Abstract: *The paper examines the main directions for optimizing the design parameters of machines used to clean grain of impurities. It identifies the key factors influencing separation efficiency, throughput, energy consumption, and the quality of the cleaned grain material. The necessity of a comprehensive approach to selecting the parameters of working components - specifically screens, air ducts, sieving surfaces, and drive mechanisms - is substantiated. An approach to optimizing the design of grain-cleaning machines is proposed, taking into account the technological properties of the grain mixture and its processing modes.*

Keywords: *grain, cleaning, impurities, grain-cleaning machine, design parameters, separation, throughput, energy efficiency, optimization.*

Науковий керівник:

Доценко Н.А.

Д-р пед. наук, канд. техн. наук, професор

Миколаївський національний аграрний університет

УДК 631.363.2

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНА

Володимир НАРІЄВСЬКИЙ, Олексій КОВАЛЕНКО,

В’ячеслав МУРАВИНЕЦЬ

Здобувачі вищої освіти спеціальності Н7 Агроінженерія

Миколаївський національний аграрний університет

м. Миколаїв, Україна

Анотація: *Розглянуто питання обґрунтування конструктивних параметрів молоткової дробарки для переробки зернової сировини. Проаналізовано основні фактори, що визначають ефективність процесу подрібнення, зокрема конструкцію робочої камери, параметри молотків, частоту їх обертання, розміри отворів решета та умови подачі зерна. Визначено основні критерії оцінювання роботи дробарки: продуктивність, питомі енерговитрати, ступінь подрібнення, рівномірність фракційного*

складу та якість отриманого продукту. Обґрунтовано доцільність оптимізації конструктивно-технологічних параметрів молоткової дробарки з метою підвищення продуктивності та зниження енергоємності процесу.

Ключові слова: *зерно, подрібнення, молоткова дробарка, молоток, решето, робоча камера, продуктивність, енергоефективність, конструктивні параметри.*

Подрібнення зерна є однією з найбільш енергоємних операцій під час виробництва комбікормів, кормових сумішей та інших продуктів переробки зернової сировини. Якість подрібнення значною мірою визначає подальші технологічні властивості продукту, його однорідність, здатність до змішування та ефективність використання у годівлі тварин. Молоткові дробарки отримали широке застосування завдяки простоті конструкції, універсальності, високій продуктивності та можливості переробки різних видів зернової сировини. Основним робочим органом дробарки є ротор із шарнірно або жорстко закріпленими молотками, які здійснюють руйнування зерна внаслідок ударної дії. Подрібнений матеріал проходить крізь отвори решета, що визначає кінцевий розмір частинок. Ефективність роботи молоткової дробарки залежить від великої кількості взаємопов'язаних параметрів. До них належать частота обертання ротора, кількість, маса та геометричні характеристики молотків, діаметр робочої камери, зазор між молотками і решетом, площа та діаметр отворів решета, швидкість подачі зерна та його фізико-механічні властивості. Тому вибір конструктивних параметрів повинен здійснюватися комплексно з урахуванням не лише необхідної крупності продукту, а й енерговитрат, продуктивності та зношування робочих органів [1].

Процес подрібнення зерна в молотковій дробарці можна умовно поділити на декілька послідовних етапів: надходження зерна до робочої камери, його захоплення молотками, ударне руйнування, переміщення частинок у робочій зоні, повторне подрібнення та проходження частинок через отвори решета [2].

Основним елементом, що визначає кінематичний режим процесу, є ротор. При його обертанні молотки набувають значної окружної швидкості. Кінетична

енергія молотка передається зернині під час удару, унаслідок чого виникають деформації та руйнування її структури.

Окружну швидкість кінця молотка можна визначити за залежністю:

$$v = \pi D n / 60, \quad (1)$$

де **v** – окружна швидкість молотка, м/с;

D – діаметр траєкторії руху молотка, м;

n – частота обертання ротора, об/хв.

