

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

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ДОБРИНЕЦЬКИЙ МИКОЛА ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 631.362.633

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Підвищення ефективності процесу подрібнення зерна шляхом
удосконалення робочих органів дробарки**
(тема роботи)

208 «Агроінженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Сукманюк Олена Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.і.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Добрінецький М.О. Підвищення ефективності процесу подрібнення зерна шляхом удосконалення робочих органів дробарки. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Робота присвячена проблемі підвищення енергоефективності і якості готової продукції, що одержується в процесі подрібнення на дробарці. У зв'язку з цим, актуальним є удосконалення робочого процесу дробарки, що дозволить отримати якісний, більш однорідний склад готового корму, при значному зниженні енергозатрат.

Ключові слова: дробарка, удосконалення, робочі органи, зерно, ефективність.

ABSTRACT

Dobrinetskyi M. Increasing of the Grain Grinding Process Efficiency by Improving the Crusher Working Bodies. Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - Agroengineering. - Polissia National University, Zhytomyr, 2021.

The work is devoted to the problem of improving energy efficiency and quality of finished products obtained in the process of grinding on a crusher. In this regard, it is important to improve the working process of the crusher, which will provide a high-quality, more homogeneous composition of the finished feed, while significantly reducing energy consumption.

Key words: crusher, improvements, working bodies, grain, efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА	6
1.1. Аналіз конструкцій дробарок фуражного зерна	6
1.2. Класифікація робочих органів дробарок	11
Висновки по розділу 1	15
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА	16
2.1. Фізико-механічні передумови зниження енергоємності процесу подрібнення	16
2.2. Аналіз процесу подрібнення зерна в дробарці	17
2.3. Взаємодія подрібнювальних частинок з робочими органами дробарки	21
Висновки по розділу 2	27
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ МАШИНИ ДЛЯ ПОДРІБЛЕННЯ ЗЕРНА	28
3.1. Опис експериментальної установки	28
3.2. Методика визначення основних показників робочого процесу дробарки	30
3.3. Дослідження взаємодії повітряно-продуктового шару з робочими органами дробарки	31
Висновки по розділу 3	35
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	37

ВСТУП

Одним із пріоритетних напрямів розвитку агропромислового комплексу, є створення нових і удосконалення вже існуючих технологій та технологічного обладнання для переробки сільськогосподарської сировини.

Організація кормо виробництва дозволяє максимально використовувати власну кормову базу та значно знизити затрати на транспортування. Тому економічно доцільно використовувати малогабаритні комбіновані агрегати для приготування комбікормів.

Дуже великий вплив на якість переробленого продукту складає подрібнення вихідної сировини, що перевищує більше 70 від загальних витрат при заготівлі і приготуванні кормів. Тому, основною проблемою є використання обладнання, яке повинно в повній мірі задовольняти сучасні вимоги, що ставляються до якості готової продукції. Також дуже важливою вимогою є простота експлуатації, обслуговування та надійності подрібнювальної машини.

У зв'язку з цим, актуальним є удосконалення робочого процесу молоткової дробарки, яка дозволяє отримати якісний, більш однорідний склад готового корму, при значних енергозатратах.

На сьогоднішній день досить розповсюджене подрібнення на молоткових дробарках, що працюють за принципом удару. Технологія відома і давно використовується у багатьох країнах. Машини молоткового типу досить зручні, прості у використанні, а також легко піддаються ремонту.

Вивчення процесу подрібнення в дробарках молоткового типу присвячено немало робіт як українських, так і закордонних вчених [1, 2]. Із проведеного аналізу дослідження існуючих конструкцій молоткових дробарок було виявлено, що проблеми, які існують в дробарках, а саме: нерівномірність гранульометричного складу, підвищений вміст пилевидної фракції, що призводить до захворювання травної системи у тварин, а також висока енергоємність, що тягне за собою до нерівномірних витрат електроенергії, потребують подальших наукових досліджень.

Тому проблема створення енергозберігаючої тена даний час актуальною.

Відповідно до викладеного, у кваліфікаційній роботі сформульовано **мету дослідження**: підвищення ефективності процесу подрібнення зерна молотковою дробаркою за рахунок обґрунтування і оптимізації конструктивних параметрів робочих органів дробильної камери.

Об'єкт дослідження: процес подрібнення зерна в молотковій дробарці.

Предмет дослідження: закономірності впливу конструктивних параметрів і режимів роботи молоткової дробарки на ефективність процесу подрібнення зерна.

Методи дослідження: теоретичні обґрунтування параметрів і режимів роботи молоткової дробарки проводилось з використанням методів математичної статистики і моделювання, законів і методів класичної механіки, методів планування багатofакторного експерименту і математичного аналізу отриманих результатів.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано тези у збірнику доповідей матеріалів науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2021», збірнику матеріалів науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «Наукові читання – 2021» та збірнику матеріалів V міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи».

Обсяг та структура роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 38 сторінках машинописного тексту, містить 4 таблиць, 21 рисунка, списку використаних джерел з 23 найменувань.

РОЗДІЛ 1.

СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА

1.1. Аналіз конструкцій дробарок фуражного зерна

У даний час без застосування ресурсозберігаючих машинних технологій, високоефективних комплексів машин і поточних ліній неможливе вирішення життєво важливих ринкових проблем сучасного тваринництва.

Зерновий корм, що підготовлюється для годування сільськогосподарських тварин, повинен відповідати зоотехнічним вимогам [3]. Для приготування комбікормів в основному використовуються концентровані корми (зернофуражні злакові, бобові культури, жмих), що містять велику кількість живильних і біологічно активних речовин.

Концентровані корми в раціоні великої рогатої худоби складають 25-60%, свиней і птиці – до 80-95%. Ефективність використання кормів залежить від їх відповідності по фізико-механічним властивостям і вмістом живильних речовин. Основними операціями приготування комбікормів для тварин і птиці є очищенні, подрібнення, дозування і змішування.

Зерно подрібнюють до дерті або муки. Ступінь подрібнення зерна визначається видом і віком тварини. Комбікорм поділяють на три ступені подрібнення, які характеризуються середньозваженими розмірами частинок (модулем помелу): дрібна (з величиною частинок від 0,2 до 1,0 мм), середня (від 1,0 до 1,8 мм) і велика (від 1,8 до 2,6 мм) [4].

Для подрібнення компонентів використовують молоткові дробарки, які є універсальними машинами.

Незалежно від ступеня подрібнення і фізичних властивостей продукту, конструктивних особливостей подрібнюючої машини вони повинні відповідати наступним вимогам [5-7]:

- безперервна, рівномірна подача продукту в робочу зону;
- рівномірне подрібнення і швидке видалення із робочої зони;

- можливість регулювання ступеня подрібнення;
- легка заміна швидкозношуваних деталей машин;
- мінімальна питома витрата енергії.

У залежності від продуктивності, подрібнювального продукту змінюються розміри, маса і деякі конструктивні елементи.

Дробарки молоткового типу є універсальними подрібнюючими машинами, так як на них можна подрібнювати різноманітні компоненти, що використовуються для приготування комбікормів.

Помітний вплив на розвиток теорії і експериментальної практики при дослідженні процесу подрібнення зернового матеріалу в молоткових дробарках надали роботи академіків В.П. Горячкіна [8], В. І. Сироватка [9], професорів С.В. Мельникова [10] та ін.

З усього різноманіття запропонованих констукцій молоткових дробарок, що використовуються на твариницьких фермах і комплексах, дя подрібнення кормів широко застосовуються молоткові дробарки ДДК, КДМ, ДБ, ДКУ, КДУ.

Типова молоткова дробарка (рис. 1.1) складається з корпусу 5, завантажувального 6 і відвідного патрубків 8, молоткового ротора 2 з робочими елементами у вигляді молотків 3, деки 7 і сепарувальної поверхні 4, яка в більшості випадків виконана у вигляді перфорованого решета.

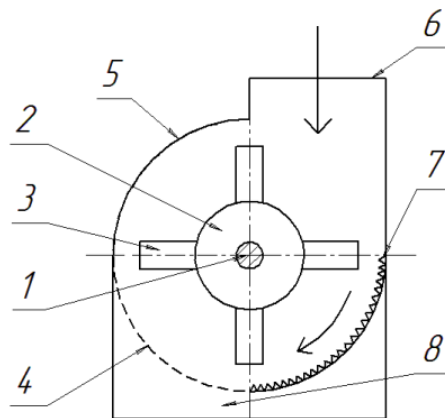


Рисунок 1.1 – Загальна схема молоткової дробарки: 1 – вал; 2 – молотковий ротор; 3 – молоток; 4 – решето; 5 – корпус; 6 – завантажувальний патрубок; 7 – дека; 8 – відвідний патрубок.

Молоткові дробарки при переробці кормів з різними фізико-механічними властивостями прості у конструктивному виконанні, надійні у використанні, компактні, а також високі швидкості робочих органів дозволяють здійснити пряме з'єднання валу ротора з електродвигуном.

Технологічний результат подрібнення залежить від конструктивного виконання і кінематичних режимів робочих органів, їх взаємодії з подрібнювальним матеріалом, організації повітряного потоку та транспортуванню подрібненого продукту.

Дробарка ДДК. Для подрібнення збагачувальних сумішей комбікормів, що містять мікроелементи, антибіотики, вітаміни та інші добавки використовують дробарки типу ДДК. У чавуному корпусі 1 (рис. 1.2) змонтований ротор 10 з молотками, на одному валу з ним вентиляторне колесо 4, змінне сито 11 і нерухова дека 5. Вентиляторне колесо обертається в камері 3 корпуса дробарки.

