МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Бочковський Владислав Вікторович

УДК 631.53.02:631.51

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ШЛЯХОМ МОДЕРНІЗАЦІЇ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ

208 “Агроінженерія”

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

Керівник роботи
Дерев'янко Д.А.
доктор технічних наук, професор

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Бочковський Владислав Вікторович. Підвищення ефективності процесу подрібнення шляхом модернізації молоткової дробарки. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Магістерська робота присвячена вирішенню актуальної науково-виробничої задачі підвищення продуктивності та зниження енергоємності процесу подрібнення лузги круп'яних і олійних культур шляхом модернізації молоткової дробарки. У роботі виконано аналіз існуючих конструкцій сільськогосподарських подрібнювальних машин, який показав їх недостатню ефективність та підвищену енергоємність при переробці зазначеного виду сировини. На основі проведеного аналізу розроблено конструктивно-технологічну схему молоткової дробарки з удосконаленими молотками, робоча поверхня яких виконана у вигляді зовнішніх триступеневих прямокутних виступів з рівними радіусами від вершин до осі підвісу, а також з живильним пристроєм у вигляді барабана з чотирма жолобами, протилежні сторони якого повернуті відносно один одного.

Експериментальні дослідження встановили, що застосування вдосконаленого живильного пристрою дозволяє збільшити подачу подрібнюваного матеріалу на 8–12 % і знизити енергоємність процесу подачі на 7–10 % порівняно з традиційними схемами при частоті обертання вала 70 хв$^{-1}$. Отримані рівняння регресії дають можливість визначати продуктивність і енергоємність процесу подрібнення лузги круп'яних і олійних культур за оптимальних конструктивно-режимних параметрів молоткового подрібнювача. Дослідний зразок забезпечує дрібний помел з розміром частинок 0,15–0,4 мм при подачі 300 кг/год та окружній швидкості молотків 40 м/с, при цьому енергоємність процесу становить 0,8–1,0 кВт·год/кг.

Результати виробничої перевірки підтвердили ефективність запропонованої модернізації: витрата електроенергії зменшилась на 30 %, продуктивність зросла на 20 % порівняно з серійною молотковою дробаркою, а частка вирівняного за розміром готового продукту досягла 98 %. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та впровадженні енергоощадного подрібнювального обладнання для агропромислового виробництва.

Ключові слова: молоткова дробарка, подрібнення, лузга круп'яних культур, лузга олійних культур, модернізація, енергоємність процесу, продуктивність, живильний пристрій, конструктивно-режимні параметри, якість подрібнення.

ANNOTATION

Bochkovskyi Vladyslav Viktorovych. Improving the Efficiency of the Grinding Process through Modernization of a Hammer Mill. – *Qualification work on the rights of the manuscript*.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The master's thesis is devoted to solving an актуаль scientific and production-oriented problem of increasing productivity and reducing the energy intensity of the grinding process of husks from cereal and oilseed crops through the modernization of a hammer mill. The study includes an analysis of existing designs of agricultural grinding machines, which revealed their insufficient efficiency and high energy consumption when processing this type of raw material. Based on the conducted analysis, a structural and technological scheme of a hammer mill was developed with improved hammers, the working surface of which is made in the form of external three-stage rectangular protrusions with equal radii from the вершини to the suspension axis, as well as a feeding device designed as a drum with four grooves, whose opposite sides are rotated relative to each other.

Experimental studies established that the use of the improved feeding device makes it possible to increase the feed rate of the ground material by 8–12% and reduce the energy intensity of the feeding process by 7–10% compared with conventional schemes at a shaft rotational speed of 70 min^{-1}. The obtained regression equations allow determining the productivity of the hammer grinder and the energy intensity of the grinding process of cereal and oilseed husks under optimal design and operating parameters of the hammer grinder. The experimental prototype provides fine grinding with a particle size of 0.15–0.4 mm at a feed rate of 300 kg/h and a peripheral hammer speed of 40 m/s, while the energy intensity of the process is 0.8–1.0 kWh/kg.

The results of industrial testing confirmed the effectiveness of the proposed modernization: electricity consumption decreased by 30%, productivity increased by 20% compared with a standard hammer mill, and up to 98% of the finished product was uniform in particle size. The obtained results can be used in the design and implementation of energy-efficient grinding equipment for agro-industrial production.

Keywords: hammer mill, grinding, cereal husks, oilseed husks, modernization, energy intensity of the process, productivity, feeding device, design and operating parameters, grinding quality.

ЗМІСТ

ВСТУП……..……..……5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ…….……9
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНОЇ СХЕМИ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ…….18
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ ……..……...……27
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……..……...36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...……...……..37

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу та переробної промисловості України особливої актуальності набуває підвищення ефективності технологічних процесів підготовки сировини, зокрема процесу подрібнення зернових, кормових і технічних матеріалів. Подрібнення є однією з найбільш енергоємних і відповідальних операцій, яка істотно впливає на якість готової продукції, продуктивність обладнання, рівень енергоспоживання та собівартість виробництва. У цьому контексті молоткові дробарки залишаються одними з найпоширеніших машин завдяки простоті конструкції, універсальності та можливості переробки широкого спектра матеріалів.

Разом із тим експлуатація традиційних молоткових дробарок виявляє низку суттєвих недоліків, серед яких підвищене енергоспоживання, нерівномірність гранулометричного складу подрібненого продукту, інтенсивний знос робочих органів, підвищений рівень вібрацій і шуму, а також обмежена адаптивність до змін фізико-механічних властивостей сировини. Зазначені проблеми особливо загострюються в умовах зростання цін на енергоресурси, необхідності підвищення ресурсо- та енергоефективності виробництва, а також впровадження сучасних вимог до якості кормів і продуктів переробки.

Модернізація молоткових дробарок шляхом удосконалення конструкції робочих органів, системи подавання матеріалу, решіт та приводу, а також оптимізації режимів роботи є перспективним напрямом наукових досліджень. Застосування сучасних інженерних рішень і матеріалів дозволяє підвищити інтенсивність процесу подрібнення, знизити питомі енерговитрати, покращити однорідність готового продукту та збільшити довговічність обладнання. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню загальної ефективності технологічних ліній і конкурентоспроможності підприємств.

Таким чином, дослідження, спрямовані на підвищення ефективності процесу подрібнення шляхом модернізації молоткової дробарки, є актуальними з наукової та практичної точок зору. Результати такої роботи можуть бути використані при проєктуванні та експлуатації подрібнювального обладнання в агропромисловому та переробному виробництві, а також сприятимуть реалізації завдань енергозбереження, підвищення якості продукції та сталого розвитку галузі.

Мета дослідження: підвищення продуктивності та зниження енергоємності процесу подрібнення лузги круп'яних і олійних культур за рахунок модернізації молоткової дробарки.

У зв'язку з поставленою метою визначено завдання досліджень:

– провести аналіз існуючих сільськогосподарських подрібнювальних машин і розробити конструктивно-технологічну схему молоткової дробарки для подрібнення лузги круп'яних і олійних культур;

– експериментально дослідити вплив конструктивно-режимних параметрів модернізованої молоткової дробарки на якісні та енергетичні показники готового продукту;

– провести виробничі випробування молоткової дробарки.

Об'єкт досліджень – технологічний процес подачі та подрібнення лузги круп'яних і олійних культур у молотковій дробарці з отриманням готового продукту необхідної крупності.

Предмет досліджень – закономірності впливу конструктивно- режимних і технологічних параметрів молоткової дробарки на продуктивність і енергоємність процесу подрібнення лузги круп'яних і олійних культур.

Методи наукового дослідження. У роботі застосовувалися теоретичні та експериментальні дослідження.

Теоретичні дослідження проводилися на основі загальноприйнятих законів класичної механіки, математики та математичної статистики.

Експериментальні дослідження проводилися відповідно до загальноприйнятих методик проведення експериментів, чинних стандартів і нормативних документів.

Розрахунок і обробка отриманих результатів виконувалися методами математичної статистики з використанням персонального комп'ютера з пакетом прикладних програм STATISTICA 12.7 і Microsoft Excel 2010.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. **Бочковський В. В.** Аналіз основних робочих органів молоткових дробарок. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 39-42.

2. Ільченко А.В., **Бочковський В.В.** Аналіз способів і технічних засобів, що застосовуються для подрібнення в сільському господарств. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 121-125.

3. Ільченко А.В., **Бочковський В.В.** Хоменко С.М. Обґрунтування перспективної конструктивно-технологічної схеми молоткової дробарки. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). НУБІП України. URL : http://animal-conf.inf.ua/conf.html.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено та обґрунтовано перспективну конструкцію молоткової дробарки, що дозволяє подрібнювати лушпиння круп'яних та олійних культур з мінімальними енерговитратами.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 33 найменувань.

Загальний обсяг роботи становить 40 сторінок комп’ютерного тексту, містить 18 рисунків.

РОЗДІЛ 1
СТАН ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз способів і технічних засобів, що застосовуються для подрібнення в сільському господарстві

Під подрібненням розуміється постійне зменшення вихідних розмірів частинок шляхом фізичного впливу на них зовнішніх сил, що перевершують за величиною сили молекулярного зчеплення цих частинок.

Залежно від виду деформації, що викликається в частці подрібнюваного матеріалу, і способу впливу на неї робочими органами подрібнювальних машин, відомі такі основні способи подрібнення матеріалів: ударом, стиранням, сколюванням, різанням і стисканням (рис. 1.1).

Спосіб подрібнення вибирається, керуючись в основному фізико-механічними властивостями матеріалу.

