

УДК 631.363:621.926:621.01

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.243-255>**Н. А. Доценко**, проф., д-р пед. наук, **О. А. Горбенко**, доц., канд. техн. наук,**О. С. Садовий**, доц., канд. техн. наук, **О. В. Баранова***Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна**e-mail: dotsenkona@mnaui.edu.ua*

Проектування енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва з оптимізацією конструкційних і технологічних параметрів

Розроблено конструктивне рішення енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна, що призначене для впровадження в технологічні лінії підприємств малих форм господарювання. Обґрунтовано конструкційно-технологічну схему подрібнювача, яка передбачає використання ротора з подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою, решета, двох дек, вібратора та амортизаторів. Встановлено, що розподіл робочої камери на чотири функціональні сектори забезпечує поетапну інтенсифікацію процесу подрібнення за рахунок послідовної ударної та стиральної дії на зерновий матеріал. Доведено, що застосування подрібнювальних елементів зі скошеною кромкою сприяє збільшенню площі контакту зерна з робочими органами, що підвищує ефективність руйнування частинок та зменшує питомі енерговитрати. Використання вібраційного впливу на робочу камеру дозволяє знизити налипання матеріалу на робочі поверхні, що зменшує енергоємність процесу та інтенсивність зношування елементів машини. Впровадження амортизаторів забезпечує зниження динамічних навантажень і підвищує надійність та довговічність конструкції.

енергоефективне обладнання, подрібнення зерна, комбікормове виробництво, конструкційні і технологічні параметри, кінематичні характеристики, механіка руйнування матеріалів, удар

Постановка проблеми. Сучасні тенденції до впровадження технологій сталого розвитку агропромислового виробництва сприяють зростанню вимог щодо ефективності використання енергетичних і матеріальних ресурсів, підвищенню рівня якості продукції та забезпеченню технологічних процесів сучасним обладнанням. Водночас, енергозатрати на підготовку комбікорму займають ключове місце у технологічному процесі виробництва комбікорму, зокрема процеси подрібнення фуражного зерна та змішування компонентів. Якість здійснення технологічної операції подрібнення компонентів комбікорму в подальшому впливає на ступінь засвоєваності кормів, а гранулометричний склад корелюється із однорідністю суміші. Конструкції машин для подрібнення фуражного зерна, що використовуються в сучасних умовах агропромислового комплексу України часто характеризуються високим ступенем енергоємності, металоємності та інтенсивним зносом робочих органів. Тому зумовлена необхідність до зниження питомих енерговитрат під час технологічного процесу подрібнення фуражного зерна, зокрема під час реалізації технологічного процесу виробництва комбікормів. Також виникає потреба у вдосконаленні конструктивних рішень обладнання для подрібнення фуражного зерна із врахуванням особливостей механіки руйнування матеріалів, кінематики робочих органів та технологічних режимів роботи. Зокрема, врахування закономірностей взаємодії зернового матеріалу з робочими органами подрібнювальних машин повинно базуватися на обґрунтованому

виборі технологічних та конструктивних параметрів пристроїв для подрібнення з метою зниження витрат енергії для реалізації технологічного процесу подрібнення фуражного зерна. Вдосконалення конструктивних параметрів обладнання для подрібнення фуражного зерна, зокрема робочих органів, що безпосередньо здійснюють процес подрібнення повинно сприяти збільшенню енергії удару, та, відповідно, покращенню модуля подрібнення та вирівнюванню гранулометричного складу комбікормових сумішей. Тому реалізація процесу впровадження енергоефективного обладнання в умовах комбікормових ліній сприяє підвищенню експлуатаційного ресурсу обладнання, зниження витрат, підвищенню якісних показників готових комбікормів. Таким чином, розробка і впровадження енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна сприятиме підвищенню рівня конкурентоспроможності як для підприємств комбікормового виробництва, так і для підприємств малих форм власності, що використовують власні потужності для виробництва комбікормів та здійснюють самостійне забезпечення ферм кормовою базою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових робіт щодо питань машиновикористання у комбікормовому виробництві свідчить про те, що проблеми енергоефективності технологічних процесів подрібнення та змішування є ключовими. Зокрема, в роботі [1] розглянуті основні підходи до реалізації технологічної операції змішування в шнекових змішувачах, а саме: оптимізація швидкості обертання, обсяг подрібнювальної камери та час проведення технологічного циклу. Створення моделей енергетичного балансу [2] дозволяють здійснити прогнозування розподілу частинок за розміром, що позитивно вплине на гранулометричний склад вихідного продукту [3]. Сучасні дослідження в галузі подрібнення зерна присвячені підвищенню енергоефективності процесу, вибору конструктивних параметрів обладнання та врахуванню матеріальних властивостей робочих органів і подрібненої сировини. Значна частина досліджень зосереджена на процесі подрібнення та енергозбереженні. Зокрема, дослідження процесів у кульових та змішувальних млинах показують, що енергоефективність таких пристроїв визначається, перш за все, співвідношенням технологічних параметрів, таких як швидкість обертання, розмір подрібнюючого середовища та час обробки [4]. Водночас, енергетичні моделі та баланси дозволяють прогнозувати розподіл частинок за розміром та зменшувати надмірні витрати енергії. Іншим напрямком досліджень є робота молоткових дробарок, що використовуються у виробництві кормів. Відомо, що ефективність їхньої роботи визначається не лише кінематичними параметрами, але й геометрією робочих елементів та умовами взаємодії матеріалів [5]. Модифікація вищезазначених параметрів дозволяє зменшити питомі енерговитрати та збільшити товарний вихід продукції [6]. У процесі подрібнення важливу роль відіграють властивості зернового матеріалу. Зокрема, було встановлено, що вологість, структура та механічні властивості зерна мають значний вплив на енерговитрати та механізм руйнування [7]. Це свідчить про необхідність врахування матеріалознавчих характеристик зернового матеріалу під час розробки обладнання. Велика увага приділяється матеріалам робочих органів та їх зносостійкості. Застосування передових матеріалів та покриттів, зокрема матеріалів із твердими вставками, дозволяє покращити зносостійкість обладнання та сталість технологічних параметрів [8]. У цьому плані матеріалознавчий підхід базується на оптимізації комплексу твердості, в'язкості та зносостійкості робочих поверхонь. Ще однією важливою тенденцією є комплексний підхід до оцінки енергоефективності технологічних процесів у зерновій промисловості, включаючи подрібнення, а також інших процесів, таких як сушіння та транспортування [9]. Це дає змогу розглядати