Зі збільшенням частоти обертання ротора зростає швидкість руху молотків та енергія удару. Це, як правило, сприяє інтенсифікації процесу подрібнення та зменшенню середнього розміру частинок. Однак надмірне збільшення частоти обертання може призвести до підвищення питомих енерговитрат, інтенсивного зношування молотків і решета, а також до небажаного перетирання зерна.

Таким чином, необхідно визначати раціональний діапазон частоти обертання ротора, за якого забезпечується необхідний ступінь подрібнення при мінімально можливих енерговитратах [3].

Важливим конструктивним параметром є геометрія молотків. На процес подрібнення впливають їх маса, довжина, ширина, товщина, форма робочої поверхні та спосіб кріплення. Збільшення маси молотка підвищує його кінетичну енергію, однак одночасно збільшує навантаження на ротор і привод. Тому конструкція молотка повинна забезпечувати достатню ударну дію при прийнятних динамічних навантаженнях.

Особливе значення має кількість молотків на роторі. Збільшення їх кількості сприяє підвищенню інтенсивності контакту робочих органів із зерном. Водночас надмірна кількість молотків може зменшувати вільний об'єм робочої камери, погіршувати рух матеріалу та збільшувати енергоспоживання. Раціональна кількість молотків повинна визначатися з урахуванням діаметра ротора, його довжини, виду зернової сировини та необхідної продуктивності.

Одним із ключових елементів молоткової дробарки є решето. Його основна функція полягає у формуванні необхідної крупності готового

продукту. Частинки, розміри яких перевищують діаметр отворів решета, залишаються в робочій камері та піддаються повторному впливу молотків. Частинки, які відповідають заданій крупності, проходять крізь отвори та виводяться з дробарки.

Зменшення діаметра отворів решета сприяє отриманню більш тонкого продукту, але одночасно збільшує тривалість перебування зерна в робочій камері та енерговитрати. Збільшення діаметра отворів підвищує продуктивність, але може призвести до отримання надмірно крупної фракції.

Тому одним із основних завдань конструктивного обґрунтування є визначення оптимального співвідношення між діаметром отворів решета, частотою обертання ротора та продуктивністю подачі зерна.

На ефективність подрібнення істотно впливає також зазор між кінцями молотків і внутрішньою поверхнею решета. При зменшенні зазору збільшується ймовірність повторного руйнування частинок та підвищується інтенсивність подрібнення. Проте надмірно малий зазор може збільшити механічні втрати, шум та ризик пошкодження робочих органів.

Для оцінювання ефективності роботи дробарки доцільно використовувати комплекс показників. Основними з них є продуктивність, питомі енерговитрати, середній розмір частинок, коефіцієнт подрібнення та рівномірність гранулометричного складу.

Продуктивність визначається як:

$$\mathbf{Q = M/t,} \qquad \mathbf{(2)}$$

де **Q** – продуктивність дробарки, кг/год;

M – маса переробленого зерна, кг;

t – тривалість роботи, год.

Питомі енерговитрати визначаються за формулою:

$$\mathbf{e = N/Q,} \qquad \mathbf{(3)}$$

де **e** – питомі енерговитрати, кВт·год/т;

N – потужність привода, кВт;

Q – продуктивність, т/год.

Для комплексної оцінки конструкції необхідно враховувати взаємозв'язок між продуктивністю та енерговитратами. Збільшення продуктивності не завжди є ознакою підвищення ефективності, оскільки воно може супроводжуватися зростанням потужності привода та погіршенням якості подрібнення.

Раціональні конструктивні параметри молоткової дробарки можуть бути визначені на основі математичного планування експерименту. Як незалежні фактори доцільно використовувати частоту обертання ротора, діаметр отворів решета, зазор між молотками та решетом, кількість молотків і продуктивність подачі зерна.

