

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Поліщук Іван Миколайович

УДК 621.296

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Підвищення ефективності подрібнення зерна шляхом
удосконалення робочих органів подрібнювача**

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
_____ Поліщук І.М.

Керівник роботи

Сукманюк О.М.

кандидат історичних наук, доцент

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Поліщук Іван Миколайович. Підвищення ефективності подрібнення зерна шляхом удосконалення робочих органів подрібнювача. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

В кваліфікаційній роботі встановлено, що дробильні машини молоткового типу з горизонтальним барабаном випромінюють шум і породжують вібрацію, особливо в момент здійснення технологічних операцій, тобто під час руйнування матеріалу в робочій камері.

У результаті проведених дослідів на дробарці з опозитним завантаженням та оптимізації процесу подрібнення зерна виявлено раціональні значення конструктивно-режимних параметрів: подавання вихідного матеріалу в лівий отвір (q_1)= $0,078 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, подавання вихідного матеріалу в правий отвір (q_2)= $0,054 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, кутова швидкість обертання ротора (ω)= $457,3$ рад/с, за яких значення енергоємності дає змогу досягнути мінімуму $E=4,86 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{т}\cdot\lambda}$. Вищевказані критеріальні співвідношення конструктивно-режимних параметрів дають змогу проектувати типорозмірний ряд молоткових дробарок з опозитним завантаженням.

Перевірка характеристик енергоємності, шуму і показників віброприскорення показала поліпшення цих характеристик при опозитному завантаженні зерна порівняно з традиційним завантаженням.

Ключові слова: подрібнювач, зерно, опозитне завантаження, робочий орган.

ANNOTATION

Ivan Mykolayovych Polishchuk. Increasing the efficiency of grain crushing by improving the working bodies of the chopper. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2023.

In the master's thesis, it was established that hammer-type crushing machines with a horizontal drum emit noise and generate vibration, especially during technological operations, i.e. during the destruction of material in the working chamber.

As a result of experiments on a crusher with an oppositional loading and optimisation of the wheat grinding process, rational values of design and operating parameters were found: feeding of the feed material into the left hole (q_1) = 0.078 kg/s, feeding of the feed material into the right hole (q_2) = 0.054 kg/s, angular speed of rotor rotation (ω) = 457.3 rad/s, at which the value of energy intensity allows to achieve a minimum of $E = 4.86$ (kWh)/(t·λ). The above criterion correlations of design and operating parameters make it possible to design a standard size range of hammer crushers with oppositional loading.

Verification of the characteristics of energy consumption, noise and vibration acceleration has shown an improvement in these characteristics with oppositional grain loading compared to traditional loading.

Keywords: chopper, grain, oppositional loading, working body.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ З ПОДРІБНЕННЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА МОЛОТКОВИМИ ДРОБАРКАМИ.....	8
1.1. Аналіз способів подрібнення фуражного зерна.....	8
1.2. Аналіз роботи молоткових дробарок із горизонтальним розташуванням ротора та їхні недоліки.....	10
Висновки по розділу.....	16
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА.....	17
2.1. Загальна програма експериментальних досліджень і вибір зернового матеріалу.....	17
2.2. Вибір факторів процесу подрібнення на основі теорії розмірності.....	18
2.3. Опис експериментальної установки для дослідження процесу подрібнення.....	21
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	27
3.1. Вплив поєднання факторів на модуль розмелювання вихідного матеріалу в молотковій дробарці з опозитним завантаженням.....	27
3.3. Особливості динаміки дробарок з опозитним завантаженням вихідного матеріалу.....	31
3.3. Оцінка одержуваного продукту за відсноною (за масою) кількістю цілих зерен.....	33
Висновки по розділу.....	37
ВИСНОВКИ.....	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	39

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Найважливішою складовою тваринницької галузі є виробництво кормів, тому що за розрахунками економістів витрати в структурі собівартості продукції становлять 60...75% від загальної вартості тваринницької продукції та продукції тваринництва, від якості та вартості якої повністю залежить національна продовольча безпека. Оскільки рівень розвитку та економічна ефективність галузі тваринництва значною мірою визначаються забезпеченням кормами цього сектору сільського господарства, найважливішими умовами успішного розвитку тваринницької галузі для збільшення обсягів її виробництва та якості продукції з одночасним зниженням собівартості за допомогою скорочення витрат на виробництво є вдосконалення засобів механізації та автоматизації процесу виробництва, розвиток та освоєння сучасних технологій переробки зернових компонентів. Це дасть змогу значною мірою здійснити імпортозаміщення в галузі створення та випуску технологічного обладнання для комбікормової промисловості, закупівлі насіння кормових рослин, а також компонентів комбікормів і кормових добавок.

Основною операцією в процесі переробки зернових культур на комбікорми для згодовування тваринам і птахам є подрібнення.

На сьогоднішній день молоткові дробарки використовуються як основне обладнання для дроблення зерна фуражного призначення в більшості господарств через їхню просту конструкцію, широке розповсюдження в комбікормовій промисловості та сільському господарстві, що забезпечують великий ефект подрібнення.

Нині молоткові дробарки з горизонтальною віссю обертання, які набули широкого поширення і використовуються як основні подрібнювачі зерна фуражного призначення, не відповідають вимогам сучасного виробництва. Низка авторів, відзначили негативні фактори шуму і вібрації, що виникають у процесі переробки подрібнюваного матеріалу, особливо в момент руйнування

матеріалу в робочій камері після його завантаження, і високу енергоємність процесу.

Що характерно, віброактивність дробарок спостерігається навіть за ретельного статичного і динамічного балансування молоткових барабанів, незношеності молотків. При цьому підвищена віброактивність молоткових дробарок веде до непродуктивних витрат енергії, супутніх основним витратам на подрібнення. За даними статистики, останніми роками на корм худобі використовують приблизно 1,3 млн тонн зерна. Витрати на його подрібнення становлять близько 14...15 млн кВт-год електроенергії. Величезні обсяги витрат електроенергії, наявність зазначених вище негативних чинників вимагають розроблення наукових і конструктивних рішень, здатних знизити віброактивність дробарок і підвищити ефективність технологічного процесу подрібнення. У зв'язку з цим науковий і практичний інтерес становлять дослідження, спрямовані на підвищення ефективності подрібнення зернових кормів у дробарках горизонтального типу на основі зниження їхньої віброактивності, що є актуальним науковим завданням.

Об'єкт дослідження є технологічний процес подрібнення фуражного зерна в дробарці молоткового типу.

Предмет дослідження – закономірності, причини та фактори впливу вібрації молоткових зернодробарок на ефективність процесу подрібнення.

Метою роботи є підвищення ефективності процесу подрібнення фуражного зерна на основі зниження технологічної віброактивності молоткових дробарок із горизонтальним розташуванням барабана.

У зв'язку з поставленою метою в цій роботі вирішувалися такі завдання:

- обґрунтувати нову технологічну схему молоткової дробарки, у якій змінюється підведення зерна до зони подрібнення та виявити основні закономірності силової взаємодії робочих органів із подрібнюваним матеріалом;
- обґрунтувати параметри та режими молоткової дробарки з опозитним завантаженням зерна.

Методи наукового дослідження. Аналітична частина досліджень виконана з використанням методів і методик, що застосовуються в теоретичній механіці, теорії машин і механізмів, опорі матеріалів і математичному аналізі.

Отримані експериментальні результати оброблялися методами математичної статистики з використанням інженерного математичного програмного забезпечення "PTC Mathcad 15.0", програми для економіко-статистичних розрахунків "Microsoft Excel" та інших пакетів прикладних програм для ЕОМ.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Сукманюк О. М., Поліщук І. М. Аналіз способів механічного руйнування зерна. Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. Том 1. С. 7-10.

2. Поліщук І. М. Фактори, що впливають на подрібнення зерна. Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. Том 2. С. 26-28.

3. Поліщук І. М. Аналіз подрібнення зернового матеріалу. Фактори, що впливають на подрібнення зерна. Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. Том 3. С. 142-144.

Практичне значення одержаних результатів. Практичний інтерес для виробництва представляє нова технологічна схема молоткової дробарки.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 21 найменування. Загальний обсяг роботи становить 62 сторінки комп'ютерного тексту, містить 11 рисунків і 3 таблиці.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ З ПОДРІБНЕННЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА МОЛОТКОВИМИ ДРОБАРКАМИ

1.1. Аналіз способів подрібнення фуражного зерна

Способи подрібнення у виробничому процесі можуть бути класифіковані за процедурою впливу елементів зовнішнього середовища на поверхню, що розділяється. Серед них виокремлюють такі: розколювання, розчавлювання, різання, вільний удар, розламування, стирання, розпилювання, утиснення, удар тощо, що наведено на рис.1.1, що достатньо висвітлено в науковій та практичній літературі [3, 2, 3].

Ефективність процесу подрібнення та якість одержуваної продукції багато в чому залежать від способу подрібнення. Наявність фізичних і механічних властивостей матеріалу, що переробляється, а також вимоги до параметрів готової продукції визначають перевагу встановлення способу подрібнення матеріалу.

Рисунок 1.1 б відображає процес розколювання. Подрібнення утрудненим і вільним ударом представлено на рисунку 1.1 "ж" і "з", використовуються в більшості випадків з метою отримання продукції тонкого розмелювання [6].

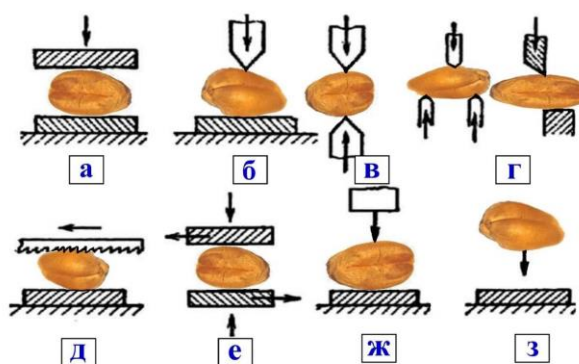


Рис. 1.1. Види подрібнення зерна: а – роздавлювання; б – розколювання; в - розламування; г – різання; д – розпилювання; е – стирання; ж – утруднений удар; з – вільний удар.

