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

Анотація: *Розглянуто процес подрібнення зернової сировини як одну з найбільш енергоємних операцій підготовки фуражного зерна та виробництва комбікормів. Визначено основні фактори, що впливають на продуктивність, ступінь подрібнення та питомі енерговитрати робочого процесу. Проаналізовано конструктивні схеми молоткових, вальцьових, дискових та роторно-відцентрових подрібнювачів, виявлено їхні переваги та недоліки. Обґрунтовано доцільність комплексної оптимізації параметрів робочих органів з урахуванням взаємозв'язку продуктивності, енергоємності та однорідності гранулометричного складу продукту. Запропоновано напрями вдосконалення конструкції, зокрема раціоналізацію форми та розташування молотків, диференціацію отворів решітного полотна за зонами та автоматичне регулювання частоти обертання ротора залежно від навантаження.*

Ключові слова: *зерно, подрібнення, подрібнювач, молотковий млин, ротор, продуктивність, питомі енерговитрати, ступінь подрібнення, конструктивні параметри, оптимізація.*

Подрібнення зернової сировини є однією з базових технологічних операцій у виробництві комбікормів та підготовці фуражного зерна до згодовування. Якість виконання цієї операції безпосередньо впливає на перетравність і засвоюваність корму, ефективність подальшого змішування та гранулювання, а також на загальні енерговитрати технологічної лінії. Надмірно грубе подрібнення знижує поживну цінність корму, тоді як надмірно тонке — призводить до невиправданого зростання питомих енерговитрат і пилоутворення. Тому раціональний вибір режимів роботи та конструктивних параметрів подрібнювача є важливим завданням підвищення ефективності післязбиральної обробки зерна.

За принципом руйнування матеріалу подрібнювачі зернової сировини поділяють на молоткові (ударної дії), вальцьові (стиску та зсуву), дискові (стирання) та роторно-відцентрові (комбінованої дії) [1]. Молоткові подрібнювачі є найбільш поширеними завдяки простоті конструкції,

універсальності щодо виду сировини та порівняно низькій металоємності, проте характеризуються підвищеними питомими енерговитратами та нерівномірністю гранулометричного складу продукту [4, 5]. Вальцьові машини забезпечують більш рівномірний розмір часток, але мають обмежену продуктивність і складнішу конструкцію робочих органів [2]. Роторно-відцентрові подрібнювачі поєднують переваги ударного та відцентрового руйнування зерна, що дає змогу знизити енергоємність процесу за збереження прийнятної продуктивності [3].

Технологічний процес подрібнення включає подачу зерна з бункера через дозувальний пристрій у робочу камеру, руйнування матеріалу молотками, закріпленими на роторі, та відведення продукту через отвори решітного полотна (рис. 1). Основними керованими параметрами є частота обертання ротора n, кількість молотків z, продуктивність подавального пристрою q та діаметр отворів решета d.

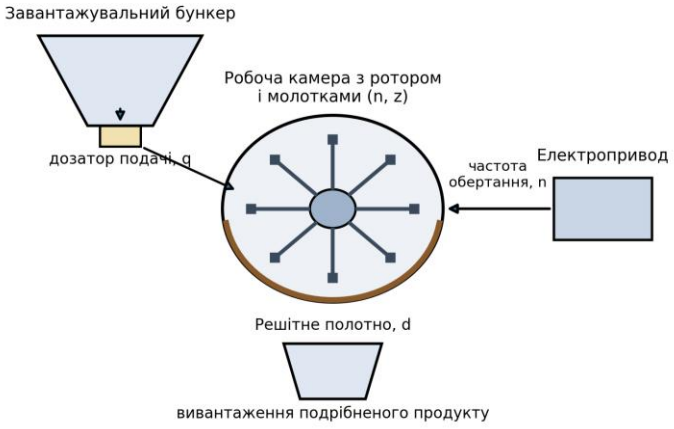


Рисунок 1. Функціональна схема технологічного процесу подрібнення зернової сировини

Продуктивність подрібнювача визначають за співвідношенням:

$$Q = M / t, \quad (1)$$

де Q - продуктивність подрібнювача, кг/год; M - маса подрібненого зерна, кг; t - тривалість оброблення, год.

Питомі енерговитрати процесу подрібнення визначають як:

$$e = E / M, \quad (2)$$

де e - питомі енерговитрати, кВт·год/т; E - витрачена електрична енергія, кВт·год; M - маса подрібненого зерна, т.

Для комплексної оцінки робочого процесу подрібнювача доцільно розглядати цільову функцію у вигляді:

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

де n - частота обертання ротора, хв$^{-1}$; z - кількість молотків; q - продуктивність подавального пристрою, кг/год; d - діаметр отворів решета, мм.

Для визначення оптимальних значень факторів n, z, q, d доцільно застосовувати методи планування багатофакторного експерименту, зокрема ротатабельне композиційне планування або план Бокса–Бенкена, що дає змогу отримати регресійні моделі продуктивності та енергоємності у вигляді поліномів другого порядку та визначити раціональну область режимів роботи. Характер залежності продуктивності від частоти обертання ротора та діаметра отворів решета ілюструє рисунок 2.

