано економічне обґрунтування ефективності впровадження удосконаленого подрібнювача у виробничих умовах, проведено порівняння із серійними аналогами, визначено техніко-економічні показники, окупність та економічні переваги запропонованої модернізації.

Ключові слова: подрібнення, корм, молоток, молоткова дробарка, продуктивність, енергія.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ | 8 |
| 1 Аналіз стану питання і завдання дослідження | 11 |
| 1.1 Вимоги до процесу подрібнення фуражного зерна | 11 |
| 1.2 Фактори, що впливають на якість подрібнення зерна молотковими дробарками | 15 |
| 1.3 Аналіз способів подрібнення фуражного зерна | 16 |
| 1.4 Класифікація молоткових дробарок, що застосовуються у виробництві комбікормів | 18 |
| 1.5 Аналіз роботи молоткових дробарок з горизонтальним розташуванням ротора та їх недоліки | 20 |
| 1.6 Висновки по розділу | 21 |
| 2 Теоретичне обґрунтування параметрів молоткового подрібнювача | 23 |
| 2.1 Особливості динаміки дробарок | 23 |
| 2.2 Втрати енергії у шарнірах молотків при їх коливаннях | 24 |
| 2.3 Дослідження непродуктивних витрат енергії через вібрацію продуктово-повітряного шару | 26 |
| 2.4 Висновки по розділу | 35 |
| 3 Експериментальні дослідження | 36 |
| 3.1 Вибір факторів процесу подрібнення | 36 |
| 3.2 Відбір факторів для дослідження в експерименті | 39 |
| 3.3 Опис експериментальної установки | 40 |
| 3.4 Результати експериментальних досліджень | 43 |
| 3.5 Висновки по розділу | 47 |
| 4 Охорона праці | 49 |

| | |
|--|----|
| 4.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі з молотковою дробаркою | 49 |
| 4.2 Проект інструкції з охорони праці при роботі з молотковим подрібнювачем концентрованих кормів | 50 |
| 4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях | 53 |
| 4.4 Висновки по розділу | 55 |
| 5 Економічна оцінка розробленого подрібнювача | 57 |
| 5.1 Вихідні дані | 57 |
| 5.2 Розрахунок показників економічної ефективності | 57 |
| 5.3 Висновки по розділу | 59 |
| Загальні висновки | 60 |
| Бібліографія | 61 |
| Додатки | 65 |

ВСТУП

Забезпечення високої продуктивності тваринництва значною мірою залежить від якості та структури кормів, зокрема ступеня подрібнення зернових компонентів комбікормів. Ефективність процесу подрібнення визначає однорідність кормових сумішей, засвоюваність поживних речовин, енергетичні витрати та загальний економічний результат виробництва. На сучасному етапі розвитку аграрного сектору України особливого значення набуває впровадження енергоощадних та надійних технологічних рішень у сфері механізації кормоприготування, що здатні забезпечити стабільну якість подрібнення при мінімальних витратах ресурсів.

Молоткові дробарки є найбільш поширеним типом подрібнювального обладнання у тваринницьких господарствах та комбікормових лініях, проте їх конструктивні параметри часто не забезпечують необхідного балансу між якістю продукту, продуктивністю та довговічністю робочих органів. Невідповідність режимів роботи і геометрії ударних елементів фізико-механічним властивостям зерна призводить до підвищених енергетичних витрат, нерівномірності фракційного складу та прискороного зношування вузлів. Тому актуальним завданням є теоретичне та експериментальне обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів молоткових дробарок, що дозволить підвищити ефективність процесу подрібнення, зменшити собівартість виробництва комбікормів та покращити техніко-економічні показники галузі.

Метою магістерської роботи є обґрунтування оптимальних конструкційних та технологічних параметрів молоткової дробарки для подрібнення зернових кормів з підвищенням енергоефективності та покращенням якісних показників кінцевого продукту. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс завдань: виконати аналіз сучасних технічних рішень у галузі подрібнення зернових; визначити конструктивні параметри ударних робочих органів; розробити удосконалену конструкцію дробарки; провести розрахунки параметрів процесу подрібнення та енерговитрат; здійснити оцінку ефективності запропонованого технічного рішення.

Наукова новизна одержаних результатів магістерської роботи полягає у обґрунтуванні взаємозв'язків геометричних характеристик молотків, траєкторій руху частинок зерна, процесів руйнування та показників якості подрібнення при різних режимах роботи дробарки. Практичне значення полягає у підвищенні ефективності експлуатації подрібнювального обладнання, можливості впровадження розробленого рішення в умовах фермерських та промислових господарств, а також зниженні експлуатаційних витрат при виробництві комбікормів.

Метою дослідження є обґрунтування та встановлення раціональних конструкційно-технологічних параметрів молоткової дробарки для подрібнення зернових кормових матеріалів, що забезпечують підвищення енергоефективності процесу, стабільність фракційного складу та покращення якісних та техніко-економічних показників роботи обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних конструкцій молоткових дробарок та визначити їх переваги, недоліки та проблемні технічні аспекти, що потребують удосконалення.
2. Дослідити вплив конструкційних параметрів робочих органів (геометрія молотків, їх маса, розташування, швидкість обертання ротора, тип решета) на якість та ефективність подрібнення зерна.
3. Розробити конструкцію удосконаленого дослідного зразка молоткової дробарки та обґрунтувати вибір її основних конструктивних елементів.
4. Провести оцінку показників продуктивності та фракційного складу подрібненого матеріалу при різних режимах роботи.
5. Розробити заходи щодо підвищення безпеки та покращення умов охорони праці при експлуатації дробарки у виробничих умовах.
6. Здійснити техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження удосконаленої конструкції дробарки та оцінити економічний ефект від її застосування.

Об'єктом дослідження є процес подрібнення зернових кормових матеріалів у молоткових дробарках.

Предметом дослідження є конструкційні та технологічні параметри молоткової дробарки, які впливають на ефективність подрібнення, енерговитрати, фракційний склад та якість отриманого подрібненого продукту.

У процесі виконання роботи застосовувалися аналітичні, розрахунково-технічні, порівняльні та експериментальні методи дослідження. Проведено аналіз науково-технічної та патентної літератури з питань подрібнення кормової сировини, виконано конструкційно-технологічні розрахунки робочих органів дробарки, математичне моделювання параметрів процесу подрібнення, а також порівняльну оцінку одержаних результатів із серійними зразками обладнання.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Вимоги до процесу подрібнення фуражного зерна

Формування якісної та збалансованої кормової бази є важливою умовою ефективного розвитку тваринництва. Зернові корми, які містять високу концентрацію енергетичних та поживних речовин, займають ключове місце у раціоні сільськогосподарських тварин.

Комбікорм визначають як однорідну суміш різних кормових компонентів, складену відповідно до біологічних потреб тварин певного виду, віку та напрямку продуктивності. Основною метою комбікормів є забезпечення організму достатнім рівнем енергії, білка, макро- і мікроелементів, вітамінів та інших важливих біологічно активних речовин згідно з нормами годівлі.

Головним зерновим компонентом концентрованих кормів є злакові культури, серед яких найбільш поширені ячмінь та пшениця. Корми рослинного і тваринного походження містять комплекс поживних речовин, необхідних для виробництва м'яса, молока, яєць, вовни та пір'я. Основними поживними складовими зернових кормів є вуглеводи, жири та білки. Зерно характеризується високою поживною цінністю, адже містить значний вміст легкозасвоюваних вуглеводів, що забезпечують до 0,95–1,36 кормових одиниць на 1 кг продукту. Близько двох третин маси злакового зерна становить крохмаль.

Однією з найважливіших операцій у виробництві комбікормів є подрібнення зерна та інших компонентів кормосировини. Завдяки подрібненню збільшується площа поверхні частинок корму, що сприяє більш інтенсивному впливу ферментів та прискорює процес травлення. Крім того, більш дрібні частинки легше пережовуються, швидше засвоюються та раціональніше перетравлюються тваринами.

Величина фракції подрібненого зерна має істотний вплив на продуктивність тварин. Доведено, що використання кормів з оптимальним розміром частинок забезпечує кращу засвоюваність поживних речовин і позитивно впливає на продуктивність. Разом з тим надмірно дрібний помел може негативно позначатися

на стані шлунково-кишкового тракту, зокрема у свиней і птиці, що потребує обґрунтованого підбору оптимальних розмірів частинок відповідно до виду та віку тварин.

Середньоважливий рівень помелу рекомендується при годівлі великої рогатої худоби. Для годівлі свиней доцільно використовувати дрібний ступінь подрібнення, оскільки вони не здійснюють значного пережовування корму. У птахівниці рекомендовано застосовувати крупніший помел із диференціацією за розміром частинок залежно від віку птиці та технології годівлі.

Таким чином, раціональна крупність подрібнення зерна є необхідною умовою ефективного функціонування травної системи тварин та отримання високих показників продуктивності. Тому розмір частинок подрібненої сировини для комбикормів регламентується нормами годівлі та технологічними вимогами.

У стандартах та рекомендаціях зоотехнії встановлено допустимі значення фракційного складу подрібненого корму для різних видів і вікових груп тварин, які визначаються за результатами ситового аналізу (таблиця 1.1).

Для визначення якісних характеристик подрібненого продукту комбикормового виробництва використовується ситовий аналіз, що дозволяє оцінити гранулометричний склад матеріалу. Суть методу полягає у визначенні частки залишку на ситах з різним діаметром отворів. Для цього попередньо відібрана навіска (як правило, 100 г) просіюється через комплект лабораторних сит із діаметром отворів 5, 4, 3, 2 та 1 мм із наступним визначенням відсоткового вмісту частинок кожної фракції.

Отримані результати дають можливість визначити модуль крупності та порівняти його з нормативними значеннями, рекомендованими для певного виду тварин і їх вікової групи. Таким чином забезпечується оптимальна структура помелу, що сприяє підвищенню засвоюваності кормів, покращенню продуктивності та збереженню здоров'я тварин.

Тонкість подрібнення визначають шляхом зважування залишків на ситі після просіювання відібраної навіски матеріалу. Відсотковий вміст залишку на ситах з відповідними діаметрами отворів регламентується вимогами стандартів. Після

проведення ситового аналізу подрібнений матеріал використовують для годівлі тварин з урахуванням їх зоотехнічних та вікових особливостей.

Таблиця 1.1 – Рекомендована крупність подрібнення зернових компонентів комбікормів для різних видів та вікових груп тварин

| Вид тварин / група | Залишок на ситі з діаметром отворів, мм |
|---|--|
| | Ø 3 мм |
| Велика рогата худоба | |
| телята до 4 місяців та молодняк 4–18 міс. | 10 % |
| бугаї-виробники, дійні корови, тварини на відгодівлі | 25 % |
| Вівці | |
| ягнята до 4 місяців | 5 % |
| молодняк старше 4 місяців, барани-виробники та матки | 12 % |
| Свині | |
| поросята 10–60 діб | 0,5 % |
| поросята 2–4 місяці | 5 % |
| дорослі свині (м'ясний та беконний відгодівельний напрям) | 5 % |
| Птиця | |
| молодняк та доросла птиця, бройлери | 2 % (не менше) |
| курчата, каченята, індичата, гусята віком 1–4 тижні | 5 % |

До тонкого помелу відносять продукт, у якого залишок на ситі з отвором 2 мм не перевищує 5% і відсутній залишок на ситі з отвором 3 мм. Середній ступінь подрібнення встановлюють при залишку менш ніж 12% на ситі з діаметром отворів

3 мм і відсутності залишку на ситі 5 мм. Грубим помелом вважається подрібнений продукт, у якого залишок на ситі 5 мм становить менше 5% та відсутнє ціле зерно.

Ступінь подрібнення зернової сировини умовно поділяють на три групи:

- тонкий (0,2...1,0 мм);
- середній (1,0...1,8 мм);
- грубий (1,8...2,6 мм).

На спеціалізованих комбікормових підприємствах прийнято виділяти три групи зернистості частинок. Частинки розміром 0,55–0,60 мм відносять до першої групи; 0,8–1,0 мм – до другої групи; 1,4–1,7 мм – до третьої групи.

Надмірне подрібнення зерна та підвищений вміст пилоподібної фракції може збільшувати енерговитрати процесу, негативно впливати на технологію приготування корму, погіршувати санітарно-гігієнічні умови праці та призводити до зниження продуктивності тварин і погіршення їх здоров'я.

Всі зазначені показники визначають рівень ефективності роботи подрібнювального обладнання та його енергоємність. Зоотехнічні вимоги до ступеня подрібнення є однаковими за принципами для всіх видів кормів, однак встановлюються з урахуванням специфіки виду тварин.

Основним показником якості подрібненого продукту є рівномірність фракційного складу. Чим рівномірніший розподіл частинок за розмірами, тим вищою є однорідність готового корму та ефективність його засвоєння тваринами.

При подрібненні зерна слід враховувати фізико-механічні властивості матеріалу, такі як розміри зерен, форма, стан поверхні, а також технічні характеристики: вологість, насипна густина, злежуваність, здатність до самосортування, кут природного укусу, коефіцієнт тертя, твердість.

Якість результатів подрібнення характеризують такі основні групи показників:

1. Показники, що відображають розмірні характеристики зернового продукту:
 - середній розмір частинок;
 - площа поверхні на одиницю маси;
 - ступінь подрібнення.
2. Показники, що відображають якість фракційного складу:

- зернистість продукту;
 - частка фракцій певного розміру.
3. Показники енергоємності процесу:
- витрати енергії на одиницю приросту нової поверхні;
 - витрата енергії на 1 тону сировини.
4. Показники продуктивності:
- продуктивність дробарки (маса продукту за одиницю часу).

1.2 Фактори, що впливають на якість подрібнення зерна молотковими дробарками

Якість подрібнення зернової сировини у молоткових дробарках формується під впливом комплексу конструкційних, технологічних та фізико-механічних факторів. Від їх взаємодії залежить як ступінь подрібнення, так і стабільність гранулометричного складу готового продукту, енергоефективність процесу та загальна продуктивність обладнання.

До основних факторів, що визначають ефективність роботи молоткових дробарок, належать:

- **конструкційні параметри робочих органів** (масогабаритні характеристики молотків, їх форма, товщина, розміщення на роторі, кількість рядів, матеріал виготовлення);
- **геометричні характеристики та тип решета** (діаметр і форма отворів, ступінь відкритості, зносостійкість);
- **кінематичні та режимні параметри дробарки** (частота обертання ротора, лінійна швидкість робочих кромek молотків, продуктивність подачі сировини);
- **фізико-механічні властивості зерна** (вологість, твердість, щільність, структурна цілісність оболонки);
- **стан робочих поверхонь та ступінь зношення робочих органів** (ступінь затуплення молотків, деформація поверхонь решета);

- **схема подачі та рівномірність надходження продукту в робочу зону** (безперервність, рівномірність та стабільність потоку).

Значний вплив на ступінь подрібнення має швидкість руху робочих органів. З підвищенням частоти обертання ротора збільшується кінетична енергія удару по зерну, проте надмірне зростання швидкості призводить до збільшення енерговитрат, посиленого абразивного зношування молотків та решіт, а також до утворення пилової фракції, яка негативно впливає на якість корму.

Оптимальні режимні параметри встановлюють з урахуванням властивостей зернової сировини та необхідного фракційного складу. Вологість зерна є одним з ключових показників, оскільки надмірно сухе зерно піддається крихкому руйнуванню, а занадто вологе – погіршує продуктивність та може призводити до залипання робочої зони.

Таким чином, якість та ефективність процесу подрібнення у молоткових дробарках забезпечується оптимальним поєднанням конструкційних рішень, режимних параметрів та властивостей вихідної сировини. Раціональний вибір даних параметрів дозволяє забезпечити високу однорідність частинок, знизити енерговитрати та підвищити ресурс роботи обладнання.

1.3 Аналіз способів подрібнення фуражного зерна

У виробничих умовах існує декілька способів подрібнення фуражного зерна, які класифікують залежно від характеру механічного впливу на матеріал. До основних способів відносять роздавлювання, розколювання, розламування, різання, вільний удар, стискуючий удар, стирання та розпилювання. Дані види руйнування зернового матеріалу є найбільш поширеними та широко описані у науковій літературі.

Ефективність процесу подрібнення значною мірою визначається вибором способу руйнування зерна. На рішення впливають фізико-механічні властивості матеріалу, структура зернівки, а також вимоги до якості кінцевого продукту. Наприклад, вільний удар і удар зі зжаттям частіше застосовують для отримання

дрібного ступеня подрібнення, тоді як методи стирання та різання переважно використовують при отриманні крупніших фракцій.

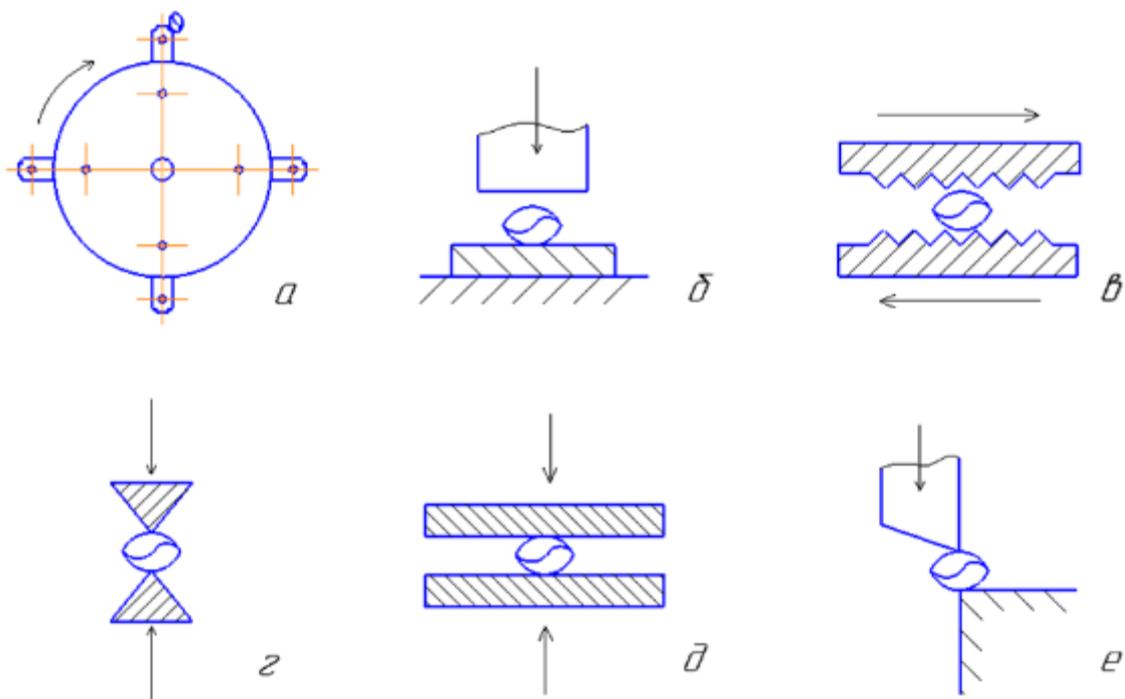


Рисунок 1.1 - Схеми способів подрібнення фуражного зерна: а) вільний удар; б) обмежений удар; в) стирання; г) сколювання; д) роздавлювання; е) різання.

Структура фуражного зерна є складною комбінацією оболонки та ендосперму, які утворюють міцну просторову систему. Оболонка виконує роль каркасу зі значною міцністю і пластичністю, тоді як внутрішні частини зерна мають більш в'язкі властивості. Одним із ключових критеріїв якості зерна є структура та твердість ендосперму, оскільки саме цей фактор суттєво впливає на результати подрібнення та подальше використання кормового продукту.

Зважаючи на специфіку структури зернової сировини, найбільш розповсюдженим способом руйнування зернового матеріалу є ударний метод подрібнення. Цей процес реалізується за рахунок багаторазових ударів молотків, що обертаються з високою швидкістю, по зерну, додаткових ударів частинок об деку та взаємодії частинок між собою, що забезпечує ударно-стираючий ефект.