Біологічну специфіку структури зернівки фуражного зерна багато авторів розглядають як складну комплексну міцнісну конструкцію з двома структурними елементами: каркасом (скелетом), що володіє пружністю і пластичністю, і наповнювачем, що має в'язкі властивості. Міцність цієї конструкції залежить від багатьох чинників, включно зі структурою оболонок і ендоспермів, цілісністю всіх компонентів конструкції.

Основними факторами, що визначають якість зернових компонентів родини злакових, є текстура ендосперму (твердість зерна), вміст білка і міцність клейковини. При цьому структура ендосперму зерна - єдина найбільш важлива та визначальна характеристика якості, оскільки впливає на якість розмелювання одержуваного продукту та кінцеве використання в кормовиробництві [12].

Процес подрібнення зерна фуражного призначення, з огляду на наявність цих характерних якостей, проходить найчастіше ударом, а також незначною мірою іншими способами руйнування.

Фізичні характеристики фуражного зерна сприяють отриманню бажаного результату за рахунок багаторазового ударного впливу молотків, що обертаються на великих швидкостях, на продукт переробки, подальшого удару об деку внаслідок переданого молотками руху частинок і ударно-витираючої дії на рухомі елементи та взаємодії частинок між собою.

С. В. Мельников у своїх працях обґрунтував ефективність дроблення зерна ударної дії з використанням молоткових дробарок. Як зазначають дослідники, вартість ударних дробарок, заснованих на принципі вільного ударного впливу, приблизно удвічі менша, ніж у валкових дробарок, заснованих на подрібненні принципом роздавлювання, при цьому потужність електродвигуна може бути утричі меншою [7].

У зв'язку з цим технологічне обладнання для переробки зерна за допомогою його подрібнення за рахунок ударного впливу має практично однакову специфіку. Уподобання виробників тваринницької галузі переважно визначаються на користь дробарок ударного типу, принцип роботи яких

ґрунтується на руйнуванні зернового матеріалу за допомогою сили стиснення і зсуву методом обмеженого або вільного удару, до яких належать молоткові дробарки.

При цьому на підприємствах зернопереробного напрямку, що здійснюють переробку зерна на комбікорми, серед подрібнювачів мають попит дробарки зернових компонентів із горизонтальною віссю обертання ротора, яким надають переваги за рахунок експлуатаційних якостей і певних переваг.

1.2. Аналіз роботи молоткових дробарок із горизонтальним розташуванням ротора та їхні недоліки

У сільськогосподарській галузі під час виробництва кормів основними подрібнювачами зернових культур були й залишаються дробарки молоткового типу, що працюють за принципом багаторазового ударно-стираючого впливу робочих органів на матеріал.

Для процесу, що протікає в дробарках із горизонтальним розташуванням ротора, характерна низка шкідливих і небезпечних чинників, до яких належить підвищений рівень шуму та вібрації, особливо в момент здійснення технологічної операції.

Як зазначено в роботі авторів, у процесі широких виробничих випробувань дробарок конструкції було відзначено, що під час подрібнення зерна в дробарках із горизонтальною віссю обертання ротора віброактивність цих машин вища, ніж віброактивність дробарок із вертикальним ротором. Однак молоткові дробарки з вертикальним розташуванням ротора мають суттєвий недолік - нерівномірне зношування молотків верхніх ярусів. Як було зазначено низкою авторів, основне навантаження подрібнюваного продукту припадає на деки і молотки верхніх ярусів, які піддаються інтенсивному зносу, при цьому термін служби яких на верхніх ярусах істотно коротший, ніж на рівнях кожного ярусу, розташованих нижче. Це може порушувати загальне динамічне балансування такого ротора.

Зазначеним пояснюється той факт, що дробарки з вертикальним ротором знаходять обмежене застосування на виробництві.

У процесі експлуатації відбувається природне зношування машини та обладнання, що супроводжується осіданням фундаменту, деформацією та зношуванням деталей, порушенням центрування валів, збільшенням зазорів, і в кінцевому підсумку, підвищенням вібрації.

Автори роботи [3] вказують, що в процесі роботи молоткової дробарки встановлено наявність шкідливих і небезпечних чинників підвищеної шумності та вібрації, що чинять негативний вплив на фізичне та психологічне здоров'я працівника.

Проведені дослідження авторів вказують, що вібрація основи фундаменту даного подрібнювача серйозно впливає на стабільність її роботи. Зі збільшенням сили удару та кута зіткнення збільшується зміщення швів фундаменту, а також максимальне напруження, при цьому марка бетону мало впливає на стійкість фундаменту.

У роботах [1,5] автори зазначають, що молоткові дробарки в процесі експлуатації створюють значний шум і вібрації, що перевищують санітарні норми та негативно впливають на надійність і довговічність машин, а також ускладнюють роботу персоналу та сприяють руйнуванню залізобетонних конструкцій.

Авторами [6] при виконанні досліджень на зернодробарці з метою оптимізації їхньої акустичної поведінки виявлено негативні фізичні впливи чинників небезпечного шуму, який виникав у навколишньому середовищі фермерів і працівників ферми під час подрібнення матеріалу в зернодробарках, де впродовж тривалого часу в результаті впливу шуму реєструвалися випадки втрати слуху. При цьому одним зі способів запропоновано зменшення амплітуди вібраційного руху елементів у зернодробарці, що згодом, як зазначено авторами, сприяє зниженню рівня шуму, створюваного елементами машини. Внесені

конструктивні зміни в бункер і опорну конструкцію дробарки дали змогу знизити вібрацію і рівень шуму на 2,6 дБ (А) для обслуговуючого персоналу.

Під час проведення досліджень авторами [7] встановлено, що вібрація і шум дробарки змінюються залежно від того, який продукт подрібнюється. Значною мірою відрізняються характеристика шуму і вібрація на холостому ходу. Так, вібрація під час подрібнення продукту переважає на низьких і середніх частотах, а для роботи дробарки на холостому ходу характерна високочастотна вібрація. Але на середніх і високих частотах шум від подрібнення продукту на 10-15 дБ вищий, як порівняти з шумом на холостому ходу. Причиною цього є зіткнення продукту з робочими органами дробарки, при цьому подрібнення продукту істотно впливає на шумовідбраційні характеристики молоткової дробарки.

У джерелі [12] зазначено, що в дробильному відділенні будь-якого підприємства АПК головним джерелом шуму є молоткова дробарка. Звук, який видає дробарка, виходить безпосередньо від зони подрібнення через ударну взаємодію робочих органів машини з матеріалом, що подрібнюється, що відбувається в ній. Еквівалентний рівень звуку при холостому ході склав 89,9 дБА, при повному завантаженні - 93,3 дБА, при підході працівника безпосередньо до обладнання показники рівня шуму зростають на 6-12%.

Під час виміру рівня вібрації за параметрами L_v у дробильному відділенні, у зоні технічного контролю виконуваних процесів на холостому ходу становили 136 дБА, за повного завантаження - 152 дБА.

У процесі переробки, очищення зерна спостерігаються підвищений шум, вібрація органів машин [6, 14].

Авторами [11] на промислових підприємствах у різних переробних галузях вивчено переробні машини, що випромінюють шум. Результати дослідження показали, що молоткова дробарка з-поміж подрібнювачів для подрібнення матеріалів виробляла найвищий рівень шуму, середнє значення якого становило - 98,4 дБ (А), у виробництві безалкогольних напоїв, який перевищує

рекомендації FEPA та OSHA (90 дБ (A)), що становить для дробарки під час подрібнення матеріалів (87,5%). Як зазначено зазначеними авторами, за останні 20 років рівень шуму в даній індустрії знизився на 0,58 дБ (A), а при подрібненні матеріалу в індустрії безалкогольних напоїв - на 9,66 дБ (A).

У тій самій роботі [3] зазначається, що інтенсивний шум, створюваний у процесі подрібнення молотковими дробарками, є серйозним стресовим фактором, що чинить негативний вплив на центральну нервову систему, порушуючи її функціональну регуляцію, а також може призводити до різних деструктивних процесів в інших системах організму. Гучний шум може також знизити увагу працівника, швидкість його реакції та здатність аналізувати ситуацію. Усе це може призвести до погіршення продуктивності та якості роботи. Причинами професійних захворювань (вібраційна хвороба або неврит), що призводять до втрати працездатності та в особливо важких випадках до інвалідності, може бути робота з молотковою дробаркою, зважаючи на систематичні впливи вібрації на працівника. Із зазначеного випливає, що робота з молотковими дробарками пов'язана з низкою шкідливих чинників, що завдають серйозної шкоди фізичному і психологічному здоров'ю працівника.

Також у роботі [9] показано, що шум і вібрація є одними з основних шкідливих виробничих факторів, боротьбі з якими надається особливе значення.

У нормальному режимі роботи виробниче обладнання може викликати вібрацію, яка чинить негативний вплив як на персонал, що обслуговує, так і на обладнання, що бере участь у технологічному ланцюжку. Вібраційні впливи на конструкції та комплектувальні елементи обладнання можуть спричинити втомні тріщини, зношення та послаблення з'єднань, що зі свого боку може призвести до збою в роботі обладнання та подальшої відмови.