процес подрібнення як частину системи виробництва енергії. Також сучасні тенденції розвитку технологій переробки зерна пов'язані з впровадженням інноваційних технологій, що інтегрують оптимізацію конструкцій обладнання, технологічних параметрів та нових матеріалів [11]. Отже, огляд літературних джерел показує, що підвищення енергоефективності подрібнення зернових матеріалів забезпечується комплексним підходом, який включає: оптимізацію технологічних режимів процесу; врахування фізико-механічних властивостей зерна; удосконалення конструкції робочих органів; застосування зносостійких та функціонально спрямованих матеріалів. Це говорить про можливість застосування принципів матеріалознавства для проектування зернозмелювального обладнання з метою зниження енерговитрат та підвищення ефективності виробництва комбікормів. Аналіз сучасних досліджень та технічних рішень у сфері подрібнення фуражного зерна дозволяє виділити основні підходи та їх особливості. Відомі конструкції зернодробарок із роторно-статорним принципом роботи забезпечують інтенсивне подрібнення за рахунок взаємодії робочих поверхонь. Їх недоліками є підвищене зношування елементів та вимогливість до точності регулювання зазорів. Способи багатоступеневого ударного подрібнення характеризуються високою інтенсивністю руйнування зерна, проте супроводжуються значними ударними навантаженнями, що знижує довговічність обладнання та підвищує енерговитрати [12]. Технології орієнтації та різання зерна перед подрібненням дозволяють підвищити рівномірність гранулометричного складу, але не вирішують проблеми налипання матеріалу та вібраційних навантажень [13]. Методи неперервної подачі та контролю крупності продукту забезпечують стабільність процесу подрібнення, однак характеризуються інтенсивним абразивним зношуванням робочих органів та недостатньою енергоефективністю [14]. Таким чином, існуючі підходи частково вирішують окремі завдання подрібнення зерна, але не забезпечують комплексного підвищення енергоефективності, зниження зносу та стабілізації роботи обладнання. Застосування рішень, спрямованих на стабілізацію потоку зерна, дозволяє забезпечити стабільне навантаження на робочі органи, тобто подрібнювальні елементи працюють у більш сталому режимі без різких перевантажень, що підвищує їхню ефективність і зменшує ризик простоїв або заклинювань [15].

Підвищення однорідності продукту пов'язане з тим, що рівномірне живлення забезпечує однакові умови перебування зерна в зоні подрібнення [16], що сприяє більш стабільному гранулометричному складу готового продукту та зменшенню частки недо- або переподріблених частинок.

Постановка завдання. Сучасне виробництво комбікормів у фермерських та малих сільськогосподарських підприємствах потребує застосування енергоефективного обладнання, що забезпечує високу якість подрібнення фуражного зерна за мінімальних витрат електроенергії. Однак існуючі конструкції молоткових зернодробилок характеризуються значними питомими енерговитратами, інтенсивним зношуванням робочих органів, підвищеними динамічними навантаженнями на елементи конструкції, а також недостатньою однорідністю гранулометричного складу готового продукту. Для вирішення зазначених проблем необхідно розробити конструкцію енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна, що забезпечує інтенсифікацію процесу руйнування зернового матеріалу за одночасного зниження енергоемності технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу. Пропонується впровадження енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна до складу технологічних ліній виробництва комбікорму малих форм власності, що належить галузі сільськогосподарського машинобудування, а саме до пристроїв для переробки

фуражного зерна на комбікорм, і може бути використано як засіб механізації процесу подрібнення або лущення зерна в індивідуальних фермерських господарствах. Метою зазначеного обладнання є підвищення енергоефективності технологічних процесів сільськогосподарського виробництва, які спрямовані на подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва.

Принцип роботи енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна пояснюється кресленням, де на рисунку 1 зображено пристрій для енергоефективного подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва. До складу пристрою для енергоефективного подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва входить: ротор з подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою 1; рама 2; подрібнювальні елементи зі скошеною кромкою 3; амортизатори 4; решето 5; вібратор 6; деки 7. Також на рисунку зазначено, що I – сектор завантаження; II – сектор першої деки; III – сектор решета; IV – сектор другої деки.

Пристрій виконаний наступним чином: на рамі 2 розміщені ротор 1 з подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою, решето 5, деки 7. Подрібнення частинок матеріалу відбувається за рахунок їх послідовних механічних взаємодій з активними (ротор) і пасивними (решето, деки) робочими органами. Весь простір робочої камери можна умовно розділити на 4 сектори: I – сектор завантаження, II – сектор першої деки, III – сектор решета, IV – сектор другої деки. На рисунку 2 зображено розріз ротора з подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою.