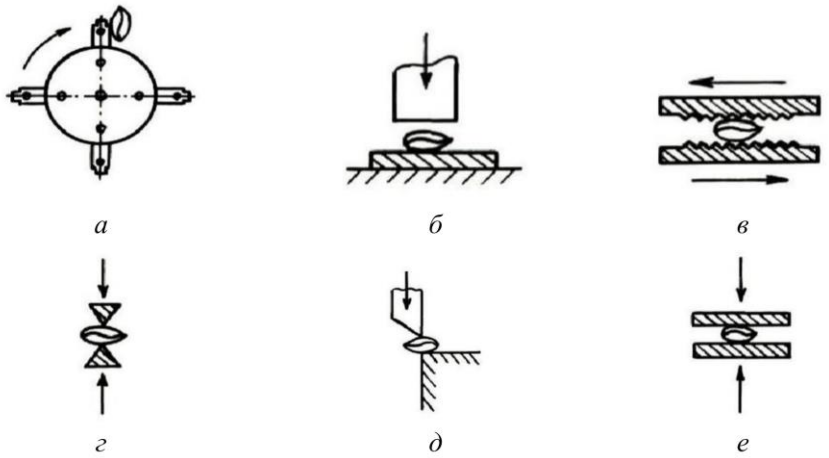

Рис. 1.1. Способи подрібнення матеріалів: а – вільним ударом; б – обмеженим ударом; в – стиранням; г – сколюванням; д – різанням; е – стисканням

Найбільшого поширення серед способів процесу подрібнення набув удар [6]. Розрізняють подрібнення за допомогою вільного (рис. 1.1, а) і обмеженого (рис. 1.1, б) ударів. Під час вільного удару подрібнення частинки матеріалу відбувається в результаті зіткнення її з робочими органами молоткової дробарки

або іншими тілами в польоті. Ефективність даного процесу подрібнення визначається швидкістю зіткнення частинок матеріалу незалежно від того, рухається руйноване тіло або робочий орган дробарки. При обмеженому ударі частинка матеріалу руйнується, потрапляючи між двома робочими органами дробарки. Ефективність даного процесу подрібнення залежить від кінетичної енергії тіла, що ударяє.

При стиранні (рис. 1.1, в) матеріал руйнується під дією сил стиснення і тангенціальних сил, в результаті чого виходить порошкоподібний продукт. При стиранні збільшується енергоємність процесу і знос робочих органів дробарки. В результаті чого продукти зносу робочих органів дробарки можуть потрапляти в подрібнювану масу, що не є бажаним з точки зору ведення процесу.

При сколюванні (рис.1.1, г) матеріал руйнується на частини в місцях найбільших концентрацій напружень, що викликаються клиноподібним розколюючим органом дробарки. Частинки більш однорідні за розмірами і формою. Цей спосіб дозволяє регулювати розміри одержуваних частинок.

При різанні (рис. 1.1, д) матеріал руйнується на заздалегідь задані за розміром і формою частини. Процес повністю керований.

Руйнування матеріалу при стисканні (рис. 1.1, е) відбувається, коли внутрішні напруження в ньому перевищують межу міцності при стисканні.

На підставі описаних способів подрібнення матеріалів можна класифікувати подрібнювальні машини, а також зробити висновок про застосування найбільш ефективної машини, що дозволяє подрібнювати лушпиння круп'яних і олійних культур до необхідного гранулометричного складу

Для процесу подрібнення на сільськогосподарських підприємствах застосовують різні подрібнювальні машини, що розрізняються за конструкцією і типом робочих органів: хрестові, штифтові, барабанні, тарілчасті, роторні і молоткові (рис. 1.2).

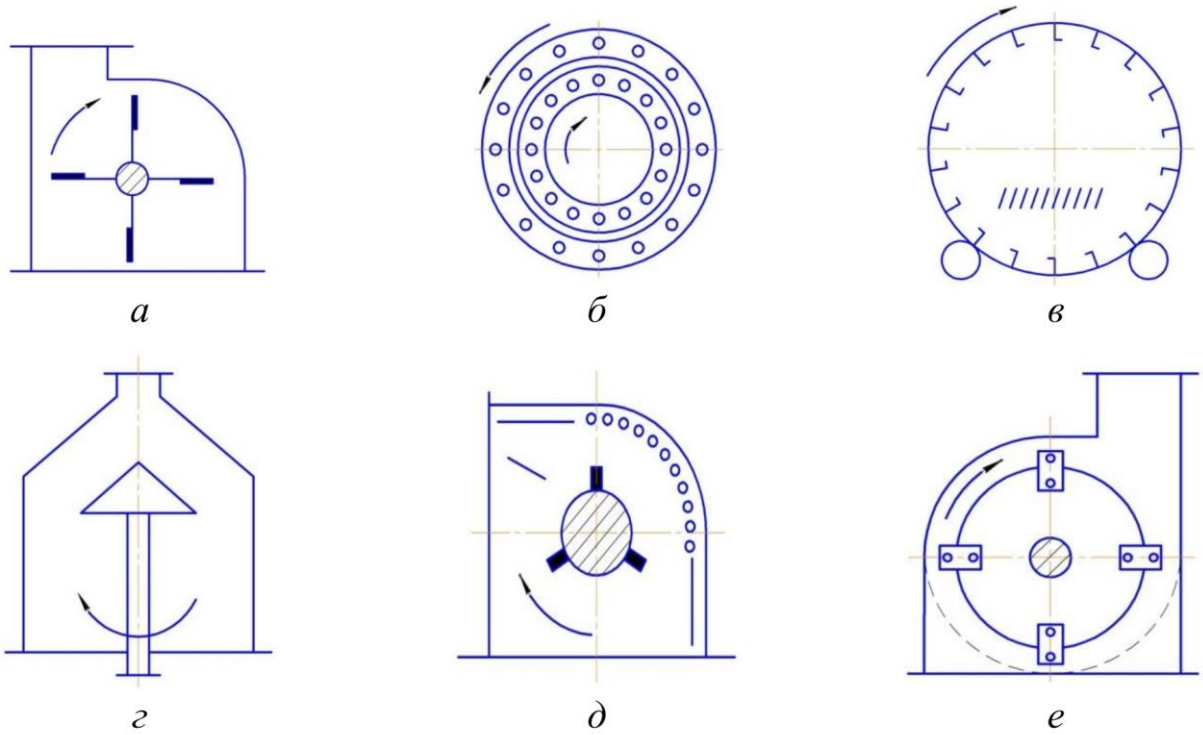

Рис. 1.2. Схеми подрібнювальних машин: а – хрестові; б – штифтові; в – барабанні; г – тарілчасті; д – роторні; е – молоткові

Хрестові дробарки (рис. 1.2, а) у своїй конструкції мають била, жорстко закріплені на роторі, окружна швидкість бил може досягати до 100 м/с. Дані дробарки знайшли широке застосування для подрібнення м'яких матеріалів.

У штифтових дробарках (рис 1.2, б) одним з основних робочих органів є два циліндри, що утворюють штифти, жорстко закріплені в основі. Процес подрібнення в даних дробарках відбувається за рахунок обертання двох циліндрів зі штифтами, що обертаються назустріч один одному. Швидкість руху штифтів може досягати до 150 м/с і вище.

Готовий продукт при подрібненні штифтовими дробарками має крупність до 5 мм. Дані дробарки знайшли широке застосування для подрібнення матеріалів зниженої міцності.

Барабанні дробарки (рис. 1.2, в) включають в себе порожнистий барабан, що має торцеві кришки з порожнистими цапфами, встановленими в підшипниках. Дробильна камера заповнена подрібнюючими тілами на 25 – 40% і подрібнюваним матеріалом. У дробильній камері за допомогою відцентрової

сили інерції подрібнюваний матеріал переміщається до стінок барабана дробарки, де стикається в зоні з подрібнювальними тілами. Дані дробарки знайшли своє застосування в основному для подрібнення маломіцних продуктів. Неможливість застосування барабанних дробарок для подрібнення лузги круп'яних і олійних культур пов'язана з тим, що дані дробарки є періодичної дії і мають великі габаритні розміри.

У тарілчастих дробарках (рис. 1.2, г) подрібнення здійснюється за рахунок удару маси матеріалу, що розганяється за допомогою обертання диска (тарілки) об деку. Дані найбільш застосовні при подрібненні таких матеріалів, як глина, вапняк та ін. Тарілчасті дробарки мало застосовуються в сільському господарстві через їх недостатню ефективність процесу подрібнення.

У роторній дробарці (рис. 1.2 д) руйнування відбувається за допомогою ударного впливу бил по матеріалу, а також зіткнень частинок подрібнюваної маси між собою. Для найбільш ефективного руйнування подрібнюваного матеріалу окружна швидкість ротора може досягати до 80 м/с. Дані дробарки в основному застосовують при виробництві будівельних матеріалів.

У молоткових дробарках (рис. 1.2, е) процес подрібнення відбувається за рахунок впливу на подрібнюваний матеріал шарнірно-підвішеними на роторі молотками. Молоткові дробарки відрізняються досить високим ступенем подрібнення. Перевагами молоткових дробарок є швидке вилучення подрібненого матеріалу з дробильної камери, можливість регулювати ступінь подрібнення, легка заміна зношених робочих органів, механізоване завантаження подрібнюваного матеріалу.

Крім представлених видів подрібнювальних машин, у сільському господарстві також використовуються жорнові млини та вальцьові верстати.

Жорнові млини, в основному працюють за принципом стирання. Дані млини знайшли застосування в основному для подрібнення зернових матеріалів в борошно або дерть. Робочими органами жорнових млинів є два плоских диска (жорна), які виготовлені з матеріалів гірських порід. Робоча поверхня жорен

являє собою борозенки, що відходять від центру диска до його периферії. Дана конструкція жорен сприяє найбільш швидкому виходу готового продукту, а також через борозенки здійснюється охолодження робочих поверхонь жорен. Також борозенки беруть участь частково в подрібненні матеріалу шляхом його сколювання об їх гострі кромки.

При подрібненні лузги на жорнових млинах знижується продуктивність і досить висока енергоємність процесу подрібнення.