У роботі [13] наголошено на негативних наслідках шуму і вібрації, які завдають непоправної шкоди здоров'ю, впливаючи на кору головного мозку, чинячи подразнювальну дію, сприяючи виникненню травматизму, порушенню процесу травлення, зміні об'єму внутрішніх органів. Сильний шум в умовах

виробництва завдає шкоди, впливаючи на працездатність обслуговуючого персоналу, прискорюючи процес стомлення, погіршення слуху, ослаблення уваги та уповільнення реакцій. З цих причин шум викликає небажану реакцію всього організму людини.

Необхідно зазначити, що згідно із зазначеними дослідженнями авторів, вплив шкідливих виробничих чинників, таких як шум і вібрація машин та обладнання, на людину має кумулятивний характер і призводить до такого негативного явища, як професійні захворювання.

Таким чином, процес переробки зернової сировини на комбикорми з використанням молоткових дробарок із горизонтальним валом ротора супроводжується вібрацією та шумом, які значно перевищують санітарні норми, що свідчить про суттєвий недолік, які, як наслідок, ведуть до збільшення енергоємності процесу подрібнення.

Коливальний процес, що може виникнути внаслідок періодичних зсувів центру тяжіння окремих складених частин ротора молоткової дробарки під час обертання, від порушення рівноваги, яке воно спричиняє... мало в статичному стані, а також при періодичній зміні форми молотків, визначається як вібрація.

Основні причини появи вібрацій у молотковій дробарці - сили, спричинені нерівноваженістю робочих органів, що обертаються, дисбалансу ротора та його складових частин, а також виникнення ударних впливів на робочі органи під час подрібнення зернофуражу.

Наявний взаємозв'язок джерела коливань ротора з корпусом дробарки через підшипники, а також наявність вібрації зумовили необхідність розгляду основних вібраційних ефектів від дій дробарки з горизонтальним валом ротора і породжуючих чинників, а також зведення до мінімізації цього негативного явища.

Наявність ударних імпульсів нерозривно пов'язана з нерівномірним завантаженням матеріалом, що подрібнюється, співвісних молотків, що призводить до дестабілізації комплексної внутрішньої системи взаємодії ротора

та шарнірно закріплених ударних елементів, яка призводить до незбалансованості системи, що обертається, внаслідок наявності неідеальних умов обертання та спричинює неврівноваженість ротора та вібрацію за рахунок впливів на елементи підшипникового вузла.

Засобом, що забезпечує вібробезпеку і запобігання розвитку негативних чинників, є створення і застосування вібробезпечних машин, або поліпшення їхніх якостей.

Таким чином, дробарки ударної дії з горизонтальним розташуванням ротора поряд з великою кількістю переваг за продуктивністю, компактністю, технічними та технологічними властивостями проти дробарок інших конструкцій володіють деякими експлуатаційними недоліками, що вимагає розгляду властивостей самобалансування молоткової дробарки з горизонтальною віссю обертання валу ротора, що здатне знизити вібраційне навантаження на працівника. Присутність цих недоліків частково є недосконалістю конструкції, яка полягає в односторонньому завантаженні подрібнюваного матеріалу через завантажувальну горловину, розташовану в верхній частині подрібнювача, чим і обумовлюється підвищена віброактивність.

Зазначене свідчить про те, що відшукування властивостей самобалансування молоткової дробарки з горизонтальним розташуванням ротора, що здатне знизити рівень віброактивності, та створення нового технологічного рішення з наявністю мінімального значення вібраційного навантаження в умовах виробничої експлуатації належить до числа вельми важливих завдань для комбікормового виробництва у сільському господарстві, які слід досліджувати та визначати теоретичними та емпіричними методами.

Згадані недоліки потребують принципово нових конструктивно-технічних рішень і розробок конструкції молоткових дробарок з горизонтальними осями обертання ротора, що дають змогу знизити віброактивність, отже, поліпшити роботу обслуговуючого персоналу за рахунок зниження впливу коливальної

системи в умовах вібронавантажень і збільшити надійність і довговічність подрібнювача за рахунок зниження механічних напружень.

Висновки по розділу

Аналіз наукових праць перерахованих вище джерел дає змогу зробити висновок, що ведуться дослідження щодо поліпшення конструкцій і робочого процесу молоткових дробарок, спрямовані на зниження шуму, віброактивності та енерговитрат на виробництво одиниці продукції. Однак для серійного виробництва деякі конструктивні рішення можуть бути досить складними у виконанні, що позначається на ціні одиниці виробів. У зв'язку з цим крім удосконалення робочих режимів і комплектувальних елементів подрібнювачів молоткового типу з горизонтальною віссю обертання актуальним є створення

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Загальна програма експериментальних досліджень і вибір зернового матеріалу

Метою дослідження є встановлення закономірностей процесу подрібнення в дробарці горизонтального типу з опозитним завантаженням і визначення раціональних параметрів процесу.

Для перевірки теоретичних положень та обґрунтування висновків на основі аналітичного дослідження було розроблено програму досліджень, що включала такі аспекти:

1) перевірку теоретично отриманих даних про зменшення рівня механічних впливів, що збуджуються молотками, які є джерелом коливань, і підтвердження підвищення ефективності подрібнення процесу за рахунок опозитного завантаження;

2) вибір факторів процесу подрібнення, що протікає в молотковій дробарці з опозитним завантаженням зерна на основі теорії розмірності;

3) проведення досліджень роботи молоткової дробарки з опозитним завантаженням на лабораторному зразку;

4) опрацювання та аналіз даних, отриманих у результаті досліджень, з метою отримання регресійних моделей, що описують процес роботи молоткової дробарки з опозитним завантаженням зерна;

5) визначення оптимальних технологічних та енергетичних параметрів молоткової дробарки з опозитним завантаженням зерна на основі отриманих рівнянь регресії та результатів досліджень.

За основні культури для подрібнення приймемо пшеницю та ячмінь звичайні, вологістю 12,3 – 13,9 %.

З огляду на те, що витікання обраного зернового матеріалу проводитиметься самопливом із двох дзеркально розташованих завантажувальних горловин, для цього необхідний показник кута природного укусу. Значення кутів природних укусів обраної сировини зернових злакових культур (ячмінь, пшениця) [4] наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Кути природних укусів сировини зернових злакових культур (ячмінь, пшениця)

№ п/п	Вид сировини зернових культур	Кути природного укусу, °	
		інтервал	середнє значення
1	Ячмінь	19-21	25
2	Ячмінь лущений	25-27	24
3	Ячмінь подрібнений	42-43	42
4	Пшениця	23-25	24
5	Пшениця подрібнена	43-44	44

Як видно з наведених значень, величина кута природного укусу не перевищує 44...45 градусів, тобто продукт стікає вільно за встановлення кута, більшого за кут природного укусу. Дослідження проводили в лабораторних умовах із застосуванням загальноприйнятих і приватних методик із застосуванням спеціального обладнання згідно з ДСТУ, згідно з комплексною методикою [13], що містить відомі й адаптовані методи визначення параметрів молоткової дробарки, її динамічних характеристик та їхніх індивідуальних особливостей у період здійснення технологічної операції, а також якісних та енергетичних параметрів процесу, що забезпечують досягнення необхідної точності, достовірності, відтворюваності та адекватності отриманих даних, із застосуванням методики факторних експериментів для аналізу впливу різних комбінацій значень факторів на роботу подрібнювача.

2.2. Вибір факторів процесу подрібнення на основі теорії розмірності

Для повного представлення технологічного процесу, на стадії проектування конструкції подрібнювача, основою фізичного моделювання є

теорія подібності, що спирається на аналіз розмірностей, за допомогою якої характеристики натурних об'єктів молоткових дробарок можливо встановити простим перерахунком критеріальних співвідношень параметрів модельних об'єктів, що встановлюються експериментально.

У класичному поданні числа подібності, або інваріанти, можна отримати з аналізу розмірностей параметрів задачі, що описують процес або явище.

Вельми бажаним є отримання критеріальних співвідношень параметрів молоткової дробарки, які впливають на процес подрібнення фуражного зерна, що дасть змогу зменшити кількість змінних в експерименті та значно його спростити.

Проаналізувавши відомості щодо типорозмірів дробарок [5,6], їхніх параметрів та параметрів робочих органів, можна зробити висновок, що багато в чому конструкції однакові та відрізняються співвідношеннями діаметра та довжини ротора, чим зумовлена зміна розмірів, маси та деяких конструктивних елементів дробарок, що вони мають схожі рівні відношення лінійних розмірів молоткових дробарок та рівність усіх схожих лінійних розмірів робочих органів, що виражається сталою та рівною величиною, яка припускає геометричну подібність.

Подібність умов однозначності (початкові та граничні умови) процесів, що протікають у молоткових дробарках, забезпечується рівністю визначальних критеріїв подібності, тому що явища і процеси, що протікають у подрібнювачах цього характеру, якісно однакові (аналогічні) [12, 14]. Ці особливості формують необхідні й достатні умови для подібності явищ, процесів, що протікають під час подрібнення матеріалів у молоткових дробарках.

Для аналізу запропонованої нами молоткової дробарки з опозитним завантаженням подрібнюваного матеріалу (рисунок 2.1) застосуємо теорію розмірності.