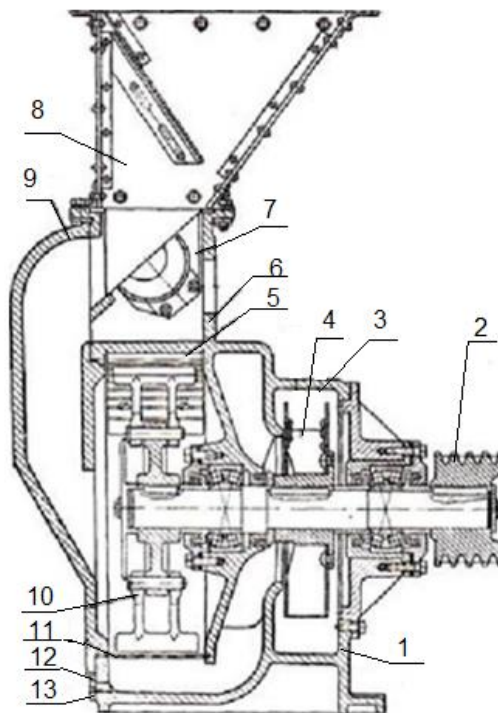


Рис.1.2. Молоткова дробарка ДДК: 1 – корпус; 2 – шків; 3 – камера для вентиляторного колеса; 4 – вентиляторне колесо; 5 – нерухоме деко; 6 – коробка для магніта; 7 – магніти; 8 – бункер; 9 – кришка; 10 – ротор; 11 – сито; 12 – планка; 13 – щілина для подачі повітря.

Дробарки ДБ-5. Промисловістю випускаються безрешітні молоткові дробарки ДБ-5 і ДКМ-5. Вони уніфіковані між собою по основним робочим органам [11, 12].

Робочий проце протікає наступним чином. Зерно подається в приймальний бункер 2 (рис. 1.3.) завантажувальним шнеком 1. Перед попаданням в дробильну камеру 4 зерно очищається від металевих домішок під дією магнітного сепаратора 3 і після чого попадає в дробильну камеру 4. Подрібнення проходить в результаті дії обертаючого робота 6 з молотками 5 на зерно. При ударній дії шарнірно-закріпнених на роторі молотків 5 і дек 7 зерно подрібнюється і видалається із дробильної камери. Готовий продукт транспортується із дробильної камери на вивантажувальний шнек 8. Пройшовши через сепаратор зерно вивантажується в патрубок 8, а не до подрібнена фракція надходить назад в дробильну камеру.

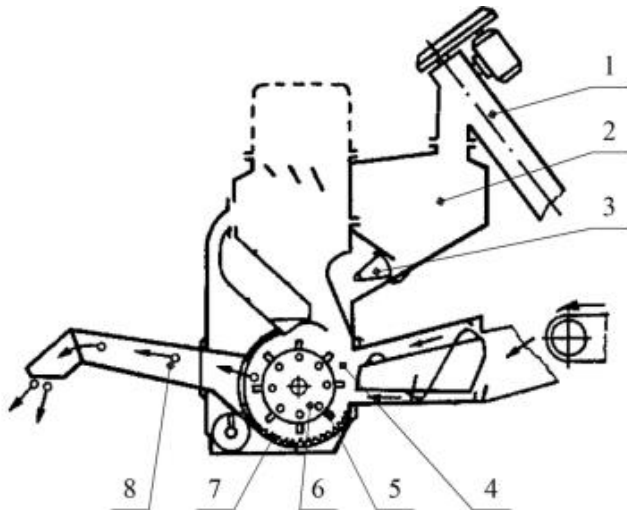


Рис. 1.3. Молоткова дробарка ДКМ-5: 1 – завантажувальний шнек; 2 – приймальний бункер; 3 – магнітний сепаратор; 4 – дробильна камера; 5 – молоток; 6 – ротор; 7 – дека; 8 – вивантажувальний патрубок

Зернові дробарки КДМ-3,0 призначена для подрібнення фуражного зерна на корм худобі і птиці та встановлюється в потокових технологічних лініях кормоцехів на тваринницьких фермах і комплексах [13]. Зернова дробарка КДМ-3,0 є модифікацією універсальної дробарки КДУ-2,0. Відрізняється від неї тим, що немає подрібнювального апарату, живильного і підпресовуючого

транспортів для подрібнення грубих і соковитих кормів. Схема дробарки фуражного серна КДМ-3,0 представлена на рис. 1.4.

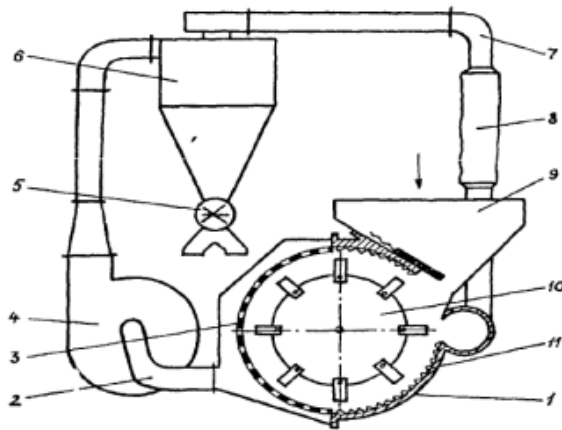


Рис. 1.4. Схема кормодробарки КДМ-3,0: 1 – корпус; 2 – подвійний патрубок; 3 – решета; 4 – вентилятор; 5 – шлюзовий затвор; 6 – циклону; 7 – трубопровід; 8 – фільтр; 9 – бункер; 10 – дробильний барабан; 11 – деки.

Основним недоліком даної дробарки є подрібнення зернового матеріалу з вмістом борошністої фракції та велика енергоємність даного процесу.

У даний час найбільше розповсюдження отримали молоткові дробарки, що випускаються Нідерланською фірмою «VAN ARSEN». Конструкція даної дробарки досить проста, також в ній враховані вимоги що ставляться до кормів: можливість роботи в раціональних режимних параметрах; очищення подрібненої маси безпосередньо магнітним сепаратором, а також простота в обслуговуванні, що дозволяє підібрати оптимальні параметри робочого процесу для любого кормоприготувального заводу.



Рис. 1.5. Молоткова дробарка: 1 – корпус дробильної камери; 2 – молотковий ротор; 3 – електродвигун; 4 – змінне решето; 5 – шафа зі змінним решетом; 6 – кришка оглядового люка.

В Польщі випускається молоткова дробарка «Zuptor 3000R» (рис. 1.6). Дана дробарка має потужний електродвигун 22 кВт, продуктивність 2,4 т/год, а також може уловлювати важкі домішки [14].



Рис. 1.6. Дробарка «Zuptor 3000R»

1.2. Класифікація робочих органів дробарок

В залежності від організації робочого процесу в дробильній камері розрізняють дробарки відкритого (езрешітні) і закритого типу. У дробарках першого типу матеріал швидко видається із неї. Використовуються для великокускового, крихкого, сухого матеріалів. Подрібнення відбувається за рахунок енергії вільного удару молотка по кускам значної маси.

В дробарках закритого типу решето і деки охоплюють барабан від 120 до 360°. Матеріал видається по мірі подрібнення до заданого розміру через отвори решета. Ці дробарки можуть бути з горизонтальним і вертикальним валом.

Робочі органи дробарок у залежності від участі в технологічному процесі можна поділити на активні (рис. 1.7) і пасивні (рис. 1.9). До активних

(ударних) відносяться такі елементи, за рахунок яких відбувається підведення енергії до подрібнювального матеріалу. Дана енергія витрачається на руйнування частинки, відсікаючись від активного робочого органу, вони прямують покинути зону дії і в результаті зіштовхуються з пасивним робочим органом – решето, деки, вихрові камери, протирізи, колосняки.

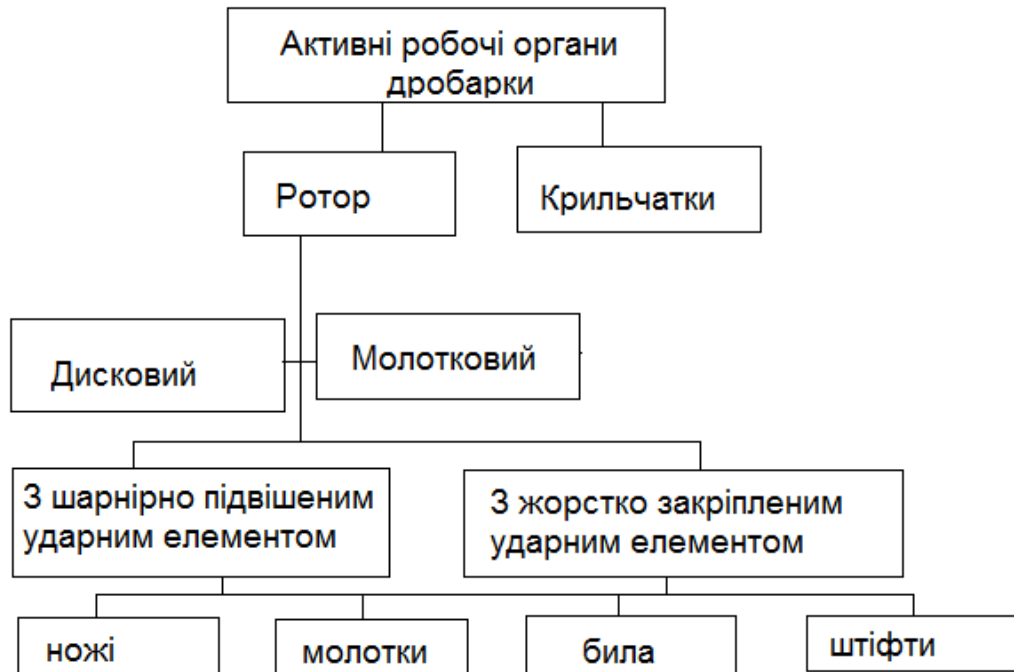


Рисунок 1.7. Активні робочі органи дробарки

На практиці для подрібнення зерна використовуються різні поєднання при знаків пасивних робочих органів (протирізи, деки, вихрові камери, решета, колосняки).