Вальцьовими верстатами називається група подрібнювальних машин, в яких стикаються одна з одною рухомі і нерухомі поверхні робочих органів, утворюючи жорсткий контакт через подрібнюваний матеріал. Вальцьові верстати отримали найбільше поширення в борошномельному, а також комбікормовому виробництвах.

Вальцьові верстати мало придатні для подрібнення лузги, оскільки вони тільки стискають її, а не подрібнюють.

Машини для подрібнення лузги круп'яних і олійних культур повинні відповідати таким основним вимогам:

- можливість регулювати ступінь подрібнення для всіх видів лузги. Наприклад, для використання лузги в якості кормової добавки середній розмір частинок (модуль помелу) для великої рогатої худоби повинен бути до 3 мм, свиней і птахів – до 1 мм;

- забезпечення швидкого переналагодження з одного виду лузги на інший без застосування складного інструменту;

- висока зносостійкість і ремонтопридатність робочих органів;

- порівняно мала енергоємність при подрібненні лузги;

- можливість регулювання подачі подрібнюваного матеріалу до робочих органів дробарки;

- у конструктивному відношенні машина повинна бути простою в пристрої, мати високу надійність у роботі, бути зручною для обслуговування та ремонту.

Проведений аналіз представлених подрібнювальних машин показує, що молоткові дробарки найбільш повно відповідають вимогам, що пред'являються до подрібнення лузги круп'яних і олійних культур. Однак слід зазначити, що сам процес подрібнення молотковими дробарками лушпиння дотепер мало вивчений, тому постає питання про вдосконалення як самого процесу подрібнення, так і конструктивно-режимних, а також технологічних параметрів дробарки.

1.2 Аналіз основних робочих органів молоткових дробарок

До робочих органів дробарок, що змінюють якісний стан вихідного матеріалу, належать такі елементи: молотки, деки та решета [1].

Основним ударним елементом у молоткових дробарках є молоток. Для подрібнення в сільському господарстві застосовуються молотки різних конструкцій. Найбільш поширеними є пластинчасті молотки (рис. 1.3), які можна поділити на прямокутні (рис. 1.3, а, б), зі ступінчастими кінцями (рис. 1.3, в, г, д) та складені фігурні (рис. 1.3, е). При наявності одного отвору для пальця молотки після зношування переднього робочого кута можуть бути повернуті та використані повторно, а молотки з двома отворами можуть використовуватися до чотирьох разів. Наявність ступенів на кінцях підвищує ефективність процесу подрібнення плівкових і волокнистих матеріалів. Складені фігурні молотки, головним чином, знайшли своє застосування при подрібненні великокускових матеріалів (макуха, брикети, кускова сіль, кістки тощо) [1].

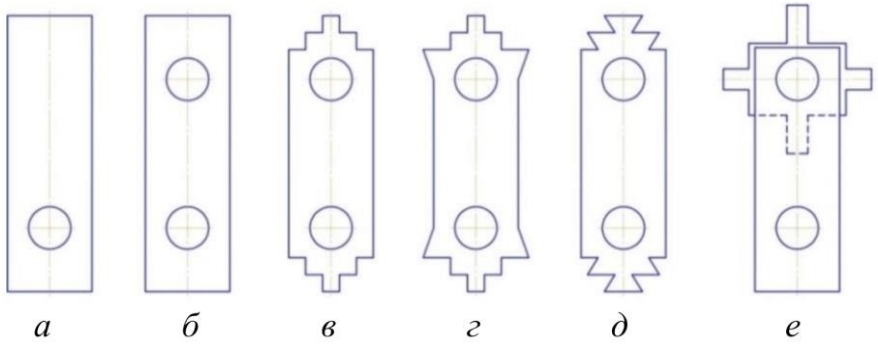

Рис. 1.3 Форми молотків: а, б – прямокутні; в, г, д – зі ступінчастими кінцями; е – складені фігурні [1].

За товщиною молотки можна поділити на тонкі, нормальні та товсті. Тонкі молотки (2–3 мм) застосовують під час подрібнення сипучих матеріалів; для подрібнення стеблових матеріалів використовують середні молотки (6–8 мм); товсті молотки (8–12 мм) застосовуються для подрібнення великокускових матеріалів [1].

Молотки виготовляють із вуглецевої або марганцевистої сталі з термічною обробкою робочих кінців до твердості за Брінеллем 390–475 НВ. Залежно від виду термічної обробки, а також матеріалу виготовлення, термін служби молотків становить від 72 до 280 годин [1].

Дека встановлюють у верхній частині корпусу й разом із решетом вони є нерухомими частинами дробарки, об які відбувається удар частинок подрібнюваного матеріалу при їх відкиданні після ударів молотків. Деки можуть мати рифлену робочу поверхню або бути решітчастими, укладеними поверх суцільної стінки корпусу дробарки [1].

Решета (рис. 1.4) слугують для виведення подрібненого продукту з робочої зони дробарки, а також для посилення ефекту подрібнення. Решета виготовляють із листової сталі завтовшки від 2 до 8 мм, і за конструкцією вони бувають гладкі (рис. 1.4, а, б) та лускаті (рис. 1.4, в, г). Щоб зменшити опір руху подрібнюваного продукту, отвори в решетах роблять конічної форми. Лускаті решета з отворами напівовальної або прямокутної форми мають гострошорстку поверхню, що значно підвищує ефект подрібнення та пропускну здатність порівняно з гладкими решетами [1].

Зазвичай до дробарки додається кілька змінних решіт із різним діаметром отворів. Заміною решіт можна досягти необхідного ступеня подрібнення

Найбільший інтерес серед робочих органів дробарки становлять молотки, що відрізняються формою робочої поверхні. Недоліком наведених конструкцій молотків є низька ефективність взаємодії робочої поверхні молотка з подрібнюваною масою [1].

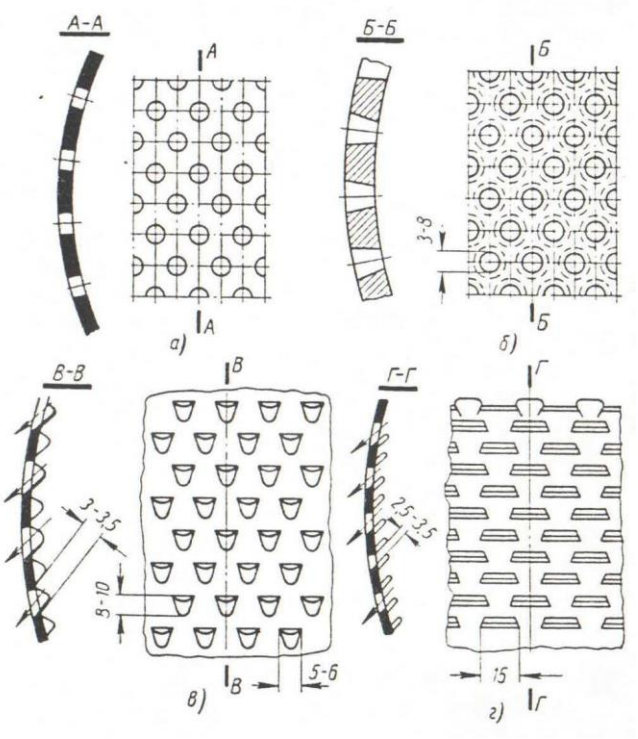

Рис. 1.4 Решета молоткових дробарок: а, б – гладкі; в, г – лускаті [1].

Молотки, закріплені на роторі дробарки, захоплюють подрібнювану масу та завдають їй ударного впливу, одночасно надаючи обертального руху, утворюючи при цьому повітряно-продуктовий шар, який рухається відносно обертання ротора. Частинки, що підлягають подрібненню, групуються у повітряно-продуктовому шарі таким чином, що великі частинки розташовуються ближче до робочої поверхні решета, перешкоджаючи виходу з дробильної камери дрібніших частинок, які знаходяться під ними [1].

За такого розташування частинок подрібнюваного матеріалу великим частинкам досить важко потрапити під удари молотків, тоді як дрібні частинки внаслідок частих ударних дій молотків надмірно подрібнюються, що призводить до підвищення енергоємності процесу подрібнення та зниження продуктивності.

Під час робочого процесу молотки відхиляються від радіального положення, унаслідок чого сила удару зменшується, а частинка подрібнюваного матеріалу прагне ковзати вздовж грані молотка, що також знижує ефективність подрібнення [1].

З метою визначення оптимальних конструктивно-режимних параметрів молотків зі ступінчастою робочою поверхнею для найбільш ефективного подрібнення лузги необхідно провести їх подальші дослідження [1].

Висновки по розділу

Аналіз існуючих подрібнювальних машин показав, що основними машинами для подрібнення різних сільськогосподарських матеріалів є молоткові дробарки. Існуючі в даний час конструкції молоткових дробарок мало придатні для подрібнення лузги, за рахунок чого знижується їх продуктивність і збільшується енергоємність процесу подрібнення.

У зв'язку з цим метою магістерської роботи є підвищення продуктивності та зниження енергоємності процесу подрібнення лузги круп'яних і олійних культур за рахунок модернізації молоткової дробарки.

РОЗДІЛ 2
ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНОЇ СХЕМИ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування перспективної конструктивно-технологічної схеми молоткової дробарки

Аналіз існуючих конструкцій молоткових дробарок дає підстави зробити висновок, що вони не можуть забезпечити якісне та ефективне подрібнення лузги круп'яних і олійних культур. Низька насипна щільність, високий коефіцієнт внутрішнього і зовнішнього тертя призводять до поганої сипучості лузги та нерівномірної її подачі до робочих органів дробарки, внаслідок чого зростає енергоємність процесу подрібнення і знижується продуктивність.

На основі проведених досліджень на кафедрі гроінженерії та технічного сервісу Поліського національного університету м. Житомир була розроблена перспективна конструктивно-технологічна схема молоткової дробарки із живильним пристроєм, який забезпечує рівномірну подачу подрібнюваного матеріалу до молоткового ротора дробарк [3].