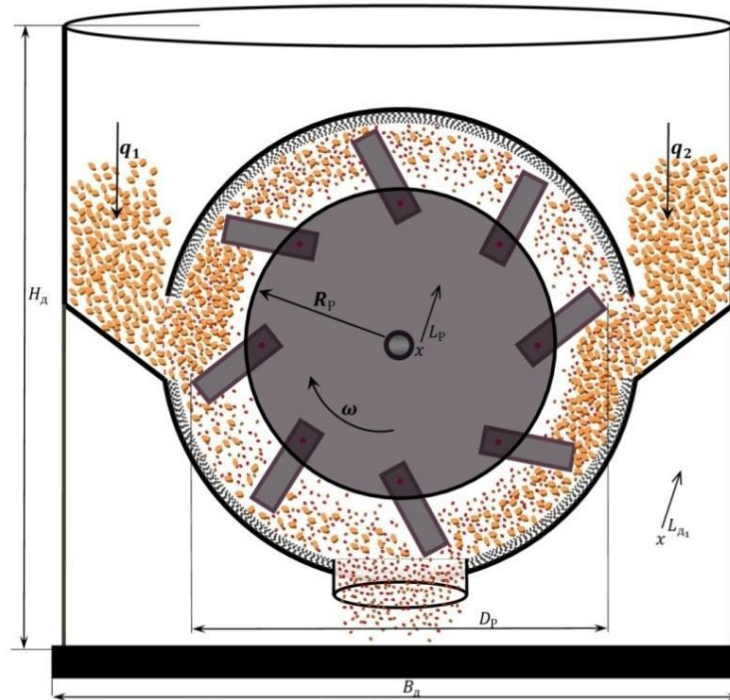


Рис. 2.1 Схема зернодробарки з опозитним завантаженням

Для визначення параметрів, що впливають на обертання ротора в щільному потоці зернових частинок, використаємо другу π -теорему. Досліджуючи розмірності змінних, що характеризують досліджувану систему "робочий орган - середовище", залежності виражаємо через основні (незалежні) розмірності системи СІ, якими є, за своєю суттю, незалежними розмірностями: довжина [L], маса [M], час [T] (або "довжина, сила, час"). Решта фізичних величин будуть "складовими", або залежними розмірностями, тобто ці розмірності можна виразити через основні.

З рівняння, наведеного в джерелах [2, 4, 5], що характеризує роботу дробарок горизонтального типу, очевидно, що визначальними параметрами фізичної моделі "робочий орган - середовище" є величини, представлені в таблиці 2.2, у якій відображено формули розмірності в класі LMT.

Як критерій оптимальності візьмемо питому енергоємність подрібнення зерна:

$$[E_i] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \frac{H \cdot M}{\text{кг}} = \frac{\text{кг} / (\text{М}/\text{с}^2) \cdot M}{\text{кг}} = \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2} \right]. \quad (2.1)$$

Таблиця 2.2 – Змінні, що описують вплив факторів на процес подрібнення в молотковій дробарці

№ п/п	Назва змінної	Позначення	Формула розмірності в класі LMT	Одиниця виміру
1	Радіус ротора	R	L	м
2	Кутова швидкість обертання ротора	ω	T^{-1}	$\frac{1}{с}$
3	Зазор між кінцями молотків і декою	δ	L	м
4	Щільність зернівки	ρ	$M \cdot L^{-3}$	$\frac{кг}{м^3}$
5	Максимальний розмір зернівок	b	L	м
6	Напруга руйнування зернівки	σ	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	$\frac{Н}{м^2} = \frac{кг}{м \cdot с^2}$
7	Подавання вихідного матеріалу в лівий отвір	q_1	$M \cdot T^{-1}$	$\frac{кг}{с}$
8	Подача вихідного матеріалу в правий отвір	q_1	$M \cdot T^{-1}$	$\frac{кг}{с}$

Замість символів величин, що входять у рівняння, замінимо їх на розмірності з таблиці:

$$F [L, (T^{-1}), L, (M \cdot L^{-3}), L, (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}), (M \cdot T^{-1}), (M \cdot T^{-1}), (M \cdot T^{-1})] = E_i. \quad (2.3)$$

Маємо рівняння з 8 невідомими. Скористаємося методами теорії розмірності, а саме π -теоревою, за допомогою якої функціональну залежність можна подати в безрозмірному вигляді, тобто у вигляді критеріїв подібності.

2.3 Опис експериментальної установки для дослідження процесу подрібнення

Для дослідження динаміки робочого процесу молоткової дробарки пропонованим способом подрібнення за різних параметрів подачі вихідного матеріалу в лівий і правий отвір на заданих компонентах зерна фуражних культур було виготовлено дослідний зразок (рисунок 2.2).

На рис. 2.2 представлено загальний вигляд лабораторної установки подрібнювача з опозитним завантаженням зерна, де наведено основні комплектувальні елементи.

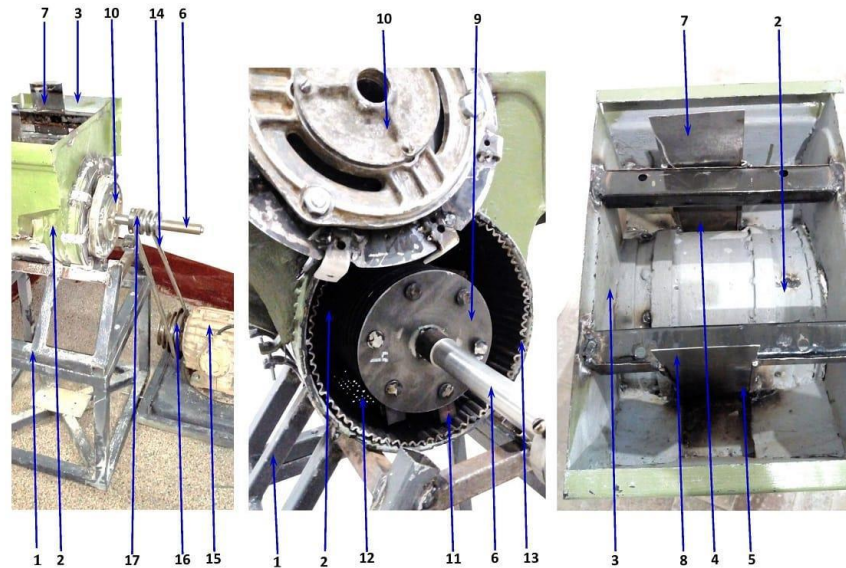


Рис. 2.2. Дослідний зразок молоткової дробарки з опозитним завантаженням зерна.

На металевій основі (рамі) 1 встановлено дробильну камеру з розміщеними на ній приводом, циліндричною камерою подрібнення з ротором у зборі 2, у верхній частині якого встановлено бункер для зерна 3 з двома різноспрямованими завантажувальними горловинами. У нижній частині бункера 3 виконані різноспрямовані горловини 4 і 5, що з'єднуються з камерою подрібнення 2, розташовані в горизонтальній площині симетрії ротора, яка проходить через його вісь обертання і збігається з віссю обертання приводного вала 6. При цьому обидві горловини мають однаковий вихідний перетин і забезпечені регульовальними пристроями. Регульовальні пристрої являють собою металеві пластини - шибери 7 і 8 для зміни прохідного перетину горловини.

Усередині камери подрібнення розміщений горизонтально розташований ротор, що складається з набору дисків 9, закріплених на приводному валу 6 (привід не показано). Напіввісь ротора барабана подрібнювача барабана 6 обертається у двох підшипникових вузлах 10, закріплених на корпусі барабана і змонтованих на загальній рамі. Ротор установки міжопорний. Підшипники 10

встановлюються на вал ротора, забезпечуючи щільну посадку з натягом. У дисках 9 на осях 18 закріплені кінцями молотки 11, з можливістю вільного обертання навколо зазначених осей. У нижній частині камери подрібнення встановлено решето 12, а на решті частини внутрішньої поверхні корпусу 2 - зубчасті деки 13.

Для поліпшення ймовірності багаторазового зіткнення молотків із матеріалом, що надходить на подрібнення, у камері подрібнення встановлено знімну конструкцію відбійних зубчастих дек 13 із секціями (рисунок 2.2).

Основні технічні характеристики лабораторної установки молоткового подрібнювача фуражного зерна з опозитним завантаженням наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічна характеристика лабораторної установки молоткової дробарки з опозитним завантаженням матеріалу

Найменування показника та одиниця виміру	Величина
Ширина камери подрібнення, мм	280
Внутрішній діаметр камери подрібнення, мм	230
Кількість відбійних дек, шт	76
Об'єм камери подрібнення з урахуванням деки, м ³	0,011 (10,93 л)
Довжина ротора, мм	220
Діаметр ротора, мм	165
Радіус описуваний кінцями молотків мм	99,5
Кількість секцій дисків ротора	22
Частота обертання ротора, об/хв	5 670, 6 970, 7 990, 10 030
Окружна швидкість молотків, м/сек	62 - 121
Конструктивні розміри молотка, мм	52×22×4
Маса молотка, кг	0,030
Кількість молотків на роторі, шт	133
Площа прохідного перерізу лівої та правої горловин, м ²	0,82
Потужність електродвигуна, кВт	1,6
Об'єм зернового приймального бункера, м ³	0,019
Габаритні розміри:	
- Довжина, мм	440
- Ширина, мм	350
- Висота, мм	880
Продуктивність молоткової дробарки, т/год	0,200

Ротор приводиться в рух за допомогою трифазного асинхронного електродвигуна АІР 80А2 потужністю 1.5 кВт, синхронна частота обертання

поля статора 3000 об/хв, швидкість обертання вала 2850 об/хв. Передача крутного моменту на ротор здійснюється через клиноремінну передачу 14.

Механічний привід забезпечує необхідну частоту обертання ротора для безперебійного процесу подрібнення обраних зернових компонентів. Частота обертання ротора лабораторного зразка регулюється вибором відповідного діаметру профілю струмка ведучого шківів, при цьому оберти асинхронного двигуна варіюються в широкому діапазоні перетворювачем частоти KIPPRIBOR серії AFD - M055.43 потужністю до 5.5 кВт.

Дробарка з опозитним завантаженням фуражного зерна працює наступним чином.