Для подрібнювальних елементів зі скошеною кромкою (рисунок 3) можуть бути рекомендовані наступні розміри: довжина – 100–110 мм, товщина – 5–7 мм. З урахуванням невеликої маси подрібнювального елемента зі скошеною кромкою, сили реакції в точці підвісу будуть відносно невеликі, а значить, їх вплив на конструкцію машини виявиться незначним, а ступінь подрібнення фуражного зерна збільшуватиметься. Також на кожух подрібнювача вібратором 6 спрямовується вібрація; при цьому налипання частинок транспортованого матеріалу на поверхню деки 7 зменшується, що призводить до зменшення енергоємності та зносу ротора 1. Амортизатори 4 зменшують передачу напружень на корпус зернодробарки. Подрібнювальний елемент виконано зі скошеною кромкою. Збільшення поверхні контакту фуражного зерна з робочим органом (подрібнювальним елементом зі скошеною кромкою) сприяє підвищенню енергоефективності процесу подрібнення.

Пристрій працює таким чином. Зернодробарка змонтована на рамі 2, на якій встановлено ротор 1 із подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою, решето 5 та деки 7. Після подачі фуражного зерна в робочу камеру воно надходить у сектор I – сектор завантаження, де потрапляє в зону обертання ротора 1. Обертаючись, ротор 1 з подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою надає зерну кінетичну енергію та здійснює первинне ударне руйнування частинок. Далі матеріал переміщується у сектор II – сектор першої деки 7, де відбувається інтенсивна взаємодія частинок з активним робочим органом – ротором 1 – та пасивним робочим органом – декою 7. У результаті багаторазових ударів і стирання ступінь подрібнення зерна зростає. Після цього частинки потрапляють у сектор III – сектор решета 5. Частинки, що досягли заданої крупності, проходять через отвори решета 5 та виводяться з робочої камери. Більш крупні фракції відбиваються від решета 5 та повертаються в зону дії ротора 1 для повторного подрібнення. Подальше доведення матеріалу до необхідного розміру відбувається у секторі IV – секторі другої деки 7, де забезпечується завершальний етап ударно-стиральної дії.

Подрібнювальні елементи ротора 1 мають довжину 100–110 мм і діаметр 5–7 мм та виконані зі скошеною кромкою. Така конструкція збільшує площу контакту зерна з

робочим органом, що підвищує інтенсивність руйнування та енергоефективність процесу подрібнення. Невелика маса подрібнювальних елементів зменшує сили реакції в точках підвісу, що мінімізує їх вплив на конструкцію машини та підвищує довговічність вузлів. Для запобігання налипанню частинок на поверхню деки 7 кожух подрібнювача оснащений вібратором 6, який створює коливання робочої камери. Вібрація сприяє очищенню робочих поверхонь, зменшенню енергоємності процесу та зниженню зносу ротора 1. Амортизатори 4 зменшують передачу динамічних навантажень і вібрацій на раму 2 та корпус зернодробарки, забезпечуючи стабільність роботи та зниження механічних напружень. Таким чином, подрібнення зерна відбувається внаслідок послідовної механічної взаємодії частинок з активним робочим органом – ротором 1 та пасивними робочими органами – решетом 5 і деками 7 у чотирьох функціональних секторах робочої камери.

Метою проектування енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва з оптимізацією конструкційних і технологічних параметрів є підвищення енергоефективності та зниження питомих витрат електроенергії, зменшення зносу робочих органів, зниження динамічних навантажень на конструкцію зернодробарки, а також покращення якості подрібнення зерна за рахунок збільшення площі контакту матеріалу з робочими органами та інтенсифікації процесу руйнування частинок.

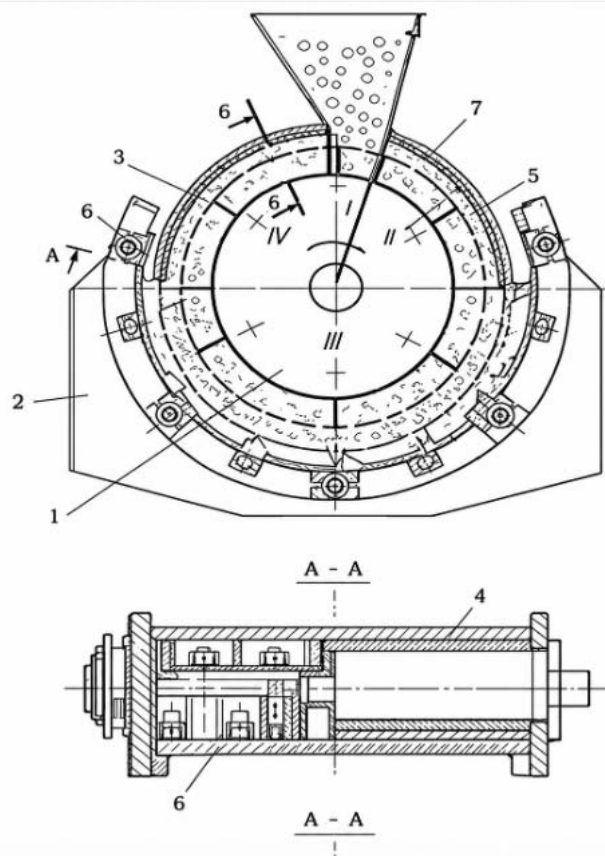


Рисунок 1 – Пристрій для енергоефективного подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва

1– ротор з подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою; 2– рама; 3–подрібнювальні елементи зі скошеною кромкою; 4– амортизатори; 5– решето; 6– вібратори; 7– деки; I – сектор завантаження; II – сектор першої деки; III – сектор решета; IV – сектор другої деки.