Молоткові дробарки, що працюють на принципі ударного руйнування, характеризуються порівняно низькою вартістю, меншою потребою у встановленій потужності та простотою обслуговування у порівнянні з іншими типами дробарок, наприклад валковими. Саме тому у тваринницьких та комбікормових господарствах найбільш широке застосування отримали дробарки ударного типу, зокрема молоткові дробарки з горизонтальним розміщенням ротора, які відзначаються високою надійністю, доступністю та технологічною гнучкістю.

1.4 Класифікація молоткових дробарок, що застосовуються у виробництві комбікормів

Молоткові дробарки, що використовуються для подрібнення фуражного зерна у кормовиробництві, характеризуються широкою номенклатурою конструкцій та різняться між собою за рядом технічних і технологічних ознак. Класифікація таких дробарок дозволяє систематизувати обладнання, визначити оптимальні параметри для конкретних умов виробництва та забезпечити правильний вибір обладнання для заданого ступеня подрібнення.

На рис. 1.2 представлена класифікація молоткових дробарок, яка здійснюється за рядом конструкційно-технологічних ознак, що визначають особливості організації робочого процесу, способи подачі та відведення матеріалу, а також розташування завантажувальних елементів.

За організацією робочого процесу молоткові дробарки поділяються на **відкриті** та **закриті**. Відкриті конструкції переважно застосовуються для конкретних виробничих цілей, тобто мають **спеціалізований** характер. Закриті конструкції забезпечують більш універсальний характер застосування в комбікормовому виробництві, що дозволяє використовувати дробарку для ширшого спектра зернових компонентів.

За способом подачі матеріалу дробарки поділяють на такі, що працюють **самотоком**, та дробарки з **примусовою подачею**. Спосіб надходження сировини безпосередньо впливає на рівномірність навантаження робочих органів та стабільність технологічного процесу.

За розташуванням завантажувальної горловини розрізняють **радіальне, тангенційне, центральне** та **бічне** введення матеріалу. Від правильного вибору положення завантажувальної горловини залежать траєкторії руху частинок у робочій камері, характер ударної взаємодії з молотками та енергоефективність процесу.

За способом відведення матеріалу дробарки класифікують на конструкції із самоплинним видаленням подрібненої сировини та дробарки із **примусовим відведенням**, що здійснюється повітряним потоком барабана, потоком вентилятора або за допомогою транспортера. Вибір способу відведення залежить від необхідної продуктивності лінії та організації технологічного процесу на підприємстві.

Представлена класифікація дозволяє систематизувати різновиди молоткових дробарок та обґрунтувати вибір конструкції залежно від умов виробництва, типу перероблюваної сировини та вимог до ступеня подрібнення.

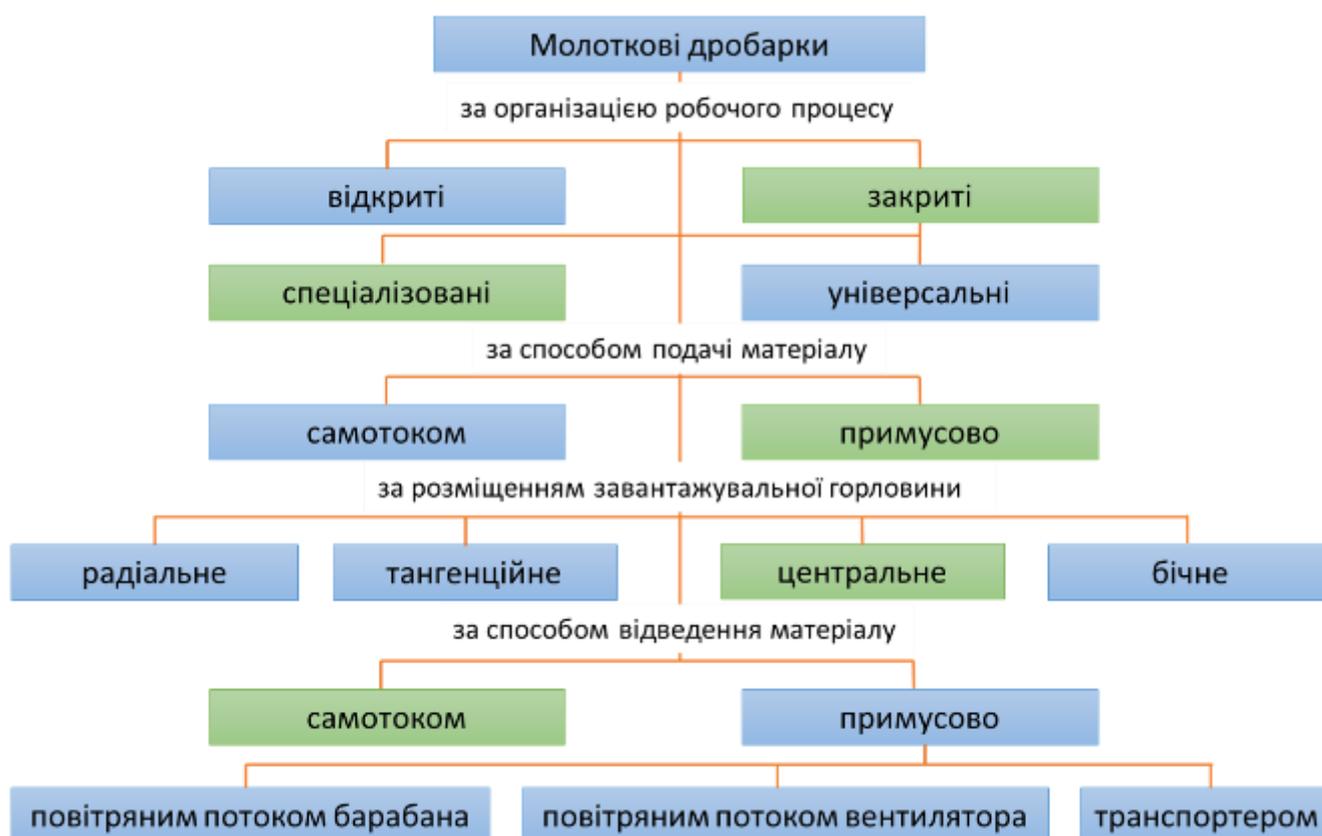


Рисунок 1.2 – Класифікація молоткових дробарок

Класифікація дозволяє обґрунтовано визначити найбільш доцільний тип дробарки для конкретних умов виробництва залежно від обсягів переробки, типу сировини, необхідного ступеня помелу та енергоефективності процесу.

1.5 Аналіз роботи молоткових дробарок з горизонтальним розташуванням ротора та їх недоліки

Молоткові дробарки з горизонтальним розташуванням ротора отримали найширше поширення у сільськогосподарському виробництві завдяки високій продуктивності, простоті конструкції, доступності обслуговування та універсальності застосування. Принцип їх роботи базується на багаторазовому ударному та ударно-стираному впливі молотків, які обертаються на великій лінійній швидкості, передаючи ударні імпульси зерну. Саме ударний характер руйнування відповідає фізико-механічній структурі фуражного зерна, яке є неоднорідною за властивостями системою, утвореною оболонкою та ендоспермом з різними рівнями міцності та пластичності.

Разом з тим, саме горизонтальна схема ротора, що використовується у більшості серійних дробарок, супроводжується низкою техніко-технологічних недоліків. Основним серед них є підвищений шум і вібрація у процесі подрібнення зернової сировини. Джерелом шуму виступають ударні взаємодії молотків з частинками матеріалу, повторні удари продукту об деку, зіткнення частинок між собою та турбулентний рух повітряного потоку всередині робочої зони дробарки. Вібраційні навантаження виникають внаслідок динамічної неурівноваженості ротора, різної маси молотків по рядах, несиметричної подачі матеріалу та дискретного характеру руйнування кожного зерна.

Поступовий знос молотків, зміна їх маси, сколювання кромки, деформація та збільшення зазору змінюють розподіл маси ротора, а отже - з часом формують нерівномірний дисбаланс. Це призводить до посилення віброактивності, зниження ресурсу підшипників, порушення центрування вала, появи резонансних режимів, а також передавання коливань через корпус і фундамент. Підвищені коливання провокують руйнування або розтріскування опорних конструкцій, розхитування

болтових з'єднань, появу тріщин у зварних з'єднаннях, деформацію дек, що знижує довговічність дробарки.

Шум і вібрація виступають не лише технічними недоліками, а і серйозним професійно-гігієнічним ризиком. На рівні виробничих умов молоткові дробарки виступають основним джерелом шумового навантаження. Це негативно впливає на нервову систему і слух працівників, викликає втому, дезорієнтацію, зниження уваги, погіршення реакційних можливостей, що підвищує ризик травматизму. Тривала дія вібрації може викликати професійні захворювання, що пов'язані з судинними та опорно-руховими порушеннями.

Наявність підвищеної вібраційної активності у дробарках з горизонтальним ротором пов'язана також із одностороннім завантаженням сировини через верхню горловину, що формує нерівномірний розподіл маси у робочій зоні та появу асиметричних ударних навантажень. Це призводить до циклічних зміщень центру ваги при обертанні, появи коливальних процесів і нестабільності роботи.

Таким чином, хоча молоткові дробарки з горизонтальним розташуванням ротора мають значні технологічні переваги над дробарками інших типів (висока продуктивність, менша встановлена потужність приводу, компактність та універсальність), вони мають і суттєві недоліки конструкційно-динамічного характеру. Ці недоліки потребують розробки нових технічних рішень та удосконалення конструкції для зниження шумового навантаження і вібраційних впливів, підвищення довговічності та надійності обладнання, а також зменшення негативного впливу на здоров'я обслуговуючого персоналу.

Пошук шляхів самобалансування ротора, оптимізації системи подачі сировини, підвищення рівномірності навантаження по рядах молотків та удосконалення конструктивно-технологічних рішень молоткового подрібнювача з горизонтальним ротором є актуальною та важливою задачею, що формує науковий напрямок удосконалення дробильного обладнання в комбікормовому виробництві.

1.6 Висновки по розділу

У першому розділі проведено аналітичний огляд особливостей процесу подрібнення фуражного зерна та обґрунтовано необхідність оптимізації

конструкційних та технологічних параметрів молоткових дробарок. Встановлено, що ефективність подрібнення у значній мірі визначається фракційним складом кормового продукту, який впливає на засвоюваність поживних речовин та продуктивність тварин. Для різних видів і вікових груп тварин існують науково обґрунтовані вимоги щодо оптимальної крупності помелу, що повинні враховуватися при конструюванні і виборі подрібнювального обладнання.

Розглянуті фізико-механічні властивості зернового матеріалу, режими подрібнення та класифікаційні ознаки молоткових дробарок показали, що процес руйнування зерна є складною динамічною системою, яка формується сукупною дією ударних, стираючих та аеродинамічних сил. За результатами проведеного аналізу можна стверджувати, що найбільшого поширення набули дробарки ударної дії з горизонтальним розташуванням ротора, як обладнання з достатньо високими експлуатаційними можливостями та універсальністю.

Разом з тим, виявлено ряд суттєвих недоліків існуючих конструкцій, серед яких підвищені шумові та вібраційні навантаження, нерівномірний знос робочих органів, зниження точності балансування ротора та зменшення ресурсу підшипникових вузлів. Наявність даних недоліків не лише знижує надійність і довговічність дробарок, але й формує негативний вплив на умови праці персоналу, підвищуючи рівень професійних ризиків.

Отже, результати аналітичних досліджень підтверджують необхідність удосконалення конструкції молоткової дробарки з горизонтальною віссю ротора з метою зниження віброактивності, шумової дії та підвищення загальної енергоефективності процесу подрібнення. Подальші дослідження спрямовані на розробку конструкційних рішень, що забезпечать самобалансування ротора та покращення динамічних характеристик машини, що буде розглянуто в наступному розділі.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МОЛОТКОВОГО ПОДРІБНЮВАЧА

2.1 Особливості динаміки дробарок

З метою зниження технологічної віброактивності молоткових дробарок нами запропоновано використання схеми подачі зерна через два бокових, симетрично (опозитно) розташованих завантажувальних вузли.

Розглянемо динамічні властивості дробарки з опозитною подачею сировини у порівнянні з традиційною конструкцією з верхньою горловиною (рис. 2.1). Для аналізу рівня динамічного врівноважування розглядаємо спрощену систему з двома молотками, встановленими на діаметральних променях «а-а», що проходять через вісь обертання барабана O та осі O_1 і O_2 обертання шарнірних з'єднань молотків. Приймемо, що барабан обертається рівномірно з кутовою швидкістю ω .

У дробарці з верхньою подачею після удару по шару зерна молотки відхиляються на різні кути ($\varphi_1 > \varphi_2$). Відповідно центробіжні сили молотків визначаються:

$$P_1 = m\omega^2\sqrt{(R^2 + r^2 + 2Rr \cos \varphi_1)} \quad (2.1)$$

$$P_2 = m\omega^2\sqrt{(R^2 + r^2 + 2Rr \cos \varphi_2)} \quad (2.2)$$

Оскільки $P_1 \neq P_2$ – система є невірноваженою, що спричиняє появу технологічної віброактивності агрегату.

При опозитній подачі (рис. 2.1 б) ситуація інша. Обидва молотки одночасно взаємодіють з рівними потоками зерна, відхиляючись на приблизно однакові кути ($\varphi_1 \approx \varphi_2$). У цьому випадку $P_1 \approx P_2$, що теоретично забезпечує можливість повного динамічного врівноваження ротора і практичного усунення технологічної віброактивності.

Другим важливим позитивним ефектом опозитної подачі є зменшення амплітуди кутових коливань молотків приблизно у два рази. Це пов'язано з тим,

що об'єм матеріалу, що потрапляє на кожен ударний орган, зменшується удвічі. Такий ефект знижує непродуктивні втрати енергії у шарнірних вузлах.

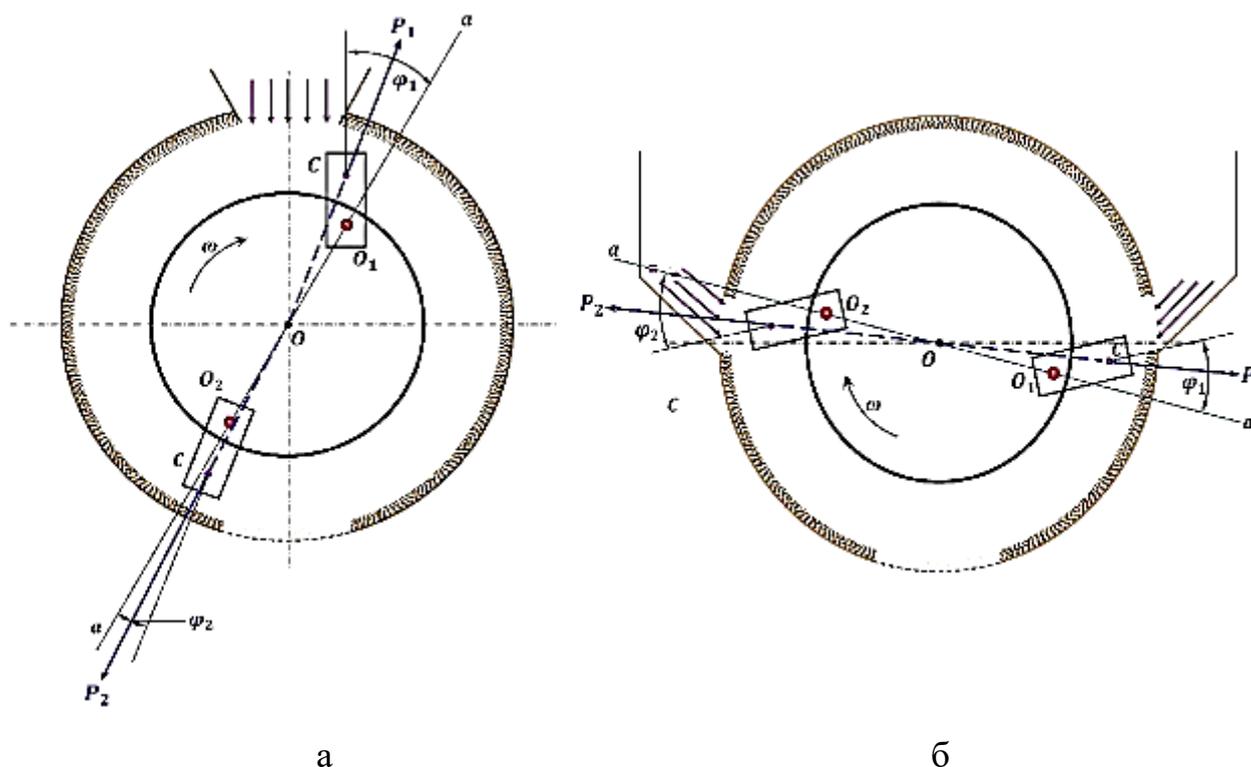


Рисунок 2.1 – Динамічні схеми системи барабана з двома діаметрально розташованими молотками: а – при верхній подачі матеріалу; б – при опозитній подачі у бокові завантажувальні пристрої

Слід зазначити, що практична реалізація схеми з опозитною подачею залежить від забезпечення максимально рівномірної подачі сировини у обидва завантажувальні канали. У реальних умовах можливі флуктуації, обумовлені природною варіацією фізико-механічних властивостей зернової маси. Однак навіть при незначних відхиленнях дана схема забезпечує істотне покращення динамічних характеристик процесу подрібнення порівняно з традиційними конструкціями.

2.2 Втрати енергії у шарнірах молотків при їх коливаннях

Інтенсивні кутові коливання молотків під час роботи дробарки призводять до підвищеного зношування деталей шарнірного з'єднання (пальців та посадкових поверхонь молотків). У крайніх випадках це може спричинити їх руйнування та

обрив молотків. Крім механічного зносу, у зоні шарнірів виникають значні втрати енергії на сухе тертя, які носять непродуктивний характер і фактично відбираються від потужності електродвигуна дробарки.

Для оцінки величини цих втрат розглянемо роботу сил, що діють на молоток у процесі його коливань.

Приблизне значення діючої на молоток відцентрової сили можна записати:

$$P = m\omega^2 R \quad (2.3)$$

Відповідно сила тертя в зоні контакту шарніру визначається виразом:

$$F = fm\omega^2 R \quad (2.4)$$

де f – коефіцієнт тертя “сталь по сталі”.

Енергія, що витрачається на проскальзування в зоні контакту за один період коливань молотка:

$$A = F(2\xi_{max} + 2\xi_{min})r_{ш} \quad (2.5)$$

де ξ_{max} , ξ_{min} – максимальні і мінімальні кути відхилення молотка (радіани),
 $r_{ш}$ – радіус пальця шарніра.

Відповідна потужність, що втрачається на тертя у шарнірі за 1 секунду:

$$N = A/T = F(\omega/2\pi) (2\xi_{max} + 2\xi_{min}) r_{ш} = fm\omega^2 R \left(\frac{\omega}{\pi}\right) (\xi_{max} + \xi_{min}) r_{ш}$$

$$N = fmR (\omega^3/\pi) (\xi_{max} + \xi_{min}) r_{ш} \quad (2.6)$$

Проведемо орієнтовну оцінку. Для малих коливань молотків:
 $\xi_{max} = 1,2^\circ$, $\xi_{min} = 0,8^\circ$.

Приймаємо: $f = 0,3$; $m = 0,2$ кг; $R = 0,3$ м; $\omega = 280$ с⁻¹; $r_{ш} = 0,01$ м.

Підстановка у формулу (2.6) дає $N \approx 50$ Вт. Якщо в дробарці встановлено 50 молотків, сумарні втрати становлять близько 2,5 кВт, що відповідає суттєвим непродуктивним витратам енергії.

Таким чином, навіть малі коливання молотків призводять до значних енергетичних втрат у шарнірних вузлах. Тому мінімізація таких коливань є важливим конструктивним завданням.