Зерновий матеріал під дією власної ваги (самопливом), а також під впливом вібрації, що передається від дробарки, подається горловинами 4 і 5 у камеру подрібнення 2, де, потрапляючи під один із рядів молотків 11, відкидається ними на деку 13, унаслідок удару об яку дробиться. Сам же молоток 11 внаслідок удару об зерно відхиляється на певний кут, але потім під дією відцентрових сил приймає звичайне положення. Одночасно інший ряд молотків вдаряє зерновий матеріал, що надходить із протилежно розміщеної горловини, розташованої в горизонтальній площині симетрії ротора, що проходить через його вісь обертання, відхиляючись на рівнозначний кут. Цей ряд молотків теж відхиляється на кут α і потім відцентрові сили знову повертають його у звичайне положення. Так відбувається доти, доки подрібнюваний матеріал не буде подрібнений до ступеня, за якого він пройде крізь решето і буде виведений з дробарки. Одномоментне відхилення рядів молотків, протилежно розташованих на роторі дробарки, не призводить до втрати балансування ротора і підвищення рівня вібрацій дробарки.

Подача матеріалу на подрібнювач регулюється вертикальним переміщенням регулювальних пристроїв, що являють собою металеві пластини - шибери 7 і 8 для зміни прохідного перерізу горловини.

Зміна зазору вихідного перетину горловин здійснюється за допомогою переміщення регулювальних пристроїв металевих пластин для зміни прохідного перетину горловини.

Клиноремінна передача 14 передає обертальний рух від електродвигуна 15 до ротора дробарки, який складається з набору дисків 9 і вала 6.

Комбінований шків, розміщений на електродвигуні 16, надає можливість використання в чотирьох різних швидкісних режимах роботи ротора.

У табл. 2.4 представлено основні зміни лінійної швидкості залежно від діаметра струмка ведучого шківа. Вал ротора рухомого шківа 17 отримує обертання від передачі контрприводу з урахуванням номінальної швидкості асинхронного електродвигуна та має чотири частоти обертання (5 670, 6 960, 7 980, 10 020 об/хв.), які, своєю чергою, залежать від обраного діаметра робочого профілю ручків'їв шківа на електродвигуні.

Таблиця 2.4 – Залежність частоти обертання вала контрприводу рухомого шківа від вибору діаметра робочих струмків на шківі електродвигуна

Параметри	1	2	3	4
Число обертів ведучого вала, об/хв	3 000	3 000	3 000	3 000
Діаметр ведучого шківа (ел. двигуна), мм	81,9	98,9	100,9	126,6
Діаметр веденого шківа (ротора), мм	38,9	38,9	38,9	38,9
Значення передавального відношення	1,99	2,32	2,66	3,34
Число обертів веденого шківа, об/хв	6 680	6 960	8 990	10 020
Кутова швидкість, рад/с	693,86	829,96	936,66	1 049,29
Діаметр кола, що описується кінцями молотків, мм	211	211	211	211
Лінійна швидкість молотків, м/с	62,94	88,26	99,69	111,23

Слід врахувати, що підібрана швидкість для руйнування структури міцнісної оболонки зернового компонента внаслідок потрапляння на деку від удару робочого органа та отриманих дефектів, є руйнівною.

Для досліджень використовувалися молотки з удосконаленою формою, зображені на рис. 2.3. Для підвищення надійності молотків їх пропонуємо наплавляти на робочі поверхні.



Рис. 2.3. Запропонована конструкція форми молотка дробарки.

Наплавлення зносостійкими сплавами робочих органів дробарок дає змогу значно продовжувати термін їхньої експлуатації.

Це дає змогу виготовляти робочі органи зі звичайної сталі з можливістю без зусиль проводити механообробку, а за допомогою спеціальних електродів проводити наплавлення шару зносостійкого металу на їхню робочу поверхню, що дає можливість витримувати робочий контур молотка або била і підтримувати їхню працездатність.

РОЗДІЛ 3

УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Вплив поєднання факторів на модуль розмелювання вихідного матеріалу в молотковій дробарці з опозитним завантаженням

Як критерій оптимальності Y_2 було обрано модуль розмелювання, як середньозважений діаметр частинок (модуль). Виходячи з роботи подрібнювачі фуражного зерна повинні забезпечувати такий середньозважений розмір частинок дерті (модуль розмелювання), який відповідає потребам кожного виду сільськогосподарських тварин.

З метою визначення якісної оцінки одержуваного продукту були проведені дослідження на лабораторному зразку дробарки, під час яких за допомогою ситового аналізу, на наборах сит з круглими отворами діаметром: 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 мм, встановлювався модуль розмелювання вихідного матеріалу M , та відповідність отриманого внаслідок подрібнення середньозваженому розміру частинок подрібненої сировини вимогам для годівлі сільськогосподарських тварин. Залишок на ситі з відповідними діаметрами отворів регламентується ДСТУ. За допомогою програмного забезпечення "PTC Mathcad 15.0" опрацьовано результати проведеного експерименту щодо середньозваженого розміру часток отриманої дерті під час подрібнення пшениці та ячменю за величиною модуля розмелення вихідного матеріалу M та обчислено коефіцієнти для поверхні багатовимірної поліноміальної регресії, які наведені в розрахунковій бланк-матриці, що наведена у лістингу додатків Б3 і Б4.

Рівняння регресії модуля розмелювання під час подрібнення пшениці, виходячи зі статистичного опрацювання результатів дослідів, має такий вигляд у кодованих змінних:

$$Y_2 (X_1, X_2, X_3) = 1.131 + 0.038 \cdot X_1 + 0.106 \cdot X_2 - 0.233 \cdot X_3 - 0.03 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.012 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.013 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.016 \cdot X_{12} + 0.024 \cdot X_{22} + 0.046 \cdot X_{32}. \quad (3.1)$$

Рівняння регресії в кодованих змінних для модуля розмелювання під час подрібнення ячменю, в результаті статистичного опрацювання результатів дослідів, має такий вигляд:

$$Y_2 (X_1, X_2, X_3) = 1.289 + 0.033 \cdot X_1 + 0.088 \cdot X_2 - 0.244 \cdot X_3 - 0.017 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.021 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.03 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.015 \cdot X_{12} + 0.002 \cdot X_{22} + 0.096 \cdot X_{32}. \quad (3.2)$$

Результати регресійного аналізу моделі рівняння поліноміальної регресії, записані в матриці Y , до даних, що містяться в матриці X , представлені в лістингу додатків Б3 і Б4, у рядку 2 відображено коефіцієнти детермінації, які в процесі дисперсійного аналізу становлять значення за подрібнення пшениці $R_2 = 98,9\%$, за подрібнення ячменю - $R_2 = 99,3\%$, що свідчить про адекватність моделі для залежності між змінними-предикторами та змінною відгуку Y_2 .

Для визначення області оптимальних значень чинників зі складених рівнянь регресії (3.3; 3.4) програмою "PTC Mathcad 15.0" спроектовано поверхні відгуку в аксонометрії в проєкціях на координатну площину, що представлені на рисунках 3.6; 3.7; 3.8, на яких один із чинників X_3 установлено на сталому рівні, тому що одночасне поєднання всіх незалежних змінних чинників, які беруть участь в експерименті, не дає змоги розмежувати поверхні відгуку для аналізу.

Аналізуючи отримані результати експериментальної залежності модуля розмелювання від сполучень двох із трьох чинників, можна зробити такі висновки: під час подрібнення пшениці, виходячи з проєкцій на координатну площину, за мінімального значення третього чинника кутової швидкості обертання ротора $X_3 = -1$, межі модуля розмелювання варіюються в діапазоні від 1,27 до 1,59 мм, ячменю – від 1,45 до 1,8 мм.

Після підвищення окружної швидкості молотків, при значенні третього фактора $X_3 = 0$, спостерігається зменшення середньозваженого розміру часток отриманої дерті та зниження меж діапазону, що при подрібненні пшениці варіюють у діапазоні від 1 до 1,3 мм, при подрібненні ячменю – від 1,16 до 1,41 мм. За верхнього рівня варіювання фактора збільшення значення кутової швидкості ротора до верхньої межі $X_3 = +1$, межі модуля розмелювання пшениці

варіюють у діапазоні від 0,8 до 1,1 мм, ячменю - від 1,06 до 1,22 мм. За парного поєднання змінюваних величин X_1 і X_2 і поступового вирівнювання подачі матеріалу в камеру подрібнення спостерігається збільшення модуля розмелювання і збільшення середньозваженого розміру частинок від дрібного до більшого розмелювання.

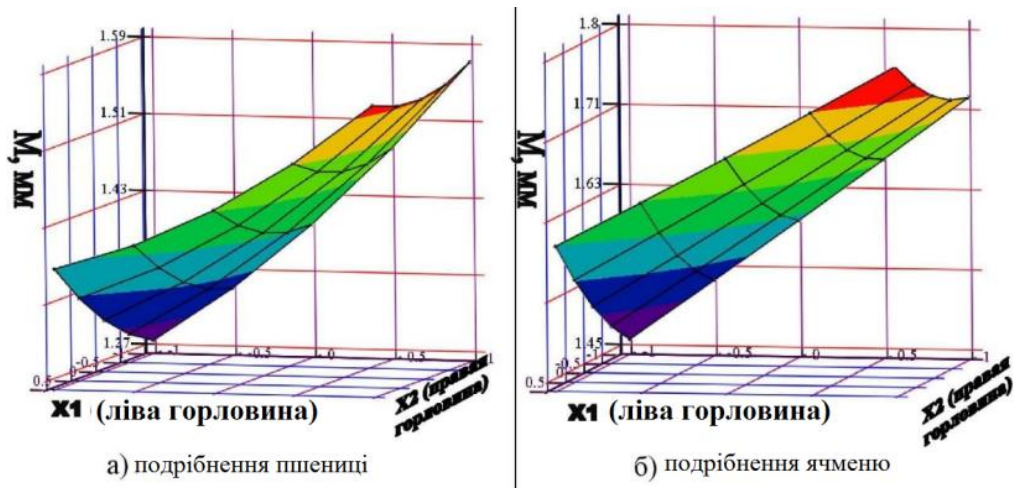


Рис. 3.1. Поверхня відгуку, що характеризує вплив сполучень чинників подачі вихідного матеріалу в лівий X_1 і правий отвір X_2 , при значенні третього чинника рівняння $X_3 = -1$, на величину модуля розмелювання Y_2 .