Молотки призначені для подрібнення матеріалу. Їх розрізняють за формою, розміром і призначенням. Молотки (рис. 1.8) бувають пластинчаті прямокутної (а) і ступінчатої (б) форми, а також фігурні (в).

Для подрібнення зерна і матеріалів використовують пластинчаті молотки товщиною 2...3 мм, для стелових кормів – 6...8 мм, для крупно кускових – 8...12 мм, для соковитих кормів – складні фігурні.

Виготовляють молотки із марганцевої сталі 6Г із загартуванням робочих (активних) поверхонь або вуглецевої сталі з наплавленням кромки сармайт. Молотки з одним отвором для пальця після зносу кромки повертають. В

залежності від конструкції молотків і фізико-механічних властивостей подрібнювального матеріалу молотки слугують 72...280 годин.

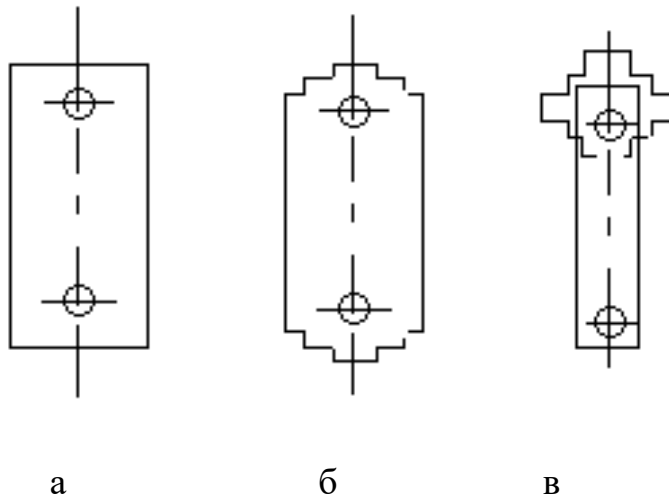
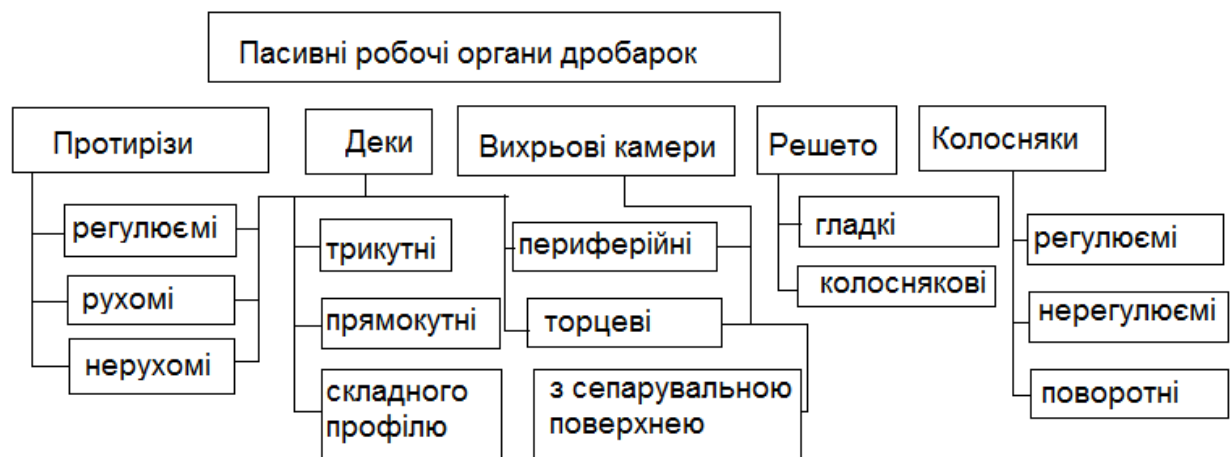


Рисунок 1.8. Форми молотків



Рисункок 1.9. Класифікація пасивних робочих органів дробарок закритого типу

Решета призначені для відведення готового продукту, додаткового його подрібнення і регулювання степені подрібнення. В кормодробарка використовують гладкі решета із листової сталі з пробившими круглими отворами і регулюванням степені подрібнення, отворами діаметром від 3 до 10 мм. Живий перетин решіт складає 0,08...0,35.

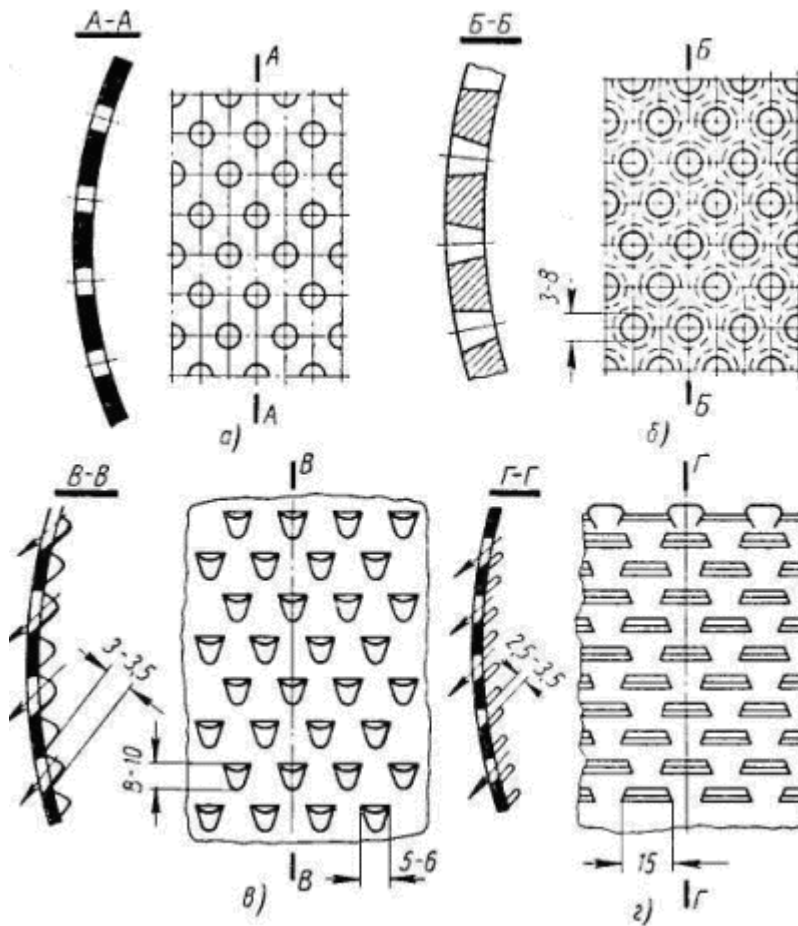


Рис. 1.10. Решета молоткових дробарок: а, б – гладенькі; в, г – лускаті

Виготовляють з листової сталі товщиною від 2 до 8 мм і бувають (рис. 1.10) гладкими (а,б) і лускаті (в,г). У тонких гладких решетах отвори штампуються, а в товстих – висвердлюються.

Деки призначені для підвищення ефективності процесу подрібнення. Вони представляють собою відбивальні поверхні, встановлені у верхній частині корпусу і охоплюючі ротор з однієї із сторін або двох сторін на визначеній частині. Разом з решетом складають нерухому стінку об яку вдаряються частинки матеріалу, відкинутого молотками. Деки бувають рифлені чавунні або сталеві з пробивними отворами. Розміщені щільно до корпусу вони утворюють шорстку поверхню. Рифлі дек мають кут $95...105^{\circ}$, а передня частина нахилена до радіусу під кутом $40...45^{\circ}$. Це забезпечує повернення частинки у зону дії молотків. Найбільша ефективність подрібнення відбувається при прямому ударі частинки в риф дека.

На основі класифікаційного огляду складена табл.1.1, що характеризує значимість основних елементів дробильної камери на процес подрібнення зерна.

Таблиця 1.1. Роль і значимість основних елементів дробарки закритого типу на процес подрібнення зерна

Елементи дробильної камери	Роль елементів в процесі подрібнення
Молотковий ротор	-подрібнення зерна; -надання кінематичної енергії подріненному матеріалу.
Дека	-подрібнення зерна; -гальмування руху повітряно-продуктовому потоку
Вихрьові камери	-підвищення пропускної здатності; -збільшення швидкості співударяння робочих органів дробарки і подрібненого матеріалу
Решето	-подрібнення зерна; -відведення готового продукту
Корпус	-формування повітряно-продуктового потоку

Удосконалення робочого процесу молоткової дробарки можливе шляхом підвищення ефективності дії робочих органів на подрібнювальний матеріал та прискореного відведення готового продукту із камери подрібнення. При цьому інтенсивність процесу подрібнення зернових культур здійснюється за рахунок максимального використання підведеної енергії ударів активними елементами і вторинними ударами матеріалу об пасивні робочі органи.

Висновки по розділу 1

В результаті проведеного огляду конструктивно-технологічних схем подрібнення зерна, прийшли до висновку, що необхідно подальше дослідження направлення на удосконалення конструктивних параметрів і режимів роботи молоткових дробарок. При цьому основною задачею є зниження питомої енергоємності процесу подрібнення, збільшення пропускної здатності дробарок і підвищення якості готового продукту.

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА

2.1. Фізико-механічні передумови зниження енергоємності процесу подрібнення

Дослідження енергетики подрібнення зерна для продовольчих і кормових цілей направлені в основному на отримання кількістних характеристик процесів, взаємодія робочих органів машин з продуктом у вигляді зусиль, питомої енергії та якісних результатів.

