

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Нонік Денис Миколайович

УДК 631.3.022.3:631.363

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБМОЛОТУ ЗЕРНОВИХ
КУЛЬТУР МОЛОТИЛЬНО-СЕПАРУЮЧИМ
ПРИСТРОЄМ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ТИПУ**

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
_____ Нонік Д.М.

Керівник роботи

Дерев'янка Д.А.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Нонік Денис Миколайович. Удосконалення процесу обмолоту зернових культур молотильно-сепаруючим пристроєм диференційного типу. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

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

В результаті проведеного в магістерській роботі аналізу способів обмолоту пристроїв і технологій, що передбачають застосування серійно випускається техніки для обмолоту зернових культур, була запропонована конструкція молотильно-сепаруючого пристрою диференційного типу і методика технологічного розрахунку конструкційних параметрів і кінематичного режиму роботи робочих органів при найбільш якій роботі пристрою.

При графоаналітичному аналізі математичних моделей і поверхонь відгуку встановлено: найбільший вплив на енергоємність процесу мають фактори X_1 – подача зернової маси і X_2 – лінійна швидкість батога; оптимальні значення (поєднання) досліджуваних факторів, що відповідають мінімальній енергоємності процесу, яка дорівнює 4,86...6,09 кДж/кг при заданій якості обмолоту зернової маси знаходяться в межах: подача – 2,85...3,15 кг/с, зазор на виході із зони обмолоту – 6,0...6,2 мм, кут установки пружно-демпфуючого елемента ротора – 56,6...58,6 град., окружна швидкість бичів в середньому перерізі аксіального ротора – 17,8...18,2 м/с.

В результаті лабораторних експериментальних досліджень встановлено: раціональне конструктивне виконання сепаруючого прутково-планчастого підбарабання змінного «живого» перетину; раціональне конструктивне виконання аксіального ротора суміщеного типу; раціональна лінійна швидкість обертання бичів у зворотному русі – 15,2...21,4 м/с, що підтверджує результати теоретичних досліджень МСП диференційованого обмолоту; при такому виконанні показники роботи МСП мають оптимальні значення: продуктивність – до 3,2 кг/с; недомолот – 1,09% при обмолоті пшениці і 1,26% при обмолоті ячменю; дроблення насіння 0,68% при обмолоті ячменю і 1,29% при обмолоті пшениці; якість роботи відповідає агротехнічним вимогам.

Ключові слова: пшениця, ячмінь, обмолот, молотильно-сепаруючий пристрій диференційного типу, комбайн, зернові культури.

ANNOTATION

Nonik Denis Nikolaevich. Improvement of the grain threshing process using a differential type threshing and separating device. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

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

As a result of the analysis of threshing methods and technologies involving the use of mass-produced equipment for threshing grain crops, conducted in the master's thesis, a design for a differential-type threshing -separating device of a differential type and a methodology for the technological calculation of structural parameters and the kinematic mode of operation of working bodies for the highest quality operation of the device.

Graphical analysis of mathematical models and response surfaces revealed that the factors with the greatest impact on the energy intensity of the process are X1 (grain mass feed) and X2 (linear speed of the flail). the optimal values (combinations) of the studied factors corresponding to the minimum energy consumption of the process, which is equal to 4.86...6.09 kJ/kg at a given threshing quality of the grain mass, are within the following ranges: feed rate – 2.85...3.15 kg/s, clearance at the threshing zone outlet – 6.0...6.2 mm, angle of installation of the elastic-damping element of the rotor – 56.6...58.6 degrees, circumferential speed of the flails in the average cross-section of the axial rotor – 17.8...18.2 m/s.

As a result of laboratory experimental studies, the following was established: rational design of the separating bar-and-plate concave of variable “live” cross-section; rational design of the combined type axial rotor; rational linear speed of rotation of the flails in reverse motion – 15.2...21.4 m/s, which confirms the results of theoretical studies of the MSU of differentiated threshing; with this design, the performance indicators of the MSU have optimal values: productivity – up to 3.2 kg/s; threshing loss – 1.09% when threshing wheat and 1.26% when threshing barley; seed crushing 0.68% when threshing barley and 1.29% when threshing wheat; the quality of work meets agrotechnical requirements.