У загальному вигляді цільову функцію оптимізації можна представити як:

$$F = f(n, d, z, \delta, Q) \rightarrow \min, \quad (3)$$

де **n** – частота обертання ротора;

d – діаметр отворів решета;

z – кількість молотків;

δ – зазор між молотками та решетом;

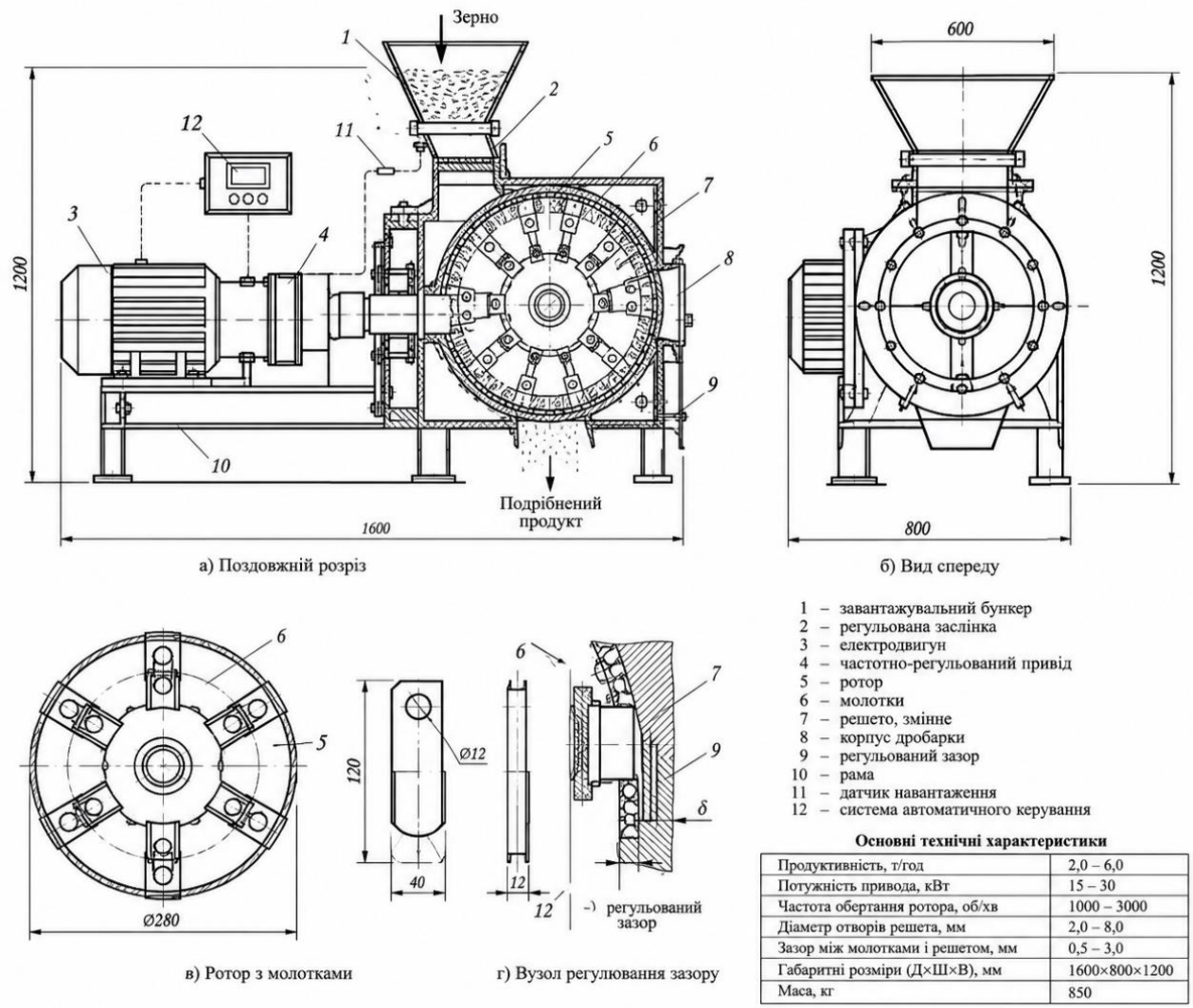
Q – продуктивність подачі.