При опозитній подачі зернової маси ударні імпульси на молотки зменшуються приблизно вдвічі, відповідно у два рази зменшуються і кути коливань ξ_{\max} , ξ_{\min} . Це означає, що потужність, яка витрачається на тертя в шарнірах, також зменшується приблизно у 2 рази. Це є другим ключовим позитивним ефектом опозитної схеми подачі сировини в дробильну камеру.

2.3 Дослідження непродуктивних витрат енергії через вібрацію продуктово-повітряного шару

Продуктово-повітряний шар циркулює в робочій камері дробарки зі швидкістю, що орієнтовно удвічі менша за лінійну швидкість кінців молотків; його товщина залежить від ступеня завантаження машини. За таких швидкостей на шар діє відцентрова сила, яка притискає його до дек і решета, внаслідок чого шар додатково ущільнюється.

Окрім цього, шар інтенсивно «пропрацьовується» вібраційними впливами, що переважно надходять від дек. На перший погляд контакти між твердими частинками шару мали б відповідати умовам сухого тертя. Проте відносне проковзування частинок одна відносно одної під дією вібрацій переводить режим у в'язке тертя. Додаткові в'язкі ефекти зумовлюються циркуляцією повітря в порах шару. За безпосереднього нормального контакту частинок проявляються також пружні властивості матеріалу.

У цілому продуктово-повітряний шар є суттєво неоднорідною дисперсною системою: частинки різняться формою, розміром та густиною. З огляду на малу товщину шару (приблизно 0,05–0,010 м) порівняно з довжиною хвилі поширення

вібрацій у зернових матеріалах (порядку десятих – кількох метрів), хвильовими ефектами можна знехтувати.

У зоні контактів частинок відбувається складний фізико-механічний процес в'язко-пружної деформації під час переміщення зерен у щільному потоці з короткочасними міжчастинковими контактами (рисунок 2.2), на які діють коливальні збурення.

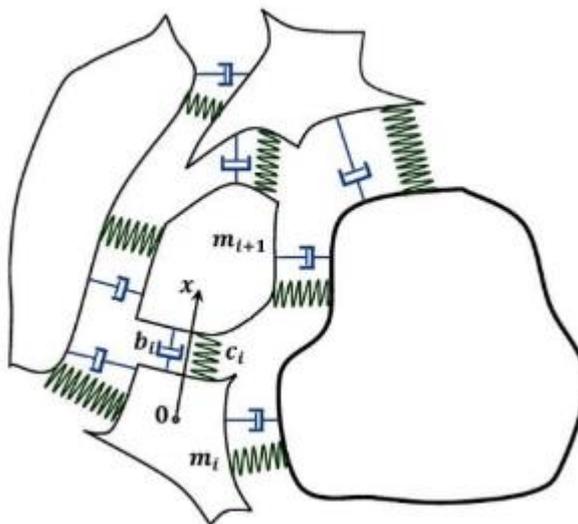


Рисунок 2.2 – Реологічна модель силових взаємодій у елементах продуктово-повітряного шару

Через різні маси, розміри та варіативність типів контактів існує цілий спектр власних частот і параметрів демпфування окремих частинок. Закони розподілу цих величин невідомі, що на поточному етапі не дозволяє побудувати обґрунтований кількісний розрахунок енергетичних втрат у шарі, спричинених віброактивністю дробарки. Тому далі обмежимося якісним описом процесів у шарі та виявленням ключових чинників.

Розглянемо одиничну частинку маси m_i та її контакт із сусідньою частинкою m_{i+1} (див. рисунок 2.2). Рівняння руху для цієї частинки можна подати так:

$$m_i \ddot{x} + b_i \dot{\eta} + c_i \eta = \Phi_{0i} \sin(\omega t) \quad (2.7)$$

де x і η - відповідно абсолютне та відносне (відносно частинки m_{i+1}) переміщення;

b_i, c_i - коефіцієнти в'язкості та жорсткості i -го контакту;

Φ_{0i} - вимушувальна сила (рівнодійна інших контактних взаємодій), спроектована на напрямок x ;

ω - кутова частота коливань, що збігається за величиною з кутовою швидкістю барабана.

Ввівши стандартні для теорії коливань перетворення

$$2n_i = \frac{b_i}{m_i}, \quad \omega_{0i} = \sqrt{\frac{c_i}{m_i}} \quad (2.8)$$

одержимо лінійне рівняння коливань частинки

$$\ddot{x} + 2n_i \dot{\eta} + \omega_{0i} \eta = \frac{\Phi_{0i}}{m_i} \sin(\omega t) \quad (2.9)$$

Потужність N_i , необхідна для подолання опору в даному контакті (розсіювання енергії на в'язкому терті), впливає з цього рівняння і має вигляд:

$$N = \frac{\Phi_{0i}^2 \omega \sin(2\delta_i)}{4m_i(\omega_{0i}^2 - \omega^2)} \quad (2.10)$$

де δ_i - кут зсуву фаз між переміщенням частинки та прикладеною до неї вимушувальною силою,

$$\delta = \arctan\left(\frac{2n_i \omega}{\omega_{0i}^2 - \omega^2}\right)$$

З (2.10) випливає, що розсіювання енергії у міжчастинкових контактах прямо пропорційне Φ_{0i} , тобто рівню віброактивності дробарки. Визначальну роль також

відіграють параметри контактів b_i і c_i , які задають власні частоти та значення фазового зсуву δ . Формально, підсумувавши втрати енергії у всіх контактах продуктово-повітряного шару, можна оцінити загальні втрати в шарі за умов його вібрацій.

Як було встановлено раніше, барабан дробарки генерує неурівноважену майже кругову відцентрову силу, яка через підшипники передається на фундамент і прилеглий ґрунт (основу фундаменту). Вібруючий фундамент здійснює вертикальні, горизонтальні та кутові коливання, що поширюються в ґрунтовому масиві у вигляді поздовжніх і поперечних хвиль. Відтак фундамент машини з динамічними навантаженнями виступає джерелом шкідливого вібраційного впливу на сусідні машини, вимірнювальну апаратуру, а також будівельні конструкції.

До фундаментів під обладнання з динамічними навантаженнями, окрім загальних вимог, висуваються додаткові. Зокрема, для молоткових дробарок нормується, щоб амплітуда горизонтальних коливань не перевищувала 0,05 мм. Амплітуда вертикальних коливань при частоті обертання барабана понад 150 с^{-1} , як правило, не нормується - вважається, що високочастотні вертикальні коливання швидко затухають у товщі ґрунту і не чинять суттєвого шкідливого впливу на оточення.

Разом із тим чинні будівельні норми (оновлені редакції колишнього СНіП 2.02.05-87) традиційно не враховують можливість «відкачування» енергії від електродвигуна технологічної машини на вібрування ґрунту під фундаментом. Такі непродуктивні витрати можуть давати відчутну додаткову складову до загальної енергоємності технологічного процесу.

Опис взаємодії фундаменту машини з динамічними навантаженнями і прилеглого ґрунту є складною задачею динаміки суцільного середовища. У строгій постановці слід розглядати ґрунт як просторову суцільну систему з параметрами, що змінюються за глибиною, а також враховувати приєднану масу ґрунту в коливальній системі «машина – фундамент – основа». Навіть постановка такої задачі, не кажучи вже про точне розв'язання, є нетривіальною.

Тому для інженерних розрахунків застосовують спрощення:

1. тіло машини та фундамент вважають абсолютно твердими;

2. основу фундаменту розглядають як таку, що не має власної маси; численні експерименти показали прийнятну збіжність результатів за такого припущення;
3. нелінійність деяких деформаційних залежностей ґрунту ігнорують, розглядаючи основу як лінійно-деформівне пружно-в'язке середовище;
4. ексцентриситет розподілу мас фундаменту не ураховують.

У подальших розрахунках розсіювання енергії в ґрунті під фундаментом також використовуватимемо ці припущення і, для визначеності, обмежимося вертикальними коливаннями.

Зв'язок дробарки з фундаментом може бути:
- жорстким, або - через амортизувальні елементи.

Цим відповідають дві розрахункові схеми системи «дробарка – фундамент – ґрунт» (рис. 2.3). Дію ґрунтової основи в обох випадках моделюють пружними елементами c , c_2 та в'язкими елементами b , b_2 що еквівалентно відображають реакцію ґрунту як пружно-в'язкого, лінійно-деформівного середовища.

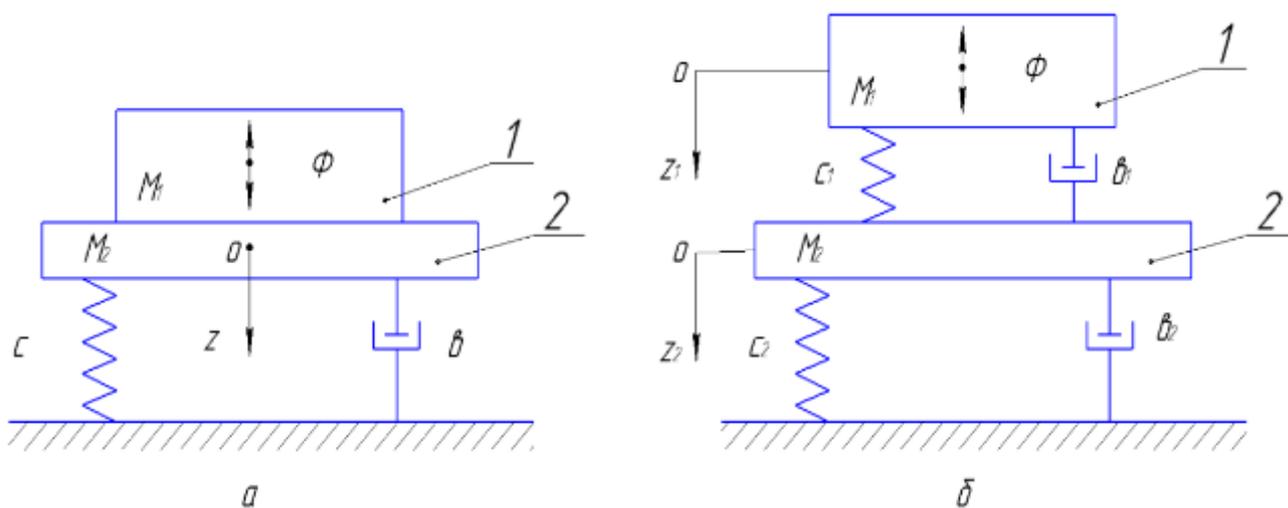


Рисунок 2.3 – Схеми до розрахунку вимушених коливань: а – жорстке кріплення дробарки до фундаменту; б – кріплення через амортизувальні елементи (1 – дробарка; 2 – фундамент)

Припустимо, що вертикальна складова відцентрової сили, яка діє вздовж осі oz (рисунок 2.3), змінюється за синусоїдальним законом:

$$\Phi = \Phi_0 \sin(\omega t) \quad (2.11)$$

де Φ - вертикальна складова відцентрової сили

Φ_0 - амплітуда відцентрової сили

ω - кутова частота вимушених коливань (дорівнює кутовій швидкості барабана)

t - час

Спершу розглянемо випадок жорсткого кріплення дробарки до фундаменту (рисунок 2.6, а). Для такої схеми диференціальне рівняння коливань «дробарка + фундамент» як єдиного тіла масою $M = M_1 + M_2$ (де M_1 - маса дробарки, M_2 - маса фундаменту) має вигляд:

$$M \ddot{z} + b \dot{z} + cz = \Phi_0 \sin(\omega t) \quad (2.12)$$

Після стандартних перетворень одержимо рівняння у канонічній формі:

$$\ddot{z} + 2n \dot{z} + \omega_0^2 z = \frac{\Phi_0}{M} \sin(\omega t) \quad (2.13)$$

де $2n = b/M$; $\omega_0 = \sqrt{c/M}$ - власна частота системи.

Розв'язок (2.13) для усталеного режиму:

$$z = A \sin(\omega t - \delta) \quad (2.14)$$

де A - амплітуда коливань; δ - фазовий зсув переміщення відносно збуджуючої сили Φ . Величини A та δ визначають за формулами:

$$A = \frac{\Phi_0 / M}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4n^2 \omega^2}} \quad (2.16)$$

$$\tan \delta = \frac{2n\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (2.17)$$

Практичні труднощі використання (2.14), (2.15) і (2.16) зумовлені тим, що амплітуда збуджуючої сили Φ не відома наперед, а ґрунтова основа має складну структуру та параметри. За відсутності заводських даних орієнтовне значення Φ_0 допускається визначати за співвідношенням:

$$\Phi_0 = me\omega^2 \quad (2.18)$$

де m - маса барабана,

e - ексцентриситет маси (зазвичай $e = 0.001$ м).

Миттєва потужність джерела коливань:

$$N = \Phi \dot{z} \quad (2.19)$$

де \dot{z} - швидкість переміщення маси M .

Середня за період потужність, що віддається на розсіювання в основі:

$$\bar{N} = \frac{1}{2\pi / \omega} \int_0^{2\pi / \omega} \Phi(t) \dot{z}(t) dt \quad (2.20)$$

Підставляючи $\Phi(t)$ і $\dot{z}(t)$ та інтегруючи, одержимо:

$$\bar{N} = \frac{\Phi_0^2 \omega \sin(2\delta)}{4M(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.21)$$

Для інженерної оцінки застосовують критерій максимуму середньої енергії джерела. З (2.21): при $\omega < \omega_0$ максимум - за $\delta = \pi/4$; при $\omega > \omega_0$ - за $\delta = 3\pi/4$.

Тоді:

$$\max \bar{N} = \frac{\Phi_0^2 \omega}{4M(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.22)$$

Оцінімо $\max \bar{N}$ для типових дробарок: $Q \approx 2.5\text{--}3.0$ т/год, $N_e = 25\text{--}30$ кВт, $M_1 = 1000$ кг, $M_2 = 500$ кг, $\omega = 300$ с⁻¹, маса барабана ~ 300 кг. За (2.46) $\Phi_0 \approx 27 \times 10^3$ Н. Рівень розсіювання суттєво залежить від близькості до резонансу ($\omega \approx \omega_0$).

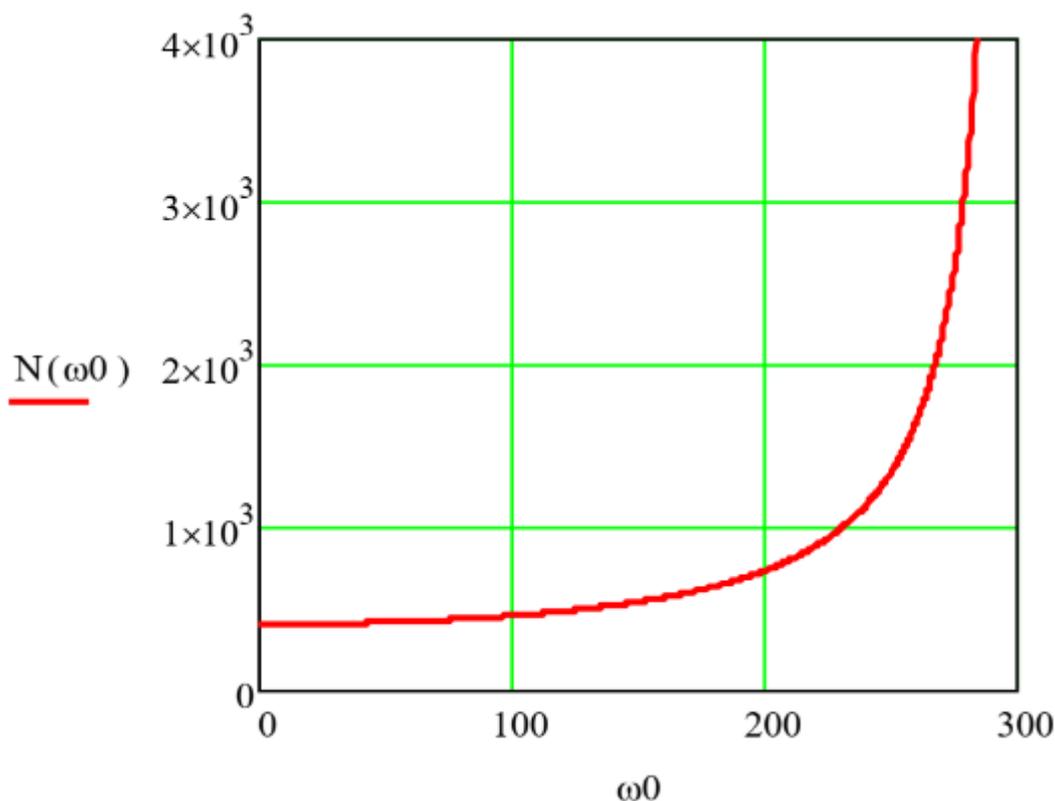


Рисунок 2.4 – Залежність енергетичних втрат у основі фундаменту від власної частоти ω_0 системи «дробарка – фундамент – основа».

Розглянемо схему з віброізолюючими елементами (рисунок 2.5, б). Система має два ступені вільності. Рівняння коливань:

$$M_1 \ddot{z}_1 + b_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_1(z_2 - z_1) = \Phi_0 \sin(\omega t) \quad (2.23)$$

$$M_2 \ddot{z}_2 + b_2 \dot{z}_2 - b_1 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_2 z_2 - c_1 (z_2 - z_1) = 0 \quad (2.24)$$

Для ефективної віброізоляції досягають антирезонанс: коливання маси M_1 малі, а фундамент коливається більше.

Антирезонансна частота:

$$\omega^* = \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{M_2}} \quad (2.25)$$

Для реалізації умова $\omega^* = \omega$, отже $c_1 = M_2 \omega^2 - c_2$.

Втрати потужності двигуна на розсіювання енергії в основі для цієї схеми оцінюють так:

$$\max \bar{N} = \frac{1}{2} \Phi_0 A \omega \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (2.26)$$

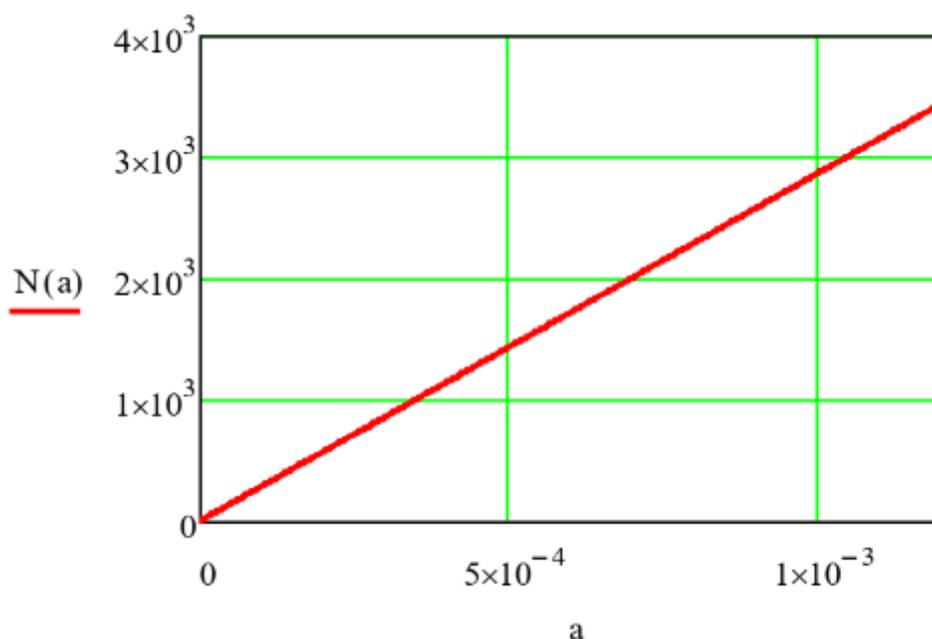


Рисунок 2.5 – Максимальна середня потужність, що віддається електродвигуном на вібрування основи, як функція амплітуди A коливань фундаменту.