Keywords: wheat, barley, threshing, differential type threshing and separating device, combine harvester, grain crops.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ОБМОЛОТУ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР.....	9
РОЗДІЛ 2. БУДОВА АКСІАЛЬНО-РОТОРНОГО МОЛОТИЛЬНО- СЕПАРУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ТИПУ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	29
РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБМОЛОТУ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ МСП ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОЇ ДІЇ.....	37
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах аграрного виробництва особливого значення набуває підвищення ефективності збирання зернових культур, що безпосередньо впливає на урожайність, енергозатрати та якість кінцевої продукції. Однією з найвідповідальніших операцій у процесі збирання є обмолот, який здійснюється молотильно-сепаруючим пристроєм (МСП) зернозбирального комбайна. Саме на цьому етапі формуються основні показники втрат, травмування зерна, засміченості та якісної підготовки вороху до наступних операцій. Незважаючи на тривалий еволюційний розвиток конструкцій МСП, класичні системи, що застосовуються сьогодні, мають обмеження за умов інтенсивного збирання високоврожайних культур, при підвищеній вологості або значному вмісті бур'янів.

Останніми роками зростає інтерес до нових конструктивних рішень, які б дозволили реалізувати адаптивну, енергозберігаючу та високоефективну технологію обмолоту. У цьому контексті перспективним напрямом є використання молотильно-сепаруючих пристроїв диференційного типу, в яких забезпечується роздільне або поетапне подання зерновмісної маси на обмолот і сепарацію з урахуванням її неоднорідності. Такий підхід дозволяє зменшити втрати зерна, покращити його якість, знизити навантаження на окремі вузли МСП та оптимізувати енергоспоживання.

Удосконалення процесу обмолоту зернових культур за рахунок впровадження диференційованих режимів взаємодії вороху з робочими органами комбайна відповідає сучасним вимогам до адаптивних технологій збирання та механізації агропромислового комплексу. Актуальність теми також зумовлена необхідністю підвищення технічного рівня вітчизняної збиральної техніки, зменшення залежності від імпорту високотехнологічного обладнання та забезпечення сталого розвитку аграрного сектору.

Таким чином, дослідження, спрямоване на вдосконалення процесу обмолоту із застосуванням молотильно-сепаруючого пристрою диференційного типу, є своєчасним, практично значущим і має важливе значення для підвищення техніко-економічної ефективності збирання зернових культур.

Мета роботи: підвищення ефективності технологічного процесу обмолоту зернових культур, розробка та реалізація параметрів конструкції і режимів роботи робочих органів молотильно-сепаруючого пристрою молотарки.

Робоча гіпотеза: полягає в тому, що застосування пружно-демпфуючих елементів у конструкції молотильно-сепаруючого пристрою призведе до зниження силового впливу на зерно пшениці та ячменю під час обмолоту, що дозволяє зменшити величину пошкоджень насіння та втрат врожаю.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких наукових завдань:

- обґрунтувати форму робочої поверхні підбарабання молотильного апарату для обмолоту;
- обґрунтувати допустимий інтервал окружної швидкості ротора за критерієм пошкодження насіння в напрямку створення молотильного пристрою зі змінною швидкістю обертання ротора, тобто диференційованого типу;
- встановити вплив механічних властивостей конструкційного матеріалу робочих органів молотильного апарату на процес обмолоту пшениці та ячменю;
- провести експериментальні дослідження та розробити рекомендації щодо вдосконалення конструкції.

Об'єктом дослідження є технологічний процес обмолоту зернових культур молотильно-сепарувальним пристроєм диференційованого типу.

Предметом дослідження закономірності якості та енергоємності процесу обмолоту зернових культур досліджуваним молотильно-сепарувальним пристроєм.

Методи наукового дослідження. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних і польових умовах відповідно до апробованих

методик і базувалися на теорії планування багатофакторного експерименту. Результати експериментальних досліджень оброблялися на ПК з використанням пакетів програм «MathCad», «Microsoft Office Excel» і «Statistica-2010». У роботі використані наявні у вільному доступі наукові дослідження та розробки (книги, монографії, статті, патенти тощо).

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Дерев'янюк Д.А., Нонік Д.М. Аналіз конструктивних особливостей і силової взаємодії насіння зернових культур із робочими органами аксіально-роторного молотильно-сепарувального пристрою диференційованого типу. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

2. Нонік Д.М. Опис експериментальної установки для дослідження молотильно-сепарувального пристрою/ Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 75-77.