Джерело: розроблено авторами

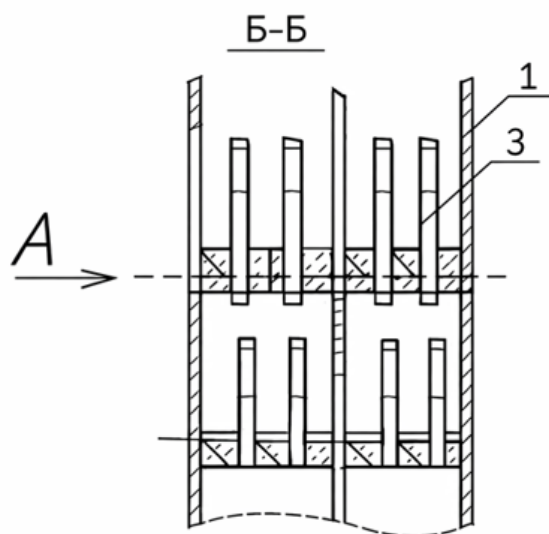


Рисунок 2 – Ротор з подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою. Розріз Б–Б
Джерело: розроблено авторами

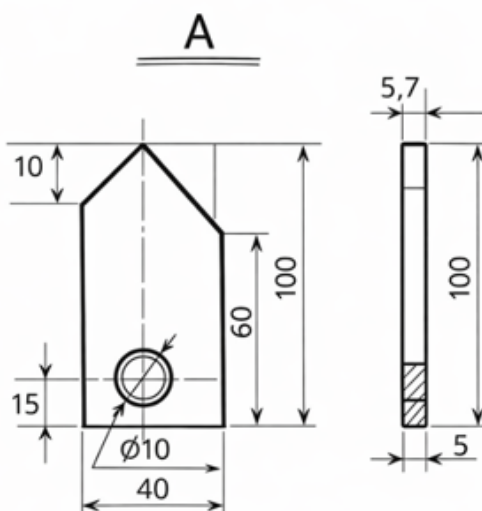


Рисунок 3 – Подрібнювальний елемент зі скошеною кромкою
Джерело: розроблено авторами

Продуктивність енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна визначається комплексом взаємопов'язаних режимних і конструкційних параметрів, серед яких визначальними є частота обертання ротора з подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою, кількість цих елементів на роторі та подача вихідного матеріалу в робочу камеру. Кожен із зазначених факторів впливає на продуктивність неоднозначно: при недостатніх значеннях обмежується пропускна здатність і ступінь подрібнення, тоді як при надлишкових значеннях проявляються негативні ефекти – взаємне екранування робочих органів, переподрібнення, забивання решета та зростання питомої енергоємності процесу. Це зумовлює наявність раціональних (оптимальних) діапазонів кожного параметра, в межах яких досягається максимальна продуктивність при прийнятних витратах енергії. Нижче наведено три

графічні залежності, побудовані на основі розрахункової моделі процесу подрібнення зерна ударно-стиральної дії в чотирисекторній робочій камері (сектори завантаження, першої деки, решета та другої деки), доповнені умовними експериментальними точками для ілюстрації характеру розкиду даних. Графіки призначені для попереднього аналізу та можуть бути уточнені за результатами власних експериментальних досліджень на фізичній моделі або діючому зразку обладнання.

Частота обертання ротора n (об/хв) безпосередньо визначає кінетичну енергію, яку отримують подрібнювальні елементи зі скошеною кромкою 3, а отже й енергію первинного ударного руйнування часток зерна в секторі завантаження I. Зі збільшенням n зростає лінійна швидкість кінців подрібнювальних елементів, унаслідок чого підвищується інтенсивність ударної взаємодії з матеріалом у секторах I та II (сектор першої деки), а частки швидше досягають розмірів, які дозволяють їм пройти через отвори решета 5 у секторі III.

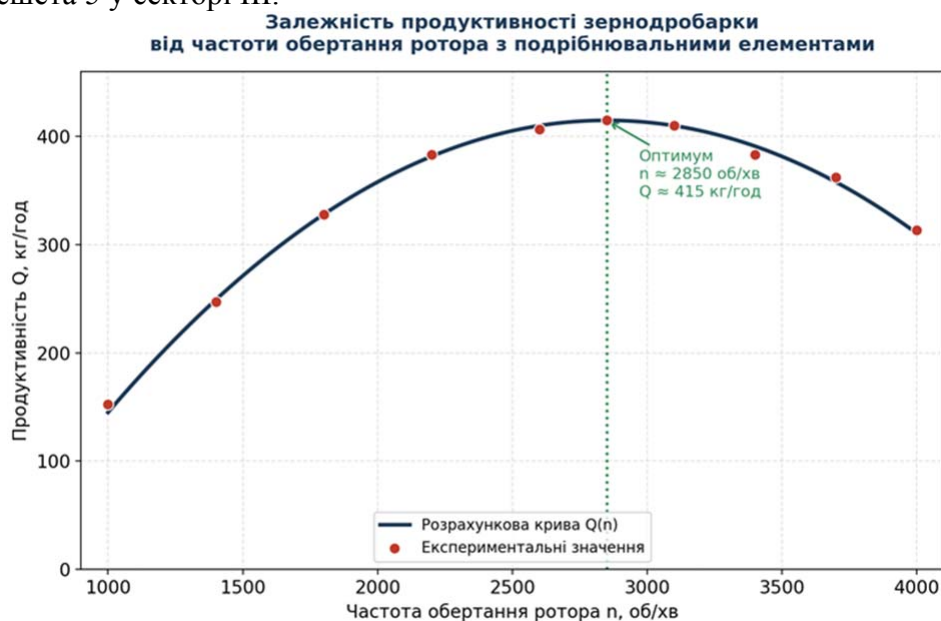


Рисунок 4 – Залежність продуктивності зернодробарки Q від частоти обертання ротора n
Джерело: розроблено авторами