Сформульовані положення теорії подрібнення твердих тіл в цьому пояснюють енергетичну сутність процесу, але не в повній мірі розкривають направленість зниження енергетики подрібнення і оптимізації її параметрів.

Розрушення твердих тіл на частинки зв'язано, згідно робочої гіпотези, з їх деформацією і утворенням поверхні сколювання.

Так, для розрушення ендосперми твердої пшениці сколюванням потрібно напруга 0,95-1,1 мПа, м'яких сортів – 0,28-0,33 мПа. Тому, питома енергія розрушення зерен також велика і знаходиться на рівні 1,9-4 кДж/кг. Як і більшість матеріалів рослинного походження, зернівки володіють пружньо-в'язкими властивостями. Відношення між пружньою, в'язкою і пластичною складовою в залежності від хімічного складу зернівок складає 10-35 (65-90 %). Таким чином, основні затрати енергії подрібнення знаходяться в зоні пластичних деформацій [15, 16].

Розподіл процесу подрібнення на етапи, враховуючи дані фізико-механічні властивості побудови зернівки, є перспективним на шляху до зниження затрат енергії на процес в цілому.

Основні наукові результати з подрібнення зерна отримані при ударному стисненні, що дозволяє розглянути з позиції графоаналітичної уяви сам процес подрібнення (рис. 2.1).

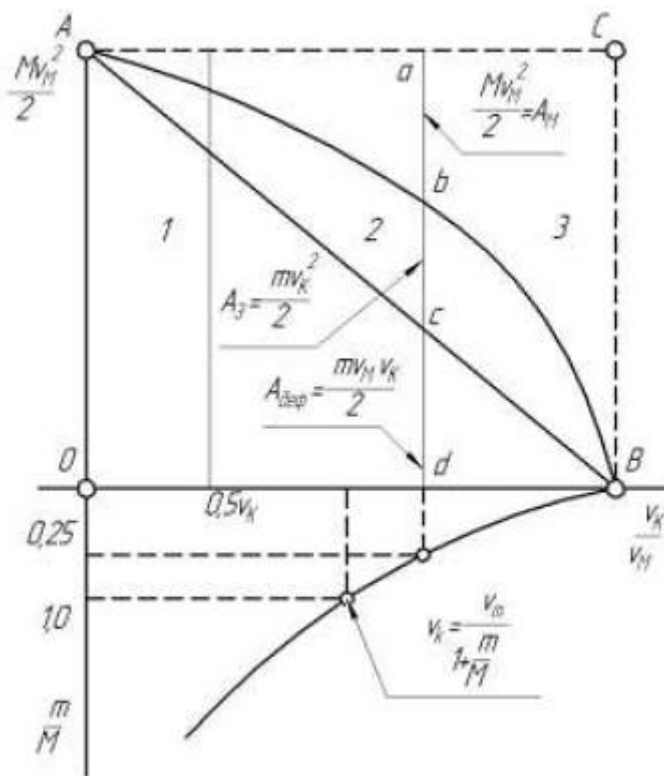


Рис. 2.1. До можливості зниження енергоємності процесу подрібнення: A_0 – повна кінематична енергія молотка; 1 – частина корисної нергії; 2 – енергія частин; 3 – енергія холостого ходу; ab – ордината холостого ходу; bc – ордината енергії частин; cd – ордината корисної енергії (деформації); V_k – швидкість частинки; V_M – швидкість молотка; m і M – відповідно маса частинки і молотка.

В частині 1 вся кінетична енергія молотка, що затрачається на деформацію зерна при $V_k = 0$. По мірі руху вправо від $V_k = 0$ частина енергії деформації зменшується в точці V_k / V_M рівна 0.

Відомо, що в даній зоні V_k / V_M 0,75-0,85 працюють молоткові дробарки та інші швидкісні подрібнювачі, вирішуючи задачу подрібнення в одному кінематичному і силовому режимі. При цьому корисною енергією деформації може бути і енергія, передана частинкам (частина 2, рис. 2.1.), так як швидкість зіткнення молотком може бути розрушена [17].

2.2. Аналіз процесу подрібнення зерна в дробарці

Розглянемо в загальному вигляді процес подрібнення зерна в дробарці безперервної дії з утворенням готового продукту (рис. 2.2). Із кільцевого шару

циркулюючо-продуктового потоку, в якому здійснюється подрібнення, виділимо елементарний об'єм dV . За одиницю часу в розглядаємому об'ємі із цілої зернової сировини (вихідного продукту) в результаті подрібнення утворюється dm готового продукту [18].

Безперервне надходження вихідної сировини в дробильну в кількості s_1 і циркуляція недоподрібненого продукту протягом τ циклів відбувається до встановленого стану, що характеризується постійною кількістю циркулюючого потоку і гранульометричним станом вихідної сировини в кількості s_2 (рис. 2.2.)

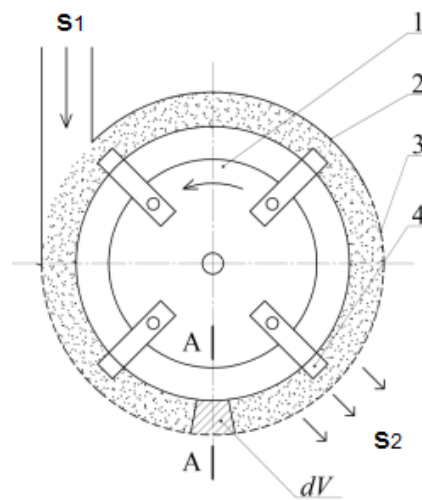


Рис. 2.2. Схема молоткової дробарки: 1 – дробильна камера; 2 – деко; 3 – решето; 4 – молоток

Диференціальне рівняння для встановленого процесу описується наступним чином [19]

$$dm = \partial \cdot \theta_n \cdot dV \quad (2.1)$$

де m – поточна кількість готового продукту, що утворилася при дії на подрібнений матеріал активної поверхні робочих органів, кг/с;

∂ – інтенсивність подрібнення, кг/(с*м²);

θ_n – площа поверхні робочих органів на одиницю об'єму повітро-продуктового шару, м²/м³;

dV – елементарний об'єм повітро-продуктового шару, м³.

$$\theta_n = \frac{\theta_m + \theta_d + \theta_r}{v}, \quad (2.2)$$

де θ_m – сумарна площа завантаженої частинки молотків, м²;

θ_d – площа деки, м²;

θ_r – площа поверхні решета, м².

Інтенсивність подрібнення сировини можна описати наступною залежністю:

$$\partial = k_v \cdot l, \quad (2.3)$$

де k_v – коефіцієнт, що характеризує швидкість подрібнення, кг/с;

l – частинка площі робочого органа, що контактує з подрібненим матеріалом.

Для порівняльної оцінки різних співвідношень параметрів робочих органів дробарок зерна або виборі ефективних режимів їх роботи Мельник С.В. [19] запропонував формулу для розрахунку питомої роботи подрібнювача:

$$A_{\text{под}} = C_1 l g \lambda^3 + C_2 (\lambda - 1). \quad (2.4)$$

де C_1 і C_2 – емпіричні коефіцієнти, що характеризують питому енергозатрати подрібнення матеріалу, Дж/кг;

λ – степінь подрібнення.

Робота з подрібнення циркулюючого шару визначається з рівняння [15]:

$$A_{\text{ш}} = 1/2 \cdot z \cdot n \cdot V_{\text{ш}} \cdot \rho \cdot \mu \cdot v^2, \quad (2.5)$$

де z – кількість молотків ротора, шт;

n – частота обертання, с⁻¹;

$V_{\text{ш}}$ – об'єм повітряно-продуктового шару, м³.

ρ – густина подрібнювального шару, кг/кг;

μ – масова частка матеріалу у повітряно-продуктовій суміші, кг/кг;

v – швидкість молотків відносно подрібненого матеріалу, м/с.

$$V_{\text{ш}} = \pi \cdot d \cdot L \cdot h_{\text{ш}}, \quad (2.6)$$

де d – діаметр дробильної камери, м;

L – довжина дробильної камери, м;

$h_{\text{ш}}$ – товщина повітря-продуктового шару, м.

Прирівнявши вирази (2.4) і (2.5) з врахуванням циркулюючого матеріалу, визначаємо об'єм кільцевого повітряно-продуктового шару:

$$V_{\text{ш}} = \frac{2 \cdot M [C_1 l g \lambda^3 + C_2 (\lambda - 1)]}{n \cdot V_{\text{ш}} \cdot \rho \cdot \mu \cdot v^2}, \quad (2.7)$$

Питома площа робочих органів дробарки визначається з наступного виразу:

$$\theta_n = \frac{Q_1 \cdot F \cdot z \cdot n \cdot V_{\text{ш}} \cdot \rho \cdot \mu \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot M \cdot [C_1 l g \lambda^3 + C_2 (\lambda - 1)]}, \quad (2.8)$$

На рис. 2.3 показана залежність питомої площі робочих органів від зміни швидкості взаємодії молотків з подрібнювальним матеріалом і пропускною здатністю при заданих параметрах дробильної камери: довжина камери 0,125 м, діаметричний перетин 0,048 м², площа решета 0,146 м².