3. Дерев'янюк Д.А., Нонік Д.М. Обмолот зернових і зернобобових культур із використанням аксіально-роторних молотильно-сепарувальних пристроїв. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 111-115.

Практичну інтерес для аграрних підприємств представляє впровадження конструкції молотильно-сепаруючого пристрою диференційного типу, що призведе до зниження силового впливу на зернові культури під час обмолоту та дозволить зменшити величину пошкоджень насіння та втрат врожаю.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 25 найменувань.

Загальний обсяг роботи становить 45 сторінок комп'ютерного тексту, містить 9 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ОБМОЛОТУ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

1.1. Аналіз конструкцій молотильно-сепаруючих пристроїв зернозбиральних комбайнів.

Розвиток зернозбиральних комбайнів нерозривно пов'язаний з удосконаленням їхнього молотильно-сепаруючого пристрою (МСП). Саме від конструкції та параметрів МСП значною мірою залежить продуктивність і якість роботи комбайна. Історично перші комбайни з'явилися ще у ХІХ столітті – це були великі причіпні машини, що поєднували жниварку, молотарку та механізм очищення зерна. Вони мали примітивні системи обмолоту, але заклали основу для розвитку галузі комбайнобудування. У ХХ столітті, з поширенням самохідних комбайнів, конструкція МСП зазнала суттєвих змін: з'явилися високопродуктивні барабанні молотарки та вдосконалені механізми сепарації, що дозволило різко підвищити продуктивність збирання зернових культур.

Класична барабанно-клавішна система. Більшість комбайнів ХХ століття працювали за класичною схемою: кормова маса надходить через похилу камеру в молотильний барабан (циліндр) з підбарабанням, де відбувається обмолот зерна шляхом ударів і тертя між бичами барабана та решітками підбарабання. Вивільнене зерно та частина половини просипаються крізь підбарабання, а решта соломистого вороху подається далі і потрапляє на клавішний соломотряс. Соломотряс (набір хитних решітчастих клавіш) струшує солому, сприяючи висипанню з неї залишків зерна. Таким чином, у класичному МСП функції обмолоту здійснює барабан, а функції основної сепарації – соломотряс. Далі зернова маса надходить на очищення – решета та вентилятор відокремлюють зерно від решти дрібних домішок.

Класична барабанна молотарка проста і надійна, тому такі комбайни довго домінували на ринку. Наприклад, широко відома радянська серія СК-5 «Нива» (з 1970 р.) мала один барабан діаметром ~600 мм і чотириклавішний соломотряс – пропускна здатність цієї машини становила близько 5 кг/с за масою хлібної маси. Більший комбайн «Дон-1500», запущений у 1986 р., мав барабан діаметром 800 мм і шириною молотарки 1500 мм, п'ять клавіш соломотряса, що забезпечило пропускну здатність до 10–12 кг/с і продуктивність до 14 т/год. Такі машини могли ефективно збирати зернові культури середньої врожайності на полях помірної площі. Перевагами барабанно-клавішної схеми є порівняно нижча енергоємність процесу (менші затрати потужності на обмолот і сепарацію), простіша конструкція та краща збереженість соломи. Солома, яка проходить через соломотряс, менше подрібнюється і зберігає довжину, придатну для тюкування та використання як підстилка. Недоліком класичної схеми є обмежена пропускна здатність: на високих врожаях і великих швидкостях руху комбайна соломотряс не встигає витрясати все зерно, що призводить до втрат. Крім того, збільшення ширини і довжини соломотряса робить машину громіздкою, а підвищити інтенсивність сепарації без суттєвого ускладнення конструкції важко.