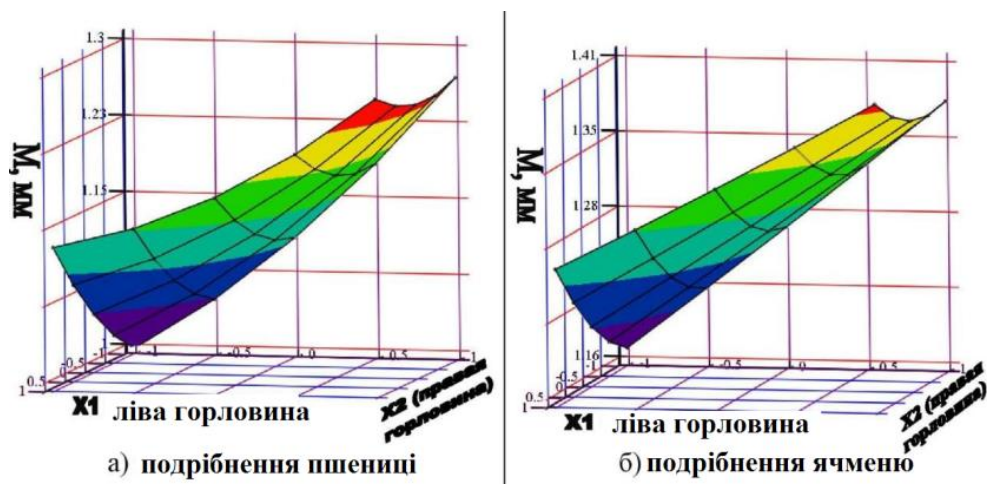


Рис. 3.2. Поверхня відгуку, що характеризує вплив сполучень чинників подавання вихідного матеріалу в лівий X_1 і правий отвір X_2 , за значення третього чинника рівняння $X_3 = 0$, на величину модуля розмелювання Y_2 .

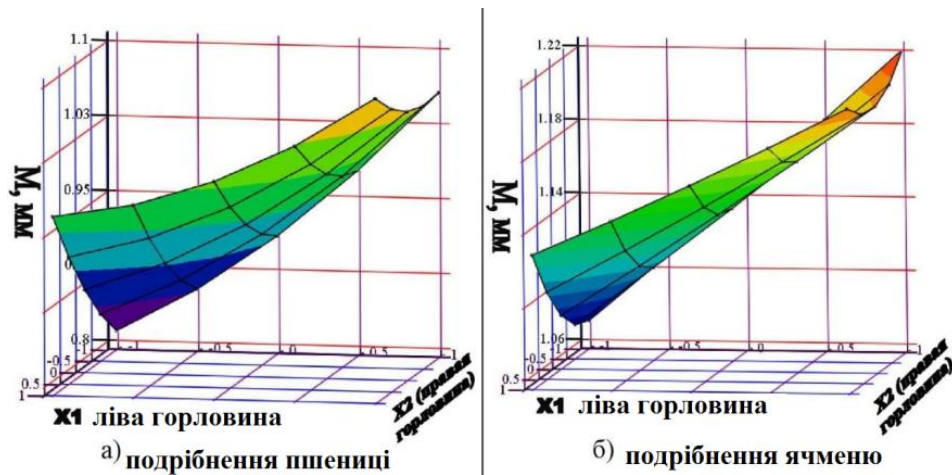


Рис. 3.3. Поверхня відгуку, що характеризує вплив сполучень чинників подавання вихідного матеріалу в лівий X_1 і правий отвір X_2 , за значення третього чинника рівняння $X_3=+1$, на величину модуля помелу Y_2 .

Таким чином, при збільшенні значення третього фактора кутової швидкості обертання ротора модуль розмелювання стає меншим.

За подрібнення пшениці та парного поєднання чинників X_1 і X_2 спостерігається збільшення розміру частинок дерті та перетворення тонкощі помелу згідно з ДСТУ з дрібного до середнього помелу та за парного співвідношення подачі матеріалу в завантажувальні горловини, в помелі спостерігається переважання діаметру частинок більших розмірів.

Під час оптимізації процесу подрібнення пшениці та ячменю, використовуючи середовище MathCAD, для відшукування значення чинників, за яких досягається локальний мінімум і максимум значень функції модуля розмелювання. Отримано розрахункові значення чинників, представлені в лістингу додатків Б3 і Б4, які відображають, що для отримання продукції тоншого помелу, необхідне збільшення кутової швидкості ротора і зниження подачі вихідного матеріалу в завантажувальні горловини як у парному співвідношенні, так і окремо. Для отримання продукції більшого дроблення і грубого помелу необхідне парне поєднання чинників X_1 і X_2 і максимальне зниження значення кутової швидкості X_3 .

Виходячи з вищевикладеного можна стверджувати, що розмір частинок продукту, одержуваного після розмелювання зерен за допомогою молоткової

дробарки з опозитним завантаженням, підходить для використання в годівлі сільськогосподарських тварин різних статевовікових груп і видів і відповідає зоотехнічним нормам, які висуваються до комбікормів.

3.2 Особливості динаміки дробарок з опозитним завантаженням вихідного матеріалу

З метою зниження технологічної віброактивності молоткових дробарок нами запропоновано схему їх завантаження зерном через два бічних, дзеркально розташованих завантажувальних пристрої [9].

Розглянемо деякі динамічні властивості дробарки з опозитним завантаженням вихідного матеріалу порівняно з дробаркою, оснащеною традиційним завантажувальним пристроєм. Принципові схеми завантажень дробарок, а також положення діаметрально розташованих молотків представлені на рис. 3.4.

Оскільки нас насамперед цікавить врівноваженість барабана, то динамічна система з двома молотками, розміщеними на діаметральних лініях "а-а" барабана, що проходять через вісь його обертання O та осі O_1 і O_2 обертання молотків у шарнірах підвісу, дає багато інформації з цього питання.

Вважаємо, як і раніше, що барабан обертається рівномірно з кутовою швидкістю ω .

У дробарці з верхньою подачею (див. рис. 3.4а), як було показано в попередньому розділі, молоток після удару по шару вихідного матеріалу відхиляється на більший кут, ніж молоток на протилежному боці, який багато в чому відновив своє деяке середнє положення після удару. Якщо позначити кути відхилення молотків як φ_1 і φ_2 , то відповідні відцентрові сили від молотків визначаються за формулами (див. (3.9))

$$P_1 = m\omega^2 \sqrt{R^2 + r^2} + 2Rr \cos \varphi_1,$$

$$P_2 = m\omega^2 \sqrt{R^2 + r^2} + 2Rr \cos \varphi_2.$$

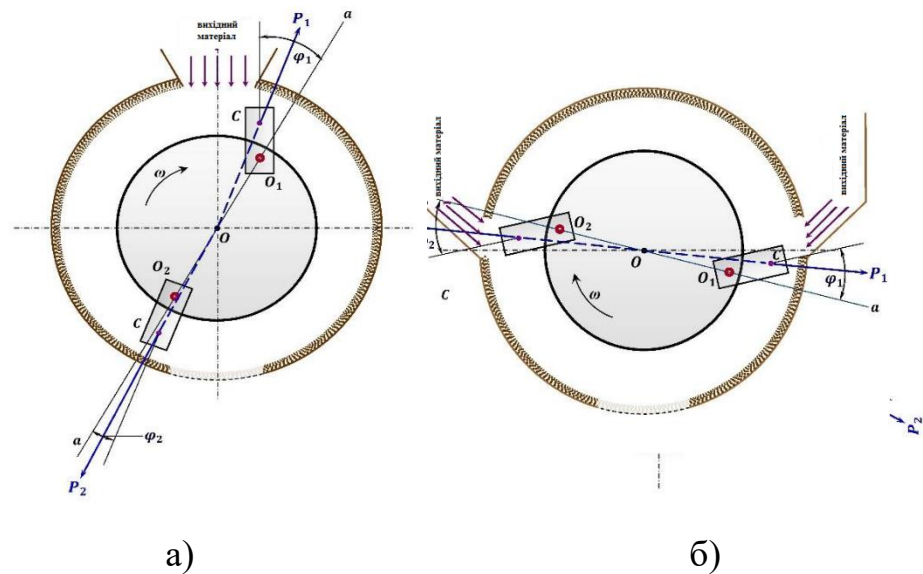


Рис. 3.4. Динамічні схеми системи барабана з двома діаметрально розташованими молотками: а) з верхньою подачею матеріалу; б) з опозитною подачею в бічні завантажувальні пристрої

Оскільки $\varphi_1 > \varphi_2$, то $P_1 < P_2$, що означає незбалансованість системи і появу технологічної віброактивності.

Зовсім інша динаміка молотків простежується при опозитному завантаженні дробарки (див. рис. 3.4 б). Тут під час одночасного удару обох молотків по вхідних шарах вихідного зерна молотки відхиляються приблизно на однакові кути, тобто $\varphi_1 \approx \varphi_2$. Відповідно $P_1 \approx P_2$. Це означає, що теоретично можливе повне врівноваження барабана дробарки (у сенсі усунення технологічної віброактивності).

Це перша позитивна властивість опозитного завантаження вихідного матеріалу.

Друга полягає в тому, що амплітуда кутових хитань молотків на своїх шарнірах зменшується приблизно удвічі, оскільки у стільки ж зменшується подача вихідного матеріалу на кожен молоток і відповідні ударні імпульси. Як буде показано далі, це знижує непродуктивну витрату енергії в шарнірах молотків.