Крива має чітко виражений параболический характер із максимумом продуктивності в зоні $n=2800\text{--}2900$ об/хв. На початковій ділянці ($n=1000\text{--}2200$ об/хв) продуктивність зростає практично пропорційно частоті обертання — це пояснюється тим, що кінетична енергія удару підрозділяється на руйнування частинок, а пропускна здатність решета 5 ще не є обмежувальним фактором. Після досягнення оптимуму подальше збільшення частоти обертання (n більше 3000 об/хв) призводить до зниження продуктивності з таких причин: надлишкове переподрібнення матеріалу в секторах I–II зменшує середній розмір часток понад необхідний, що підвищує енергоємність без приросту виходу готової фракції; зростає кількість часток, що багаторазово повертаються від решета 5 у зону дії ротора I для повторного подрібнення, що знижує ефективну пропускну здатність камери; підвищується аеродинамічний опір обертанню ротора та інтенсивність зношування подрібнювальних елементів 3, що зменшує стабільність робочого процесу; вібратор 6 і амортизатори 4 працюють у режимі підвищених динамічних навантажень, що скорочує термін служби вузлів кріплення. Таким чином, раціональний діапазон частоти обертання ротора для розглянутої конструкції становить орієнтовно 2600–3100 об/хв, у межах якого забезпечується

максимальна продуктивність ($Q=400\text{--}415$ кг/год) за відносно помірних динамічних навантажень на конструкцію.

Кількість подрібнювальних елементів зі скошеною кромкою z (шт.), рівномірно розподілених на роторі 1, визначає густину ударних взаємодій з матеріалом за один оберт ротора. Кожен елемент має довжину 100–110 мм і товщину 5–7 мм, а скошена кромка забезпечує збільшену площу контакту з частками зерна, що сприяє інтенсифікації процесу руйнування.

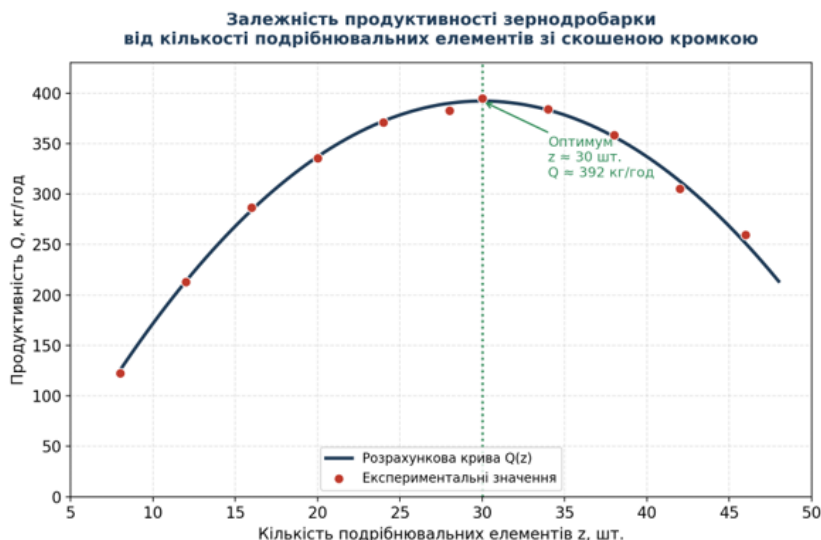


Рисунок 5 – Залежність продуктивності зернодробарки Q від кількості подрібнювальних елементів z
Джерело: розроблено авторами

Залежність $Q(z)$, як і залежність $Q(n)$, має пологий екстремум, проте за іншим фізичним механізмом. При малій кількості елементів ($z=8\text{--}20$ шт.) частина об'єму робочої камери залишається не охопленою ударною дією за один оберт ротора, тому значна частка матеріалу проходить сектори I–II без достатньої кількості контактів із робочим органом, що знижує продуктивність і погіршує рівномірність подрібнення. Зі збільшенням z до 28–32 шт. зростає ймовірність контакту кожної частки матеріалу з подрібнювальним елементом на шляху проходження через сектори робочої камери, що підвищує продуктивність до максимального значення ($Q=390\text{--}395$ кг/год при $z=30$ шт.). Подальше збільшення кількості елементів ($z > 35$ шт.) спричиняє зниження продуктивності внаслідок таких чинників: взаємне екранування сусідніх подрібнювальних елементів зменшує ефективну робочу площу контакту кожного з них з матеріалом; зростає аеродинамічний та механічний опір обертанню ротора, що підвищує енергоємність процесу без пропорційного приросту виходу готової фракції; збільшується маса ротора в зборі, що підвищує інерційні навантаження на амортизатори 4 і знижує ефективність гасіння вібрацій; підвищується ризик заклинювання великих часток між сусідніми елементами при щільному їх розташуванні. Отже, для розглянутої конструкції раціональна кількість подрібнювальних елементів становить $z=28\text{--}34$ шт., що забезпечує близьку до максимальної продуктивність при збереженні достатнього вільного простору між елементами для безперешкодного проходження матеріалу.

Подача матеріалу q (кг/год) у сектор завантаження I визначає інтенсивність наповнення робочої камери зернодробарки. На відміну від двох попередніх факторів, подача матеріалу впливає не лише на продуктивність по готовій фракції, а й

безпосередньо на питомі витрати електроенергії W (кВт·год/т), тому цю залежність доцільно розглядати в комбінованому вигляді – із двома осями ординат.