Для підвищення продуктивності класичних комбайнів конструктори вдосконалювали їхні МСП. Було запроваджено додаткові бітери (відбійні бітери за барабаном, що рівномірно подають ворох на соломотряс) і прискорювачі потоку. Приклад – система APS (Accelerated Pre-Separation) німецької компанії CLAAS, встановлена на багатьох моделях «Mega» та «LEXION». Суть APS: перед основним барабаном розміщується прискорювальний барабан меншого діаметра, який розганяє хлібну масу з ~3 м/с до ~20 м/с до потрапляння у молотарку. Це забезпечує рівномірніше надходження матеріалу на барабан та попередній обмолот: вже на прискорювачі та першому барабані відцентрова сила викидає значну частину зерна ще до соломотряса. Як наслідок, навантаження на соломотряс зменшується, а продуктивність машини зростає (в досвіді CLAAS –

до 20%). Багатобарабанні схеми (два і навіть три барабани послідовно) дали змогу інтенсифікувати процес обмолоту, наблизивши можливості «класики» до роторних рішень. Так, в Україні на Херсонському комбайновому заводі у 2005 р. був створений дослідний зразок комбайна «Славутич» КЗС-9М-1 із трьохбарабанним молотильним агрегатом. Концепція трибарабанної молотарки розглядалася як перспектива підвищити пропускну здатність до 12–15 кг/с без переходу на роторну схему. Хоча у серійне виробництво такі моделі масово не вийшли, вони стали важливим кроком в еволюції класичних МСП.

Роторна (аксіально-роторна) система. Проривним рішенням у комбайнобудуванні стало застосування замість барабана і соломотряса єдиного робочого органу – поздовжнього ротора в циліндричному кожусі. У роторному комбайні зерно вимолочується і відділяється по всій довжині обертального ротора, навколо якого розташоване підбарабання (решітки). Перші успішні роторні комбайни з'явилися у середині 1970-х: компанія Sperry-New Holland у 1975 р. випустила модель TR70 з двома паралельними роторами (Twin Rotor™), а трохи згодом фірма International Harvester (тепер Case IH) запровадила свою знамениту технологію Axial-Flow (однороторні комбайни з осьовим рухом маси) у кінці 1970-х. Протягом 1980–1990-х більшість провідних виробників долучилися до роторної революції: комбайни з аксіальними роторами почали витісняти класичні особливо у сегменті високої продуктивності.

Принцип роботи ротора відрізняється тим, що потік скошеної маси входить у роторний корпус і переміщується вздовж нього спіралеподібно. Входячи в зазор між обертовим ротором і нерухомим підбарабанням, маса багаторазово перевертається і треться, що забезпечує інтенсивний обмолот і сепарацію протягом більшого часу, ніж у короткому барабані. Ротор фактично об'єднує функції молотильного барабана і соломотряса: зерно висипається через решітки під роторами, а солома транспортується на вихід. Головна перевага роторної системи – різке зростання пропускну здатності і продуктивності комбайна. Довгий шлях сепарації та дія відцентрових сил дають змогу вилучити

більше зерна з маси, знизити втрати на великих врожаях. Роторні комбайни краще справляються у важких умовах – вологий хлібостій, зелена солома – де соломотряс класичної машини швидко «забивається». Відсутність великого соломотряса дозволила скоротити габарити або направити простір під інші вузли.

Втім, роторна конструкція має й недоліки. По-перше, солома після проходження крізь ротор виходить сильно подрібненою. Аксіально-роторний обмолот інтенсивно ламає стебла, перетираючи їх на короткі фрагменти. Це ускладнює використання соломи на підстилку або корм – в основному її доводиться подрібнювати й розкидати як добриво. По-друге, через подрібнення соломи підвищується навантаження на систему очищення зерна: дрібна подрібнена половина і битий колос важче відділяються на решетах, може зростати ризик втрат або потреба у більш потужному вентиляторі очищення. Також роторні комбайни вимагають більшої потужності двигуна – енергоємність процесу обмолоту зростає, адже значна частина енергії витрачається на тертя та перемішування маси вздовж ротора. Високопродуктивні сучасні ротори потребують двигунів потужністю 350–500 к.с. і більше, що підвищує витрати пального. За конструкцією роторний МСП складніший: довгий ротор, потужна трансмісія для його приводу, великі підшипники тощо. Проте зменшення числа рухомих вузлів (немає соломотряса з багатьма клявішами і шатунним механізмом) позитивно впливає на надійність – виробники відзначали, що в роторах менше деталей, які підлягають зносу. Щодо впливу на якість зерна, існувала думка, що роторний обмолот агресивніший і більше травмує зерно. Однак практика показала, що за правильного налаштування втрати на дроблення зерна у сучасних роторах мінімальні й порівнянні з класичними машинами. Навпаки, на делікатних культурах (наприклад солодовий ячмінь, насіннєві бобові) деякі роторні комбайни навіть дають менше ушкоджень, оскільки зерно обмолочується поступово багатьма ударами меншої сили, а не разовим інтенсивним ударом барабана.