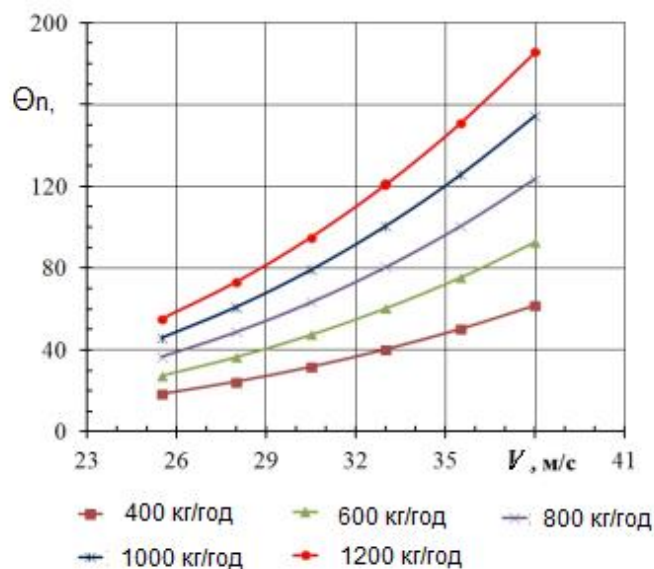


Рис. 2.3. Залежність питомої площі робочих органів θ_n від зміни швидкості молотків та пропускної здатності дробарки

Питома площа робочих органів θ_n приймаючи участь в процесі подрібнення зерна за рахунок первинних ударів активними елементами – молотками, сумарна площа яких складає θ_m і вторинних ударів об пасивні робочі органи – деки і решето, площа яких залежать від ряду факторів. Основними із яких є: фізико-механічні властивості подрібненого матеріалу, характер дроблених поверхонь і параметри режиму подрібнення. Тому важливими є умови розвитку машин для подрібнення зернових матеріалів,

подальше вивчення властивостей переробленого матеріалу і розробка нових органів дробарок.

2.3. Взаємодія подрібнювальних частинок з робочими органами дробарки

При вивченні процесу подрібнення потрібно розглянути взаємодію активних і пасивних робочих органів із зерновим матеріалом, рахуючи в першому приближенні частинку правильної кулькоподібної форми, а поверхню молотків і деки у вигляді площини.

Після удару молотка за час ударного імпульсу частинка набирає швидкість $V_{\text{част.}}$. Перевищуючи швидкість молотка в точці удару $(1+k)$ разів і складає:

$$V_{\text{част.}} = V_{\text{удар.м}} \times (1 + k), \quad (2.9)$$

де $V_{\text{удар.м}}$ – кутова швидкість молотка, м/с;

k – коефіцієнт встановлення швидкості частинки після ударення.

Для закону збереження енергії справедлива нерівність:

$$\frac{M \times V_{\text{mol}}^2}{2} = \frac{M \times (V'_{\text{удар м}})^2}{2} + \frac{m \times V_{\text{част}}^2}{2}, \quad (2.10)$$

де M – маса молотка, кг;

m – маса частинки, кг;

V_{mol} – відносна швидкість молотка до удару, м/с;

$V'_{\text{удар м}}$ – відносна швидкість молотка після удару, м/с;

$V_{\text{част}}$ – швидкість частинки після удару, м/с.

Розглянемо взаємодію частинки з молотком при ударі, коли маса молотка M суттєво більша маси частинки m ($M \gg m$) (рис. 2.4).

Тоді відносна швидкість $V_{\text{відн}}$ частинки визначається:

$$V_{\text{відн}} = |V_{\text{mol}}| - |V_{\text{част}}|, \quad (2.11)$$

де $|V_{\text{mol}}|$, $|V_{\text{част}}|$ – модулі швидкостей відповідно молотка і частинки, м/с.

Якщо знехтувати тертям, тоді при прямому центральному ударі частинки будуть відлітати зі швидкістю $V_{\text{част}}$:

$$V_{\text{час}} = k \times V_{\text{відн}}. \quad (2.12)$$

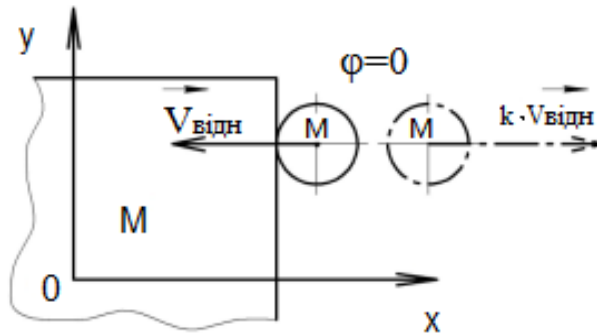


Рисунок 2.4. Взаємодія частинки з молотком при ударі

Якщо перейти в нерухому систему відліку координат – тоді отримаємо наступне рівняння для визначення швидкості частинки $V'_{\text{част}}$ [20, 21]:

$$V'_{\text{част}} = V_{\text{mol}} + k \cdot V_{\text{відн}}. \quad (2.13)$$

Підставивши у рівня (2.13) значення відносної швидкості $V_{\text{відн}}$ із виразу (2.11), отримаємо:

$$V'_{\text{част}} = V_{\text{mol}} + k \cdot (V_{\text{mol}} - V_{\text{час}}) = V_{\text{mol}} \cdot (1 + k) - k \cdot V_{\text{час}}, \quad (2.14)$$

При подрібненні матеріалу відбувається зношування кромки молотка за деякими закономірностями, враховуючи в першому приближенні по дузі кола, тому в більшості випадків напрямлення удару відхилено від нормалі.

На рис. 2.5. зображено взаємодію закругленої форми кромки молотка радіусом R з частинкою матеріалу. При зустрічі частинки m з поверхнею молотка в точці K , розміщеною під кутом φ до напрямку руху молотка, на частинку діє сила реакції P поверхні молотка, що є сумо сил тертя T і нормальної реакції P_N . Направлення швидкості молотка V_{mol} в точці K і реакції P утворюється кут $\varphi - \varphi_t$, де φ_t - кут тертя. Проекції реакцій P на направленість швидкості молотка і в осьовому напрямку дає значення сили P_0 , що залежить від кута φ .

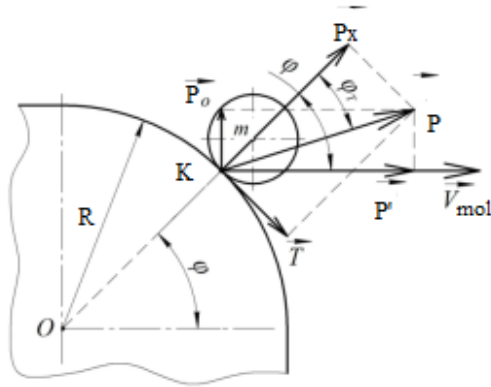


Рисунок. 2.5. Взаємодію закругленої форми кромки молотка радіусом R з частинкою матеріалу

Надаючи граничні значення φ , отримаємо при $\varphi=0$ – прямий удар, коли частинка з максимальною швидкістю відлетіла від молотка прожовжує рух в площині дії молотка; при $\varphi=\varphi_t$ складова $P_0=0$, що обумовлює рівненство кутів падіння і відбивання; при $\varphi>\varphi_t$ осьова складова (по вісі ротора) сили реакції P , направлені виштовхнути частинку в боковому напрямку:

$$P_0 = P \cdot \sin(\varphi - \varphi_t), \quad (2.15)$$

Таким чином, частинка отримує удар «з ковзанням». По мірі збільшення φ до значення $\frac{\pi}{2}$, кут також збільшується до $\frac{\pi}{2}$.

При $\varphi>\varphi_t$ всі частинки, отримавши удар зі сторони заокругленої форми молотка а точці K , отримають подальший рух зі швидкістю $V_{\text{час}}$ під кутом до нормалі в точці K . Найбільш ймовірний кут відльоту частинки складає $0 \dots \frac{\pi}{2}$.

Потрапляючи до деки (рис. 2.6) швидкість частинки після удара молотка в проекції на вісі x' і y' буде рівна:

$$V'_{\text{част } x'} = V_{\text{mol}} + V'_{\text{част}} \cdot \cos \beta; \quad (2.16)$$

$$V'_{\text{част } y'} = V'_{\text{част}} \cdot \sin \beta; \quad (2.17)$$

Модуль швидкості частинки отримає швидкості:

$$|V'_{\text{част д}}| = \sqrt{V'^2_{\text{част } x'} + V'^2_{\text{част } y'}} \quad (2.18)$$

З врахування вищезазначених виразів швидкість частинки визначається:

$$V'_{\text{част д}} = \sqrt{(V_{\text{мол}} + V_{\text{відн}} \sqrt{k^2 + (1+k) \cdot f \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta}) \cdot \sqrt{V_{\text{відн}}^2 \cdot (k^2 + (1+k) \cdot f \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \beta)}, \quad (2.19)$$

Кут польоту β' частинки до деки визначається відношенням:

$$\beta' = \arctg \frac{V'_{\text{част у}'}}{V'_{\text{част х}'}} \quad (2.20)$$

Відповідно до розрахунків при заданих значеннях швидкості молотків $V_{\text{мол}} = 60 \dots 80$ м/с, коефіцієнтів встановлення швидкості $k = 0,45$ і тертя $f = 0,35$ матеріалу, кут прольоту β' частинки в деці змінюється від 0 до 15° .

Розглянемо випадок, коли повітряно-продуктовий потік має рівномірний розподіл, а швидкість підлітання до деки частинки по вісі y ($V'_{\text{част у}}$ максимальна. При найбільшій складовій швидкості частинки в напрямку деки $V'_{\text{част х'}}$ буде рахуватись, що частинка досягає деки без зіткнення з іншими частинками. Дані умов відповідають куту підлітання частинки до деки в межах $\beta' = 5 \dots 15^\circ$, а кут φ змінюється від 30 до 75° . Відповідно, до поверхні деки буде доходити потік частинок, що взаємодіє з молотком і буде рівний:

$$\varepsilon = \sin 75^\circ - \sin 30^\circ = 0,47 \quad (2.21)$$

Для забезпечення найбільш ефективного співударяння частинки з декою, її поверхня повина бути направлена до найбільш ймовірного напрямку польота частинки під кутом $\frac{\pi}{2}$, при цьому 93...98 запасу кінетичної енергії частинки може бути використано на руйнування. Досягнути цього можна, завдяки розміщенню граней рифів деки до торцевої стінки камери в якій відбувається процес подрібнення зерна під кутом $\vartheta = 90^\circ - \beta = 82 \dots 74^\circ$.