За реалістичних амплітуд $A = 0.5-1.0$ мм відбір потужності може сягати 1.43–2.86 кВт у традиційній схемі; для опозитної подачі ці втрати можна мінімізувати.

2.4 Висновки по розділу

1. Доведено, що джерелом підвищеної віброактивності молоткових дробарок із горизонтальним розташуванням барабана є ударні імпульси, які виникають під час взаємодії молотків з вихідним матеріалом у зоні під завантажувальною горловиною. У зв'язку з цим запропоновано нове наукове поняття - «технологічна віброактивність дробарки».

2. Встановлено, що малі паразитні коливання молотків і сухе тертя в їх шарнірах істотно збільшують непродуктивні витрати енергії (до 8 % від потужності приводного електродвигуна) у дробарках із традиційною схемою завантаження зерна. В опозитній схемі ці втрати можуть бути зменшені приблизно вдвічі.

3. Прогнозні розрахунки показують, що «відбір» енергії на вібрування основи (фундаменту) дробарки може досягати 10 % потужності приводу. Щоб зменшити ці втрати, слід або збільшувати масу фундаменту, або знижувати віброактивність самої дробарки. Останній шлях є більш перспективним, оскільки, крім енергоефекту, підвищує надійність агрегату й зменшує віброшумове навантаження на довкілля. Для опозитної дробарки такі втрати теоретично можуть бути зведені до нуля.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Вибір факторів процесу подрібнення

Для повного уявлення про технологічний процес на етапі проектування конструкції подрібнювача базою фізичного моделювання є теорія подібності, що спирається на аналіз розмірностей. Завдяки цьому характеристики натурних (реальних) об'єктів молоткових дробарок можна встановлювати шляхом перерахунку критеріальних співвідношень параметрів модельних зразків, визначених експериментально.

У класичному підході числа подібності (інваріанти) одержують саме з аналізу розмірностей параметрів задачі, яка описує процес або явище. Бажано сформулювати критеріальні співвідношення параметрів молоткової дробарки, що впливають на процес подрібнення фуражного зерна, адже це дає змогу зменшити кількість змінних в експерименті та суттєво спростити його проведення.

Проаналізувавши дані щодо типорозмірів дробарок та їх робочих органів, можна зробити висновок, що в багатьох аспектах конструкції подібні, а відмінності зводяться переважно до співвідношення діаметра та довжини ротора. Це, своєю чергою, визначає габарити, масу та окремі конструктивні елементи. Водночас для молоткових дробарок різних типорозмірів зберігаються однакові відносини лінійних розмірів як самих машин, так і їхніх робочих органів (за сталої масштабної величини), що відповідає вимогам геометричної подібності.

Подібність умов однозначності (початкових і граничних умов) для процесів, які відбуваються у молоткових дробарках, забезпечується рівністю визначальних критеріїв подібності, оскільки явища і процеси в подрібнювачах цього класу є якісно однаковими (аналогічними). Сукупність цих ознак формує необхідні та достатні умови подібності явищ і процесів під час подрібнення матеріалів у молоткових дробарках.

Для аналізу запропонованої нами молоткової дробарки з опозитним завантаженням подрібнюваного матеріалу (рисунок 3.1) застосовано теорію розмірностей.

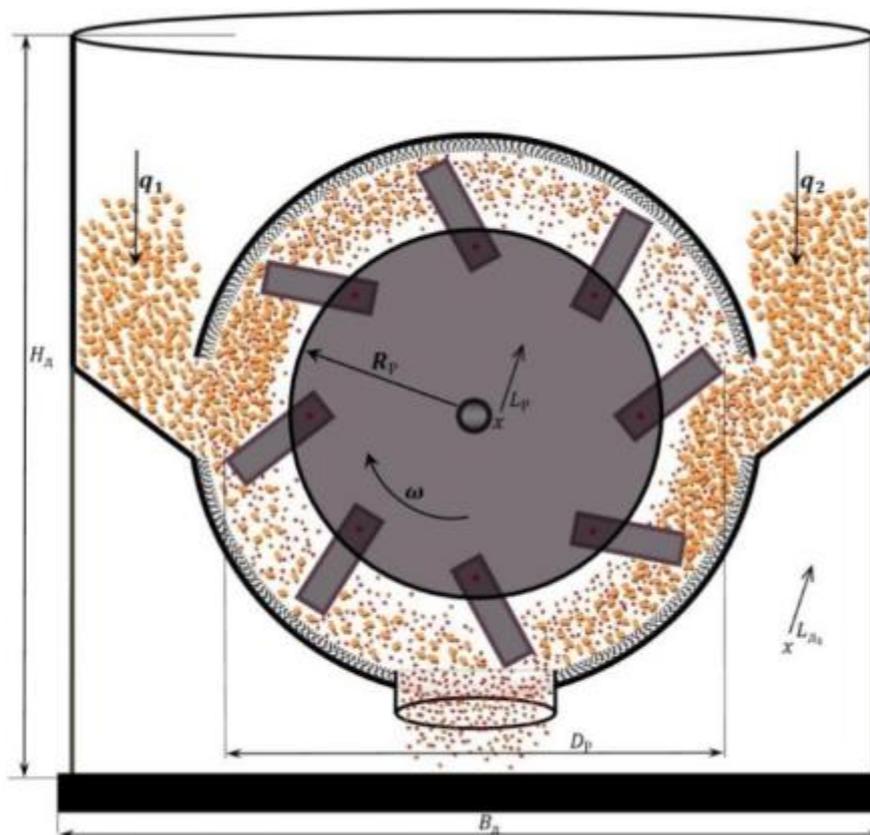


Рисунок 3.1 – Схема зернодробарки з опозитним завантаженням.

Щоб визначити параметри, що впливають на рух (обертання) ротора в щільному потоці зернових частинок, використаємо другу π -

теорему. Розглядаючи розмірності змінних, які характеризують систему «робочий орган – середовище», усі залежності виражаємо через основні (незалежні) розмірності системи SI: довжина [L], маса [M], час [T] (або еквівалентний набір «довжина – сила – час»). Усі інші фізичні величини є похідними (залежними) розмірностями, тобто можуть бути виражені через базові.

З рівняння, що характеризує роботу дробарок горизонтального типу (за профільними джерелами), випливає, що визначальними параметрами фізичної моделі «робочий орган – середовище» є величини, наведені у таблиці 3.2, де подано формули розмірностей у класі L–M–T.

Таблиця 3.1 – Змінні, що описують вплив чинників на процес подрібнення в молотковій дробарці

| № | Назва змінної | Позначення | Розмірність (L–M–T) | Одиниця SI |
|---|---|------------|------------------------------------|---------------------------|
| 1 | Радіус ротора | R | L | м |
| 2 | Кутова швидкість обертання ротора | ω | T ⁻¹ | с ⁻¹ |
| 3 | Зазор між кінцями молотків і декою | δ | L | м |
| 4 | Густина зернівки | ρ | M·L ⁻³ | кг·м ⁻³ |
| 5 | Максимальний лінійний розмір зернівки | b | L | м |
| 6 | Напруження руйнування зернівки (границя міцності) | σ | M·L ⁻¹ ·T ⁻² | Н·м ⁻² = Па |
| 7 | Подача матеріалу в лівий отвір | q1 | M·T ⁻¹ | кг·с ⁻¹ |
| 8 | Подача матеріалу в правий отвір | q2 | M·T ⁻¹ | кг·с ⁻¹ |

Як критерій оптимальності приймаємо питому енергоємність подрібнення зерна E_i :

$$[E_i] = \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] = \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \right] = \left[\frac{(\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2) \cdot \text{m}}{\text{kg}} \right] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (3.1)$$

Припускаючи існування функціональної залежності між величинами, подамо її як безрозмірну функцію від аргументів:

$$E_i = \Phi(R, \omega, \delta, \rho, b, \sigma, q_1, q_2) \quad (3.2)$$

У класі базових розмірностей L–M–T аргументи мають такі розмірності:

$$F(L, T^{-1}, L, ML^{-3}, L, ML^{-1}T^{-2}, MT^{-1}, MT^{-1}) \sim L^2T^{-2} \quad (3.3)$$

3.2 Відбір факторів для дослідження в експерименті

Під час теоретичного й емпіричного вивчення процесу подрібнення зерна критично важливо коректно обрати параметри для планування експерименту. Це дає змогу охопити провідні аспекти технологічного процесу, раціонально визначити керовані фактори та мінімізувати витрати на експериментальні дослідження.

Необхідною умовою оптимізації робочого процесу є виокремлення ключових критеріїв, що найбільше характеризують об'єкт дослідження.

Для побудови плану повнофакторного експерименту, проведення випробувань і отримання рівнянь регресії з метою оптимізації конструктивно-режимних параметрів молоткової дробарки доцільно відібрати найбільш значущі незалежні та керовані величини. Як фактори процесу подрібнення (що входять до критеріїв подібності) приймаємо:

- Подача вихідного матеріалу в лівий отвір - q_1 , кг/с;
- Подача вихідного матеріалу в правий отвір - q_2 , кг/с;
- Кутова швидкість обертання ротора - ω , рад/с.

Комбінації цих факторів (у складі комплексних параметрів) та рівні їх варіювання істотно впливають на енергоємність процесу, рівень звуку, віброактивність дробарки і характер протікання подрібнення.

З метою визначення оптимальних технологічних параметрів виконано попередні розрахунки діапазонів зміни факторів і рівнів їх варіювання, що впливають на узагальнені (комплексні) показники.

Рационально підібрані фактори є керованими, контрольованими та незалежними, відображають провідні риси процесу в молотковій дробарці горизонтального типу з опозитним завантаженням. Це створює підґрунтя для багатофакторного планування експерименту, дослідження їхнього впливу на енергоємність подрібнення та оцінювання значущості взаємодій між факторами, що зрештою підвищує інформативність і якість лабораторних випробувань.

3.3 Опис експериментальної установки

Для вивчення динаміки робочого процесу молоткової дробарки за запропонованою схемою подрібнення, за різних параметрів подачі вихідного матеріалу в ліве та праве завантажувальні вікна на заданих зернових компонентах фуражних культур, виготовлено експериментальний зразок (рисунок 3.2).

Експериментальна установка змонтована на металевій рамі (основанні) 1. На ній розташовано:

- дробильну (циліндричну) камеру подрібнення з ротором у зборі 2;
- привід (електродвигун із клинопасовою передачею);
- бункер для зерна 3 з двома взаємно протилежно орієнтованими завантажувальними горловинами.

Нижня частина бункера 3 утворює дві горловини 4 і 5, що з'єднані з камерою подрібнення 2 і розташовані в горизонтальній площині симетрії ротора, яка проходить через його вісь обертання (що збігається з віссю ведучого вала 6). Обидві горловини мають однакові вихідні перерізи та оснащені регулювальними пристроями - металевими пластинами-шиберами 7 і 8 для зміни площі прохідного перерізу.

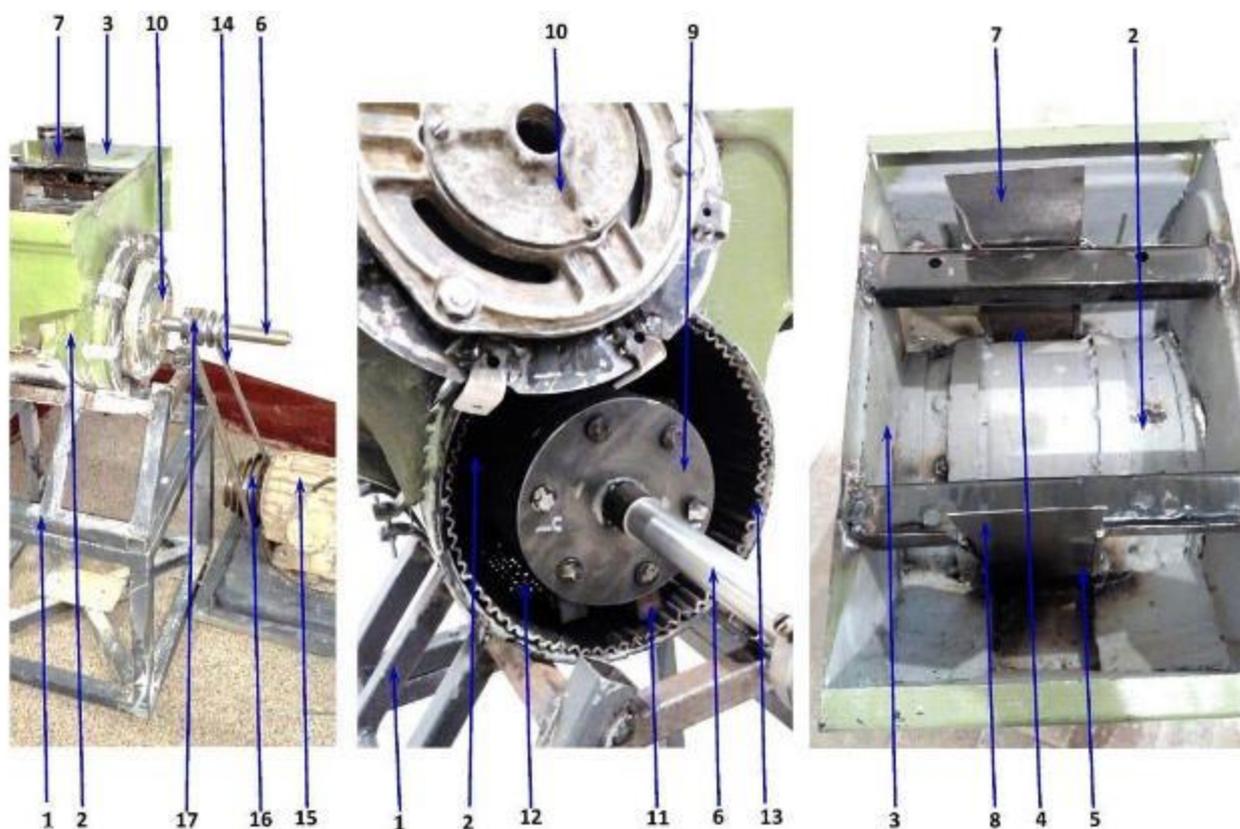


Рисунок 3.2 – Експериментальний зразок молоткової дробарки з опозитним завантаженням зерна

У середині камери встановлено горизонтальний ротор, що складається з пакета дисків 9, закріплених на приводному валу 6 (привід на рисунку умовно не показано). Напіввісь ротора обертається в двох підшипникових вузлах 10, закріплених на корпусі барабана та змонтованих на загальній рамі (міжопорне виконання). Підшипники 10 встановлено з натягом. У дисках 9 на осях 18 шарнірно закріплені молотки 11, які можуть вільно обертатися навколо своїх осей.

У нижній частині камери змонтовано решето 12, а на решті внутрішньої поверхні корпусу 2 - зубчасті деки 13. Для підвищення імовірності багаторазових ударних взаємодій молотків із матеріалом у зоні дроблення застосовано знімну конструкцію відбійних (зубчастих) дек 13 із секціями.

Ротор приводиться в дію трифазним асинхронним електродвигуном АІР 80А2 потужністю 1,5 кВт з синхронною частотою обертання поля статора 3000 об/хв та швидкістю обертання вала 2850 об/хв. Передавання крутного моменту здійснюється клинопасовою передачею 14.

Необхідна частота обертання ротора забезпечується:

- підбором діаметра профілю ручая ведучого шківa (механічне регулювання передавального числа);
- частотним перетворювачем KIPPRIBOR серії AFD–M055.43 (потужність до 5,5 кВт), що дозволяє широко варіювати частоту обертання асинхронного двигуна.

Таблиця 3.5 – Технічна характеристика лабораторної установки молоткової дробарки з опозитним завантаженням матеріалу

| Найменування показника та одиниця вимірювання | Значення |
|--|------------------|
| Ширина камери подрібнення, мм | 275 |
| Внутрішній діаметр камери подрібнення, мм | 220 |
| Кількість відбійних дек, шт | 76 |
| Об'єм камери подрібнення з урахуванням деки, м ³ | 0,011 (10,93 л) |
| Довжина ротора, мм | 220 |
| Діаметр ротора, мм | 165 |
| Радіус, описуваний кінцями молотків, мм | 99,5 |
| Кількість секцій дисків ротора, шт | 22 |
| Частота обертання ротора, об/хв | 5670; 6960; 7980 |
| Колова швидкість молотків, м/с | 62–111 |
| Габарити молотка, мм | 52 × 20 × 4 |
| Маса одного молотка, кг | 0,029 |
| Кількість молотків на роторі, шт | 132 |
| Площа прохідного перерізу лівої та правої горловин, м ² | 0,81 |
| Потужність електродвигуна, кВт | 1,5 |
| Об'єм зернового приймального бункера, м ³ | 0,019 |
| Габаритні розміри, мм: довжина / ширина / висота | 430 / 350 / 870 |
| Продуктивність дробарки, т/год | 0,200 |

Примітка: опозитне (дзеркальне) завантаження через дві горловини з рівними перерізами та шибєрним регулюванням дає змогу симетризувати ударні імпульси,

зменшити технологічну віброактивність, стабілізувати динаміку ротора і, як наслідок, позитивно впливати на енергоємність та якість подрібнення.

3.4 Результати експериментальних досліджень

Одним із провідних критеріїв ефективності роботи молоткової дробарки є енергоємність процесу подрібнення.