Серед прикладів роторних машин – у кожного великого виробника є своя лінійка. Case IH з 1977 р. випускає Axial-Flow, що став синонімом однороторного комбайна. Комбайни Case (серії 140, 240, 250 тощо) оснащені одним поздовжнім ротором; ця концепція понад 40 років вдосконалюється, і нині такі машини працюють у всьому світі. New Holland після свого піонерського TR70 розвинув двороторну схему: сучасні New Holland серії CR мають два ротори середньої довжини, розташовані паралельно. Двороторна конфігурація забезпечує ширший потік маси і дещо рівномірніше завантаження, аніж один масивний ротор – це фірмовий підхід New Holland. Компанія John Deere спершу тривалий час дотримувалася класичних комбайнів (легендарні серії 9000 з соломотрясами), але у 1990-х також перейшла на ротор: з'явилися моделі серії CTS (гібрид з циліндром і роторами-сепараторами) та STS, а згодом сучасні однороторні John Deere S-серії. Наприклад, JD S770 має один поздовжній ротор TriStream з конусоподібним носком і регульованими направляючими – це дозволяє оптимізувати процес під різні культури. Свіжі тенденції – поява надвеликих комбінованих систем: John Deere X9 (випуск з 2020 р.) оснащений одразу двома поздовжніми роторами і здатен обмолочувати рекордно великі обсяги зерна (клас 10+, понад 700 к.с.). Тобто відбувається зближення концепцій: мульти-роторні схеми і гібридні системи (про них далі) покликані ще збільшити продуктивність.

Гібридні та комбіновані системи. Прагнучи поєднати переваги обох підходів, інженери створили змішані схеми МСП. Гібридний зернозбиральний комбайн зазвичай має класичний барабанний молотильний апарат на вході, а замість соломотряса – один або два осьові ротори для додаткової сепарації залишків зерна з соломи. Таким чином, первинний обмолот відбувається швидко на барабані, а довиділення зерна – інтенсивно в роторному сепараторі. Першими комерційно успішними гібридами стали комбайни John Deere CTS у 1990-х роках: у них за традиційним барабаном встановлено два поздовжні ротори для сепарації соломи (назва розшифровується як Cylinder + Tine Separators). Пізніше

і Claas, і New Holland реалізували свої концепції гібридів. Компанія CLAAS з кінця 1990-х випускає відому серію LEXION APS HYBRID: наприклад, Lexion 770 має систему APS з прискорювачем і барабаном, а далі – два паралельні ротори Roto Plus для сепарації. Така машина зберігає плавність обмолоту як у класичного комбайна, проте здатна працювати на високих врожаях без втрат, як роторні. У 2020 р. New Holland представила гібридні комбайни серії CH (Crossover Harvesting), зокрема модель CH7.70: в ній поєднані великий барабан діаметром 750 мм (як у класичних NH CX) і двороторна система Twin Rotor для сепарації. За даними виробника, продуктивність такої машини на 25% вища за звичайний клавішний комбайн аналогічного класу. Гібридні моделі зайняли нішу між соломотрясними комбайнами середньої продуктивності та топ-роторними: фермер отримує високу пропускну здатність, але з меншими вимогами до потужності, ніж у чистого ротора, і простішим технічним обслуговуванням.

Гібридна схема молотарки намагається дати «краще з двох технологій». Її переваги такі: завдяки барабану забезпечується дбайливіший обмолот, мінімізується дроблення зерна і биття насіння. Одночасно, роторна секція відбирає максимум зерна з соломистої маси, знижуючи втрати. В результаті комбайн може працювати швидше, не ризикуючи залишити зерно в соломі. Практика показала, що гібриди також краще зберігають якість соломи: солома після барабанного обмолоту менш пошкоджена, тож навіть пройшовши крізь короткі ротори, вона виходить довшою, ніж у чисто роторних машинах (де часто солону перетирає на дрібні фрагменти). Таким чином, у великих господарствах, де потрібно і врожай швидко зібрати, і солону зберегти, гібрид може бути оптимальним вибором. Втім, за складністю гібрид – це фактично «комбайн у комбайні»: наявність і повноцінної барабанної молотарки, і роторів ускладнює конструкцію, збільшує масу та ціну машини. Обслуговування гібридних комбайнів теж складніше: більше рухомих деталей (контролювати стан як барабана і підбарабання, так і ротора та підшипників). Попри це, більшість