Частинка ударяючись об поверхню деки під кутом польота β' зі швидкістю $V'_{\text{част д}}$, яку розглядаємо у вигляді проекцій:

$$V'_{\text{част х}'} = V'_{\text{част д}} \cdot \cos \beta'; \quad (2.22)$$

$$V'_{\text{част у}'} = V'_{\text{част д}} \cdot \sin \beta'. \quad (2.23)$$

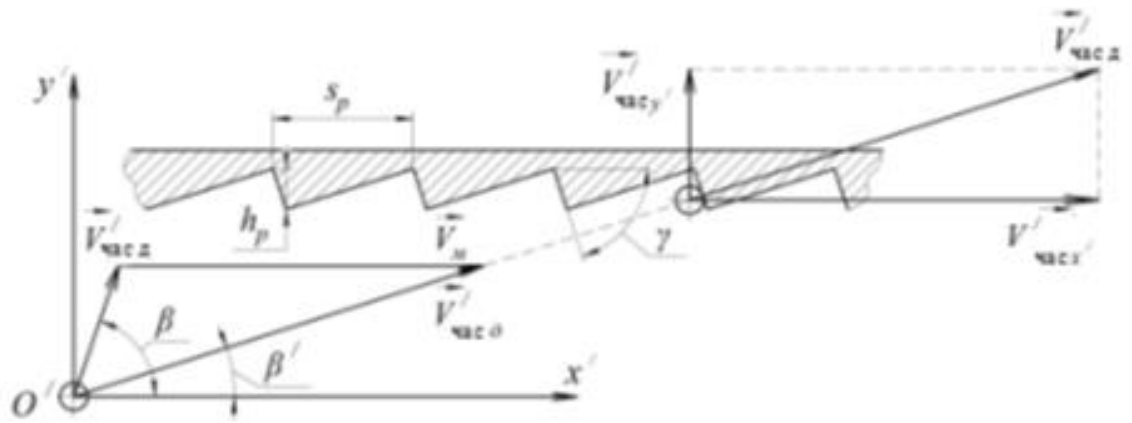


Рисунок 2.6. Взаємодія частинки з гранями рифів деки

Кут підлітання частинки β' залежить не тільки від кута падіння φ , але і від коефіцієнта встановлення k швидкості відлітання від поверхні молотка, коефіцієнт тертя f і ряд інших факторів, таких як сила аеродинамічного опору, Коріолісова сила, сила тяжіння в даному випадку не враховуються.

Виходячи із кута подіння частинки до деки β' і кута нахилу робочої грані рифа деки γ відносно терцевої стінки дробильної камери, визначається крок рифів s_p (рис. 2.6):

$$s_p = \frac{h_p \cdot \sin[180 - (\beta' + \gamma)]}{\sin \beta' \cdot \sin \gamma}, \quad (2.24)$$

де h_p – висота рифа деки, мм.

Важливою умовою при розрахунку кроку рифів s_p кільцевих дек є відсутність «тіньового ефекту» від сусіднього рифу, тобто частинки повинні взаємодіяти по всій довжині робочої грані рифа деки.

Вищевикладені теоретичні дослідження руху частинки зернового матеріалу в камері подрібнення дозволяють визначити швидкість і кут нахилу частинки до деки $\beta' = 5 \dots 15^\circ$. В результаті розрахунку геометричні параметри відбійних поверхонь дек: кут нахилу робочої грані рифа деки $\gamma = 82 \dots 74$ і крок рифів s_p , який визначає кількість рифів на кільцевих деках z . Результати розрахунку кроку рифа, виходять із висоти і кута прольота, що наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Розрахунок крока рифів кільцевих дек

Висота рифів h_p , мм	4	6	7	8	9
Крок рифів, s_p , мм	20	24	30	36	40

Взаємодія частинки з рифами дек можливо оцінити величиною моменту M , що представляє від молоткового ротора через повітряно-продуктовий шар на корпус дробильної камери [22].

$$M = M_1 + M_2, \quad (2.25)$$

де M_1 – момент сили, створенню кінематичною енергією удару частинки о риф деки, N ;

M_2 – момент, створеними силами тертя частинок об поверхні деки, N .

$$M = n \cdot (N_1 + N_2) \cdot R, \quad (2.26)$$

де R – середній радіус деки, м;

n – кількість дек.

З врахування конструкції і режимів роботи установки побудовані залежності (рис. 2.7) моменту, що передається молотковим ротором через повітряно-продуктовий потік на камеру подрібнення, від зміни швидкості молотків і маси матеріалу.

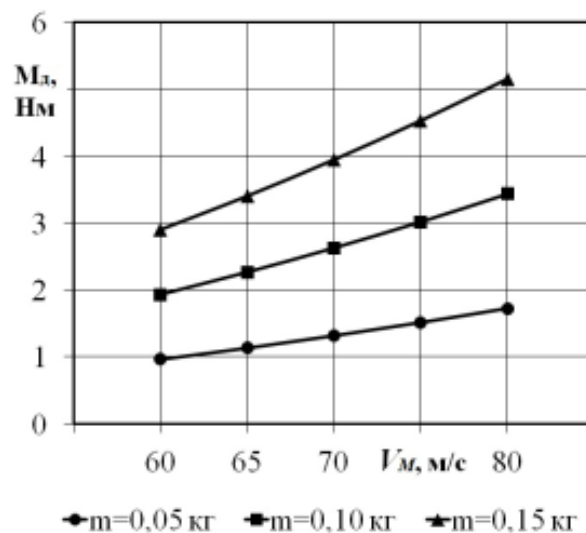


Рис. 2.7. Залежність моменту, створюємого повітряно-продуктовим потоком, від зміни швидкості молотків і маси в камері подрібнення

Висновок по розділу 2

Питома площа робочих органів θ , що приймає участь в процесі подрібнення зерна за рахунок ударів активних елементів – молотків, сумарна площа яких складає θ_m і вторинних ударів о пасивні роботи органи – решето і деки, площа яких відповідно θ_d і θ_r залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, характеру подрібнювальної поверхні і параметрів режиму подрібнення.

Взаємодія повітряно-продуктового шару з кільцевими деками дозволяє зменшити кругову швидкість подрібненого матеріалу за рахунок гальмування повітряно-продуктового шару, що в свою чергу сприяє підвищенню відносної швидкості співударяння молотків з частинками зерна.

З врахуванням найбільш ймовірного кута падіння частинки β' до деки, в межах $5...15^\circ$, кут робочої грані рифа деки γ відносно торцевої стінки дробильної камери складає в межах $82...74^\circ$.

РОЗДІЛ 3.

УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ МАШИНИ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА

Основною метою дослідження є підвищення ефективності процесу подрібнення зерна молотковою дробаркою з рифленими деками шляхом удосконалення робочих органів. У відповідності до мети і поставлених задач було розроблено наступні етапи:

1. Удосконалення робочих органів дробарки закритого типу з деками, виконані у формі кілець.
2. Визначення впливу кільцевих дек на якісні і кількісні показники робочого процесу молоткової дробарки.
3. Дослідження взаємодії повітряно-продуктового шару з робочими органами дробарки.

3.1. Опис експериментальної установки

Молоткова дробарка (рис. 3.1.) складається з завантажувального пристрою 1, корпуса 2, ротора 3 з молотками 4, встановлений в корпусі 2 на валу 5 і розміщений в барабані 6, виконаний у вигляді усіченого конуса. Молотки 4 з втулками 7 посаджені на вісі 8 і можуть бути розміщені у гвинтовій лінії. Ротор спирається на два підшипника 9. На валу ротора під завантажувальним отвором встановлений шнек 10, що подає продукт в дробарку.

Ротор встановлений таким чином, що може переміщуватись вздовж вала 5 і приводиться в обертання від електродвигуна 11 через муфту 12. Зерно, що подається подрібненню, попадає в отвір завантажувального пристрою 1 і далі шнеком 10 – в зону подрібнення, де під дією ударів сталених молотків 4 та ударів об деку 17, а також стирання частинок об перфоронаву поверхню барабану 6. Ротор 3 і перфорований барабан 6 обертаються один назустріч другому.

У процесі подрібнення зерно переміщується по барабану 6 в сторону великого діаметра по гвинтовій лінії під дією відцентрових сил і молотків 4 ротора 3. Таке перемішування зерна в значній мірі збільшує шлях його проходження по перфорованій поверхні барабану.

Подрібнене зерно видаляється із дробарки за допомогою пневмотранспортера або іншим способом.