Розроблена конструкція молоткової дробарки дає змогу рівномірно подавати подрібнюваний матеріал до її робочих органів, завдяки чому зменшується динамічне навантаження на вал ротора дробарки. Також знижується енергоємність процесу подрібнення та підвищується продуктивність [3].

Молоткова дробарка (рис. 2.1) складається з циліндричного корпуса 1 із завантажувальним бункером 2 та вивантажувальним вікном 3, а також дробильної камери 4. Усередині корпуса співвісно з ним установлено ротор 5 із шарнірно закріпленими за допомогою пальців 6 молотками 7 [3].

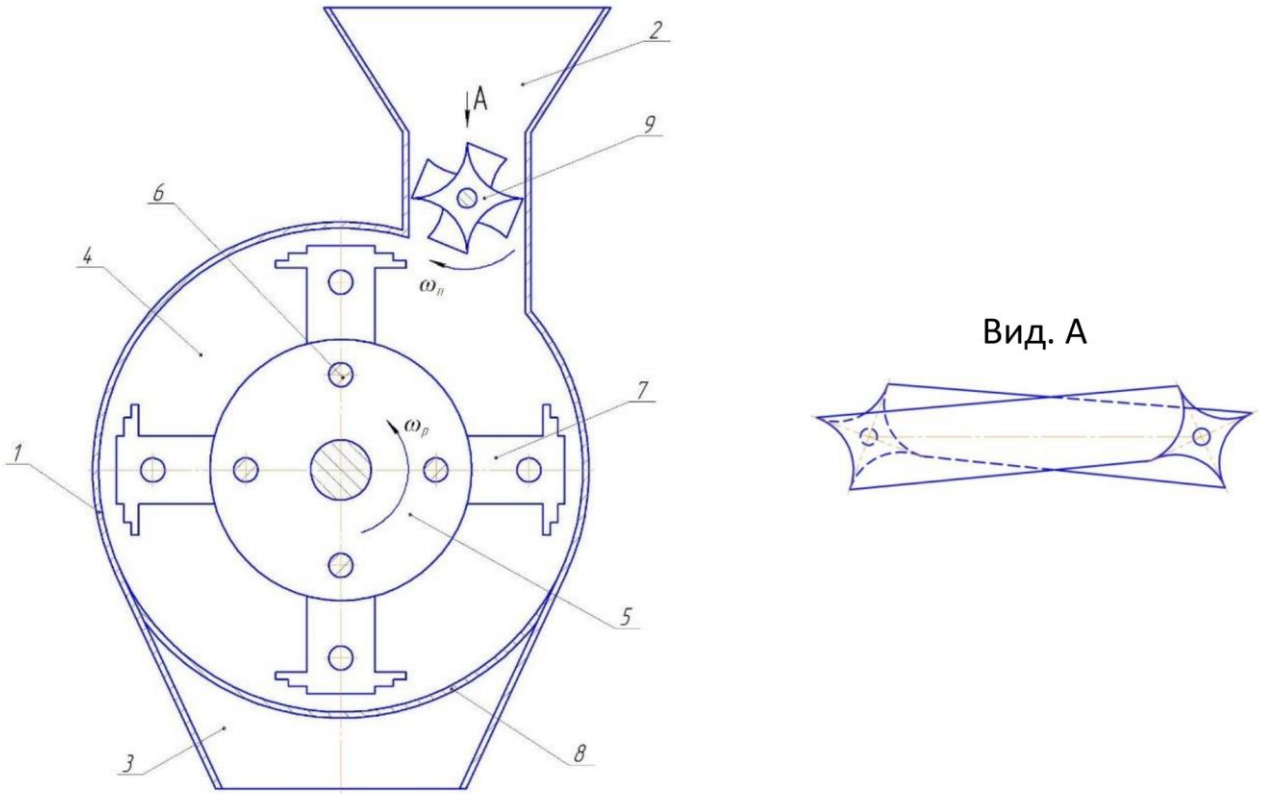

Рис. 2.1. Молоткова дробарка: 1 – циліндричний корпус; 2 – завантажувальний бункер; 3 – вивантажувальне вікно; 4 – дробильна камера; 5 – ротор; 6 – палець; 7 – молоток; 8 – решето; 9 – живильний пристрій [3].

Також у циліндричному корпусі 1 навпроти вивантажувального вікна 3 встановлено решето 8. У горловині завантажувального бункера 2 змонтовано живильний пристрій 9, який являє собою циліндр із чотирма жолобами, протилежні сторони якого повернуті одна відносно одної [3].

Запропонований живильний пристрій 9 відповідає таким основним вимогам [3]:

– забезпечує рівномірну подачу подрібнюваного матеріалу до робочих органів молоткової дробарки;

– здійснює попереднє підпресовування матеріалу перед його надходженням у дробильну камеру;

– гарантує необхідну пропускну здатність і герметичність.

Робота живильного пристрою здійснюється від індивідуального приводу з регулятором частоти обертання.

Молоткова дробарка працює таким чином.

Із бункера-накопичувача лузга надходить у завантажувальний бункер 2, звідки за допомогою живильного пристрою 9 потрапляє в циліндричний корпус 1 із дробильною камерою 4, де залучається у обертальний рух і під дією відцентрових сил накопичується в робочій зоні молотків 7, шарнірно закріплених за допомогою пальців 6 на роторі 5. Потрапляючи на робочу поверхню молотків 7, лузга подрібнюється внаслідок удару. Частково подрібнена лузга під дією швидкості, наданої молотками 7, з великою силою вдаряється об корпус дробарки, а також об решето 8. Через отвори решета 8 подрібнена лузга видаляється з дробильної камери у вивантажувальне вікно 3 [3].

Частинки, розміри яких менші за діаметр отворів решета 8, проходять крізь них і через вивантажувальне вікно 3 виходять із дробарки. Більш крупні частинки, які не пройшли крізь отвори решета 8, піддаються додатковому подрібненню [3].

Молоток (рис. 2.2) являє собою пластину 1, уздовж якої розташовані отвори 2 для її кріплення, а також виступи 3, радіуси від вершин яких до точки підвісу є рівними [3].

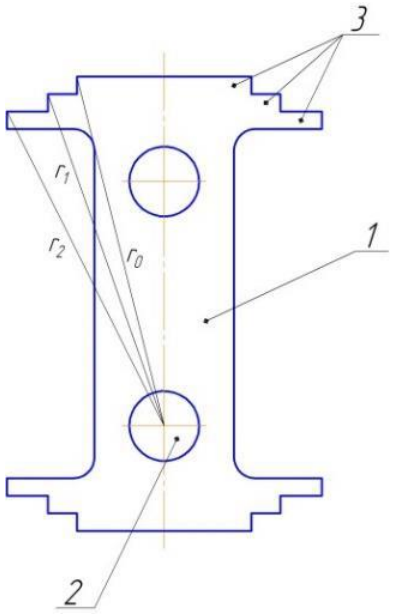

Рис. 2.2. Молоток дробарки [3].

Досліджувана молоткова дробарка являє собою сукупність кількох окремих, але взаємопов’язаних єдиним технологічним процесом об’єктів, кожен з яких виконує певні технологічні операції, на які істотний вплив мають вхідні та вихідні параметри [3].

Таким чином, досліджувану молоткову дробарку можна представити як сукупність таких елементів: завантажувального бункера з живильним пристроєм, подрібнювального апарата з експериментальними робочими органами, решета та вивантажувальної горловини [3].

Вхідними параметрами, що впливають на робочий процес завантажувального бункера з живильним пристроєм, є фізико-механічні властивості подрібнюваного матеріалу (вологість W, насипна щільність ρ), конструктивні та режимні параметри живильного пристрою (коефіцієнт використання об’єму жолоба живильного пристрою K_v, частота обертання вала живильного пристрою n_p, кількість жолобів $z_ж$) [3].

Вихідними параметрами, що визначають роботу живильного пристрою, який подає матеріал до подрібнювального апарата, є: величина подачі $Q_р$, витрати потужності на подачу подрібнюваного матеріалу $P_{под}$, енергоємність процесу подачі $E_{под}$ та нерівномірність подачі Δq [3].

Вхідними параметрами, що впливають на роботу подрібнювального апарата, є конструктивні та режимні параметри робочих органів (кількість молотків z_m, форма робочої поверхні молотків Φ_m, колова швидкість молотків υ_m [3].

Вихідними параметрами молоткової дробарки, на основі яких здійснюється оцінювання її робочого процесу, є: продуктивність Q, витрати потужності на процес подрібнення P_i, енергоємність процесу подрібнення E та коефіцієнт якості готового продукту K_k [3].

Таким чином, з метою спрощення теоретичних досліджень процесу подрібнення лузги круп’яних і олійних культур молотковою дробаркою нами було прийнято рішення умовно розділити пристрій на окремі об’єкти, а їхню взаємодію в системі надалі описати за допомогою додаткових залежностей [3].

2.2 Опис і принцип роботи лабораторної установки

Для підтвердження та перевірки теоретичних залежностей, а також подальшого вивчення процесу подрібнення лузги круп'яних і олійних культур у молотковій дробарці на кафедрі агроінженерії татехнічного сервісу Поліського національного університету була розроблена та виготовлена лабораторна установка [9]. Загальний вигляд лабораторної установки представлений на рис. 2.3.

При розробці та виготовленні лабораторної установки враховувалися такі вимоги:

- можливість регулювати конструктивно-режимні та технологічні параметри роботи в широких межах варіювання;

- можливість швидкого складання та розбирання основних вузлів молоткової дробарки;

- можливість зняття вхідних і вихідних параметрів роботи за допомогою простих і надійних пристроїв.