світових виробників нині мають гібридні моделі у своєму портфоліо, оскільки великі агропідприємства прагнуть максимальної ефективності. Окрім згаданих, можна відзначити Massey Ferguson Delta (AGCO), що теж має барабан і два ротори; комбіновані молотарки у John Deere (лінійка T Series використовує кілька барабанів + активний сепаратор замість частини клавіш). Компанія Rostselmash (РФ) в 2010-х випустила модель Torum – це суто роторний комбайн, а от у 2020 р. представила гібрид RSM X820 (клас 8) з двобарабанною системою і роторами, що ознаменувало прихід гібридів і в пострадянське виробництво.

Вітчизняні та зарубіжні моделі: історичні аспекти. Україна має давні традиції комбайнобудування, успадковані від СРСР. Перші серійні радянські самохідні комбайни випускалися з 1930-х (завод «Комунар» у Запоріжжі налагодив серію ще до війни). Після війни флагманами стали сімейства СК-3, СК-4 (1950-ті – початок 60-х), а з 1970-х – СК-5 «Нива». СК-5 «Нива» стала наймасовішим комбайном: її випуск тривав понад 30 років, виготовлено понад 2 мільйони штук – абсолютний світовий рекорд. «Нива» важила близько 7,4 т, мала двигун 155 к.с., 5-метрову жатку, 3,6 м соломотряс, бункер 3 м³. Вона була розрахована на урожайність до ~40 ц/га і площі до 500 га – тобто типові умови середньої ланки колгоспів. Для більших господарств у 1980-х створено «Дон-1500» (Ростсільмаш, Ростов-на-Дону), що відносився до третього покоління комбайнів. «Дон-1500» мав ширшу молотарку (1,5 м) і потужніший двигун (235 к.с.), що дозволило збільшити пропускну здатність удвічі проти «Ниви». З 1986 до 2006 р. випущено десятки тисяч «Донів», він став основою парку в 1990-х.

Після здобуття Україною незалежності постало питання власного виробництва комбайнів. У 1995–1998 рр. Херсонський машинобудівний завод випустив дослідну серію комбайнів «Славутич» КЗС-9-1 – це були зернозбиральні комбайни класичного типу з барабаном (діаметр 700 мм) і соломотрясом, пропускну здатністю близько 9–11 кг/с. Одночасно розроблявся роторний варіант КЗСР-9 «Славутич» (1996 р. – дослідний зразок) та велася

модернізація барабанної версії. Загалом Херсонський завод виготовив близько 1500 комбайнів «Славутич» у кінці 90-х – початку 2000-х. Поява вітчизняної машини дещо знизила імпорتنі ціни на комбайни в Україні. Модифікації «Славутича» включали згаданий трьохбарабанний КЗС-9М-1, а також серію комбайнів «Скіф» – подальший розвиток конструкції у 2000-х. Паралельно в 1997–2004 рр. діяв концерн «Лан» (м. Олександрія), що об'єднав кілька підприємств і налагодив випуск комбайнів «Лан-001» та наступних моделей. За зразок було взято німецький Claas Dominator 108, фактично «Лан» став локалізованою його копією. Комбайн «Лан-001» мав пропускну здатність 9–11 кг/с і був оснащений барабанно-клатівною молотаркою класичного типу. Перші 10 машин зібрано 1998 року, всього випущено близько 140 комбайнів «Лан» різних модифікацій. Незважаючи на успішні випробування і початок серійного виробництва, проект «Лан» зіштовхнувся з труднощами: економічна криза кінця 90-х, відсутність сталого держзамовлення та конкуренція з вживаними імпортними машинами призвели до згорання виробництва у середині 2000-х. Аналогічна доля спіткала й інші амбітні проекти того часу: на Харківському заводі ім. Малишева пробували скласти комбайн «Обрій» (спільно з польською компанією Vizon, модель Vizon Z110), на київському заводі «Атек» випускали кілька комбайнів «Атек-1300» (копія італійського Laverda), на «Південмаші» в Дніпрі зібрали малу партію комбайнів «Дніпро-350» (за участі Claas, аналог модель Mega). Жоден з цих проектів не переріс у великосерійне виробництво – до середини 2000-х вони зупинилися. Причини були спільні: висока собівартість вітчизняної техніки, недостатнє фінансування модернізації заводів, а головне – аграрії віддавали перевагу або значно продуктивнішим західним комбайнам останніх моделей, або дешевим імпортним машинам, що були у вжитку. Державні програми підтримки (наприклад, компенсація 30% вартості) не змогли кардинально змінити ситуацію. Як наслідок, українське комбайнобудування увійшло в XXI століття з обмеженим виробництвом. На сьогодні серійно випускаються окремі моделі на заводах, що належать