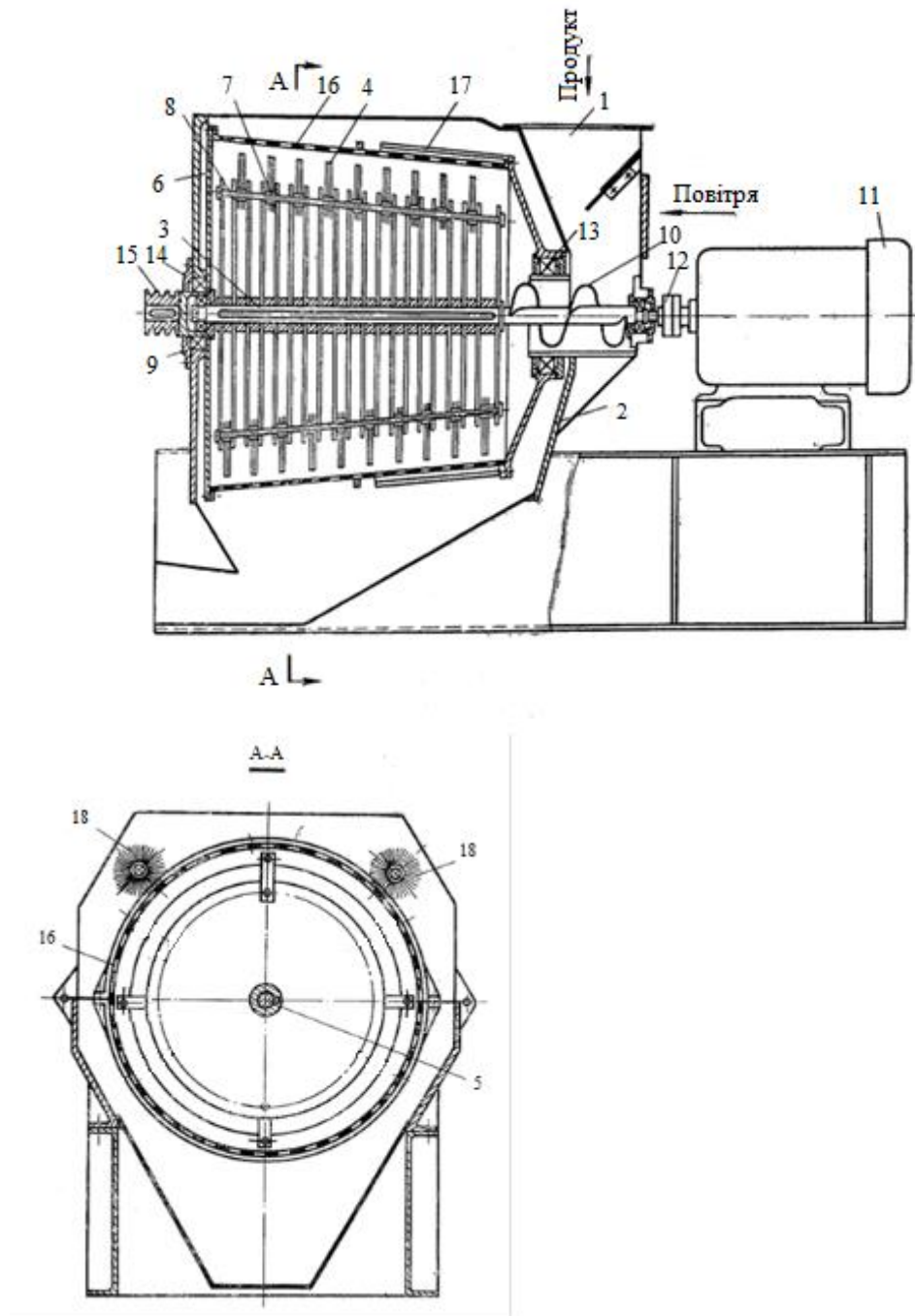


Рис. 3.1. Молоткова дробарка: 1 – завантажувальний пристрій; 2 – корпуса; 3 – ротора; 4 – молотки; 5 – валу; 6 – барабан; 7 – втулки; 8 – вісь; 9, 13, 14 – підшипники; 10 – шнек; 11 – електродвигун; 12 – муфта; 15 – шків; 16 – перфорована поверхня; 17 – деки.

3.2.Методика визначення основних показників робочого процесу дробарки

Основними показниками процесу подрібнення продукту є питома енергоємність, пропускна здатність і якість готового продукту.

Потужність на валу ротора дробарки визначається з врахуванням коефіцієнта корисної дії електродвигуна за методикою:

Ефективну і корисну потужність на валу дослідженої дробарки визначаємо за формулами [23]:

$$P_e = P \times \eta_{px}; \quad (3.1)$$

$$P_{кор} = P \times \eta_{px} - P_{xx} \times \eta_{xx}, \quad (3.2)$$

де η_{px} і η_{xx} – коефіцієнт корисної дії електродвигуна в режимах робочого і холостого ходу дробарки;

P_{xx} – потужність, затрачена на холостий хід дробарки, кВт.

Величина питомих енергетичних витрат, віднесених до одиниці маси готового продукту визначається за формулою:

$$\zeta_e = \frac{P_e}{Q}; \quad (3.3)$$

$$\zeta_n = \frac{P_{кор}}{Q}; \quad (3.4)$$

де ζ_e і ζ_n – питомі витрати ефективних і корисної потужності, кВт год/т;

Q – пропускна здатність дробарки, т/год.

Питома енергоємність процесу подрібнення визначається на формулою:

$$E = \frac{\zeta_e}{\lambda}; \quad (3.5)$$

$$E_{кор} = \frac{\zeta_n}{\lambda}; \quad (3.6)$$

де E , $E_{кор}$ – питома енергоємність з врахуванням розміру подрібнення, кВт год/т.

λ – розмір подрібнення матеріалу.

Пропускна здатність дробарки визначається при встановленому режимі роботи шляхом проб готового продукту протягом визначеного часу та розраховується за формулою:

$$Q = 3.6 \frac{m}{T}, \quad (3.7)$$

де m – маса проби, кг;

T – час відбирання проби, с.

Степінь подрібнення визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{D_{\text{зер}}}{M_n}, \quad (3.8)$$

де $D_{\text{зер}}$ – діаметр зерна, мм;

S_n – середній розмір частинки готового продукту.

Діаметр зерна, рівний діаметру кулі, об'єм якої рівний дійсному об'єму зерна, розраховується за формулою:

$$D_{\text{зер}} = 1,24 \sqrt{V_c}, \quad (3.9)$$

де V_c – середній об'єм зерна, визначається зануренням 100 зерен в мірний циліндр, частково заповнюється рідиною.

Основними характеристиками зерна, що впливають на процес подрібнення і сепарації, є: ви зерна, вологість, забрудненість, натуральна маса, абсолютна маса і розмір.

3.3. Дослідження взаємодії повітряно-продуктового шару з робочими органами дробарки

Дослідження моменту M_d , що передається молотковим ротором через повітряно-потоковий шар на дробильну камеру і на кільцеві деки виконувалось відповідно до методики дослідження процесу взаємодії повітряно-продуктового шару з пасивними органами дробарки.

Загальний вигляд дробильної камер лабораторної установки, що включає молотковий ротор, гладеньку периферійну камеру і рифлену торцеву деку представлено на рис. 3.2.



Рисунок 3.2. Загальний вигляд дробильної камери лабораторної установки з робочими органами

Досліди проводились за матрицею плану 3^2 на дробарці періодичної дії. Досліджувався вплив маси циркулюючого в дробильній камері матеріалу m і лінійної швидкості молотків V_m на момент M , що передається молотковим ротором через повітряно-продуктовий шар на дробильну камеру і кільцеві деки, при різних кількостях рифів z на кільцевих деках. Задавалася висота рифу деки $h_p = 6$ мм фз конструктивних параметрів камери подрібнення, та визначний шаг рифа $s_p = 24$ мм. Зазор між молотками і деками складає 5 мм. Отримані результати показані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Матриця плану 3^2 і результат дослідів

Позначення	Маса навіски, г	Швидкість молотків, V_{mol}	Момент, Нм		
			на дробильній камері		при відсутності кільцевих дек, (y_3)
			кількість рифів на кільцевих деках, шт		
			24 (y_1)	12 (y_2)	
1	-1	-1	1,564	1,462	0,898
2	0	-1	2,877	2,341	1,598
3	+1	-1	2,384	3,421	1,487
4	-1	0	1,706	1,624	1,198
5	0	0	3,124	2,846	1,798
6	+1	0	4,564	3,458	2,356
7	-1	+1	1,756	1,457	1,308
8	0	+1	3,275	2,742	1,689
9	+1	+1	4,766	3,648	2,445

За результатами дослідів отримані рівняння регресії і побудовані двохмірні перетини, що дозволяють проаналізувати вплив факторів на крутний момент:

$$y_1 = 3,112 + 1,454x_1 + 0,188x_2 + 0,138x_1^2 + 0,847x_1x_2 - 0,079x_2^2; \quad (3.10)$$

$$y_2 = 2,894 + 0,974x_1 + 0,107x_2 - 0,308x_1^2 - 0,099x_2^2; \quad (3.11)$$

$$y_3 = 1,698 + 0,569x_1 + 0,204x_2 \quad (3.12)$$

На рис. 3.3 показано двохмірний перетин, подубований за рівнянням регресії та показує, що момент, реалізується на деках в досліджуваній області варіювання факторів, має максимум при масі циркуляційного навантаження 0,121 кг та швидкості молотків 56 м/с.

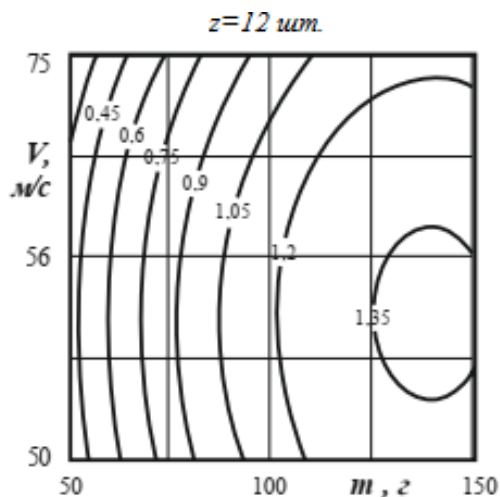


Рисунок 3.3. Двохмірний перетин поверхні відгуку, що характеризує залежність моменту опору на кільцевих деках з кількістю рифлів $z=12$ шт від маси навіски подрібненого матеріалу m (фактор x_1) і швидкості молотків V_{mol} (фактор x_2).

На рис. 3.4. наведені розрахунки і дослідні значення моменту, створюємого повітряно-продуктовим потоком, від швидкості молотків при кількості рифів на кільцевих деках $z=12$ шт і маси циркуляційного в камері подрібненого матеріалу $m = 0,121$ кг.