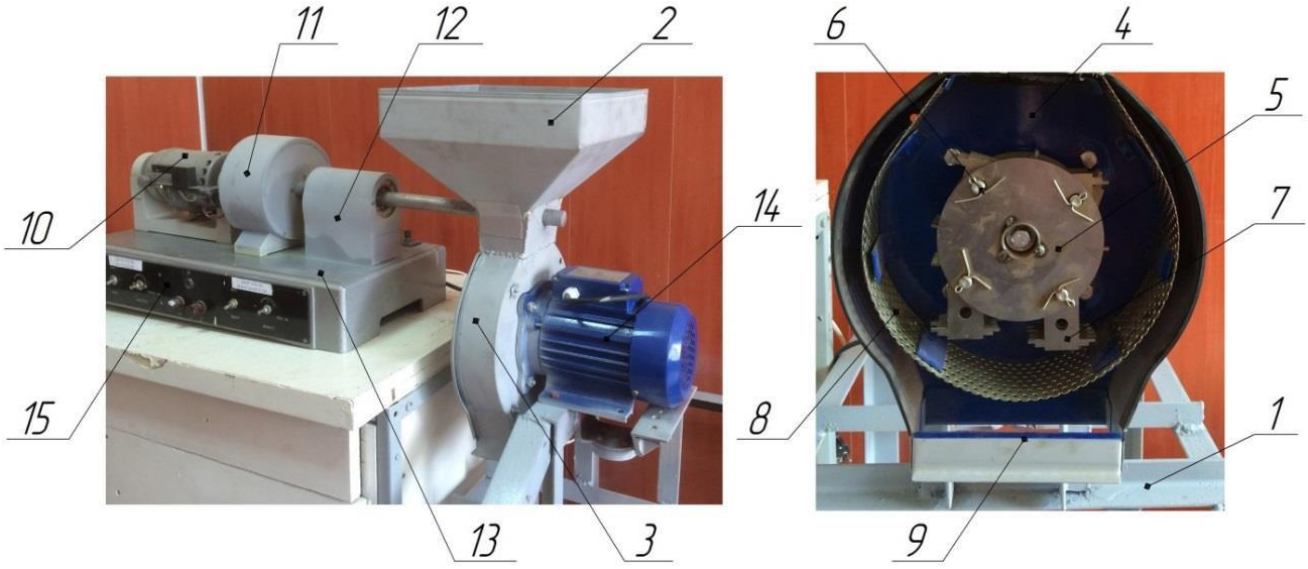

Рис. 2.3. Загальний вигляд лабораторної установки.

Молоткова дробарка розміщена на рамі 1 і складається із завантажувального бункера 2, корпусу 3 з дробильною камерою 4, всередині якої встановлені ротор 5 з шарнірно-закріпленими на його осях 6 молотками 7, решето 8 і

вивантажувального вікна 9. У горловині завантажувального бункера встановлено живильний пристрій (рис. 3.2), що має індивідуальний привід від електродвигуна 10 через редуктор 11 і підшипникову опору 12, встановлених на станині 13. Подача матеріалу здійснюється проти напрямку обертання ротора 5, а привід вала молоткової дробарки здійснюється від електродвигуна 14, закріпленого на торцевій стінці корпусу дробильної камери.

Лабораторна установка виконана з можливістю зміни частоти обертання вала живильного пристрою і вала ротора молоткової дробарки за допомогою регуляторів, встановлених на панелі управління 15.

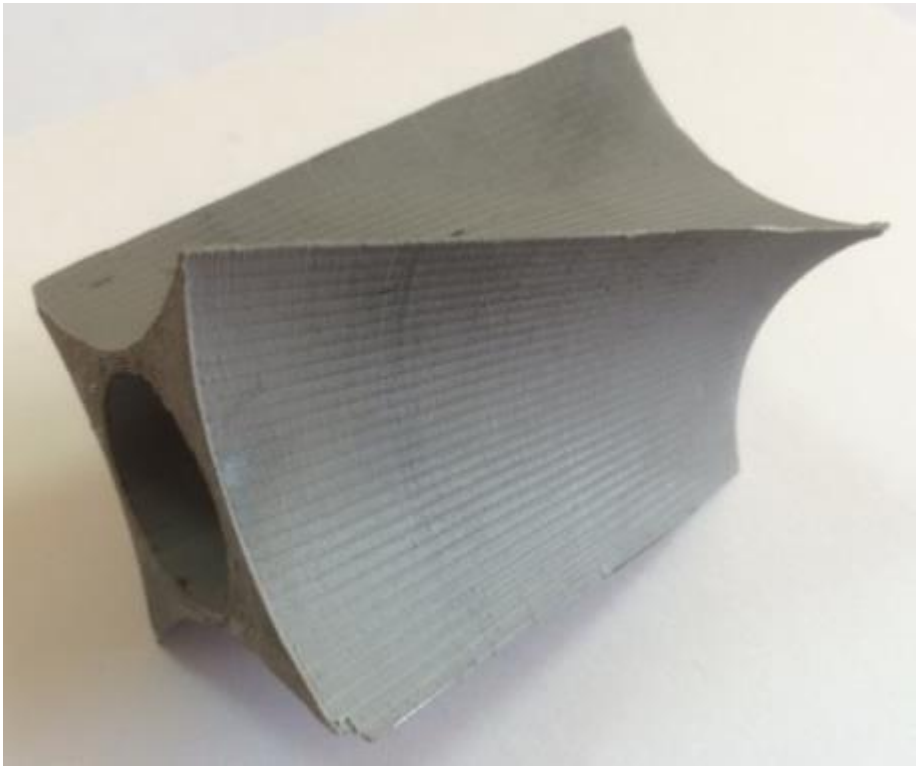

Рис. 2.4. Живильний пристрій

Робочий процес подрібнення лузги круп'яних і олійних культур протікає наступним чином. У завантажувальний бункер 2 засипається подрібнюваний матеріал (лузга соняшнику, гречки, проса), звідки за допомогою живильного пристрою проти напрямку обертання вала ротора 5 подається в дробильну камеру 4. У дробильній камері 4 подрібнюваний матеріал піддається ударному впливу молотків 7 і отримує часткове руйнування. Крім руйнування від удару молотками 7, частинки подрібнюються при ударах об поверхню решета 8, а

також в результаті взаємодії одна з одною. Подрібнений продукт виводиться з дробильної камери через вивантажний отвір 9.

Загальний вигляд ротора в зборі представлений на рис. 2.5.

Рис. 2.5. Загальний вигляд ротора в зборі.

В ході проведення експериментів був комплект змінних решіток з отворами різного діаметру, які встановлювалися для своєчасного виведення подрібненого матеріалу із заданим гранулометричним складом з дробильної камери молоткової дробарки.

2.2 Подрібнюваний матеріал і прилади, що використовуються при проведенні експериментальних досліджень

Для проведення експериментальних досліджень були відібрані наступні види подрібнюваного матеріалу: лушпиння соняшнику, гречки та проса, як найбільш поширені відходи сільськогосподарського виробництва. Подрібнюваний матеріал відбирався у виробничих цехах після лущення відповідного виду культури.

Основні фізико-механічні властивості лушпиння є типовими, тому їхні дані були взяті з літературних джерел [4, 5, 16, 22].

Проби готового продукту відбирали при усталеному режимі роботи молоткової дробарки. Для визначення моменту усталеного режиму роботи застосовували цифровий мультиметр DT-9202A. Час досвіду вимірювали за допомогою секундоміра.

Частоту обертання вала ротора живильного пристрою і ротора дробарки визначали із застосуванням тахометра годинникового типу ТЧ-10Р з точністю до 0,1 об/хв.

Для зважування відібраних проб готового продукту застосовували електронні ваги марки ВЛКТ-500М з точністю до 0,01 кг.

Витрати енергії на процес подрібнення лузги визначалися із застосуванням електричного лічильника СО-5У з класом точності 2,5, призначеного для обліку електричної енергії з номінальною частотою струму 50 Гц з похибкою 2,5 %, що є цілком прийнятним у таких експериментах.

2.3. Програма і методика виробничих випробувань

Після закінчення лабораторних експериментальних досліджень і обробки отриманих даних розроблялася програма і методика виробничих випробувань, які проводилися з метою встановити:

- ефективність пропонованої молоткової дробарки, що полягає в підвищенні продуктивності та зниженні енергоємності процесу подрібнення;

- достовірність теоретичних розробок і результатів експериментів з визначення конструктивно-режимних і технологічних параметрів роботи молоткової дробарки в виробничих умовах;

Для цього на сільськогосподарських підприємствах були проведено виробничі випробування молоткової дробарки.

Виробничий зразок молоткової дробарки представлений на рис. 2.6.

Рис. 2.6. Молоткова дробарка.

Виробничий зразок молоткової дробарки був доопрацьований на основі теоретичних обґрунтувань параметрів, представлених у другому розділі, та результатів, отриманих у ході лабораторних досліджень. Конструктивні та режимні параметри живильного пристрою та молоткового ротора встановлювалися для подрібнення лушпиння соняшнику, гречки та проса.

Програма виробничих випробувань передбачала визначення продуктивності молоткової дробарки та енергоємності процесу подрібнення.

РОЗДІЛ 3
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ

3.1. Результати лабораторних досліджень

Для забезпечення нормального технологічного процесу подрібнення, потік матеріалу, що виходить з живильного пристрою, повинен мати необхідну рівномірність. Рівномірність потоку подрібнюваного матеріалу забезпечує зниження енергоємності процесу подрібнення, збільшення продуктивності, а також знижуються динамічні навантаження на ротор з молотками [1].

З огляду на фізико-механічні властивості подрібнюваного матеріалу, була проведена серія дослідів з виявлення залежності рівномірності Δq подачі подрібнюваного матеріалу до робочих органів молоткової дробарки від частоти обертання $n_п$ валу живильного пристрою (рис. 3.1).