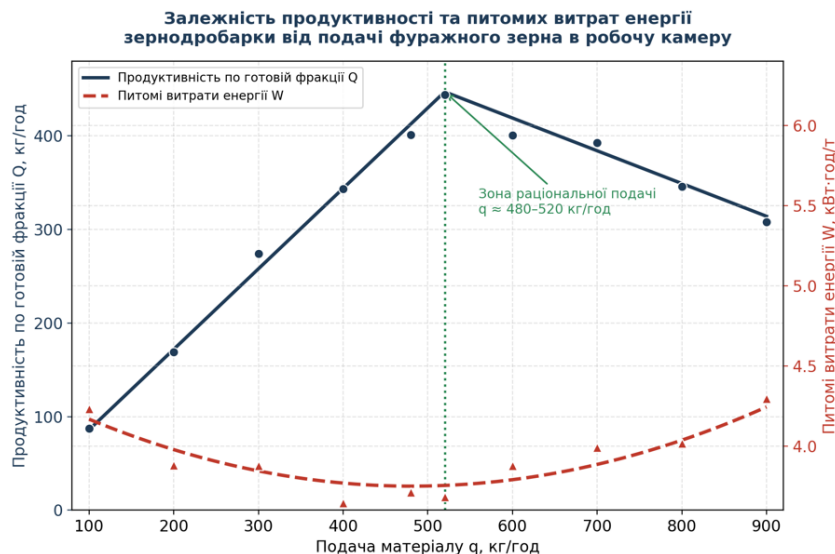


Рисунок 6 – Залежність продуктивності по готовій фракції Q та питомих витрат енергії W від подачі матеріалу q

Джерело: розроблено авторами

Крива продуктивності $Q(q)$ (суцільна лінія) має дві характерні ділянки. На першій ділянці ($q = 100\text{--}500$ кг/год) продуктивність по готовій фракції зростає практично пропорційно подачі – робоча камера встигає переробляти весь матеріал, що надходить, без істотного накопичення в секторах I–IV. Після досягнення подачі $q \approx 500\text{--}520$ кг/год настає зона насичення робочої камери: подальше збільшення подачі матеріалу не супроводжується пропорційним приростом виходу готової фракції, а за $q > 520$ кг/год продуктивність по готовій фракції навіть знижується внаслідок: перевантаження сектору решета 5, коли частки не встигають проходити через отвори й накопичуються, частково повертаючись у зони I–II; зниження ефективності ударної взаємодії ротора 1 з матеріалом через перевантаження робочої камери (ефект «подушки» з нерухомого матеріалу); зменшення вільного простору в секторах дек 7, що знижує інтенсивність ударно-стиральної дії на завершальному етапі. Крива питомих витрат енергії $W(q)$ (штрихова лінія) має U-подібний характер із мінімумом у зоні $q=480\text{--}520$ кг/год. При недовантаженні робочої камери ($q < 400$ кг/год) частка енергії, що витрачається на холостий хід ротора, обертання порожніх ділянок камери та подолання тертя в підшипникових вузлах, припадає на меншу масу обробленого матеріалу, тому питомі витрати на тону продукту зростають. При перевантаженні ($q > 550$ кг/год) питомі витрати енергії знову зростають через повторні цикли подрібнення часток, що не пройшли крізь решето 5, і підвищений опір обертанню ротора в переповненій камері.

Перетин зон мінімуму питомих витрат енергії та максимуму продуктивності по готовій фракції визначає раціональний діапазон подачі матеріалу $q=480\text{--}520$ кг/год, у межах якого обладнання забезпечує одночасно високу продуктивність ($Q=410\text{--}440$ кг/год) і мінімальну енергоємність процесу ($W=3,75\text{--}3,85$ кВт·год/т).

Проведений аналіз трьох ключових факторів – частоти обертання ротора, кількості подрібнювальних елементів зі скошеною кромкою та подачі матеріалу – показує, що кожен із них впливає на продуктивність зернодробарки за схожим принципом: існує раціональний діапазон значень, відхилення від якого в будь-який бік

(як зменшення, так і збільшення) призводить до зниження ефективності процесу подрібнення фуражного зерна; раціональна частота обертання ротора: $n \approx 2600\text{--}3100$ об/хв (Q до 415 кг/год); раціональна кількість подрібнювальних елементів: $z \approx 28\text{--}34$ шт. (Q до 395 кг/год); раціональна подача матеріалу: $q \approx 480\text{--}520$ кг/год (Q до 440 кг/год при мінімальній питомій енергоємності 3,75–3,85 кВт·год/т).