У багатофакторному експерименті отримували рівняння регресії в кодованих змінних, де як функцію відгуку Y_1 прийнято енергоємність E . Її оцінювали через досягнуту продуктивність дробарки Q і споживану потужність N з урахуванням ступеня подрібнення λ .

$$Y_1(X_1, X_2, X_3) = 7.574 - 2.174X_1 - 3.564X_2 + 2.066X_3 + 2.217X_1X_2 - 2.317X_1X_3 - 2.22X_2X_3 + 0.154X_1^2 + 1.889X_2^2 + 3.315X_3^2 \quad (3.4)$$

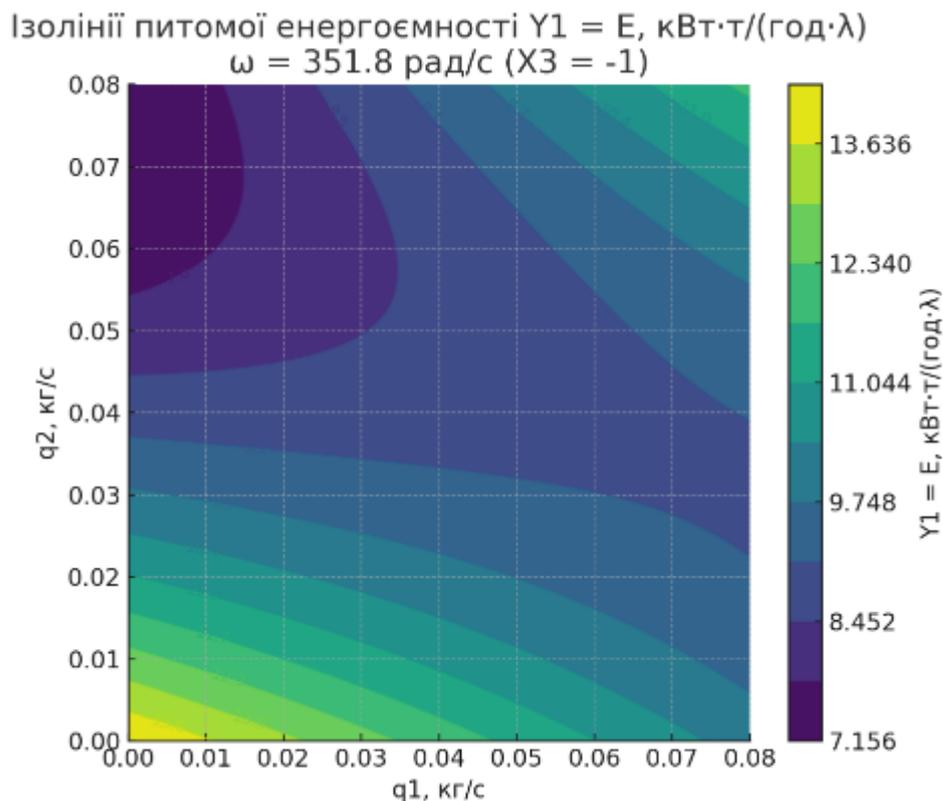


Рисунок 3.3 – Залежність питомої енергоємності $Y_1=E$ при $\omega=351.8$ рад/с ($X_3=-1$)

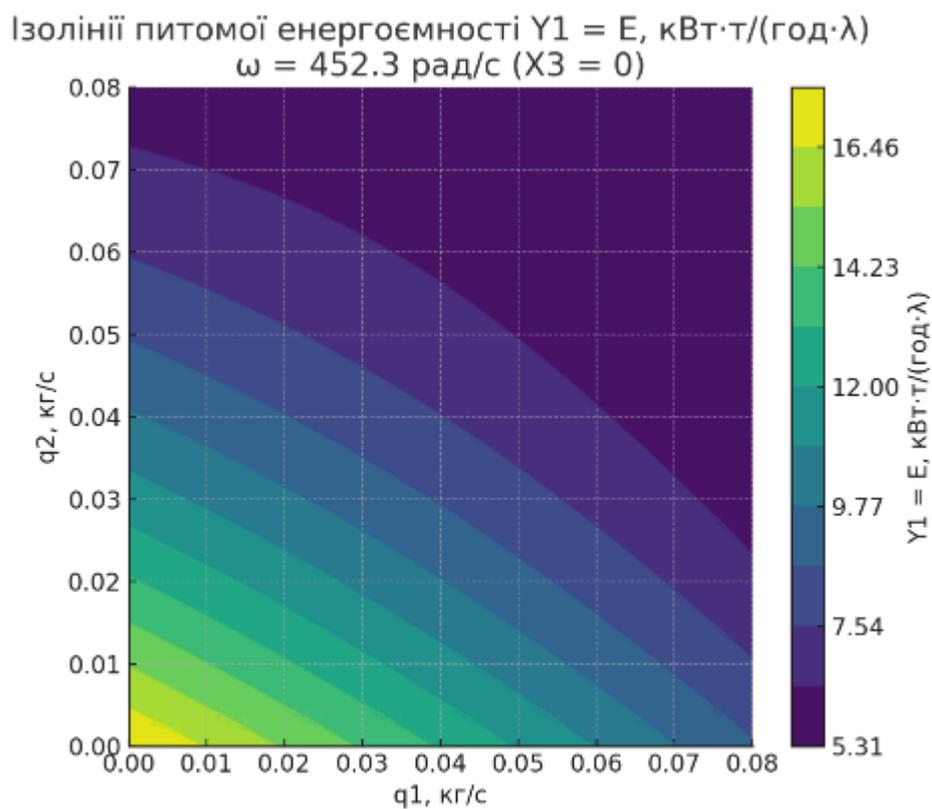


Рисунок 3.4 – Залежність питомої енергоємності $Y_1=E$ при $\omega=452.3$ рад/с ($X_3=0$)

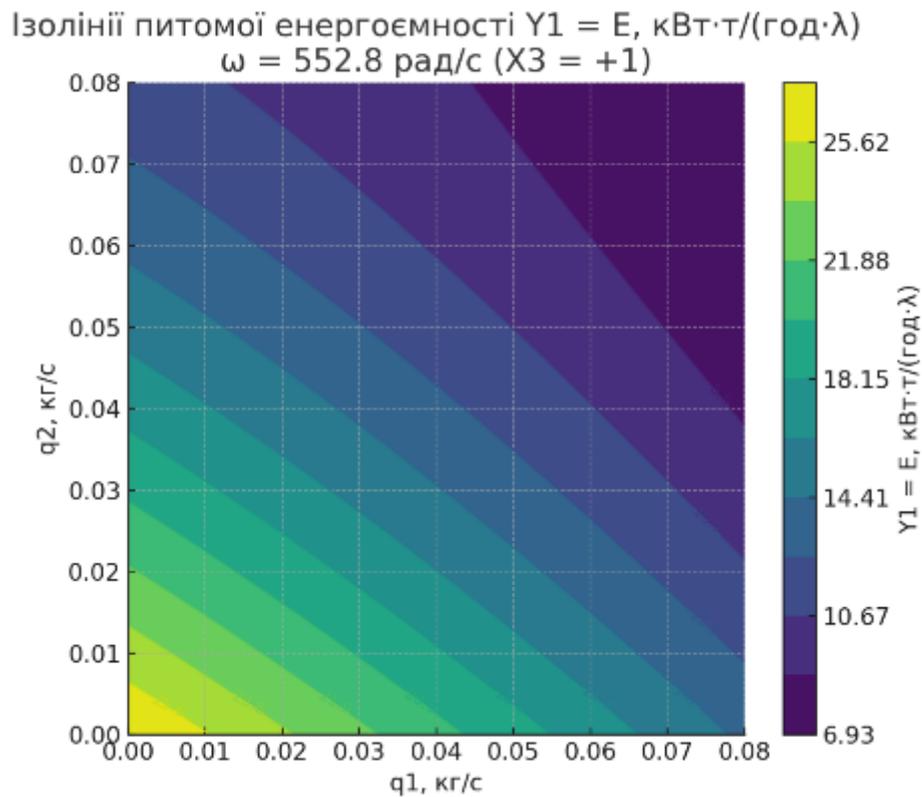


Рисунок 3.5 – Залежність питомої енергоємності $Y_1=E$ при $\omega=552.8$ рад/с ($X_3=+1$)

З аналізу рис. 3.3 – 3.5, на яких подано експериментальну залежність енергоємності від поєднань двох із трьох факторів - подачі вихідного матеріалу в лівий отвір X_1 і правий отвір X_2 - за сталої величини третього фактора, кутової швидкості обертання ротора $X_3 = -1; 0; -1$; можна зробити такі висновки: за мінімального значення третього фактора, кутової швидкості ротора $X_3 = -1$, межі енергоємності процесу подрібнення для пшениці змінюються в інтервалі від 6 до 9,8 кВт·т/год·λ, для ячменю - від 7,4 до 13,8 кВт·т/год·λ.

Після підвищення колової швидкості молотків, за значення третього фактора $X_3 = 0$, спостерігається зниження енергоємності процесу та звуження меж діапазону, які під час подрібнення пшениці становлять 4,8–8,8 кВт·т/год·λ. Для ячменю, навпаки, спостерігається розширення меж діапазону - від 5,5 до 16,7 кВт·т/год·λ. На верхньому рівні варіювання фактора (збільшенні значення) кутової швидкості ротора до верхньої межі $X_3 = +1$ межі енергоємності процесу подрібнення для пшениці становлять 5,5–10,2 кВт·т/год·λ, для ячменю - 7,4–26,7 кВт·т/год·λ. За парного поєднання змінних X_1 та X_2 і поступового вирівнювання подач матеріалу в камеру подрібнення спостерігається зменшення енергоємності процесу.

На отриманих графіках у тривимірній системі координат залежностей енергоємності процесу подрібнення пшениці та ячменю видно області з мінімальними значеннями енергоємності за максимального поєднання факторів подачі вихідного матеріалу в лівий X_1 і правий X_2 отвори та за значення третього фактора $X_3 \geq 0$. Після підвищення кутової швидкості $X_3 \geq 0$, що відповідає діапазону колових швидкостей молотків 45...55 м/с, зерновий матеріал подрібнюється з меншими енерговитратами завдяки досягнутій швидкості ударних елементів.

За мінімального значення кутової швидкості $X_3 = -1$ межі енергоємності процесу подрібнення істотно вищі, ніж за основного рівня $X_3 = 0$. Це пояснюється тим, що за малих колових швидкостей молотків продукт руйнується гірше, довше перебуває в камері подрібнення, що спричиняє зростання масової концентрації продукту в камері та істотне збільшення енергоємності процесу.

За однобічної подачі матеріалу лише в лівий X1 або лише в правий X2 отвір видно області з підвищеною енергоємністю процесу подрібнення порівняно з парною подачею.

Аналізуючи дані графічних зображень і рівнянь, можна відзначити, що під час подрібнення пшениці та ячменю зі збільшенням швидкості в межах 45–55 м/с енергоємність помітно зменшується, а за подальшого зростання колових швидкостей молотків понад 55 м/с енергоємність знову зростає внаслідок збільшення гідродинамічних опор ротора. Звідси оптимальна швидкість молотків - у межах 45...55 м/с.

За оптимізації процесу подрібнення пшениці за критерієм мінімуму енергоємності, із застосуванням функції Minimize(Y, X) пакета Mathcad, отримано раціональні значення факторів, відповідно до яких локальний мінімум енергоємності процесу подрібнення пшениці досягається за значень $X1=1$, $X2=0,331$, $X3=0,013$; для ячменю - за $X1=1$, $X2=0,554$, $X3=0,155$.

Отже, для досягнення оптимального значення енергоємності процесу подрібнення пшениці раціональними параметрами в натуральних одиницях є:

- частота обертання ротора $\omega=453,6$ рад/с;
- парна подача матеріалу у співвідношенні - у правий отвір $q1=0,08$ кг/с, у лівий отвір $q2=0,05$ кг/с.

Для візуалізації тенденцій зміни енергоємності процесу подрібнення в залежності від виду матеріалу та значень подачі матеріалу в лівий і правий завантажувальні горловини, заданих рівняннями регресії, програмою «PTC Mathcad 15.0» у декартовій системі координат на площинах осей спроектовані двовимірні графіки кожного з факторів X1 та X2 за фіксованого значення другого аргумента X1 або X2 на постійному рівні (рис. 3.6., 3.7).

За умови встановлення факторів X2 та X3 на нульовому рівні, межі діапазону енергоємності при подрібненні пшениці варіюються в межах 4,9–6,15 кВт·т/год·λ, що значно нижче, ніж при подрібненні ячменю, діапазон енергоємності якого має розширені межі 5,9–9,6 кВт·т/год·λ. При збільшенні об'єму подачі будь-якого матеріалу в ліву горловину X1 величина енергоємності має тенденцію до поступового зниження. Подібна закономірність має місце і при збільшенні подачі

в праву горловину (при середній подачі в ліву горловину). Ці графіки також вказують на те, що при подачі вихідного матеріалу тільки в одну горловину (ліву при $X_2=-1$ або праву при $X_1=-1$) спостерігається підвищена енергоємність процесу подрібнення. Деяка різниця графіків на рисунках 3.6 і 3.7 пояснюється різною механікою взаємодії матеріалу, що виходить з горловин, з молотками, що рухаються по висхідних та низхідних траєкторіях.

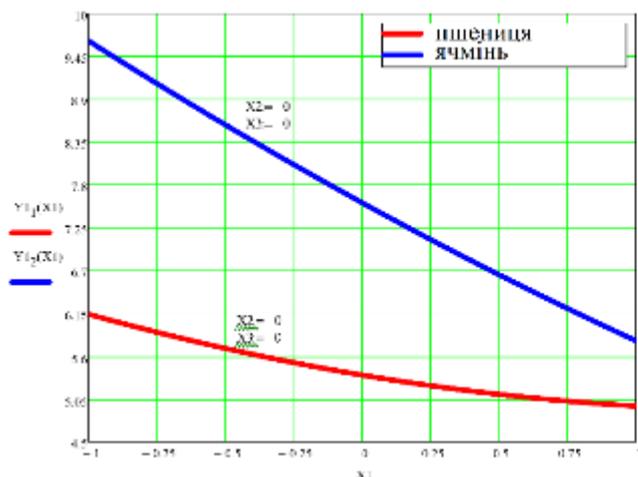


Рисунок 4.4 - Значення енергоємності процесу, в залежності від подачі матеріалу в ліву завантажувальну горловину при значенні правої $X_2=0$ та $X_3=0$

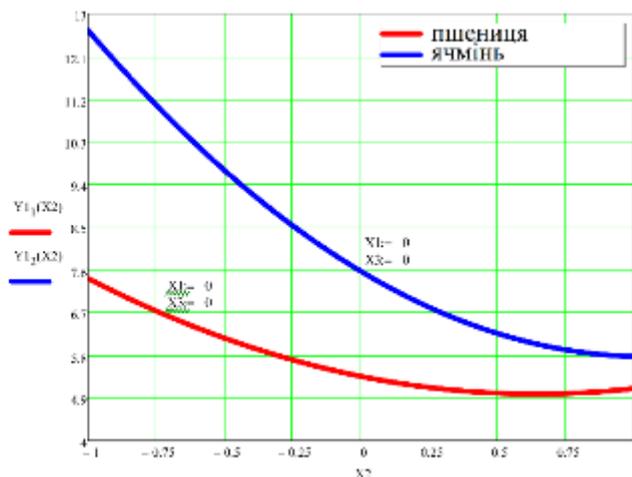


Рисунок 4.5 - Значення енергоємності процесу, в залежності від подачі матеріалу в праву завантажувальну горловину при значенні лівої $X_1=0$ та $X_3=0$

Аналіз факторів, які впливають на процес подрібнення зернових компонентів у молотковій дробарці з опозитною завантаженням при прийнятому інтервалі варіювання кутової швидкості ротора, дозволив з множини факторів визначити два найбільш значущих варіабельних і незалежних фактора.

3.5 Висновки по розділу

1. Проведені експериментальні дослідження підтвердили раніше отримані теоретичні висновки, що віброактивність молоткових дробилок для фуражного зерна може бути знижена при опозитному завантаженні подрібнюваного

матеріалу через дві дзеркально розташовані завантажувальні горловини. Було встановлено, що парна взаємодія цих факторів значно знижує віброактивність.

2. У процесі подрібнення ячменю та пшениці мінімальне значення величини енергоємності процесу подрібнення досягається при збільшенні подачі подрібнюваного матеріалу в ліву та праву отвори, при умові парної подачі матеріалу. Для дробарки горизонтального типу найбільш оптимальними є умови двостороннього завантаження матеріалу в камеру подрібнення при рівному співвідношенні подачі матеріалу, що призводить до зниження значення енергоємності процесу подрібнення.

3. Аналіз показує, що при збільшенні окремо величини фактора X_1 або X_2 показники енергоємності процесу подрібнення рівномірно зростають. Поверхні відгуку показують збільшення значень величин при односторонній подачі матеріалу окремо в завантажувальну горловину X_1 або X_2 , при значенні другого з представлених факторів на нижньому рівні, тобто при повністю закритій шиберній заслінці. Подальше збільшення фактора X_1 або X_2 призводить до збільшення значень вивчених показників.

Верхня межа величин енергоємності процесу подрібнення поступово знижується, зміщуючись від периферії до центру при $X_1 \geq 1$ та $X_2 \geq 2$. Величини показників знижуються до нижніх меж та мають мінімальне значення при парній подачі матеріалу в рівному співвідношенні в дзеркально розташовані завантажувальні горловини, тобто при умові $X_1 = X_2$.

4. Результати проведеного дисперсійного аналізу дозволяють зробити висновок, що кутова швидкість суттєво впливає на значення енергоємності процесу подрібнення. Оптимальним значенням для подрібнювачів з опозитним завантаженням буде величина лінійної швидкості, рівна 45 м/с.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі з молотковою дробаркою

При роботі з молотковою дробаркою зерна необхідно дотримуватися загальних вимог охорони праці, які визначені відповідними нормативно-правовими актами. Перш за все, робоче місце повинно бути організовано так, щоб забезпечити безпеку працівників і ефективне використання обладнання. Усі механізми молоткової дробарки, зокрема її рухомі частини, повинні бути надійно захищені огорожами або іншими захисними пристроями, щоб запобігти контакту працівників з потенційно небезпечними елементами машини. Важливо забезпечити зручний доступ до всіх частин дробарки для виконання обслуговування та ремонту, при цьому зона роботи дробарки має бути чітко позначена, а робітники повинні бути забезпечені відповідними засобами індивідуального захисту (захисними касками, рукавицями, захистом від вібрацій і шуму, захистом органів дихання).

Встановлення засобів колективного захисту є обов'язковим, включаючи блокування доступу до дробарки під час її роботи, а також наявність засобів для аварійного відключення машини в разі необхідності. Працюючи з таким обладнанням, працівники повинні бути проінструктовані щодо безпечного виконання операцій, знати порядок дій у разі аварійних ситуацій. Всі рухомі частини, включаючи молотки, повинні бути надійно зафіксовані, щоб уникнути їх самовільного руху чи викиду під час роботи машини.

Вимоги щодо охорони праці при роботі з молотковою дробаркою зерна регулюються низкою нормативно-правових актів, зокрема Державними стандартами України (ДСТУ) та Європейськими стандартами (EN), які визначають безпечні умови роботи на виробничих підприємствах. Зокрема, важливими є ДСТУ 2757-94 "Машини для обробки зерна. Загальні вимоги безпеки" та ДСТУ EN 609-2:2015. В Україні також існують норми, прописані в Законі України "Про охорону праці", Порядку проведення інструктажу з охорони праці та інших нормативних документах, що визначають обов'язки роботодавців щодо створення безпечних умов праці.

Згідно з Директивою Європейського Союзу 2006/42/ЕС про механічне обладнання, при використанні машин, зокрема дробарок, повинні дотримуватися вимоги щодо безпеки обладнання, а саме: наявність відповідних захисних бар'єрів, автоматичних систем безпеки, що запобігають доступу до рухомих частин машини під час її роботи, а також необхідність регулярного технічного обслуговування та ремонту обладнання.

Таким чином, дотримання нормативно-правових вимог є важливою складовою забезпечення безпеки праці при використанні молоткових дробарок зерна.

4.2 Проект інструкції з охорони праці при роботі з молотковим подрібнювачем концентрованих кормів

Інструкція з охорони праці при роботі з молотковою дробаркою зерна

1. Загальні положення

1.1. Інструкція з охорони праці при роботі з молотковою дробаркою зерна є обов'язковою для всіх працівників, які здійснюють експлуатацію, обслуговування або ремонт молоткової дробарки зерна.

1.2. Молоткова дробарка зерна використовується для подрібнення різних видів зерна (пшениці, ячменю, кукурудзи та ін.) з метою подальшої обробки або виготовлення комбікормів.

1.3. Всі працівники повинні бути навчені безпечним методам роботи з молотковою дробаркою, пройти інструктаж з охорони праці та мати відповідні допуски до роботи з обладнанням.

2. Загальні вимоги безпеки

2.1. Перед початком роботи з молотковою дробаркою потрібно перевірити справність обладнання, наявність огорожувальних пристроїв і механізмів безпеки, а також технічний стан електричного обладнання.

2.2. Перевірте, чи працюють всі сигнальні пристрої, автоматичні блокування та аварійні кнопки зупинки.

2.3. Не допускайте включення дробарки, якщо огороження чи захисні дверцята відкриті або зняті.

2.4. Під час роботи дробарки не можна здійснювати ніяких ремонтних або обслуговувальних робіт, якщо обладнання підключене до електроживлення.

2.5. Усі роботи з дробаркою повинні виконуватися після попереднього вимкнення живлення і вжиття необхідних заходів для запобігання випадковому запуску.

3. Вимоги до робочого місця

3.1. Робоче місце повинно бути чистим, сухим, добре освітленим, а також забезпеченим засобами для швидкого доступу до аварійного вимкнення обладнання.

3.2. Підлога в місці установки дробарки повинна бути рівною, без тріщин, ям, а також не слизькою.

3.3. Між молотковою дробаркою та іншими виробничими машинами або обладнанням має бути забезпечено достатньо вільного простору для безпечного обслуговування.

3.4. Забороняється зберігати зайві предмети та інструменти в зоні роботи дробарки.

4. Правила безпечного використання молоткової дробарки

4.1. Під час роботи з молотковою дробаркою забороняється знаходитися в зоні рухомих частин машини без відповідного захисту (огороження, захисні екрани).