Ці теоретичні висновки щодо дробарки з опозитним завантаженням ґрунтуються на припущенні, що забезпечено абсолютно однакову подачу

вихідного матеріалу в кожне з опозитних вікон. Реально завжди спостерігаються флуктуації подачі у зв'язку з мінливістю фізико-механічних властивостей фуражного зерна. Тому можливі деякі малі випадкові відхилення від теоретичних оцінок.

3.3. Оцінка одержуваного продукту за відносною (за масою) кількістю цілих зерен

У результаті опрацювання даних, що містяться в матриці X , та отриманих результатів, записаних у матриці Y , за значенням відносної (за масою) кількості цілих зерен $Ц$ (%) як залишку на решеті з діаметром отворів 3-5 мм, де за вихідний матеріал узято пшеницю та ячмінь, за допомогою функції "polyfitstat" програмного забезпечення "PTC Mathcad 15. 0" нами обчислено коефіцієнти для поверхні регресії багатовимірною полінома, які наведені в розрахунковій бланк-матриці додатків Б7 і Б8, на підставі яких складено такі рівняння в кодованих змінних:

а) при подрібненні пшениці

$$Y_4 (X_1, X_2, X_3) = 0.725 - 0.023 \cdot X_1 + 0.367 \cdot X_2 - 0.381 \cdot X_3 - 0.063 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.001 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.17 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.131 \cdot X_1^2 - 0.133 \cdot X_2^2 + 0.161 \cdot X_3^2. \quad (3.3)$$

б) при подрібненні ячменю

$$Y_4 (X_1, X_2, X_3) = 0.365 - 0.104 \cdot X_1 + 0.046 \cdot X_2 - 0.201 \cdot X_3 + 0.111 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.058 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.057 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.055 \cdot X_1^2 + 0.065 \cdot X_2^2 + 0.009 \cdot X_3^2. \quad (3.4)$$

Результати регресійного аналізу моделі рівняння поліноміальної регресії, наведені в розрахунковій бланк-матриці додатків Б7 і Б8, відображають, що для рівнянь коефіцієнт детермінації за дисперсійного аналізу дорівнює $R^2 = 97.5\%$ за подрібнення пшениці та 95.4% за подрібнення ячменю.

Для отримання візуального представлення складених рівнянь регресії побудовано поверхню відгуку в аксонометрії, де наведено експериментальну залежність кількості цілих зерен у розмелюванні від сполучень двох із трьох чинників подачі вихідного матеріалу в лівий отвір X_1 та правий отвір X_2 , за

умови встановлення на постійному рівні третього чинника кутової швидкості обертання ротора $X_3 = -1; 0; +1$.

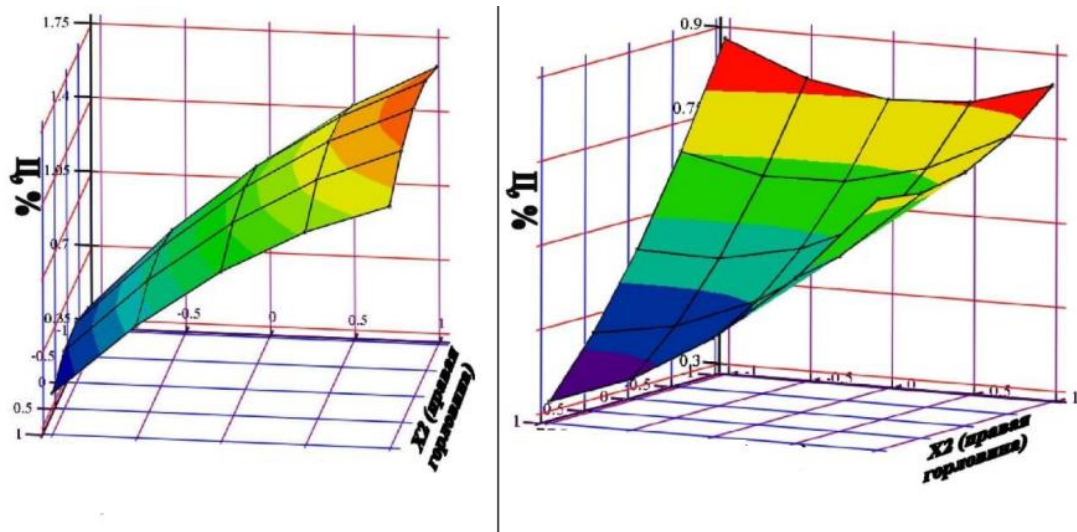


Рис. 3.5. Поверхня відгуку, що характеризує вплив сполучень чинників подачі вихідного матеріалу в ліву X_1 і праву завантажувальну горловину X_2 , при значенні третього чинника рівняння $X_3 = -1$, на показник відносної (за масою) кількості цілих зерен у розмелюванні Y_4

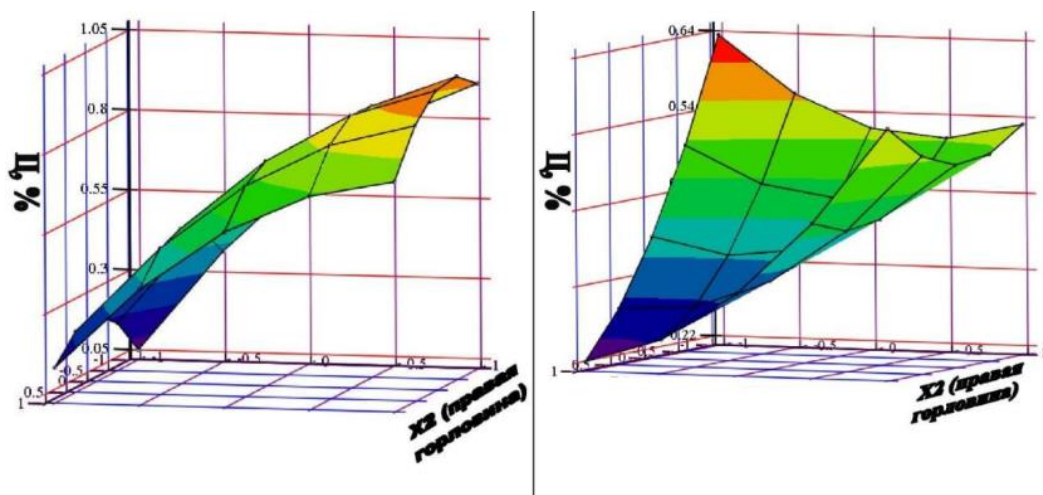


Рис. 3.6. Поверхня відгуку, що характеризує вплив сполучень чинників подачі вихідного матеріалу в ліву X_1 і праву завантажувальну горловину X_2 , при значенні третього чинника рівняння $X_3 = 0 = const$, на показник відносної (за масою) кількості цілих зерен у помелі Y_4

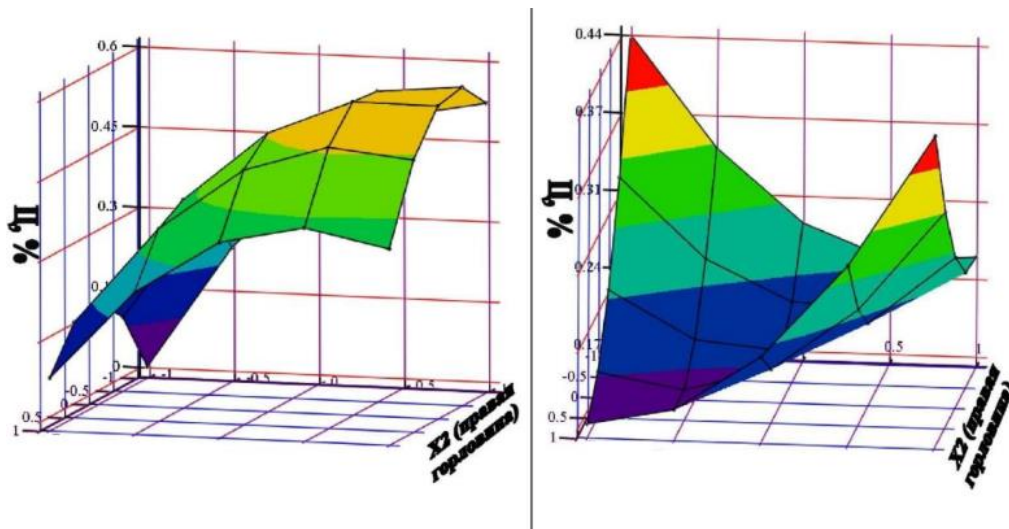


Рис. 3.7. Поверхня відгуку, що характеризує вплив сполучень чинників подачі вихідного матеріалу в ліву X_1 і праву завантажувальну горловину X_2 , при значенні третього чинника рівняння $X_3 = +1 = const$, на показник відносної (за масою) кількості цілих зерен у розмелі Y_4

Аналізуючи результати наведеного матеріалу (рис. 3.5, 3.6 і 3.7), можна зробити такі висновки: виходячи з проєкцій на координатну площину, за мінімального значення третього фактора кутової швидкості обертання ротора $X_3 = -1$, межі показника відносного (за масою) показника кількості цілих зерен у розмелюванні пшениці варіюються в діапазоні від 0,35 до 1,75 %, ячменю - у межах від 0,31 до 0,87 %.

Після підвищення окружної швидкості молотків, за значення третього фактора $X_3 = 0$, спостерігається зниження кількості цілих зерен у розмелюванні та звуження меж діапазону, які під час подрібнення пшениці варіюються в діапазоні від 0,05 до 1,05 %, під час подрібнення ячменю межі діапазону розширюються від 0,22 до 0,66 %. При збільшенні кутової швидкості ротора до верхньої межі $X_3 = +1$, кількість цілих зерен у розмелі під час подрібнення пшениці варіюється в межах від 0 до 0,6%, ячменю - від 0,17 до 0,44%, при цьому межі діапазону також звужуються.