Висновки. У роботі вирішено науково-прикладне завдання проектування енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна в умовах комбікормового виробництва. Розроблено конструкцію подрібнювача, що забезпечує інтенсифікацію процесу руйнування зерна за рахунок раціонального поєднання ударної та стиральної дії в межах чотирисекторної робочої камери. Використання ротора з подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою дозволяє збільшити площу контакту з матеріалом, підвищити ступінь подрібнення та знизити питомі енерговитрати. Застосування двох дек і решета забезпечує поетапну сепарацію та повернення недоподрібнених частинок у зону повторної обробки, що стабілізує гранулометричний склад продукту. Використання вібратора забезпечує зменшення налипання матеріалу на робочі поверхні, що сприяє зниженню енергоємності процесу та зносу робочих органів. Встановлення амортизаторів дозволяє зменшити динамічні навантаження на конструкцію та підвищити надійність роботи обладнання. Запропоноване технічне рішення забезпечує підвищення енергоефективності, зниження витрат електроенергії, покращення якості подрібнення та довговічності машини. Розроблене обладнання доцільно використовувати в технологічних лініях комбікормових підприємств, зокрема в умовах малих і середніх фермерських господарств. В основу пристрою для енергоефективного подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва поставлено задачу удосконалення пристрою для енергоефективного подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва, що містить раму, ротор з подрібнювальними елементами, подрібнювальні елементи зі скошеною кромкою, амортизатори, решето, деки, вібратори. При цьому з метою зменшення енерговитрат та підвищення модуля помелу кінцевого продукту на роторі встановлені подрібнювальні елементи, що виконані зі скошеною кромкою, а на кожух подрібнювача вібратором передається вібрація; при цьому налипання частинок транспортованого матеріалу на поверхню деки зменшується, що призводить до зменшення енергоємності та зносу ротора; амортизатори зменшують передачу напружень на корпус пристрою. Таким чином досягається підвищення енергоефективності та зниження питомих витрат електроенергії, зменшення зносу робочих органів, зниження динамічних навантажень на конструкцію зернодробарки, а також покращення якості подрібнення зерна за рахунок збільшення площі контакту матеріалу з робочими органами та інтенсифікації процесу руйнування частинок. Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої для енергоефективного подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва, згідно з корисною моделлю, з метою зменшення енерговитрат та підвищення модуля помелу кінцевого продукту на роторі встановлені стрижневі подрібнювальні елементи, що виконані зі скошеною кромкою; на кожух подрібнювача вібратором повідомляється вібрація; при цьому налипання частинок транспортованого матеріалу на поверхню деки зменшується, що призводить до зменшення енергоємності та зносу ротора; амортизатори зменшують передачу напружень на корпус пристрою. Сукупними ознаками пристрою енергоефективного подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва, є встановлення подрібнювальних елементів, що виконані зі скошеною кромкою; спрямування на кожух подрібнювача вібратором вібрації; при цьому налипання частинок транспортованого матеріалу на поверхню деки зменшується, що призводить

до зменшення енергоємності та зносу ротора; зменшення передачі напружень на корпус пристрою амортизаторами. Подрібнювальні елементи виконані зі скошеною кромкою з метою зменшення енерговитрат та підвищення модуля помелу кінцевого продукту на роторі. Встановлення подрібнювальних елементів зі скошеною кромкою на роторі забезпечує зміну траєкторії руху частинок зерна в робочій зоні, інтенсифікує ударно-зсувну взаємодію з матеріалом та підвищує кратність впливу на окремі частинки. Така геометрія сприяє більш рівномірному подрібненню, підвищенню модуля помелу кінцевого продукту та одночасному зменшенню питомих енерговитрат за рахунок оптимізації процесу руйнування зерна. Встановлення вібратора на кожусі подрібнювача забезпечує передавання коливань на робочі поверхні деки, що запобігає налипанню та накопиченню частинок матеріалу в зоні подрібнення і сприяє стабілізації технологічного процесу, зменшенню опору руху матеріалу, підвищенню продуктивності та зниженню енергоємності роботи обладнання. Встановлення амортизаторів забезпечує демпфування динамічних навантажень, які виникають у процесі роботи ротора, та зменшує передачу вібрацій і напружень на корпус пристрою. Це підвищує довговічність конструкції, зменшує знос з'єднань і кріпильних елементів, а також покращує експлуатаційну надійність обладнання в цілому. Підвищення енергоефективності технологічних процесів подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва досягається за рахунок зниження питомих витрат електроенергії, зменшення зносу робочих органів, зниження динамічних навантажень на конструкцію зернодробарки, а також покращення якості подрібнення зерна завдяки збільшенню площі контакту матеріалу з робочими елементами та інтенсифікації процесу руйнування частинок.

Список літератури

1. Elbendari A. M., Ibrahim S. S. Optimizing key parameters for grinding energy efficiency and modeling of particle size distribution in a stirred ball mill. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 3374. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87229-8>
2. Kumar A., Sahu R., Tripathy S. K. Energy-efficient advanced ultrafine grinding of particles using stirred mills—A review. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 14. P. 5277. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16145277>
3. Zhang X., Qin Y., Jin J., Li Y., Gao P. High-efficiency and energy-conservation grinding technology using a ceramic-medium stirred mill. *Powder Technology*. 2022. Vol. 396. P. 354–365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.10.056>
4. Martelli S., Di Nunzio P. E. Powder ball milling: An energy balance approach to particle size reduction. *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2409.20202>
5. Castillo Alvarez Y., Jiménez Borges R., Monteagudo Yanes J. P. et al. Mathematical model to improve energy efficiency in hammer mills in feed industry. *Processes*. 2025. Vol. 13, No. 5. P. 1523. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13051523>
6. Al-Eid M., Qabatty A., Kubaisi R., Jaafar A. A. K. Optimization of key operating parameters to enhance performance and energy efficiency of a hammer mill for corn grinding. *Discover Applied Sciences*. 2025. Vol. 7. P. 639. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07263-z>
7. Kalandarov P., Khayitov A., Sharifov H., Murodova G. Study on the effect of grain moisture on grinding efficiency. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 497. P. 03025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449703025>
8. Wen Z.-P., Zhou Y.-M., Zhang F.-L., Zhang G.-X., Luo S.-M. A novel method for improving milling efficiency and wear resistance of mill hammer with orderly brazed diamond grains. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05885-8>
9. Abdel-Aal E. M. Insights into grain milling and fractionation practices for improved food sustainability with emphasis on wheat and peas. *Foods*. 2024. Vol. 13, No. 10. P. 1532. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13101532>
10. Codină G. G., Dabija A. Innovative grain processing: Trends and technologies. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 23. P. 10954. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142310954>