4.2. Для запобігання потрапляння в дробарку сторонніх предметів необхідно стежити за чистотою зони завантаження і вчасно усувати будь-які предмети, які можуть потрапити у машину.

4.3. Під час роботи дробарки оператор повинен стежити за її роботою, включаючи перевірку рівня шуму, вібрацій та температури. У разі появи аномальних сигналів негайно вимкнути машину і провести перевірку.

4.4. Використання захисних рукавичок, спецвзуття та інших засобів індивідуального захисту є обов'язковим для всіх працівників.

4.5. Під час завантаження зерна в машину не допускається перевищення нормальної швидкості подачі або перевантаження дробарки.

4.6. У разі виникнення задимлення, перегріву чи інших аномальних явищ слід негайно вимкнути дробарку та провести її огляд.

5. Вимоги до електробезпеки

5.1. Для запобігання ураженню електричним струмом всі електричні підключення повинні відповідати вимогам стандартів і бути заземлені.

5.2. Обслуговування електричної частини дробарки має проводити тільки кваліфікований електрик після відключення живлення.

5.3. Проводити ремонтні роботи, які стосуються електричної частини, можна тільки після повного вимкнення молоткової дробарки від електроживлення.

6. Вимоги до обслуговування та ремонту

6.1. Проводити будь-які обслуговування або технічне обслуговування дробарки дозволяється тільки після її вимкнення і перевірки відсутності рухомих частин.

6.2. Для чищення дробарки необхідно використовувати спеціальні інструменти, не допускаючи контакту з рухомими частинами машини.

6.3. Регулярно перевіряйте стан молотків, решет, підшипників та інших механізмів, що відповідають за роботу дробарки, і в разі потреби проводьте їх заміну або ремонт.

7. Аварійні ситуації

7.1. У разі аварійної ситуації, такої як замикання, перегрів або інші несправності, оператор повинен негайно вимкнути дробарку і повідомити про інцидент керівництво.

7.2. При аваріях з механічними пошкодженнями або утриманням сторонніх предметів у машині слід вжити заходів для безпечного зняття енергії з машини, перед тим як виконувати ремонтні роботи.

8. Нормативно-правова база

8.1. Інструкція з охорони праці базується на вимогах законодавчих актів України, таких як Закон України "Про охорону праці", Порядок проведення

інструктажу з охорони праці та ДСТУ 2757-94 «Машини для обробки зерна. Загальні вимоги безпеки».

8.2. Для обладнання, що відповідає європейським стандартам, повинні дотримуватись Директиви Європейського Союзу 2006/42/ЕС щодо механічного обладнання, що забезпечують безпеку користувачів.

4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях

Порядок дій у надзвичайних ситуаціях: наліт шахедів (безпека під час атаки безпілотників)

1. Підготовка до можливої атаки

1.1. Захист персоналу та людей:

- Забезпечити, щоб усі працівники та відвідувачі перебували в безпечних зонах (сховищах, підвалах, спеціальних укриттях) згідно з планом евакуації.

- Перевірити справність всіх укриттів і сховищ на відповідність вимогам безпеки.

- У разі відсутності спеціальних укриттів, визначити найближчі об'єкти, які можуть служити укриттями (підвали, приміщення без вікон, міцні стіни).

1.2. Перевірка наявності засобів захисту:

- Перевірити наявність індивідуальних засобів захисту: протигази, аптечки першої допомоги, радіостанції для зв'язку.

- Перевірити наявність запасу води, їжі та необхідних медикаментів у укриттях.

2. Під час атаки безпілотниками (шахедами)

2.1. Попередження про загрозу:

- В разі сповіщення про можливу атаку безпілотниками або шахедами через систему оповіщення або інші канали, негайно оголосити сигнал тривоги.

- Інформувати усіх співробітників і відвідувачів про загрозу і направити їх до найближчого укриття або безпечної зони.

2.2. Реакція на сигнал повітряної тривоги:

- Під час тривоги всі працівники та інші особи повинні негайно покинути робочі місця і переміститися до укриттів, не зволікаючи.
- Закрити всі вікна, двері та інші отвори в приміщеннях, якщо це дозволяє ситуація.
- Якщо укриття знаходяться далеко або не доступні, розглядати можливість перебування у віддалених частинах будівлі з мінімальними вікнами та стінами, що надають захист.

2.3. Дії під час вибуху або влучання:

- Якщо безпілотник здійснив напад або стався вибух у безпосередній близькості, залишатися в укритті до зняття тривоги або поки не стане безпечно виходити.
- При наявності вогню чи диму застосовувати вогнегасники або інші засоби боротьби з вогнем, якщо це безпечно.
- У разі поранень надавати першу медичну допомогу, скориставшись аптечками, або звертатися за допомогою до медичних служб.

3. Після атаки

3.1. Перевірка території на наявність додаткових загроз:

- Після атаки перевірити територію на наявність інших вибухових пристроїв або обломків, що можуть бути небезпечними.
- Не залишати укриття або робочі місця без необхідності до зняття тривоги або повідомлення від відповідних органів (Державна служба з надзвичайних ситуацій, військові).

3.2. Евакуація:

- Якщо необхідно провести евакуацію, дотримуватись інструкцій і слідувати вказівкам органів влади або керівництва щодо маршрутів і безпечних точок збору.
- Під час евакуації намагатися уникати відкритих територій, таких як парки або площі, що можуть бути потенційними цілями для подальших атак.

3.3. Звітування і контроль:

- Після стабілізації ситуації провести перевірку всіх співробітників і оцінити ступінь шкоди, завданої атаками, включаючи матеріальні збитки, пошкодження інфраструктури тощо.

- Скласти звіт про інцидент і передати його відповідним органам.

4. Профілактика та підготовка до наступних атак

4.1. Навчання персоналу:

- Регулярно проводити навчання та тренування для персоналу, щоб бути готовими до будь-якої надзвичайної ситуації.

- Навчити персонал принципам надання першої медичної допомоги, евакуації та використання засобів захисту.

4.2. Аналіз і покращення заходів безпеки:

- Проводити аналіз поточної ситуації та розробляти плани для поліпшення безпеки (наприклад, обладнання додатковими засобами захисту, зміни в планах евакуації).

- Оновлювати технічне обладнання для виявлення дронів, покращення системи оповіщення та реагування.

5. Законодавчі норми та правила безпеки

- Ознайомлення з національними та міжнародними стандартами безпеки у разі атак з використанням безпілотників, зокрема з Законом України "Про охорону праці", ДСНС України та міжнародними стандартами у галузі безпеки при надзвичайних ситуаціях (наприклад, Європейські директиви з безпеки при аваріях).

Ці заходи повинні бути адаптовані до умов конкретного підприємства чи установи, щоб забезпечити максимальний захист персоналу та мінімізацію можливих збитків.

4.4 Висновки по розділу

Охорона праці при роботі з молотковою дробаркою зерна вимагає регулярних інструктажів та дотримання правил безпеки, що допомагає запобігти травмам. Важливо здійснювати технічні огляди обладнання та правильно організувати робочі процеси для мінімізації ризиків аварій. Працівники повинні

використовувати індивідуальні засоби захисту, зокрема рукавички та захисні окуляри. У разі надзвичайних ситуацій, таких як аварії чи атаки шахедів, необхідно чітко дотримуватись встановленого порядку дій. Всі заходи охорони праці регулюються нормами українського законодавства та міжнародними стандартами.

5 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОГО ПОДРІБНЮВАЧА

5.1 Вихідні дані

Задача магістерської роботи полягає в розробці нової конструктивно-технологічної схеми подрібнювача фуражного зерна, яка повинна забезпечувати високу якість подрібнення, низькі питомі витрати енергії та високу пропускну здатність. Для аналізу економічної ефективності нової розробки було взято за прототип молотковий подрібнювач кормів КР-02.

Обсяг робіт: під час зимового періоду (210 днів) в обох випадках – для подрібнювача КР-02 і для нового подрібнювача – запланований обсяг робіт складає 100 тон.

Продуктивність: для нового подрібнювача продуктивність складає 240 кг/год, що на 20% більше, ніж у молоткового подрібнювача КР-02, де продуктивність складає 200 кг/год.

Потужність приводу: потужність приводу для обох подрібнювачів однакова і складає 2,5 кВт.

Питома енергоємність: питома енергоємність нового подрібнювача є нижчою, що дозволяє зменшити енергетичні витрати на одиницю продукції. Для молоткового подрібнювача КР-02 питома енергоємність складає 12,5 кВт·год/т, а для нового – 10,4 кВт·год/т.

Обслуговуючий персонал: кількість обслуговуючого персоналу залишилась незмінною у обох варіантах – 1 людина.

Капітальні вкладення: для нового подрібнювача капітальні вкладення складають 5200 грн, тоді як для подрібнювача КР-02 балансову вартість не вказано, оскільки це прототип.

5.2 Розрахунок показників економічної ефективності

Порівняльна оцінка базового серійного подрібнювача КР-02 та удосконаленої конструкції виконана на основі питомих експлуатаційних витрат. До

складу даних витрат включені: заробітна плата обслуговуючого персоналу, витрати на спожиту електроенергію, амортизаційні відрахування, витрати на технічне обслуговування та ремонт. Розрахунок економічних показників здійснено згідно з методичними рекомендаціями [47].

В результаті проведених розрахунків встановлено, що модернізований подрібнювач забезпечує зниження питомих експлуатаційних витрат на 17,3 %, що зумовлено меншою питомою енергоємністю подрібнення та зниженням витрат на обслуговування і ремонт агрегата. При цьому продуктивність розробленої конструкції зростає на 20 % при незмінній встановленій потужності електроприводу та однакової чисельності обслуговуючого персоналу.

Таблиця 5.1 – Показники економічної ефективності розробленого подрібнювача

| Показники | Базовий варіант | Розроблений подрібнювач | % до базового |
|--|-----------------|-------------------------|---------------|
| Продуктивність, т/год | 0,20 | 0,24 | 120,0 |
| Встановлена потужність, кВт | 2,5 | 2,5 | 100,0 |
| Обслуговуючий персонал, люд. | 1 | 1 | 100,0 |
| Капітальні вкладення, грн | – | 5200 | – |
| Питомі річні експлуатаційні витрати, грн/т | 457,40 | 378,37 | 82,7 |
| у т.ч.: заробітна плата | 421,25 | 350,00 | 83,1 |
| витрати на електроенергію | 32,50 | 27,08 | 83,3 |
| амортизаційні відрахування | 2,03 | 0,71 | 35,1 |
| витрати на ТО і ремонт | 1,62 | 0,57 | 35,1 |
| Максимальне річне навантаження, т | 100 | 100 | – |
| Економія питомих витрат, грн/т | – | 79,03 | – |
| Річна економія експлуатаційних витрат, грн | – | 7903,4 | – |
| Строк окупності капвкладень, років | – | 0,7 | – |

5.3 Висновки по розділу

Техніко-економічна оцінка модернізованого подрібнювача засвідчила його переваги над базовим аналогом КР-02. Зниження питомих експлуатаційних витрат забезпечує отримання додаткового економічного ефекту, який при річному навантаженні становить 7903,4 грн. Розрахунки показали, що впровадження удосконаленої конструкції є економічно доцільним, оскільки термін окупності капітальних вкладень становить лише 0,7 року, що відповідає одному виробничому сезону.

Загальні висновки

1. Запропоновано молоткову дробарку з опозитною (дзеркальною) двосторонньою подачею зерна. Схема збалансовує ударні навантаження по діаметру ротора, знижує технологічну віброактивність і непродуктивні енерговтрати порівняно з традиційною верхньою подачею.

2. Аналітично показано: при опозитній подачі відхилення парних молотків і їх відцентрові сили вирівнюються ($\varphi_1 \approx \varphi_2$; $P_1 \approx P_2$), що теоретично усуває джерело технологічної вібрації. Оцінено втрати енергії у шарнірах молотків і доведено їх зменшення за рахунок менших кутових коливань.

3. Сформовано реологічну модель в'язко-пружних контактів частинок у тонкому вібруючому шарі; розсіяння енергії прямо пропорційне рівню віброактивності, отже її зниження дає безпосередній енергетичний ефект.

4. На спрощених моделях «машина-фундамент-грунт» встановлено: поблизу резонансу втрати на вібрування основи можуть досягати $\approx 10\%$ потужності приводу. Ефективні шляхи зменшення: уникнення резонансу, антирезонансне налаштування амортизаторів, перш за все - зниження первинної віброактивності опозитною подачею.

5. Розроблено та випробувано лабораторний зразок дробарки з опозитною подачею (22 секції дисків, 132 молотки, 62–111 м/с). Дослідження на пшениці й ячмені підтвердили теоретичні висновки.

6. Відібрано керовані фактори: подача в ліву (q_1) та праву (q_2) горловини і кутова швидкість ω . Отримано регресійні моделі ($R^2 \approx 0,90-0,95$), побудовано поверхні відгуку та 2D-перерізи. Показано перевагу збалансованої двосторонньої подачі ($q_1 \approx q_2$).

7. Оптимальний діапазон лінійної швидкості молотків - 45–55 м/с: тут мінімізуються енерговитрати; далі вони зростають через гідро-аеродинамічні опори. Для пшениці локальний мінімум досягався при $q_1 \approx 0,08$ кг/с, $q_2 \approx 0,05$ кг/с, $\omega \approx 454$ рад/с.

8. Систематизовано загальні вимоги й інструкції (ЗІЗ, огороження, блокування, регламенти ТО/ремонт, порядок дій при НС/повітряній тривозі). Заходи узгоджені з вимогами законодавства України та стандартів ЄС, що знижує ризики шуму, вібрації, пилу та травмонебезпеки.

9. Порівняно з КР-02: +20% продуктивності і $\approx -16,8\%$ питомої енергоємності при тій же потужності 2,5 кВт; питомі експлуатаційні витрати знижено з 457,40 до 378,37 грн/т (економія 79,03 грн/т); річний ефект за 100 т - 7903,4 грн; окупність вкладень 5200 грн - $\approx 0,7$ року.

Бібліографія

1. Єгоров, Б.В. Технологія виробництва комбікормів [Текст]: підруч. для вищ. навч. закладів/Б.В. Єгоров.–Одеса.: Друкарський дім, 2011.– 448 с.
2. Дудін В.Ю. Технологія виробництва і переробки продукції свинарства: навчальний посібник / М. Повод, О. Бондарська, В. Лихач, С. Жижка, В. Нечмілов та ін. – Київ : Науково-методичний центр ВФПО, 2021. – 360 с.
3. Романюха І.О., Дудін В.Ю. Курсове і дипломне проектування тваринницьких підприємств: навч. посібн. [для студ. вищ. навч. закл.]/І.О. Романюха, В.Ю. Дудін; за ред. І. Романюхи. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2014. – 418 с.
4. Повод М.Г, Дудін, В.Ю., Шпетний М.Б. Розробка основних засад щодо обґрунтованого визначення розмірів санітарно-захисних зон свиноферм: монографія, Суми, «Сумський національний аграрний університет» 2019. – 96 с., ISBN 978-617-593-059-5
5. Дудін В.Ю. Експериментальні дослідження малогабаритного подрібнювача соковитих кормів/ В.Ю. Дудін, О.С. Гаврильченко, П.С. Височин // Materials of the XIII International scientific and practical Conference Science and civilization – 2018, Volume 12, January 30 - February 7, 2018.: Sheffield. Science and education LTD – 41-45 p
6. Дудін В.Ю. Формування якості годівлі повнораціонними комбікормами / В.Ю. Дудін, О.С. Гаврильченко, Ю.І. Мудрак, П.І. Черниш //Materiály XIV Mezinárodní vědecko - praktická konference «Moderní vymoženosti vědy - 2018», Volume 8 : Praha. Publishing House «Education and Science» - S. 48-53.
7. Дудін В.Ю. Дослідження енергетичних характеристик процесу змішування сипких кормів/ В.Ю. Дудін, Я.О. Муха, О.Ю. Лук'яненко // Materials of the XIII International scientific and practical Conference Conduct of modern science - 2018 , November 30 - December 7, 2018. Construction and architecture. Agriculture. Modern information technology.: Sheffield. Science and education LTD – 41-45 p.
8. Дудін В.Ю. Дослідження процесу різання коренеплодів / В.Ю. Дудін, І.А. Бородавка//Materialy XV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, «Strategiczne pytania światowej nauki - 2019» , Volume 10 Przemysł: Nauka i studia– 36-39 s.

9. Дудін В.Ю. Дослідження подрібнювача фуражного зерна сколюючої дії / В.Ю. Дудін, О.М. Антіпов // *Materialy XV Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, «Strategiczne pytania światowej nauki - 2019»*, Volume 10 *Przemysł: Nauka i studia* -33-35 s.
10. Suhadi, W. Die Shecke als Arbeitsorgan in verarbeitungs - maschinen. / W.Suhadi. // *Maschinenbautechnik* –№5, 1967, – P. 41-56. (англ)
11. Oyama J., Ayaki K. Kagaki Kikai, 1956, №20, – P. 6.
12. Lacey. P.M. Development in the Thery of Particfl mixing. *J. Appl. Chem.* 1954, №4, – P. 257
13. Duschek K. Optimierung der Produktion in einem bolivianischen Ziegelwerk / *Ziegelindustrie International*. Wiesbaden: Dauerlag
14. http://mehzavod.com.ua/Materials/%D0%91%D1%83%D0%BA%D0%BB%D0%B5%D1%82_%D0%9C%D0%9A%D0%A3.pdf
15. https://downloads.skiold.dk/downloads/leaflets/engelsk/disc-mill_gb.pdf
16. <https://downloads.skiold.dk/downloads/feed/psheet/130986003949.pdf>
17. <https://agrostory.com/ua/info-centre/agronomists/mobilnyy-kombikormovyy-zavod-i-perspektivy-ego-ispolzovaniya/>
18. <https://propozitsiya.com/ua/kombikorm-na-kolesah>
19. <https://riela.com.ua/peresuvna-ustanovka-kombikormiv/>
20. Magnus, K. Schwingungen: Eine Einführung in die physikalischen Grundlagen und die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen [Text] / Kurt Magnus. - Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2008. – 74p.
21. Parkinson, A.G. Vibration and balancing of rotating continuous shafts [Text]/A.G. Parkinson, R.E.B. Bishop // *Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science.* – 1961. – No.3. – P. 200-213.
22. Баранецька О.Р. Вібраційне змішування сумішей сипучих матеріалів [Текст] / О.Р. Баранецька // *Машинознавство.* – 2000. – № 3 (33). – С. 60–63.
23. Афтаназів, І.С. Вибір технології і обладнання для змішування сумішей сипучих матеріалів [Текст] / І.С.Афтаназів, О.Р.Баранецька, О.М. Сімчук// *Машинознавство.* – 1999. – № 5 (23). – С. 55–62.