іноземним компаніям або у кооперації: наприклад, Херсонський завод певний час здійснював крупновузлове збирання комбайнів CLAAS Tucano на власних площах. Крім того, українські підприємства успішно виробляють жатки, причепні збиральні агрегати, запасні частини до комбайнів (підприємство «Харвест» тощо), але повноцінних сучасних вітчизняних зернозбиральних комбайнів небагато.

Світовий ринок комбайнів нині контролюється кількома великими корпораціями: John Deere, CNH (Case IH/New Holland), AGCO (Massey Ferguson, Fendt, Gleaner тощо), CLAAS, Deutz-Fahr та деякими регіональними виробниками (наприклад, Sampo Rosenlew у Фінляндії, Gomselmash у Білорусі, Kubota в Японії та ін.). Кожна з цих фірм пропонує лінійки різних конструктивних схем – від традиційних клавішних до роторних флагманів. Цікаво, що деякі бренди зберегли унікальні технічні рішення: скажімо, Gleaner (США, тепер у складі AGCO) використовує поперечно розташований ротор, що комбінує подачу маси поперек машини з аксіальним принципом обмолоту. Компанія Massey Ferguson історично виробляла комбайни з клавішною молотаркою (ушавлена серія MF 860 тощо), а після входження до AGCO отримала у розпорядження технології роторних і гібридних систем. Сучасні комбайни MF і Fendt (ще один бренд AGCO) багато в чому уніфіковані: так, нещодавно випущена серія IDEAL під брендами Fendt, Massey Ferguson і Challenger – це спільна розробка AGCO з двома великими роторами і надпотужним двигуном (до 790 к.с.). Deutz-Fahr (частина концерну SDF) також має власну лінійку: зберігає випуск клавішних моделей для невеликих ферм, але її найбільший комбайн серії 9C також роторний. Отже, загальна тенденція така, що для малих і середніх господарств пропонуються відносно прості і дешевші комбайни класичної схеми, а для великих агрохолдингів – високопродуктивні ротори або гібриди.

Переваги, недоліки конструкцій та вплив на ефективність збирання. З точки зору ефективності агротехнологічного процесу, основними показниками

роботи МСП є: пропускна здатність (масова подача, з якою комбайн може працювати без перевантаження); рівень втрат зерна при обмолоті і сепарації; ступінь травмування зерна; чистота зерна на виході після очистки; якість соломи (чи придатна до подальшого використання); а також витрати палива на тонну обмолоченого зерна. Конструкція молотильно-сепаруючого пристрою безпосередньо впливає на всі ці показники, тому вибір типу МСП завжди є компромісом залежно від умов господарства.