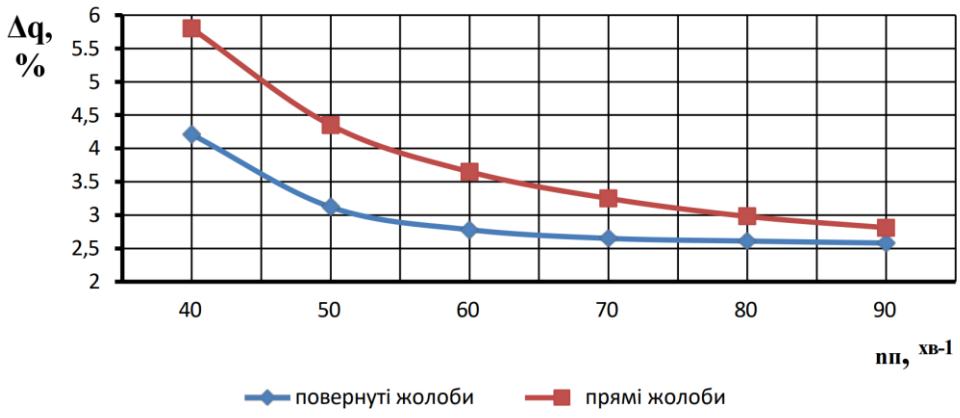

Рис. 3.1. Залежність рівномірності подачі подрібнюваного матеріалу Δq від частоти обертання вала живильного пристрою $n_п$ (лушпиння гречки).

Аналіз залежності нерівномірності подачі подрібнюваного матеріалу Δq від частоти обертання вала живильного пристрою показує, що пропонована конструкція живильного пристрою забезпечує рівномірність потоку подрібнюваного матеріалу до робочих органів молоткової дробарки при менших частотах обертання в порівнянні з живителем з жолобами прямої форми. Для

подальших досліджень застосовуємо живильник з жолобами, протилежні сторони яких повернуті відносно один одного.

Якісне подрібнення лузги круп'яних і олійних культур до необхідного гранулометричного складу нерозривно пов'язане з процесом її подачі до робочих органів дробарки. Для проведення експериментальних досліджень була виготовлена лабораторна установка з поздовжнім і поперечним розташуванням живильного пристрою відносно вала молоткового ротора дробарки [9].

Вплив способу розташування живильного пристрою відносно вала ротора представлено на рисунках 3.2, 3.3.

Як видно з представлених залежностей, поздовжнє розташування живильного пристрою забезпечує збільшення величини подачі подрібнюваного матеріалу на 8 ... 12 %, а також зниження енергоємності процесу подачі на 7 ... 10 %, в порівнянні з поперечним, при частоті обертання вала живильного пристрою 70 $хв^{-1}$.

Також із залежностей 3.2 і 3.3 видно, що зі збільшенням частоти обертання вала живильного пристрою понад 70 $хв^{-1}$ відбувається зниження величини подачі подрібнюваного матеріалу за рахунок зменшення заповнення жолобів живильного пристрою, що тягне за собою збільшення енергоємності процесу подачі.

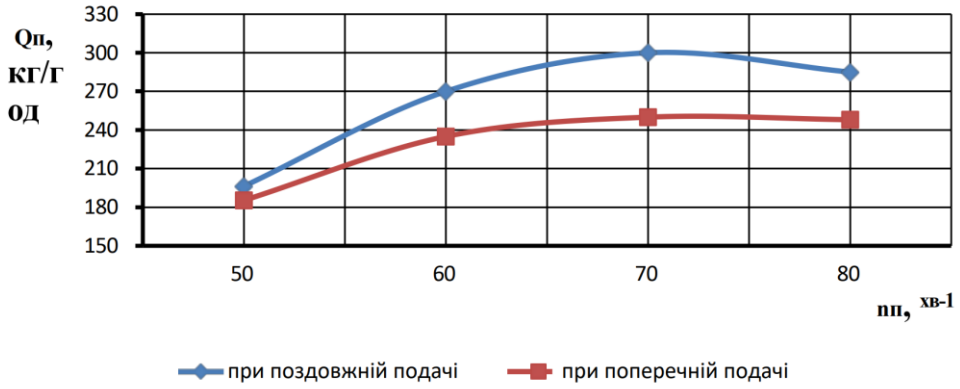

Рис. 3.2. Залежність величини подачі $Q_п$ подрібнюваного матеріалу від частоти обертання вала живильного пристрою $n_п$ при $D_п$ = 0,07 м (лушпиння гречки)

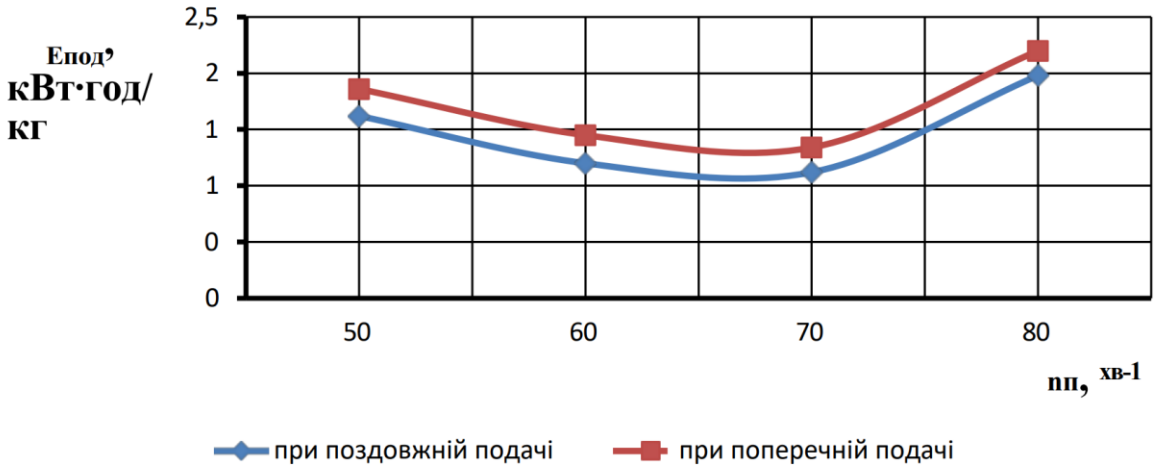

Рис. 3.3. Залежність енергоємності процесу подачі $E_{под}$ від частоти обертання вала живильного пристрою n_n при D_n = 0,07 м (лушпиння гречки).

Експериментальні дослідження проводилися на лабораторній установці, представленій у розділі 3 на рис. 2.1.

Величина подачі живильного пристрою та енергоємність процесу, як було виявлено під час аналітичних досліджень, залежить від його геометричних розмірів, частоти обертання і фізико-механічних властивостей подрібнюваного матеріалу.

З метою визначення впливу величини подачі подрібнюваного матеріалу до робочих органів молоткової дробарки проводилися дослідження з різними конструктивними та режимними параметрами роботи живильного пристрою [10, 12]. Діаметр D_n барабана і частота обертання n_n вала живильного пристрою мають істотне значення для визначення величини подачі подрібнюваного матеріалу до робочих органів молоткової дробарки.

Графічно залежність величини подачі подрібнюваного матеріалу від частоти обертання n_n і діаметра D_n барабана живлення пристрою представлена на рис. 3.4.

Як видно з рис 3.4, діаметр D_n барабана живильного пристрою веде до збільшення величини подачі. Це пояснюється зростанням відцентрових сил, що збільшують швидкість сходу матеріалу з лопаті жолоба живлючого пристрою. Те саме відбувається і з частотою обертання n_n ва вала живильного пристрою в

процесі подачі. При цьому, зі збільшенням частоти обертання вала живильного пристрою, збільшується і подача.

У досліджуваному діапазоні конструктивних і режимних параметрів живильного пристрою були побудовані рівняння регресії для питомої енергоємності процесу подачі подрібнюваного матеріалу до робочих органів молоткової дробарки (3.1)

$$E_{под} = 3{,}583 - 0{,}057 \cdot n_{п} - 22{,}547 \cdot D_{п} + 0{,}0004 \cdot n_{п}^{2} + 0{,}155 \cdot n_{п} D_{п} + 121{,}431 \cdot D_{п}^{2} \quad (3.1.)$$

Рівняння (31) перевірялося за критерієм Фішера.

Аналіз залежності (рівняння 3.1.) показав, що мінімальна енергоємність процесу подачі подрібнюваного матеріалу до робочих органів молоткової дробарки, що дорівнює 1,12 ... 1,21 кВт·год/кг, досягається при частоті обертання nп 60 ... 70 хв-1 і діаметрі Dп барабана живильного пристрою, що дорівнює 0,07 м, при цьому величина подачі подрібнюваного матеріалу становить 250 ... 300 кг/год.

На продуктивність молоткової дробарки, крім впливу фізико-механічних властивостей і величини подачі подрібнюваного матеріалу, також значний вплив мають і робочі органи.

На рис. 3.4 представлені залежності продуктивності молоткової дробарки від окружної швидкості молотків, які показують, що молотки зі ступінчастою формою робочої поверхні забезпечують продуктивність молоткової дробарки на 20 % більше в порівнянні з прямокутними при окружній швидкості молотків, що дорівнює 40 м/с.

На рис. 3.5 представлена залежність енергоємності процесу подрібнення лузги від окружної швидкості молотків. З даного рисунка видно, що в межах зміни окружної швидкості від 25 ... 35 м/с енергоємність досить висока, це пояснюється тим, що швидкість молотків не достатня для руйнування подрібнюваного матеріалу.