24. Берник, М.П. Віброімпульсний привод нового вібраційного змішувача [Текст] / М.П. Берник, О.В. Цуркан, Л.Д. Величко // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 2(18). – С. 3–7.
25. Sarang O. Effects of powder cohesion and segregation on pharmaceutical mixing and granulation: dissertation doctor of philosophy: 05.2003/ O.Sarang // USA: New Jersey. – 2016. – P.1-8 (140).
26. Берник М.П., Цуркан О.В. Обґрунтування технологічних та конструктивних схем енергозберігаючих віброзмішувачів барабанного типу // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – №1 (17). – С. 34–37.
27. Цуркан О.В., Величко Л.Д. Віброімпульсний привод нового вібраційного змішувача // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – №2 (18). – С. 3–7.
28. Берник П.С., Берник М.П., Цуркан О.В. Енергозберігаючі змішувачі для приготування сипучих кормів // Техніка АПК. – 2003. – №8. – С. 16–18.
29. Регресійний аналіз [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://libfree.com/114811945_ekonomikaregresiyuy_analiz.html - Назва з екрану.
30. Рогатинський Р.М. Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів з сировиною сільськогосподарського виробництва: Дис.- докт. техн. наук: 05.20.01. - К., 1997.- 425 с.
31. Гевко І.Б., Гурик О.Я. Дослідження конструкторсько-технологічних параметрів зони перевантаження гвинтових транспортно-технологічних систем. Збірник наукових праць Національного аграрного університету "Механізація сільськогосподарського виробництва". - Том VII. - К.: Видавництво НАУ. - 2000. - с. 184-190.
32. Григор'єв А.М., Преображенський П.А. Комплексна механізація і автоматизація вантажорозвантажувальних і транспортних робіт в машинобудуванні і приладобудуванні. К.: Наукова думка, - 1967. - 116 с.
33. Радик Д.Л., Гурик О.Я. Дослідження енерговитрат шнекового змішувача. - Тернопіль: Вісник ТДТУ, 2001, Том. 6, №3 - С56-61.
34. Оришка Х.О., Гончаров В., Кравцова Г., Артюхов А.. Процес взаємодії з сипкими матеріалами у постачальному пристрої гравітаційно- роторного типу. Вісник ТДТУ, Т.6., №4., 2001. С. 88-95.

35. Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин. Навч. посібник. -К.: НМК ВО, 1992. - 320 с.
36. Стадник І.Я. Науково-технічні основи дискретної дії на компоненти при перемішуванні : монографія / І.Я. Стадник. – Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. – 240 с.
37. Strenk F. Mieszanieimieszalniki (Mixing and mixingequipment) / F.Strenk. – Warszawa : Wydawnictwa NaukowoTechniczne, 1971. – 367 p.
38. Стадник І.Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста : дис ... д.т.н. : 05.18.12 / І.Я. Стадник. – Київ. – 2013. – 487 с.
39. Researching of the concentration distribution of soluble layers when mixed in the weight condition / I.Stadnyk, J.Pankiv, P.Havrylko, H.Karpyk // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. – 2019. – Vol. 13. – № 1. – P. 581–592. DOI: 10.5219/1129. 5
40. Корнієнко Я.М. Процеси переносу в дисперсних системах : навч. посіб. / Я.М. Корнієнко, Р.В. Сачок. – Київ, 2011. – 132 с. 10. Расслоение в псевдоожигеном слое [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://repetitora.com/rassloeniev-psevdoozhizhenom-sloe>.
41. Drobot V.I. Technological calculations in baking production / V.I. Drobot. – Condor, 2010. – 440 p.
42. Закон України «Про охорону праці»
43. НПАОП 0.00-4.21-04. «Типове положення про службу охорони праці»
44. ДСТУ 2293-99 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять»
45. НПАОП 0.00-6.03-93 «Порядок опрацювання і затвердження роботодавцем нормативних актів з охорони праці, що діють на підприємстві»
46. Положення «Про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту» (Наказ Держгірпромнагляду від 24.03.2008 року № 53).
47. ДСТУ 4397: 2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 15 с.

ДОДАТКИ

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра механізації виробничих процесів у тваринництві

Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів молоткової дробарки зерна

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-1-24
Лускань Максим Сергійович

Керівник: к.т.н., доцент
Дудін Володимир Юрійович

Дніпро-2025

Мета і задачі досліджень

Метою дослідження є обґрунтування та встановлення раціональних конструкційно-технологічних параметрів молоткової дробарки для подрібнення зернових кормових матеріалів, що забезпечують підвищення енергоефективності процесу, стабільність фракційного складу та покращення якісних та техніко-економічних показників роботи обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних конструкцій молоткових дробарок та визначити їх переваги, недоліки та проблемні технічні аспекти, що потребують удосконалення.
2. Дослідити вплив конструкційних параметрів робочих органів (геометрія молотків, їх маса, розташування, швидкість обертання ротора, тип решета) на якість та ефективність подрібнення зерна.
3. Розробити конструкцію удосконаленого дослідного зразка молоткової дробарки та обґрунтувати вибір її основних конструктивних елементів.
4. Провести оцінку показників продуктивності та фракційного складу подрібненого матеріалу при різних режимах роботи.
5. Розробити заходи щодо підвищення безпеки та покращення умов охорони праці при експлуатації дробарки у виробничих умовах.
6. Здійснити техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження удосконаленої конструкції дробарки та оцінити економічний ефект від її застосування.

Об'єктом дослідження є процес подрібнення зернових кормових матеріалів у молоткових дробарках.

Предметом дослідження є конструкційні та технологічні параметри молоткової дробарки, які впливають на ефективність подрібнення, енерговитрати, фракційний склад та якість отриманого подрібненого продукту.

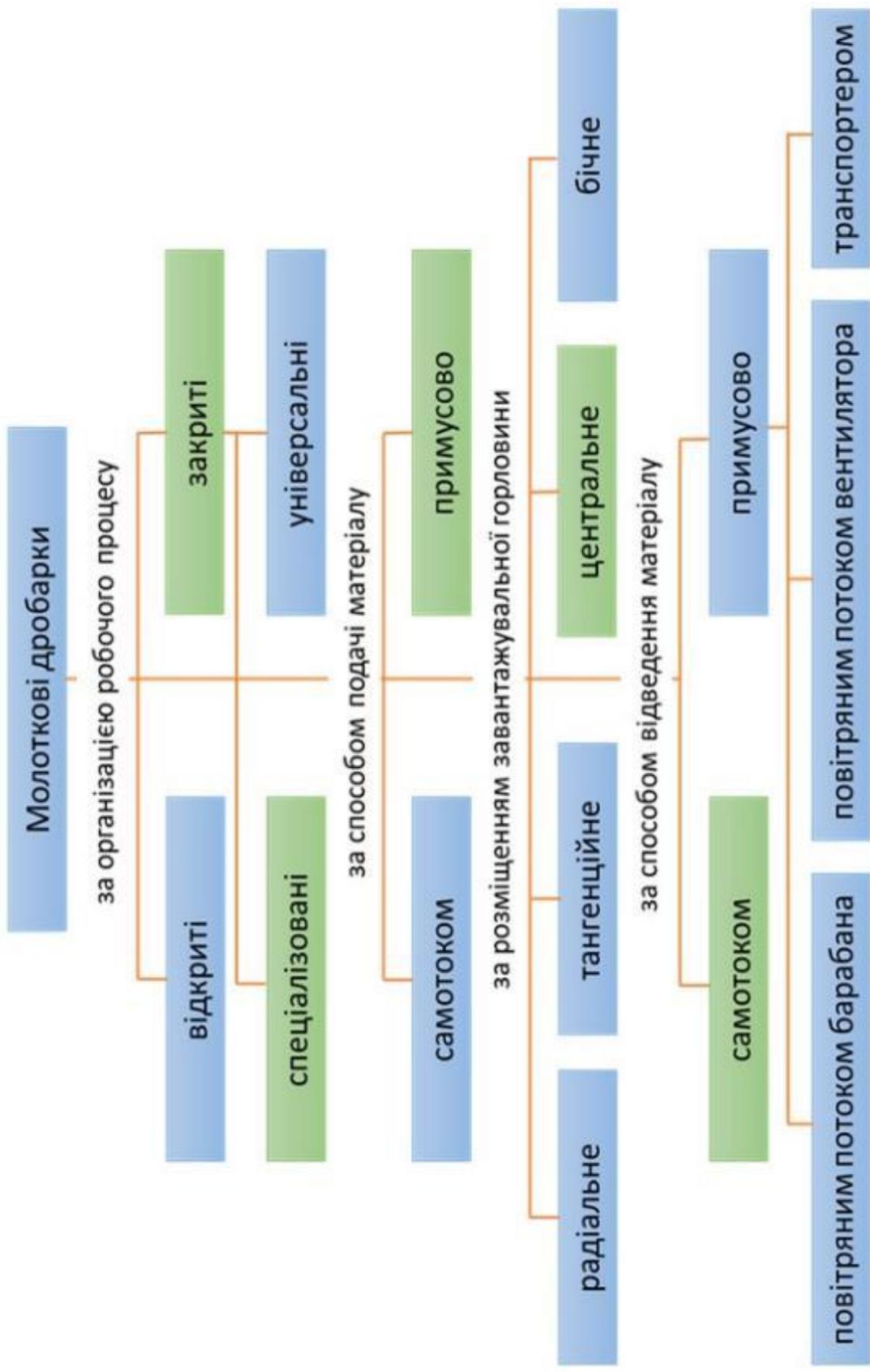


Рисунок 1 - Класифікація молоткових дробарок

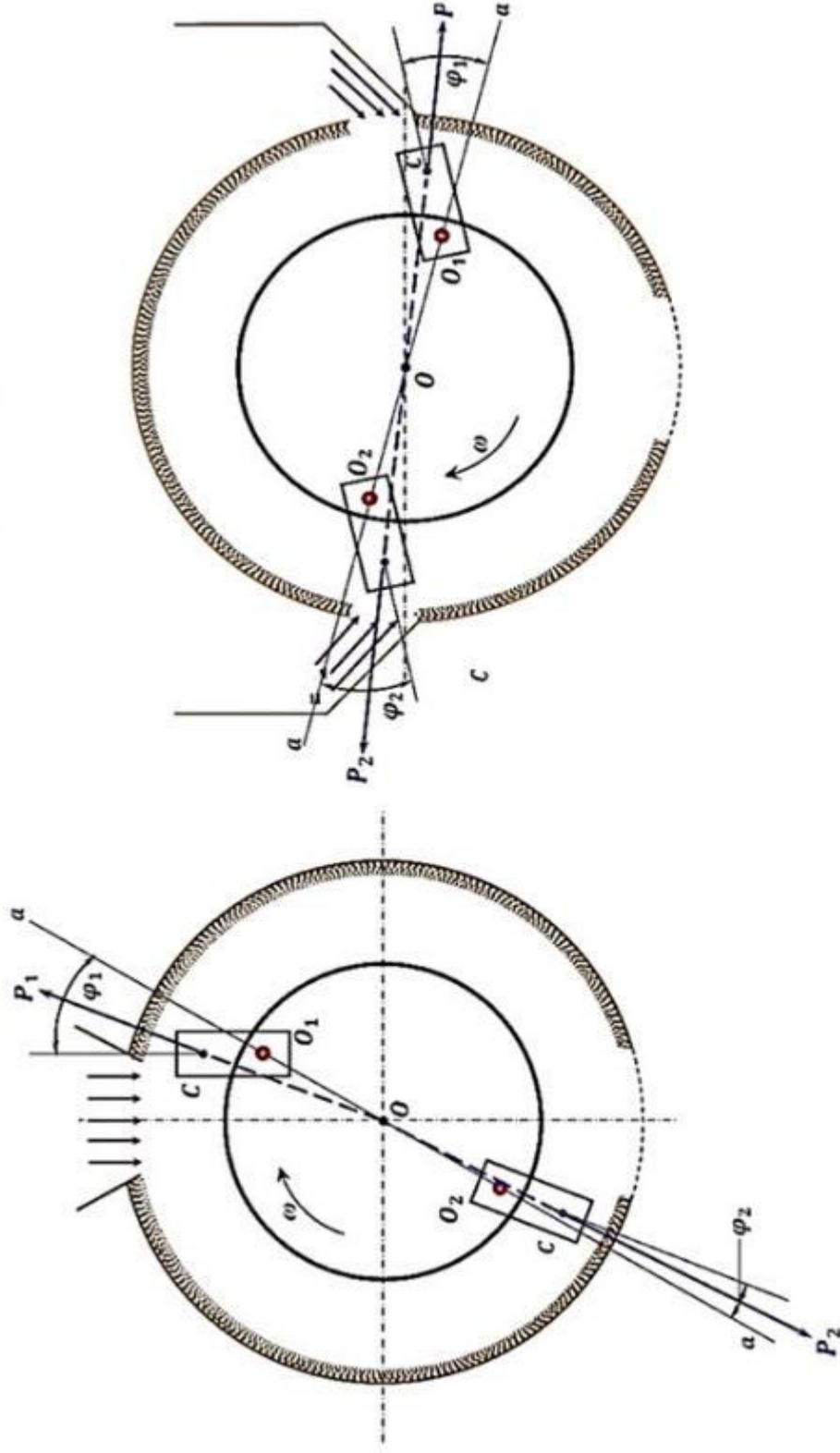


Рисунок 2 - Динамічні схеми системи барабана з двома діаметрально розташованими молотками: а - при верхній подачі матеріалу; б - при опозитній подачі у бокові завантажувальні пристрої

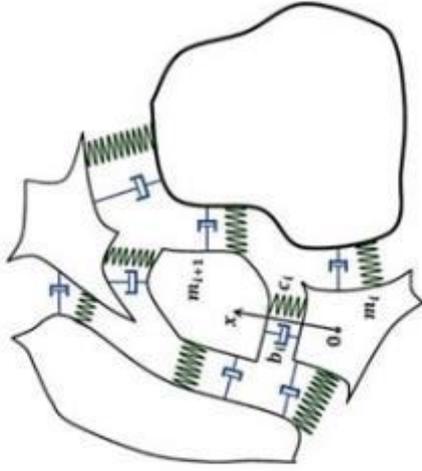


Рисунок 3 - Реологічна модель силових взаємодій у елементах продуктово-повітряного шару

Рівняння руху частинки

$$m_i \ddot{x} + b_i \dot{x} + c_i x = \Phi_{0i} \sin(\omega t)$$

де x і η - відповідно абсолютне та відносне (відносно частинки m_{i-1}) переміщення;
 b_i, c_i - коефіцієнти в'язкості та жорсткості i -го контакту;

Φ_{0i} - вимушувальна сила (рівнодійна інших контактних взаємодій), спроектована на напрямок x ;

ω - кутова частота коливань, що збігається за величиною з кутовою швидкістю барабана.

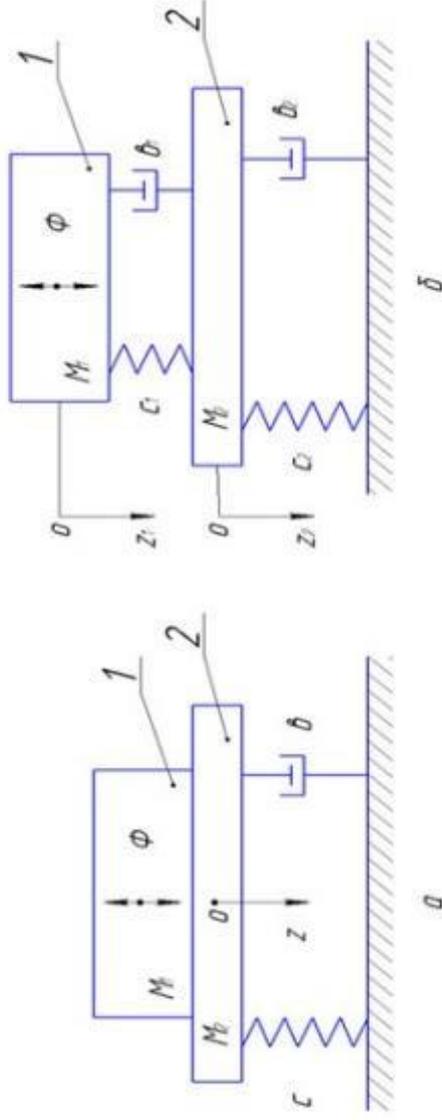


Рисунок 4 - Схеми до розрахунку вимушених коливань: а - жорстке кріплення дробарки до фундаменту; б - кріплення через амортизувальні елементи (1 - дробарка; 2 - фундамент)

Зв'язок дробарки з фундаментом може бути: - жорстким, або - через амортизувальні елементи.

Цим відповідають дві розрахункові схеми системи «дробарка - фундамент - ґрунт» (4). Дію ґрунтової основи в обох випадках моделюють пружними елементами c_1, c_2 та в'язкими елементами b_1, b_2 що еквівалентно відображають реакцію ґрунту як пружно-в'язкого, лінійно-деформівного середовища.

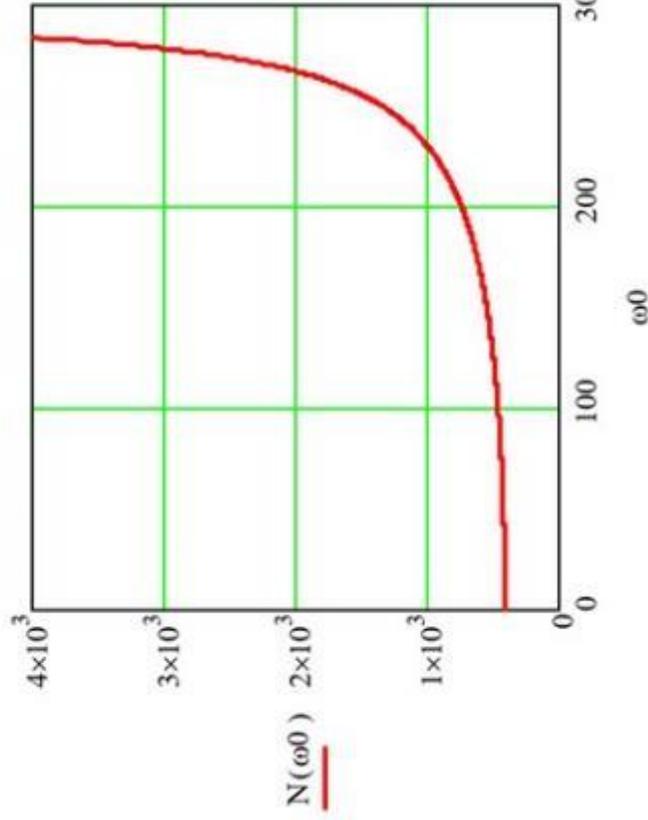


Рисунок 5 - Залежність енергетичних втрат у основі фундаменту від власної частоти ω_0 системи «дробарка - фундамент - основа»

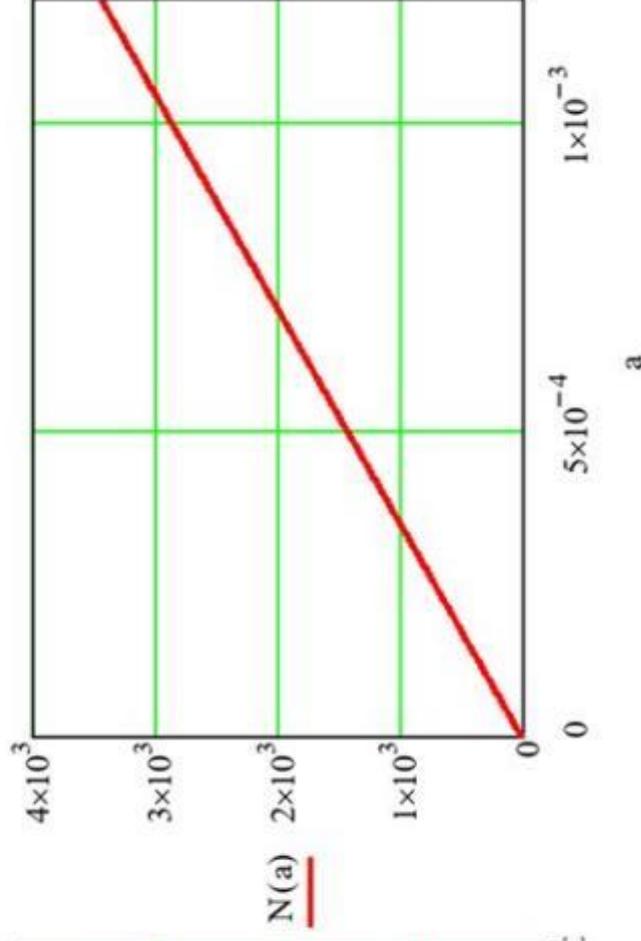


Рисунок 6 - Максимальна середня потужність, що віддається електродвигуном на вібрування основи, як функція амплітуди A коливань фундаменту

Розрахунки показують, що «відбір» енергії на вібрування основи (фундаменту) дробарки може досягати 10 % потужності приводу. Щоб зменшити ці втрати, слід або збільшувати масу фундаменту, або знижувати віброактивність самої дробарки.