11. Зернодробарка: патент 121765, Україна: МПК B02C2/08, B02C9/02. Заявл. 09.08.2017; опубл. 27.07.2020, Бюл. № 14.
12. Спосіб лушення і подрібнення зерна: патент 101589./ Гвоздєв О. В. Заявл. 06.03.2015; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18.
13. Спосіб підвищення рівномірності подрібнення зерна: патент 116240, МПК A21C1/06, A21D13/08. / Нанка О. В. Заявл. 06.12.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.
14. Nesterenko O., Vasylovskiy O., Kisilov R. Areas of improvement of feeding devices for pneumatic separation channels. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2023. Vol. 7(38), Part II. P. 90–97. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.90-97](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.90-97)
15. Babenko D., Dotsenko N., Gorbenko O. Study of structural and kinematic characteristics of an energy-efficient oil press. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2024. Vol. 28, No. 3. P. 41–54. DOI: <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/2.2024.41>

References

1. Elbendari, A. M., & Ibrahim, S. S. (2025). Optimizing key parameters for grinding energy efficiency and modeling of particle size distribution in a stirred ball mill. *Scientific Reports*, 15, 3374. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87229-8>
2. Kumar, A., Sahu, R., & Tripathy, S. K. (2023). Energy-efficient advanced ultrafine grinding of particles using stirred mills—A review. *Energies*, 16(14), 5277. <https://doi.org/10.3390/en16145277>
3. Zhang, X., Qin, Y., Jin, J., Li, Y., & Gao, P. (2022). High-efficiency and energy-conservation grinding technology using a ceramic-medium stirred mill. *Powder Technology*, 396, 354–365. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.10.056>
4. Martelli, S., & Di Nunzio, P. E. (2024). Powder ball milling: An energy balance approach to particle size reduction. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2409.20202>
5. Castillo Alvarez, Y., Jiménez Borges, R., Monteagudo Yanes, J. P., et al. (2025). Mathematical model to improve energy efficiency in hammer mills in feed industry. *Processes*, 13(5), 1523. <https://doi.org/10.3390/pr13051523>
6. Al-Eid, M., Qabatty, A., Kubaisi, R., & Jaafar, A. A. K. (2025). Optimization of key operating parameters to enhance performance and energy efficiency of a hammer mill for corn grinding. *Discover Applied Sciences*, 7, 639. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07263-z>
7. Kalandarov, P., Khayitov, A., Sharifov, H., & Murodova, G. (2024). Study on the effect of grain moisture on grinding efficiency. *E3S Web of Conferences*, 497, 03025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449703025>
8. Wen, Z.-P., Zhou, Y.-M., Zhang, F.-L., Zhang, G.-X., & Luo, S.-M. (2024). A novel method for improving milling efficiency and wear resistance of mill hammer with orderly brazed diamond grains. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05885-8>
9. Abdel-Aal, E. M. (2024). Insights into grain milling and fractionation practices for improved food sustainability with emphasis on wheat and peas. *Foods*, 13(10), 1532. <https://doi.org/10.3390/foods13101532>
10. Codină, G. G., & Dabija, A. (2024). Innovative grain processing: Trends and technologies. *Applied Sciences*, 14(23), 10954. <https://doi.org/10.3390/app142310954>
11. Nyzhnyk, O. P. (2020). Grain crusher (UA Patent No. 121765). Ukrpatent.
12. Gvozdev O.V. (2015). The method of husking and grinding grain. (UA Patent No. 101589). Ukrpatent.
13. Nanka O.V. (2017). The method of increasing the uniformity of grain grinding (UA Patent No. 116240). Ukrpatent.
14. Nesterenko, O., Vasylovskiy, O., & Kisilov, R. (2023). Areas of improvement of feeding devices for pneumatic separation channels. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 7(38, Part II), 90–97. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.90-97](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.90-97)
15. 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>

Nataliia Dotsenko, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, **Olena Gorbenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Oleksiy Sadovoy**, Assoc. Prof., PhD tech. Sci, **Olena Baranova**
Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine

Design of Energy-Efficient Equipment for Grinding Feed Grain for Compound Feed Production with Optimization of Structural and Technological Parameters

In the conditions of modern small-scale feed mills, the key issue is to reduce energy consumption for the implementation of technological processes and improve the quality of finished products while maintaining the specified particle size distribution that corresponds to the specified recipe. Given this, the purpose of the current study is to develop a design for equipment for grinding feed grain that meets the energy efficiency requirements for equipment and ensures the preservation of material and technical resources of enterprises. A design solution for energy-efficient equipment for grinding feed grain has been developed, which is intended for implementation in the technological lines of small-scale enterprises. The proposed technical solution belongs to the means of mechanization of grain processing processes and can be effectively implemented in individual farms. The design and technological scheme of the grinder has been substantiated, which involves the use of a rotor with grinding elements with a beveled edge, a sieve, two decks, a vibrator and shock absorbers. It has been established that the division of the working chamber into four functional sectors provides a gradual intensification of the grinding process due to the sequential impact and abrasion action on the grain material. It has been proven that the use of grinding elements with a beveled edge contributes to an increase in the area of contact of the grain with the working bodies, which increases the efficiency of particle destruction and reduces specific energy consumption. The use of vibrational effects on the working chamber allows to reduce the adhesion of the material to the working surfaces, which, in turn, reduces the energy intensity of the process and the intensity of wear of the machine elements. The introduction of shock absorbers ensures a decrease in dynamic loads and increases the reliability and durability of the structure. The generalization of the obtained results shows that the proposed equipment provides: increased energy efficiency of the process of grinding feed grain; reduced specific electricity consumption; improved grinding quality and stability of the particle size distribution; reduced wear of the working bodies and increased machine life; reduced vibration load on the structure. Thus, the implementation of the developed equipment is an appropriate and promising direction for increasing the efficiency of compound feed production, especially in the conditions of small and medium-sized agricultural enterprises.

energy-efficient equipment for grinding grain, compound feed production, structural and technological parameters, kinematic characteristics, mechanics of material destruction, impact

Одержано (Received) 18.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 19.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 22.06.2026