При цьому обмеженнями можуть бути задані необхідний діапазон крупності готового продукту, максимально допустимі питомі енерговитрати, допустимі механічні навантаження та рівень втрат.

Вдосконалена молоткова дробарка призначена для подрібнення зерна до заданої крупності та може використовуватися у технологічних лініях виробництва комбікормів і кормових сумішей. Зерно надходить у завантажувальний бункер 1, звідки за допомогою регульованої заслінки 2 рівномірно подається до робочої камери. Регулювання подачі дає можливість підтримувати оптимальне навантаження на робочий орган залежно від продуктивності та властивостей зернової сировини.

У робочій камері встановлений ротор 5, на якому шарнірно закріплені молотки 6. Під час обертання ротора від електродвигуна 3 через частотно-регульований привод 4 молотки набувають значної окружної швидкості. Зернівки, потрапляючи в зону обертання молотків, руйнуються внаслідок

ударного навантаження, деформації та багаторазових зіткнень між частинками, молотками та внутрішніми поверхнями робочої камери.



1 – завантажувальний бункер
2 – регульована заслінка
3 – електродвигун
4 – частотно-регульований привід
5 – ротор
6 – молотки
7 – решето, змінне
8 – корпус дробарки
9 – регульований зазор
10 – рама
11 – датчик навантаження
12 – система автоматичного керування

Основні технічні характеристики

Продуктивність, т/год	2,0 – 6,0
Потужність привода, кВт	15 – 30
Частота обертання ротора, об/хв	1000 – 3000
Діаметр отворів решета, мм	2,0 – 8,0
Зазор між молотками і решетом, мм	0,5 – 3,0
Габаритні розміри (Д×Ш×В), мм	1600×800×1200
Маса, кг	850

Рис. 1 – Конструктивно-технологічна схема вдосконаленої молоткової дробарки для переробки зерна

Подрібнений матеріал переміщується вздовж змінного решета 7. Частинки, розмір яких менший за отвори решета, проходять крізь нього та виводяться з дробарки як готовий продукт. Крупні частинки затримуються в робочій камері й продовжують піддаватися ударній дії молотків до досягнення необхідної крупності.

Заслінка 2 забезпечує зміну інтенсивності надходження сировини. Це дозволяє уникати перевантаження робочої камери та електродвигуна і стабілізувати продуктивність дробарки. Застосування регульованого привода 4 дає можливість змінювати частоту обертання ротора відповідно до виду зерна та необхідної крупності подрібнення. При цьому можна зменшувати

енергоспоживання при роботі з легкоподрібнюваною сировиною. Конструкція передбачає можливість встановлення решіт із різним діаметром отворів. Це дозволяє оперативно змінювати гранулометричний склад готового продукту без суттєвої зміни конструкції машини. Вузол 9 дозволяє встановлювати необхідний зазор δ між робочими кінцями молотків і поверхнею решета. Оптимізація цього параметра дає можливість регулювати інтенсивність повторного подрібнення та впливати на продуктивність і питомі енерговитрати. Ротор обладнаний рівномірно розташованими молотками, що забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження та інтенсивну взаємодію молотків із зерновою масою. Для показаної конструкції передбачено чотири групи молотків, розташованих по окружності ротора. Датчик 11 контролює навантаження електродвигуна. Отримана інформація передається до системи автоматичного керування 12, яка може коригувати подачу зерна та частоту обертання ротора. Це дозволяє підтримувати дробарку поблизу оптимального режиму роботи. Поєднання регульованої подачі, частотно-регульованого привода та автоматичного контролю навантаження дає змогу уникати роботи дробарки в режимах недовантаження або перевантаження. У результаті створюються передумови для зниження питомих енерговитрат при забезпеченні необхідної якості подрібнення. Таким чином, основна відмінність вдосконаленої дробарки полягає не лише у зміні конструкції робочої камери, а в інтеграції механічного регулювання та автоматичного керування процесом подрібнення. Це дозволяє одночасно впливати на три основні показники роботи машини: продуктивність, якість подрібнення та питомі енерговитрати. Перспективним напрямом удосконалення молоткових дробарок є застосування регульованого електропривода. Зміна частоти обертання ротора залежно від продуктивності та фізико-механічних властивостей сировини дозволяє підтримувати оптимальний режим подрібнення. Додаткове застосування датчиків навантаження привода та контролю продуктивності може забезпечити автоматичне регулювання подачі зерна. Для підвищення енергоефективності також доцільно забезпечувати рівномірне завантаження робочої камери.