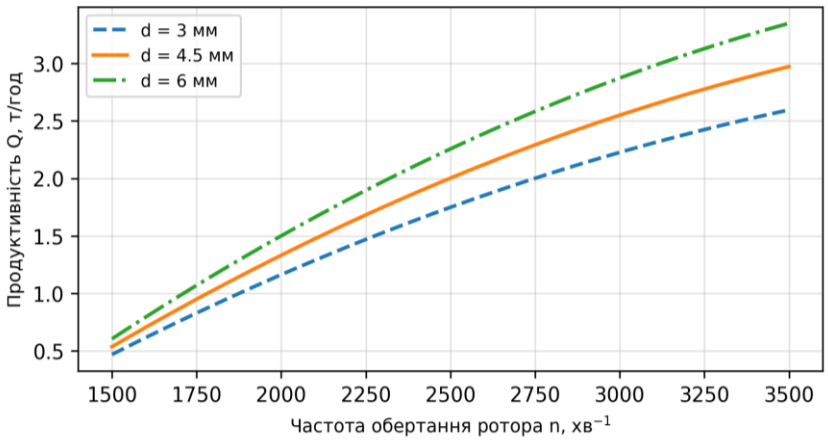


Рисунок 2 - Залежність продуктивності подрібнювача від частоти обертання ротора та діаметра отворів решета

Зі збільшенням частоти обертання ротора продуктивність подрібнювача зростає внаслідок підвищення інтенсивності ударної взаємодії молотків із зерном, однак після певного значення n приріст продуктивності сповільнюється, тоді як питомі енерговитрати та динамічні навантаження на підшипникові вузли продовжують зростати. Збільшення діаметра отворів решета підвищує продуктивність, але одночасно погіршує однорідність гранулометричного складу продукту. Отже, раціональні значення частоти обертання ротора та розміру отворів решета мають визначатися з урахуванням

допустимого ступеня подрібнення, а не лише за критерієм максимальної продуктивності.

Перспективними напрямами вдосконалення конструкції подрібнювача є: раціоналізація форми, кута установки та матеріалу молотків з підвищеною зносостійкістю робочих кромок; диференціація діаметра отворів решітного полотна за зонами робочої камери; застосування змінних (секційних) решіт для оперативного регулювання ступеня подрібнення; впровадження частотно-регульованого електропривода з автоматичним коригуванням частоти обертання ротора залежно від фактичного навантаження, що контролюється датчиком струму на валу двигуна. Це забезпечує оптимальне співвідношення продуктивності та енергоємності при зміні властивостей зернової сировини.

Важливим резервом підвищення ефективності є також зменшення зазору між кінцями молотків і решітним полотном, що інтенсифікує руйнування зерна без зростання частоти обертання ротора й дає змогу знизити динамічні навантаження на привод.

Таким чином, продуктивність, ступінь подрібнення та питомі енерговитрати перебувають у складному взаємозв'язку з конструктивними та режимними параметрами подрібнювача. Раціональне вдосконалення має передбачати комплексний підхід - поєднання математичного моделювання й багатофакторного експерименту з адаптивними системами автоматичного керування режимом роботи.

Список використаних джерел

1. Castillo Alvarez Y., Jiménez Borges R., Monteagudo Yanes J. P., Rodríguez Pérez B., Patiño Vidal C. D., Pfuyo Muñoz R. Mathematical Model to Improve Energy Efficiency in Hammer Mills and Its Use in the Feed Industry: Analysis and Validation in a Case Study in Cuba. Processes. 2025. Vol. 13, No. 5. Article 1523. DOI: 10.3390/pr13051523.

2. Vasilyeva N., Golyshevskaia U., Sniatkova A. Modeling and Improving the Efficiency of Crushing Equipment. Symmetry. 2023. Vol. 15, No. 7. Article 1343. DOI: 10.3390/sym15071343.

3. Li A., Jia F., Chu Ya., Han Yan., Li H., Sun Z., Ji Sh., Li Zh. Simulation of the movement of rice grains in a centrifugal huller by discrete element method and the influence of blade shape. Biosystems Engineering. 2023. Vol. 236. P. 54–70. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2023.10.013.

4. Doudkin M., Yakovlev V., Stryczek P., Leśniewski T. Optimization of Technological Parameters of the Working Process of a Spring–Rotor Grinder Based on Mathematical Modeling. Applied Sciences. 2026. Vol. 16, No. 6. Article 2900. DOI: 10.3390/app16062900.

5. Marczuk A., Blicharz-Kania A., Savinykh P., Isupov A., Palichyn A., Ivanov Il. Studies of a Rotary–Centrifugal Grain Grinder Using a Multifactorial Experimental Design Method. Sustainability. 2019. Vol. 11. Article 5362. DOI: 10.3390/su11195362.

Abstract: *The paper examines the process of grinding grain raw material as one of the most energy-intensive operations in feed preparation and compound feed production. The main factors affecting productivity, degree of grinding and specific energy consumption are identified, and design schemes of hammer, roller, disc and rotary-centrifugal grinders are compared. The expediency of a comprehensive optimisation of the working-tool parameters is substantiated, taking into account the interrelation between productivity, energy intensity and particle-size uniformity. Directions for improving the grinder design are proposed, including rationalising the shape and arrangement of hammers, zonal differentiation of screen hole diameters, and an automatic rotor-speed control system.*

Keywords: *grain, grinding, grinder, hammer mill, rotor, productivity, specific energy consumption, degree of grinding, design parameters, optimization.*

Науковий керівник:

Доценко Н.А.

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

Миколаївський національний аграрний університет