Мінімальне значення кількості цілих зерен у розмелі Π (%) у процесі подрібнення пшениці спостерігається за умови подачі вихідного матеріалу в ліву завантажувальну горловину X_1 , а також за мінімального парного подавання

матеріалу. Максимальне значення цілих зерен у розмелі під час подрібнення пшениці спостерігається під час подавання вихідного матеріалу в праву завантажувальну горловину X_2 . За парної подачі одночасно в завантажувальні горловини кількість цілих зерен у розмелі незначно менша, ніж під час подачі вихідного матеріалу в праву завантажувальну горловину X_2 . Зі збільшенням кутової швидкості X_3 межі діапазону кількісного співвідношення цілих зерен у розмелюванні поступово зсуваються в бік зниження в 1,5 раза, до нижнього значення шкали до нульових значень.

У процесі подрібнення ячменю мінімальна величина кількості цілих зерен у розмелюванні спостерігається під час подачі вихідного матеріалу в ліву завантажувальну горловину X_1 , максимальна - під час подачі вихідного матеріалу в праву завантажувальну горловину X_2 . Зі збільшенням величини третього фактора гіперповерхня набуває більш пологої структури, і поступово знижується до нижнього значення шкали. Під час подрібнення ячменю збільшення кутової швидкості X_3 також призводить до зниження величини і меж діапазону цілих зерен у помелі в 1,2 раза.

За парного поєднання чинників X_1 і X_2 та поступового вирівнювання рівномірної подачі матеріалу до камери подрібнення, спостерігається зниження кількості цілих зерен у розмелюванні, порівнюючи з односторонньою подачею в правий отвір X_2 , одностороння подача в лівий отвір X_1 призводить до зменшення кількості цілих зерен.

Парне поєднання чинників X_1X_3 і встановлення X_2 на нижньому рівні призводять до мінімального значення кількості цілих зерен у розмелюванні, порівняно з парною взаємодією X_2X_3 , за умови встановлення X_1 на нижньому рівні, або парного подавання матеріалу в камеру подрібнення.

Загалом збільшення кутової швидкості ротора призводить до суттєвого зниження кількості цілих зерен у розмелі, до фактично нульових значень.

Висновки по розділу

Результати експерименту засвідчили, що одностороннє завантаження матеріалу в горловину камери подрібнення, розташовану з боку обертових молотків, що здійснюють рух вертикально вниз за низхідною траєкторією X_2 , призводить до збільшення величини віброприскорення. Повітряний потік, створений обертовими ударними елементами в камері подрібнення, а також повітряно-продуктовий шар, що обертається, створюють перешкоду проникненню матеріалу всередину камери подрібнення дробарки з горловини, розташованої з боку обертових молотків, які здійснюють рух вертикально вгору за висхідною гілкою траєкторії, що зумовлює меншою мірою вплив чинника X_1 на величину віброприскорення.

Під час подрібнення пшениці та ячменю величина віброприскорення знижується до нижньої межі досліджуваного діапазону, за умови парного подавання матеріалу, зі збільшенням об'єму матеріалу в горловину, розташовану з боку обертових молотків, які здійснюють рух вертикально вгору по висхідній гілці траєкторії, рівень вібрації підвищується за одностороннього подання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дробильні машини молоткового типу з горизонтальним барабаном випромінюють шум і породжують вібрацію, особливо в момент здійснення технологічних операцій, тобто під час руйнування матеріалу в робочій камері. Це зумовлено невривноваженістю ударних реакцій на робочих органах і відхиленням на різні кути (від радіального напрямку) протилежних молотків. За даними літературних джерел, рівень віброактивності підшипникових вузлів дробарок досягає 0,014...0,020 м/с, рівень шуму – 103 дБА.

У результаті отриманих результатів на дробарці з опозитним завантаженням та оптимізації процесу подрібнення пшениці виявлено раціональні значення конструктивно-режимних параметрів: подавання вихідного матеріалу в лівий отвір (q_1)=0,078 $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, подавання вихідного матеріалу в правий отвір (q_2)=0,054 $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, кутова швидкість обертання ротора (ω)=457,3 рад/с, за яких значення енергоємності дає змогу досягнути мінімуму $E=4,86 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{т}\cdot\lambda}$. Значення критеріїв подібності для процесу подрібнення пшениці становили такі величини: $\pi_1=2,366$; $\pi_3=1,449$; $\pi_4=1,282\times 10^{-4}$. Вищевказані критеріальні співвідношення конструктивно-режимних параметрів дають змогу проектувати типорозмірний ряд молоткових дробарок з опозитним завантаженням.

Перевірка характеристик енергоємності, шуму і показників віброприскорення показала поліпшення цих характеристик при опозитному завантаженні зерна порівняно з традиційним завантаженням. Так, під час подрібнення пшениці зниження енергоємності процесу досягає 8,2 %, шуму – 2,5 %, віброприскорення – 11,5 %. Для ячменю відповідні показники зниження становлять: енергоємності – 19,9 %, шуму – 4,7 %, віброприскорення – 14,9 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Новицький А. В. Підвищення безвідказності кормодробарок конструкторсько-технологічними методами на основі структурного аналізу їх надійності: дис. ... кандидата технічних наук : 05.05.11 / Новицький Андрій Валентинович ; Національний аграрний університет. Київ, 2001. 190 с.
2. Бойко А. І., Новицький А. В. Підвищення надійності кормодробарок та подрібнювачів. Механізація сільськогосподарського виробництва. К. : НАУ, 1997. Т. III. С. 6 – 8.
3. Шпиганович Т. О., Ялпачик О. В. Дробарка прямого удару з системою сепарування зерна та продуктів подрібнення. Техніка і технологія АПК : науково-виробничий журнал. К., 2011. №12 (27). С. 7 – 10.
4. Єгоров Б. В., Давиденко Т. М. Вдосконалення підготовки концентрованих кормів при виробництві повноцінних комбікормів для сільськогосподарських тварин. Корми і кормовиробництво: міжвідомчий тематичний науковий збірник Ін-ту кормів УААН. Вінниця, 2008. Вип. 61. С. 135 – 140.
5. Ібатуллін І. І., Мельник Ю. Ф., Отченашко В. В. Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин: навчальний посібник. Київ, 2014. 422 с.
6. Ібатуллін І. І., Мельничук Д. О., Богданов Г. О. та ін. Годівля сільськогосподарських тварин: навчальний посібник. Київ, 2006. 444 с.
7. Горобець В. Г., Сердюк А. М. Дослідження пускових характеристик асинхронного двигуна для привода роторно-пульсаційного апарата з використанням частотного перетворювача. Енергетика і автоматика. 2023. №1. С. 122-135.
8. Горобець В. Г., Сердюк А. М. Експериментальне дослідження процесів приготування рідких зернових кормів в роторно-пульсаційному апараті. Енергетика і автоматика. 2022. №4. С. 74-85.

9. Gorobets V. G., Trokhaniak V. I., Serdyuk A. M. Numerical simulation of hydrodynamics and heat transfer processes in rotor-pulsing apparatus for preparation of liquid feed. *Енергетика і автоматика*. 2019. №5, С. 22-29.

10. Savinyh P., Aleshkin A., Nechaev V., Ivanovs S. Simulation of particle movement in crushing chamber of rotary grain crusher: 16th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. 2017. P. 309-316.

11. Горобець В. Г., Гескін Д. В. Методи приготування рідких кормів за допомогою роторно-пульсаційного апарата. *Науковий вісник НУБіП*. 2013. Вип. 184. Ч. 1 С. 241-246.

12. Горобець В. Г., Гескін Д. В. Визначення умов руйнування (подрібнення) часточок різної форми при застосуванні роторно-пульсаційного апарата (РПА). *Науковий вісник НУБіП*. 2013. Вип. 184. Ч. 2, С. 65-70.

13. Соломка О. В. Аналіз процесу подрібнення зернових матеріалів. *Вісник Харківського національного технічного університету ім. Петра Василенка*. Харків, 2009. Вип. 78. С. 132 – 140.

14. Олексієнко В. О. Підвищення ефективності роботи малогабаритних зернових молоткових кормодробарок: дис. ... кандидата технічних наук : 05.05.11 / Олексієнко Вадим Олександрович ; Таврійська державна агротехнічна академія. Мелітополь, 2006. 173 с.

15. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: Навч. посібник / Дацишин О. В., Ткачук А. І., Гвоздев О. В., Ялпачик Ф. Ю, Гвоздев В. О. ; за ред. О. В. Дацишина. Вінниця: Нова Книга, 2009. 488 с.

16. Ревенко І. І., Брагінець М. В., Заболотько О. О. *Машини та обладнання для тваринництва*. К. : Кондор, 2011. 396 с.

17. Шпиганович Т. О., Ялпачик О. В. Обґрунтування конструктивних параметрів дробарки зерна прямого удару з попередньою сепарацією зернового матеріалу. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ, 2010. Вип. 10. Т.3. С. 23 – 35.

18. Сухенко Ю. Г., Сухенко В. Ю., Хоменко С. В. Підвищення довговічності робочих органів дробарок для зерна. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. К. : НУБіП України, 2010. Вип. 144. Ч.5. С. 260 – 267.

19. Сукманюк О. М., **Поліщук І. М.** Аналіз способів механічного руйнування зерна. Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. Том 1. С. 7-10.

20. **Поліщук І. М.** Фактори, що впливають на подрібнення зерна. Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. Том 2. С. 26-28.

21. **Поліщук І. М.** Аналіз подрібнення зернового матеріалу. Фактори, що впливають на подрібнення зерна. Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. Том 3. С. 142-144.