Нерівномірна подача призводить до періодичних перевантажень ротора та електродвигуна, зростання питомих енерговитрат і нерівномірності фракційного складу готового продукту. Важливим напрямом є оптимізація форми та розташування молотків. Раціональне розташування робочих елементів забезпечує рівномірний розподіл навантаження на ротор, підвищує інтенсивність контакту із зерном та сприяє ефективному переміщенню матеріалу в робочій камері.

Обґрунтування конструктивних параметрів молоткової дробарки є комплексним завданням, яке повинно враховувати взаємозв'язок кінематичних, геометричних і технологічних факторів. Найбільш істотний вплив на процес подрібнення мають частота обертання ротора, маса та геометрія молотків, їх кількість, діаметр отворів решета, зазор між молотками та решетом і продуктивність подачі зерна. Збільшення частоти обертання ротора та зменшення діаметра отворів решета сприяють підвищенню інтенсивності подрібнення, але можуть супроводжуватися збільшенням енерговитрат і зношування робочих органів. Тому конструктивні параметри необхідно визначати за критерієм комплексної ефективності. Перспективним є використання математичного моделювання та експериментальної оптимізації для встановлення раціонального співвідношення між параметрами ротора, молотків, решета та режимом подачі зерна. Застосування регульованого електропривода й автоматичного контролю навантаження створює можливості для підвищення продуктивності, зниження питомих енерговитрат і стабілізації якості готового продукту.

Список використаних джерел

4. Vaiciukevičius E., Jasinskas A., Jotautienė E., Domeika R., Gerdauskas K., Zinkevičienė R., Lekavičienė K. Determination of Optimal Technological Parameters for Sorting Wheat Grains in Chambers of Different Constructions. Processes. 2023. Vol. 11, No. 12. Article 3441. DOI: 10.3390/pr11123441.

5. Babenko, D., Dotsenko, N., & Gorbenko, O. (2024). Study of structural and kinematic characteristics of an energy-efficient oil press. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 28(3), 41-54. https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/2.2024.41

6. Kolankowska E., Choszcz D. J., Markowski P., Reszczyński P. S., Lipiński A. J. The Process of Separating Buckwheat and Wheat Grain in a Pneumatic Cone Separator in the Context of Sustainable Agriculture. Processes. 2022. Vol. 10, No. 1. Article 59. DOI: 10.3390/pr10010059.

Abstract: *The paper addresses the substantiation of design parameters for a hammer mill used to process grain raw materials. It analyzes the key factors determining the efficiency of the grinding process, specifically the design of the grinding chamber, hammer parameters, rotational speed, screen aperture size, and grain feeding conditions. The main criteria for evaluating the mill's performance are identified: throughput, specific energy consumption, degree of comminution, uniformity of particle size distribution, and the quality of the resulting product. The study justifies the optimization of the hammer mill's design and operational parameters to enhance throughput and reduce the process's energy intensity.*

Keywords: grain, grinding, hammer mill, hammer, screen, grinding chamber, throughput, energy efficiency, design parameters.

Науковий керівник:

Доценко Н.А.

Д-р пед. наук, канд. техн. наук, професор

Миколаївський національний аграрний університет

УДК 631.363.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПОДРІБНЮВАЧА

Вадим ЛАСКОВИЙ, Іван ОСМЯТКІН, Олександр ВІЛЬЧИНСЬКИЙ

Здобувачі вищої освіти спеціальності Н7 Агроінженерія

Миколаївський національний аграрний університет

м. Миколаїв, Україна