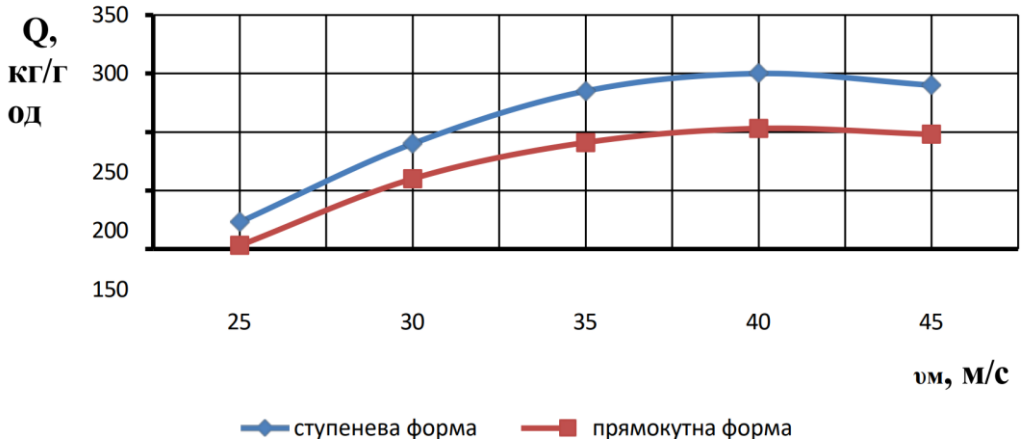

Рис. 3.5. Залежність продуктивності *Q* молоткової дробарки від окружної швидкості молотків $\upsilon_м$, лушпиння гречки.

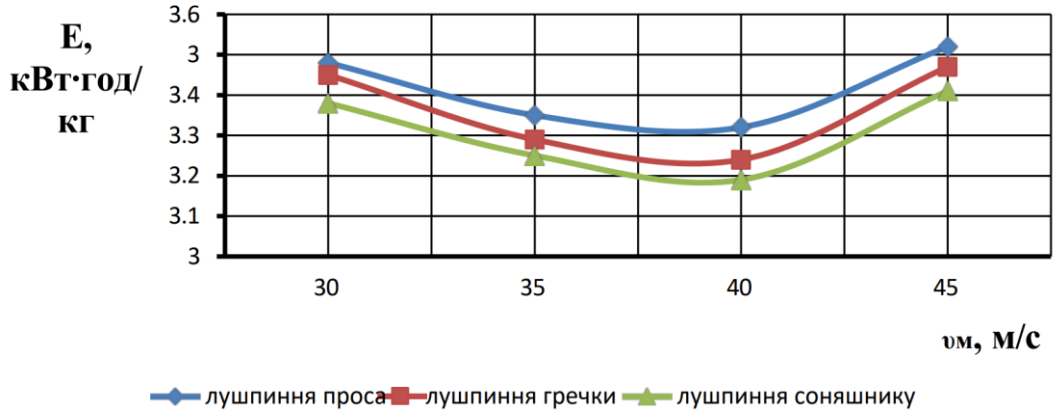

Рис. 3.6. Залежність енергоємності процесу подрібнення E від окружної швидкості молотків $\upsilon_м$.

При значенні окружної швидкості молотків 40 м/с енергоємність процесу для кожного виду подрібнюваного матеріалу приймає мінімальне значення, тобто окружна швидкість є оптимальною. Це пов'язано з тим, що в дробильній камері відбувається руйнування матеріалу під дією ударів молотків і видалення подрібнених частинок через решето. Зі збільшенням окружної швидкості молотків понад 40 м/с енергоємність починає зростати за рахунок збільшення витрат енергії на холостий хід.

Проведення експериментальних досліджень дозволило встановити вплив окружної швидкості молотків на модуль помелу готового продукту (малюнок 3.6).

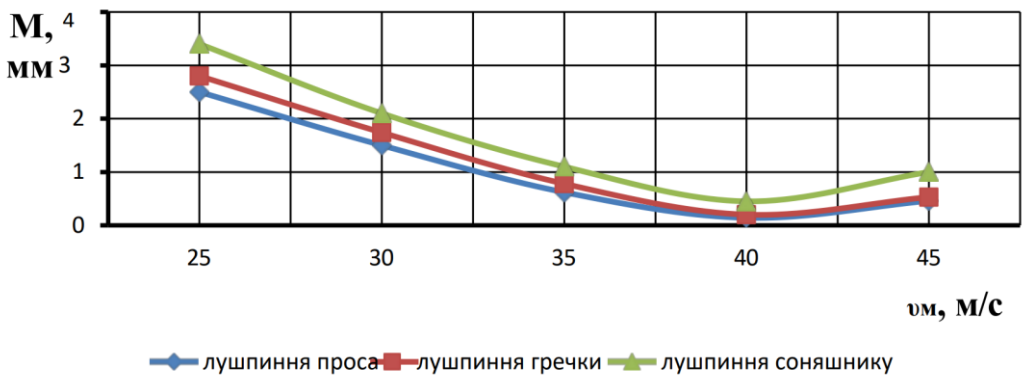

Рис. 3.6. Залежність модуля помелу M готового продукту від окружної швидкості молотків $\upsilon_м$.

Аналіз залежності модуля помелу готового продукту від окружної швидкості молотків показує, що при досягненні оптимальної окружної швидкості молотків 40 м/с модуль помелу зменшується, подальше збільшення окружної швидкості призводить до збільшення модуля помелу через сильний вентиляційний вплив на подрібнювану масу. Експериментальна молоткова дробарка забезпечує дрібний помел 0,15 ... 0,4 мм.

На рис. 3.7 і 3.8 представлені теоретична та експериментальна залежності впливу величини подачі подрібнюваного матеріалу та окружної швидкості молотків на продуктивність молоткової дробарки.

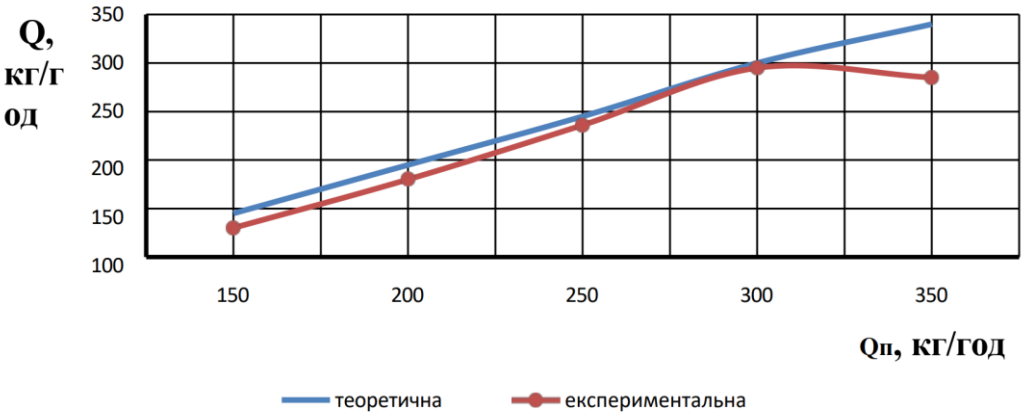

Рис. 3.7. Залежність продуктивності Q молоткової дробарки від величини подачі $Q_п$ подрібнюваного матеріалу

З рис. 3.8 видно, що експериментальна крива трохи нижча за теоретичну, за рахунок непостійності насипної щільності подрібнюваної маси та коефіцієнта заповнення жолоба живильного пристрою.

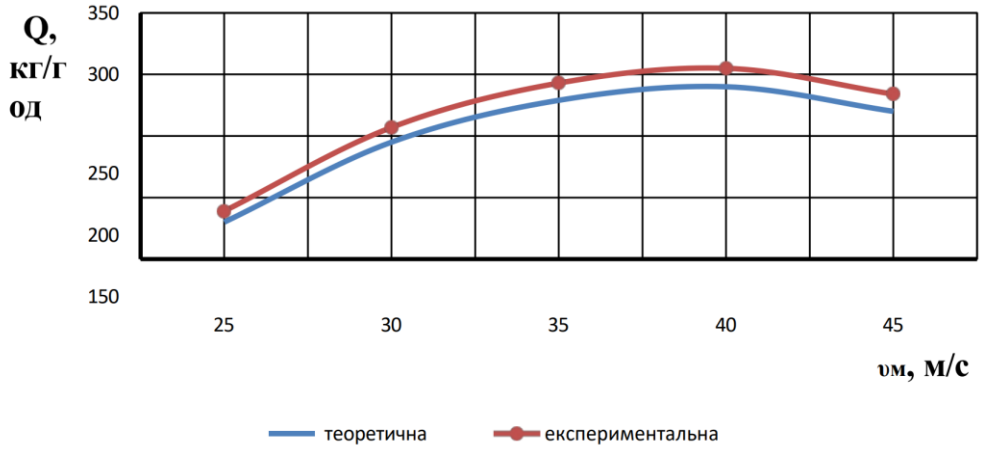

Рис. 3.8. Залежність продуктивності Q молоткової дробарки від окружної швидкості молотків $\upsilon_{м.}$

5.1 Результати виробничих випробувань молоткової дробарки

У поставлених завданнях досліджень були передбачені виробничі випробування дослідного зразка молоткової дробарки.

Для виробничого порівняння була обрана молоткова дробарка ІЗКБ-1. Вона більш доступна за ціною і є однією з основних моделей, що використовується в особистих підсобних і малих фермерських господарствах [5, 12].

На молоткову дробарку ІЗКБ-1 були встановлені нові молотки і живильний пристрій. Протягом 35 днів через кожний робочий тиждень проводився відбір навісок подрібненої маси вагою 5 кг.

За період проведення експерименту по молотковій дробарці ІЗКБ-1 кількість подрібненої маси, що відповідає необхідним значенням крупності, не перевищувала 68 %. При цьому, недоподрібнену масу можна піддати додатковому подрібненню, але це супроводжується додатковим обсягом робіт і витратами. Частинки розміром менше 0,35 мм склали в середньому 27 % за весь експеримент.

Продуктивність молоткової дробарки ІЗКБ-1 відповідає заявленій у технічному паспорті і склала 200...245 кг/год, а пропонованій – 250 ... 300 кг/год.