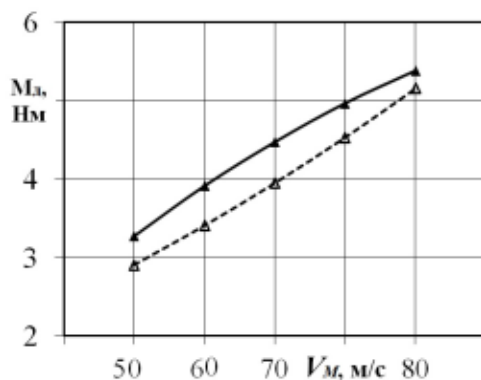


Рисунок 3.4. Значення моменту на деці: $--\triangle--$ теоретичні; $—\blacktriangle—$ дослідні.

Отже, з рис. 3.4. видно, що результати розрахунків, отримані з рівняння регресії (3.11) показали задовільну сходиність розрахункових і дослідних значень критерії оптимізації (середнє розходження значень складає 9,7 %).

В другій серії дослідів визначали момент на деці дробарки відкритого типу. Подавання матеріалу здійснювалась доовано в кількості 280 кг/год. Матриця плану 3^2 і результати дослідів наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Матриця плану 3^2 і результати дослідів

Рівень варіювання факторів	Швидкість молотків, V_{mol}	Кількість рифлів на кільцевих деках, з шт.	Момент на дробильній камері, M_d	Питомі енергозатрати, E , кВт*год/(м*од. вим.)
Верхний +1	70	36		
Нульовий 0	60	24		
Нижний -1	50	12		
1	-1	-1	2,364	1,398
2	0	-1	2,404	1,684
3	+1	-1	2,358	1,689
4	-1	0	2,348	1,455
5	0	0	2,418	1,568
6	+1	0	2,298	1,844
7	-1	+1	2,617	1,302
8	0	+1	2,611	1,398
9	+1	+1	2,498	1,577

За результатами отримані рівня регресії:

$$M_d = 2,364 - 0,039x_1 + 0,084x_2 - 0,057x_1^2 - 0,102x_2^2; \quad (3.13)$$

$$E = 1,748 + 0,194x_1 - 0,098x_2 - 0,059x_1^2 - 0,049x_2^2. \quad (3.14)$$

За моделями регресії побудовані двохмірний перетин поверхонь відгуку залежностей критерії оптимізації (рис. 3.5), що дозволяє проаналізувати вплив факторів на момент M_d і питомі енергозатрати E з врахуванням степені подібнення.

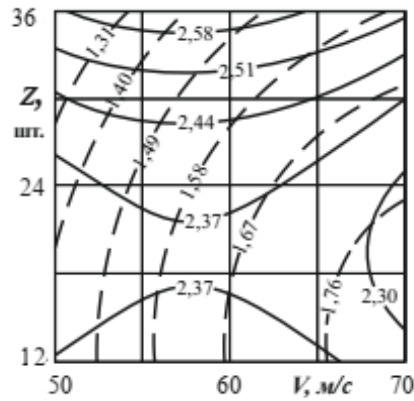


Рисунок 3.5. Двохмірний перетин поверхонь відгуку, що характеризує залежність моменту дробильної камери M_d (—) і питомих енергозатрат E (---) від швидкості молотків V_{mol} (факторів x_1) і кількості рифлей на кільцевих деках (фактор x_2).

Аналіз моделей і двохмірних перетинів показує, що в області дослідження зі збільшенням кількості рифів збільшуються момент на дробильній камері з 2,37 до 2,58 Нм. При цьому знижуються і питомі енергозатрати процесу подрібнення до 14 %, що вказують на позитивний вплив збільшення площі контактної взаємодії повітряно-продуктового потоку з кільцевими деками.

Висновки по розділу 3

Кінематична енергія повітряно-продуктового потоку створює у дробильній камері крутний момент, який при встановленні кільцевих дек з рифленими поверхнями збільшується на 14% у порівнянні з гладкою дробильною камерою. Збільшуючи площу контактної взаємодії подрібненого матеріалу з робочими поверхнями дробильної камери дозволяє максимально використовувати кінетичну енергію частинок на реалізацію процесу подрібнення, тим самим підвищуючи ефективність подріблення.

ВИСНОВКИ

Удосконалення робочого процесу молоткової дробарки можливе шляхом підвищення ефективності дії робочих органів на подрібнювальний матеріал та прискореного відведення готового продукту із камери подрібнення. При цьому інтенсивність процесу подрібнення зернових культур здійснюється за рахунок максимального використання підведеної енергії ударів активними елементами і вторинними ударами матеріалу об пасивні робочі органи.

Питома площа робочих органів, що приймає участь в процесі подрібнення зерна за рахунок ударів активних елементів – молотків і вторинних ударів о пасивні робочі органи – решето і деки, залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу та характеру подрібнювальної поверхні і параметрів режиму подрібнення.

Взаємодія повітряно-продуктового шару з кільцевими деками дозволяє зменшити кругову швидкість подрібненого матеріалу за рахунок гальмування повітряно-продуктового шару, що в свою чергу сприяє підвищенню відносної швидкості співударяння молотків з частинками зерна.

З врахуванням найбільш ймовірного кута падіння частинки β' до деки, в межах $5...15^\circ$, кут робочої грані рифа деки γ відносно торцевої стінки дробильної камери складає в межах $82...74^\circ$.

За результатами дослідів було встановлене наступне: при встановленні кільцевих дек з рифленими поверхнями в камері подрібнення відбувається збільшення моменту на 14% у порівнянні з гладкою дробильною камерою. Це говорить про те, що зі збільшенням площі контактної взаємодії подрібненого матеріалу з робочими поверхнями дробильної камери можливо використовувати кінетичну енергію частинок на реалізацію процесу подрібнення, тим самим збільшуючи ефективність подрібнення. Максимальний крутний момент на деках виникає при питомому циркуляційному навантаженні $1,98 \text{ кг/м}^2$ діаметрального перетину дробильної камери.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасьев, А.П. Устройство мукомольных мельниц. СПб. 1983. 144 с.
2. Демидов, А.Р. Способы измельчения и методы оценки их эффективности. Элеваторная, мукомольно-крупяная и комбикормовая промышленность. М., 1969. № 11. С. 51.
3. ЗУ «Про безпечність та гігієну кормів» Відомості Верховної Ради (ВВР), 2021, № 15, ст.127.
4. ДСТУ 7693:2015 Комбикормова сировина. Загальні технічні умови.
5. Дяченко Л.С. Основи технології комбикормового виробництва: навч. посібник. Л.С. Дяченко, В.С. Бомко, Т.Л. Сивик. Біла Церква, 2015. 306 с.
6. Ревенко І. І. Машини та обладнання для тваринництва: Підручник. І. І. Ревенко, М. В. Брагінець, В. І. Ребенко. К.:Кондор, 2012. 731 с.
7. Механізація виробництва продукції тваринництва. І. І. Ревенко, Г. М. Кукта, В. М. Манько та ін.; за ред. І. І. Ревенка. К.: Урожай. 1994. 264 с.
8. Горячкин В. П. Собрание сочинений: в 3 т. Т.3. Москва : Колос, 1965. 384 с.
9. Сыроватка В.И. Исследования основных закономерностей процесса измельчения зерна в молотковой дробилке кормов: Автореф. дис... канд.техн. наук. В.И. Сыроватка. М., 1964. 36 с.
10. Мельников С.В. Моделирование рабочего процесса в молотковой кормодробилке. Механизация сельскохозяйственного производства: Зап. Ленинградского СХИ. Л., 1968. т. 119. Вып. 1. С. 113-117.
11. Скляр О.Г., Болтянська Н.І. Механізація технологічних процесів у тваринництві: навч. посіб. Мелітополь: Колор Принт, 2012. 720с.
12. Пилипенко О. М. Аналіз і вибір принципових технічних рішень для застосування в конструкціях зернових дробарок малих ферм / О. М. Пилипенко, Л. М. Павліченко, С. М. Чибис // Вісн. ХДТУСГ. – Х., 2001 – Вип. 8, т. 2. Підвищення надійності відновлюємих деталей машин. – С. 295– 299.
13. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л.: Колос, 1978. 560 с.
14. <https://agrarka.com/ua/ads/r-110/p-1/>

15. Егоров Г.А. Технологические свойства зерна. Москва: Агропромиздат, 1985. 218 с.
16. Дулаев, В.Г. Оптимальные системы технологических процессов и машин мукомольного производства: Монография. М.: Издательский комплекс МГУПП, 2003. 378 с., Зверев С.В. Физические свойства зерна и продуктов его переработки. Москва: ДеЛи принт, 2007. 176 с.
17. Федоренко И.Я., Левин А.М. Энергетические соотношения при ударном измельчении зерна. Механизация и электрификация. 2002. №11. С. 32-33.
18. Алешкин В.Р., Рощин П.М. Механизация животноводства / Под ред. С.В. Мельникова. М.: Агропромиздат, 1985. 336 с.
19. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Ленинград: Колос, 1978. 560 с.
20. Акименко А. В., Сундеев А. А., Воронин В. В. Совершенствование процесса измельчения фуражного зерна. *Хранение и переработка зерна*. 2011. № 2. С. 45 – 47.
21. Завражных А. И., Николаев Д. И. Механизация приготовления и хранения кормов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. завед. Москва: Агропромиздат, 1990. 336 с.
22. Погорелов А. В. Аналитическая геометрия. Москва: Наука, 1968. 176 с
23. Мельников С.В., Кирпичников Ф.С. Расход энергии на создание воздушного потока ротором дробилки. Записки ЛСХИ. 1976. Т. 290. С.16–24.