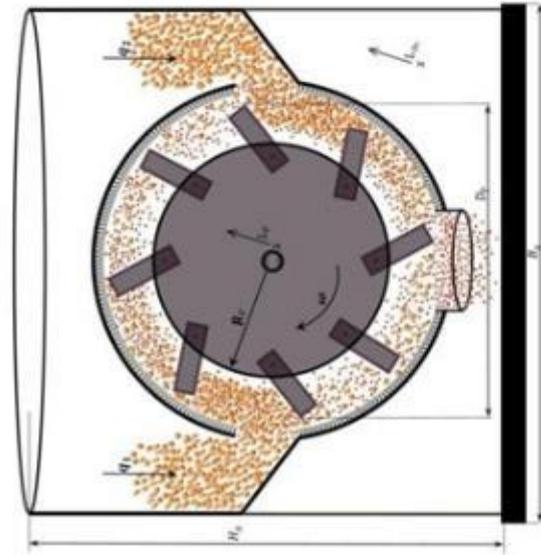


Рисунок 6 - Схема зернодробарки з опозитним завантаженням

Таблиця 1 - Змінні, що описують вплив чинників на процес подрібнення в молотковій дробарці

| № | Назва змінної | Позначення | Розмірність (L-M-T) | Одиниця SI |
|---|---|------------|------------------------------------|------------------------|
| 1 | Радіус ротора | R | L | м |
| 2 | Кутова швидкість обертання ротора | ω | T ⁻¹ | с ⁻¹ |
| 3 | Зазор між кінцями молотків і декою | δ | L | м |
| 4 | Густина зернівки | ρ | M·L ⁻³ | кг·м ⁻³ |
| 5 | Максимальний лінійний розмір зернівки | b | L | м |
| 6 | Напруження руйнування зернівки (границя міцності) | σ | M·L ⁻¹ ·T ⁻² | Н·м ⁻² = Па |
| 7 | Подача матеріалу в лівий отвір | q1 | M·T ⁻¹ | кг·с ⁻¹ |
| 8 | Подача матеріалу в правий отвір | q2 | M·T ⁻¹ | кг·с ⁻¹ |

Як критерій оптимальності приймаємо питому енергоємність подрібнення зерна E_i

$$E_i = \Phi(R, \omega, \delta, \rho, b, \sigma, q_1, q_2)$$

Як змінні фактори процесу подрібнення приймаємо:

- Подача вихідного матеріалу в лівий отвір - q_1 , кг/с;
- Подача вихідного матеріалу в правий отвір - q_2 , кг/с;
- Кутова швидкість обертання ротора - ω , рад/с.

Експериментальні дослідження

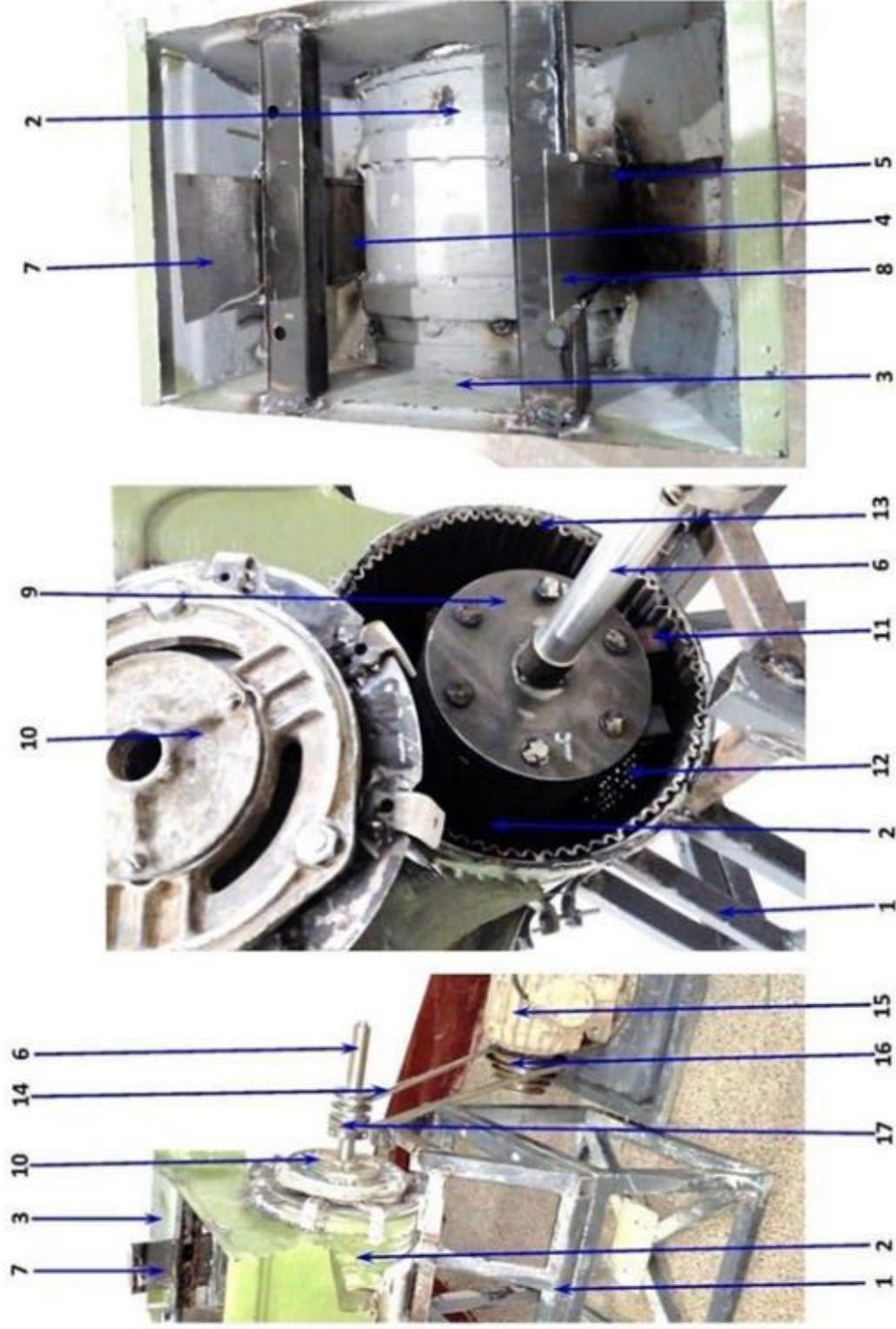


Рисунок 7 - Експериментальний зразок молоткової дробарки з опозитним завантаженням зерна

Результати експериментальних досліджень

Рівняння регресії в кодovаних змінних, де як функцію відгуку Y_1 прийнято енергоємність E . Її оцінювали через досягнуту продуктивність дробарки Q і споживану потужність N з урахуванням ступеня подрібнення λ .

$$Y_1(X_1, X_2, X_3) = 7.574 - 2.174X_1 - 3.564X_2 + 2.066X_3 + 2.217X_1X_2 - 2.317X_1X_3 - 2.22X_2X_3 + 0.154X_1^2 + 1.889X_2^2 + 3.315X_3^2$$

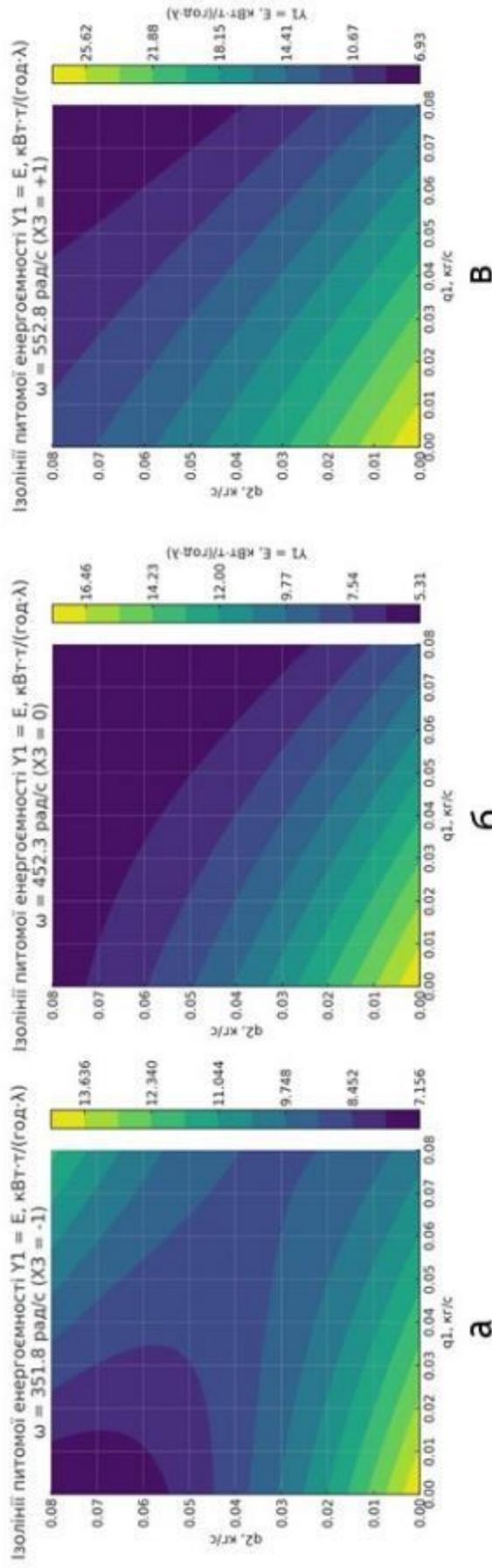


Рисунок 8 - Залежності питомої енергоємності $Y_1=E$ при: а - ($X_3=-1$), б - ($X_3=0$), в - ($X_3=+1$)

Аналізуючи дані графічних зображень і рівнянь, можна відзначити, що під час подрібнення пшениці зі збільшенням швидкості в межах 45-55 м/с енергоємність помітно зменшується, а за подальшого зростання колових швидкостей молотків понад 55 м/с енергоємність знову зростає внаслідок збільшення гідродинамічних опор ротора. Звідси оптимальна швидкість молотків - у межах 45...55 м/с.

Результати експериментальних досліджень

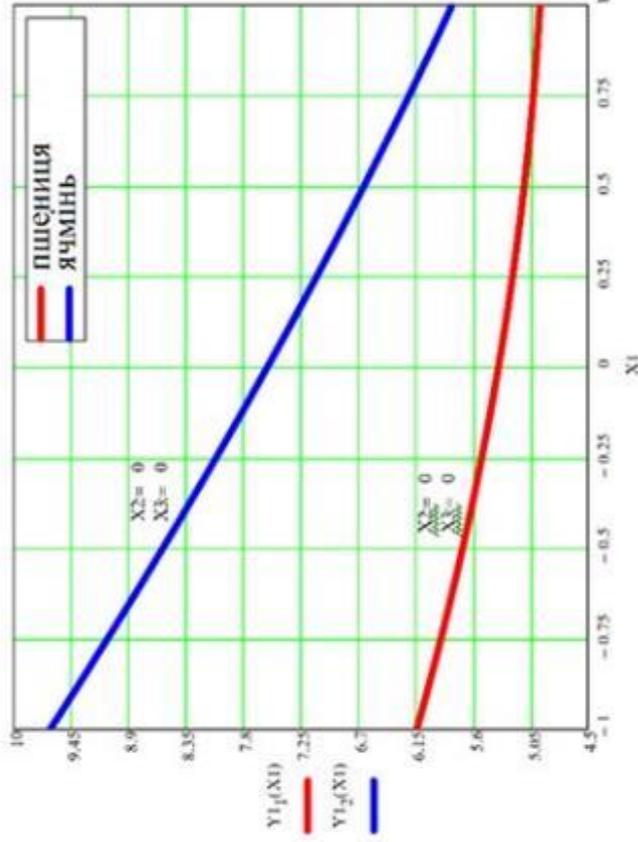


Рисунок 9 - Значення енергоємності процесу, в залежності від подачі матеріалу в ліву завантажувальну горловину при значенні правої $X2=0$ та $X3=0$

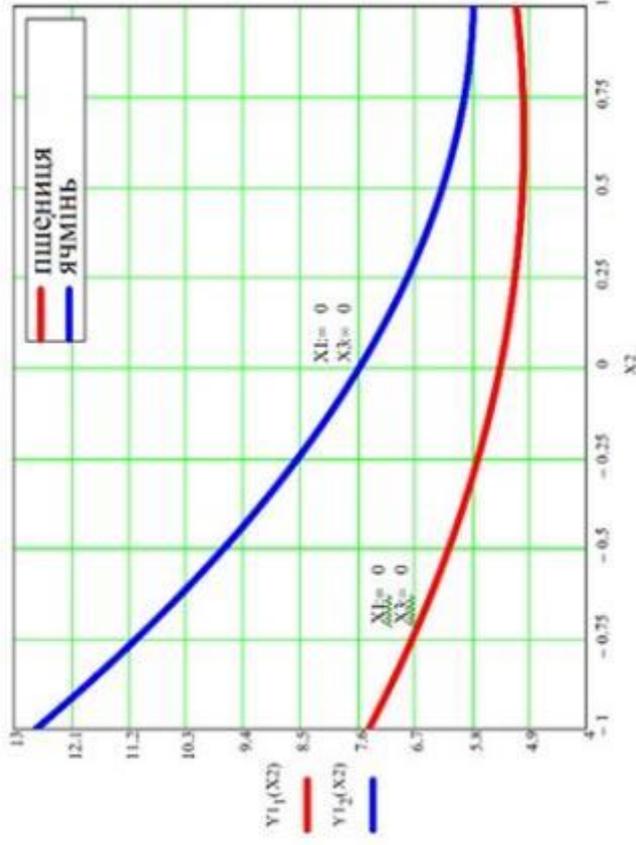


Рисунок 10 - Значення енергоємності процесу, в залежності від подачі матеріалу в праву завантажувальну горловину при значенні лівої $X1=0$ та $X3=0$

За умови встановлення факторів $X2$ та $X3$ на нульовому рівні, межі діапазону енергоємності при подрібненні пшениці варіюються в межах 4,9-6,15 кВт·т/год·л, що значно нижче, ніж при подрібненні ячменю, діапазон енергоємності якого має розширені межі 5,9-9,6 кВт·т/год·л. При збільшенні об'єму подачі будь-якого матеріалу в ліву горловину $X1$ величина енергоємності має тенденцію до поступового зниження. Подібна закономірність має місце і при збільшенні подачі в праву горловину (при середній подачі в ліву горловину).

Заходи по забезпеченню захисту оператора від дії шкідливих та небезпечних факторів

Перед дробаркою має бути встановлений магнітний захист в відповідності до чинних правилами організації та ведення технологічного процесу для запобігання потраплянню в робочу зону магнітних домішок, які можуть викликати аварію або іскріння та вибух. Завантажувальний бункер дробарки має захисну решітку з розміром комірок 20x20 мм для запобігання потраплянню сторонніх предметів.

Ротор дробарки статично відбалансований в зібраному вигляді. Молотки надійно закріплені, не мають тріщин або інших дефектів. Молотки не повинні зачіпати за деку і решето, щоб уникнути іскріння.

Робота проєктованої дробарки з підвищеною вібрацією та іншими несправностями не допускається. Пуск дробарки здійснюється тільки в незавантаженому стан після ретельної перевірки відсутності в ній сторонніх предметів.

До пуску в роботу слід перевірити укомплектованість, кріплення та стан молотків на роторі та цілісність решіт. При появі стуку чи інших несправностей машина повинна бути негайно зупинена для виявлення та усунення причин несправності. При пуску дробарка має бути спочатку пропущена вхолосту, потім з поступовим завантаженням до необхідної. При цьому мають бути вжиті заходи проти зворотного викиду продукту. Молоткова дробарка встановлюється на віброізолюючих основах.

Привід дробарки повинен вимикатися при перевантаженні робочих органів. Дробарка повинна мати пристрої аварійного відключення, що виключають можливість травмування працівників у разі порушення режиму роботи дробарки або виникнення несправностей.

Техніко-економічна оцінка

| Показники | Базовий варіант | Розроблений подрібнювач | % до базового |
|--|--------------------|----------------------------|---------------|
| Продуктивність, т/год | 0,20 | 0,24 | 120,0 |
| Встановлена потужність, кВт | 2,5 | 2,5 | 100,0 |
| Обслуговуючий персонал, люд. | 1 | 1 | 100,0 |
| Капітальні вкладення, грн | - | 5200 | - |
| Питомі річні експлуатаційні витрати, грн/т | 457,40 | 378,37 | 82,7 |
| у т.ч.: заробітна плата | 421,25 | 350,00 | 83,1 |
| витрати на електроенергію | 32,50 | 27,08 | 83,3 |
| амортизаційні відрахування | 2,03 | 0,71 | 35,1 |
| витрати на ТО і ремонт | 1,62 | 0,57 | 35,1 |
| Максимальне річне навантаження, т | 100 | 100 | - |
| Економія питомих витрат, грн/т | - | 79,03 | - |
| Річна економія експлуатаційних витрат, грн | - | 7903,4 | - |
| Строк окупності капвкладень, років | - | 0,7 | - |

1. Запропоновано молоткову дробарку з опозитною (дзеркальною) двосторонньою подачею зерна. Схема збалансовує ударні навантаження по діаметру ротора, знижує технологічну віброактивність і непродуктивні енерговтрати порівняно з традиційною верхньою подачею.
2. Аналітично показано: при опозитній подачі відхилення парних молотків і їх відцентрові сили вирівнюються ($\varphi_1 \approx \varphi_2$; $P_1 \approx P_2$), що теоретично усуває джерело технологічної вібрації. Оцінено втрати енергії у шарнірах молотків і доведено їх зменшення за рахунок менших кутових коливань.
3. Сформовано реологічну модель в'язко-пружних контактів частинок у тонкому віброуючому шарі; розсіяння енергії прямо пропорційне рівню віброактивності, отже її зниження дає безпосередній енергетичний ефект.
4. На спрощених моделях «машина-фундамент-грунт» встановлено: поблизу резонансу втрати на вібування основи можуть досягати $\approx 10\%$ потужності приводу. Ефективні шляхи зменшення: уникнення резонансу, антирезонансне налаштування амортизаторів, перш за все - зниження первинної віброактивності опозитною подачею.
5. Розроблено та випробувано лабораторний зразок дробарки з опозитною подачею (22 секції дисків, 132 молотки, 62-111 м/с). Дослідження на пшениці й ячмені підтвердили теоретичні висновки.
6. Відібрано керовані фактори: подача в ліву (q_1) та праву (q_2) горловини і кутова швидкість ω . Отримано регресійні моделі ($R^2 \approx 0,90-0,95$), побудовано поверхні відгуку та 2D-перерізи. Показано перевагу збалансованої двосторонньої подачі ($q_1 \approx q_2$).
7. Оптимальний діапазон лінійної швидкості молотків - 45-55 м/с: тут мінімізуються енерговитрати; далі вони зростають через гідро-аеродинамічні опори. Для пшениці локальний мінімум досягався при $q_1 \approx 0,08$ кг/с, $q_2 \approx 0,05$ кг/с, $\omega \approx 454$ рад/с.
8. Систематизовано загальні вимоги й інструкції (ЗІЗ, огороження, блокування, регламенти ТО/ремонту, порядок дій при НС/повітряній тривозі). Заходи узгоджені з вимогами законодавства України та стандартів ЄС, що знижує ризики шуму, вібрації, пилу та травмонезбезпеки.
9. Порівняно з КР-02: +20% продуктивності і $\approx -16,8\%$ питомої енергоемності при тій же потужності 2,5 кВт; питомі експлуатаційні витрати знижено з 457,40 до 378,37 грн/т (економія 79,03 грн/т); річний ефект за 100 т - 7903,4 грн; окупність вкладень 5200 грн - $\approx 0,7$ року.