На одну тонну подрібненої маси фракція необхідної крупності в середньому склала 954 кг в пропонованій і 720 кг в ІЗКБ-1. Аналіз середніх показників дробарок показав, що частинки розміром менше 0,35 мм, в пропонованій дробарці становлять 2,5 %, що в 4,5 рази менше, ніж в ІЗКБ-1. Фракція з частинками необхідного розміру в середньому становить 97,5 % проти 72 % на користь пропонованої дробарки, а недоподрібнені частинки були присутні тільки в ІЗКБ-1.

Висновки по розділу

Виходячи з результатів проведених експериментальних досліджень були сформульовані основні висновки:

1. За результатами експериментальних досліджень було обрано поздовжнє розташування живильного пристрою відносно валу ротора дробарки, при якому величина подачі збільшується на 5...7 %, а енергоємність процесу подачі знижується на 7...10 %.

2. Мінімальна енергоємність процесу подачі подрібнюваного матеріалу до робочих органів молоткової дробарки, що дорівнює 1,12...1,21 кВт·год/кг, досягається при частоті обертання n_n 60…70 хв$^{-1}$ і діаметрі D_n барабана живильного пристрою, що дорівнює 0,07 м, при цьому величина подачі подрібнюваного матеріалу становить 250…300 кг/год.

3. При значенні окружної швидкості молотків 40 м/с енергоємність процесу для кожного виду подрібнюваного матеріалу приймає мінімальне значення, тобто окружна швидкість в даних межах є оптимальною.

4. За результатами експериментальних досліджень обрано оптимальні значення досліджуваних параметрів роботи молоткової дробарки, при яких забезпечується дрібний помел. Так, для оптимальних параметрів роботи

експериментальної молоткової дробарки забезпечується дрібний помел 0,15...0,4 мм при величині подачі 300 кг/год і окружній швидкості молотків 40 м/с.

5. При значенні величини подачі, що дорівнює 300 кг/год, досягається значення продуктивності молоткової дробарки 300 кг/год і відповідне їй значення енергоємності 1,23...1,35 кВт·год/кг.

6. Аналіз середніх показників порівнюваних дробарок показав, що частинки розміром менше 0,35 мм, в пропонованій молотковій дробарці складають 2,5 %, що в 4,5 рази менше, ніж в ІЗКБ-1. Фракція з частинками необхідного розміру в середньому становить 97,5 % проти 72 % на користь пропонованої дробарки, а недоподрібнені частинки були присутні тільки в ІЗКБ-1.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У роботі вирішено актуальну науково-виробничу задачу підвищення продуктивності та зниження енергоємності процесу подрібнення лузги круп'яних і олійних культур шляхом застосування вдосконаленої конструкції молоткової дробарки.

2. Проведений аналіз існуючих конструкцій сільськогосподарських подрібнювальних машин показав, що вони мало застосовні і енергоємні при подрібненні лузги круп'яних і олійних культур. У зв'язку з чим, була розроблена конструктивно-технологічна схема молоткової дробарки, що відрізняється тим, що в її конструкції використовуються молотки, робоча поверхня яких виконана у вигляді зовнішніх триступеневих прямокутних виступів, радіуси від вершин яких до осі підвісу рівні, і живильним пристроєм, виконаним у вигляді барабана з чотирма жолобами, протилежні сторони якого повернуті відносно один одного.

3. Застосування живильного пристрою, виконаного у вигляді барабана з чотирма жолобами, протилежні сторони яких повернуті відносно один одного, дозволяє збільшити величину подачі подрібнюваного матеріалу на 8...12 %, а також знизити енергоємність процесу подачі на 7...10 %, у порівнянні з поперечним, при частоті обертання вала живильного пристрою 70 $хв^{-1}$.

Отримані рівняння регресії дозволяють визначити продуктивність молоткового подрібнювача і енергоємність процесу подрібнення лузги круп'яних і олійних культур при оптимальних конструктивно-режимних параметрах молоткового подрібнювача.

Експериментальний молотковий подрібнювач забезпечує дрібний помел 0,15…0,4 мм при величині подачі 300 кг/год і окружній швидкості молотків 40 м/с. При значенні діаметра барабана живильного пристрою 0,07 м, і частоті обертання, що дорівнює 70 $хв^{-1}$, а також окружній швидкості молотків, що дорівнює 40 м/с, забезпечується продуктивність молоткового подрібнювача 300

кг/год і відповідна їй енергоємність процесу 0,8…1,0 кВт·год/кг при подрібненні лузги круп'яних і олійних культур молотковим подрібнювачем.

4. Виробнича перевірка дослідного зразка молоткової дробарки підтвердила, що витрата електроенергії знижується на 30%, підвищується продуктивність на 20% в порівнянні з серійною молотковою дробаркою і отримано до 98% вирівняного за розміром частинок готового продукту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бочковський В. В. Аналіз основних робочих органів молоткових дробарок. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 39-42.

2. Ільченко А.В., Бочковський В.В. Аналіз способів і технічних засобів, що застосовуються для подрібнення в сільському господарств. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 121-125.

3. Ільченко А.В., Бочковський В.В. Хоменко С.М. Обґрунтування перспективної конструктивно-технологічної схеми молоткової дробарки. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). НУБІП України. URL : http://animal-conf.inf.ua/conf.html.

4. Perry R. H., Green D. W., Southard M. Z. Perry’s Chemical Engineers’ Handbook. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2019. 2272 с.

5. McCabe W. L., Smith J. C., Harriott P. Unit Operations of Chemical Engineering. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2005. 1168 с.

6. Geankoplis C. J., Hersel A. A., Lepek D. H. Transport Processes and Separation Process Principles (Including Unit Operations). 5th ed. Boston: Pearson, 2018. 1201 с.

7. Wills B. A., Finch J. Wills’ Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. 512 с.

8. Gupta A., Yan D. S. Mineral Processing Design and Operation: An Introduction. Amsterdam: Elsevier, 2006. 718 с.

9. Fellows P. J. Food Processing Technology: Principles and Practice. 4th ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. 1152 с.

10. Bhandari B., Bansal N., Zhang M., Schuck P. (eds.) Handbook of Food Powders: Processes and Properties. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. 688 с.

11. ASABE/ASAE S319.4 (FEB2008, R2012). Method of Determining and Expressing Fineness of Feed Materials by Sieving. St. Joseph, MI: ASABE, [пагінацію офіційно не зазначено у відкритих прев'ю].

12. ISO 3310-1:2016. Test sieves — Technical requirements and testing — Part 1: Test sieves of metal wire cloth. Geneva: ISO, 26 с. (вид. BSI).

13. ISO 3310-2:2013. Test sieves — Technical requirements and testing — Part 2: Test sieves of perforated metal plate. Geneva: ISO, 18 с. (вид. BSI).

14. Барановський В. М. Сільськогосподарські машини. Машини для приготування і роздавання кормів : підручник. Київ : Аграрна освіта, 2018. 412 с.

15. Ковальов М. М., Гнатюк О. І. Машини та обладнання для переробки сільськогосподарської продукції : навч. посіб. Київ : НУБіП України, 2019. 356 с.

16. Бурлака О. П. Процеси і апарати агропромислового виробництва : підручник. Харків : ХНАУ, 2017. 480 с.

17. Поліщук І. М. Теорія та розрахунок машин для подрібнення зерна і кормів : навч. посіб. Вінниця : ВНАУ, 2020. 290 с.

18. Кравчук В. І., Луценко М. М. Механізація технологічних процесів у кормовиробництві : підручник. Київ : Урожай, 2016. 368 с.

19. Олексієнко В. О., Петриченко С. В. Дослідження енергоємності процесу подрібнення в молоткових дробарках. Вісник аграрної науки. 2021. № 4. С. 52–58.

20. Шеремета Р. Б. Вплив конструкції молотків на ефективність подрібнення зернових матеріалів. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2020. № 12. С. 41–46.

21. Федченко З. А. Оптимізація режимів роботи молоткових подрібнювачів. Техніка і технології АПК. 2019. № 6. С. 23–28.

22. Тарельник В. Б. Аналіз процесу подрібнення біологічної сировини молотковими дробарками. Наукові праці Полтавської державної аграрної академії. 2020. Т. 1. С. 87–92.

23. Степанюк М. В. Підвищення зносостійкості робочих органів молоткових дробарок. Вісник машинобудування та транспорту. 2022. № 1. С. 64–69.

24. Ortiz-Cañavate J. Tecnología de la mecanización agraria. Madrid : Mundi-Prensa, 2016. 540 p.

25. García A., Gil S. Máquinas agrícolas y agroindustriales. Barcelona : Reverté, 2018. 420 p.

26. Hernández J. Procesos mecánicos en la industria agroalimentaria. Madrid : Síntesis, 2017. 395 p.

27. Sánchez R., Pérez L. Ingeniería de procesos de molienda y trituración. Valencia : UPV, 2019. 310 p.

28. Gil S. A., Parra A. G. Evaluación energética de un molino de martillos aplicado a biomasa agrícola. Revista Ingeniería Agrícola. 2019. Vol. 9(2). P. 45–52.

29. Cisneros A. M., Quito M. A. Análisis del rendimiento de un molino de martillos para productos agroindustriales. Revista Tecnológica ESPOL. 2020. Vol. 33(1). P. 78–85.

30. Guallichico C. S. Optimización del proceso de molienda en molinos de martillos. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. 2018. Vol. 22(3). P. 201–208.

31. Ayala M. G., De los Ríos J. A. Influencia de la velocidad periférica en la eficiencia de molienda. Ingeniería Mecánica. 2021. Vol. 24(4). P. 311–318.

32. Parra S. A. Modelado cinemático del martillo en molinos de impacto. Revista Científica de Ingeniería. 2017. Vol. 15(2). P. 99–105.

33. Hernández J., López F. Energy consumption analysis of hammer mills in agro-industrial applications. Revista Latinoamericana de Ingeniería. 2022. Vol. 30(1). P. 55–62.