Клавішний комбайн при правильному регулюванні забезпечує низький відсоток пошкодження зерна – удар барабана в поєднанні з тертям об підбарабання достатньо ефективно вимолочує колос, але не роздрібнює зернівки. Барабанний обмолот добре підходить для більшості традиційних культур (пшениця, ячмінь, соя тощо). На виході з класичного комбайна отримуємо відносно чисту соломку, яку можна зібрати прес-підбирачем. Це важливо для тваринництва, адже дає побічний продукт – підстилку або грубий корм. З іншого боку, якщо господарство практикує заробляння подрібненої соломи в ґрунт (no-till, мінімальний обробіток), то перевага у вигляді довгої соломи втрачає значення, а навіть стає недоліком (довгу соломку треба потім подрібнювати). Що стосується втрат, у класичному комбайні «вузьким місцем» є соломотряс – саме на ньому при перевантаженні починають втрачатися неவிбиті зерна. Тому продуктивність клавішних машин обмежена: збільшення ширини і довжини соломотряса дає лише часткове рішення. На полях з урожайністю 50–60 ц/га і вище великі барабанні комбайни (на кшталт «Дон-1500Б» чи сучасних New Holland CX) можуть досягати межі пропускної здатності, за якою починається ріст втрат зерна. Таким чином, на високих врожаях роторні чи гібридні технології виявляються ефективнішими – вони дозволяють обмолотити і відсепарувати більше зерна за одиницю часу без збільшення втрат. Досвід великих агрофірм показує, що на полях понад 1000 га з високою врожайністю інвестиція у продуктивніші роторні комбайни виправдана: менші строки жнив скорочують ризики втрат від осипання зерна та погодних негараздів. З іншого

боку, для фермерів з дрібними ділянками клавішний комбайн більш вигідний з фінансової точки зору – він дешевший, простіший в ремонті, споживає менше пального. Тому на ринку і досі затребувані моделі всіх типів.

Роторні комбайни зарекомендували себе як машини для важких умов і великих обсягів робіт. Вони дозволяють ефективно збирати врожай у стислі терміни, досягаючи рекордної продуктивності (сучасні флагмани здатні намолочувати по 50–70 тонн зерна за годину роботи). Висока інтенсивність роботи не лише економить час, а й покращує якість зерна: комбайн не «псує» зерно тривалим перестоюванням скошених валків на полі, зменшує залежність від погоди. Особливо це актуально для вологих кліматичних зон, де «вікно» хорошої погоди під час жнив обмежене. Роторні системи також дають менші втрати зерна при збиранні кукурудзи та соняшника, де велика маса стебел і обгорток здатна приховувати зерно – довший шлях у роторі краще вивільняє врожай. Щодо витрат палива, то на низькій врожайності ротор може бути менш рентабельним (двигун працює не на повну завантаженість, а витрачає пальне), але на високій урожайності роторні комбайни часто демонструють нижчий питомий розхід палива (л/т зерна), оскільки один високопродуктивний комбайн замінює два менших. Звісно, все це досягається за умови правильної експлуатації – сучасні моделі оснащені автоматизованими системами налаштування. Наприклад, CLAAS CEMOS AUTOMATIC, John Deere Interactive Combine Adjust тощо: електроніка сама регулює оберти барабана/ротора, вентилятора, зазори підбарабання і решіт, аналізуючи потік зерна і засміченість. Це допомагає навіть недосвідченому оператору підтримувати оптимальний режим, отримуючи чисте зерно без перевитрат і підвищених втрат.

Підсумовуючи, конструкції молотильно-сепаруючих пристроїв зернозбиральних комбайнів еволюціонували від простого бичового барабана зі струщувальником соломи до складних багатоступеневих гібридних систем із попереднім прискоренням і залишковою сепарацією роторами. Історичні моделі – такі як «Нива» чи зарубіжні Massey Ferguson Runtime серій 70-х – заклали

перевірену часом базу: барабан + клавіші. Новітні комбайни – на кшталт CLAAS Lexion, John Deere X9, New Holland CR – демонструють інженерний пошук шляхів підвищити продуктивність: подвійні ротори, синхронізовані багатобарабанні молотарки, автоматизація процесів. На ринку співіснують всі ці рішення, оскільки кожне має свою нішу. Вибір МСП завжди компроміс: для невеликого господарства надмогутній ротор буде нерентабельним, а для агрохолдингу класична машина – «вузьким місцем» у жнивах. У будь-якому разі, сучасні конструкції прагнуть досягти максимально повного вилучення зерна із мінімальним пошкодженням та втратами, забезпечити стійку роботу навіть за складних умов (рельєф, волога солома) і спростити працю механізатора. Саме ці цілі визначають тенденції подальшого розвитку молотильно-сепаруючих пристроїв – зростання пропускної здатності, впровадження адаптивних систем керування, зменшення шкідливого впливу на ґрунт (гусеничні ходові системи для важких комбайнів), роботизація деяких операцій. Уже з'являються концепти трибарабанних молотарок нового покоління, які, за оцінками розробників, можуть стати достойною альтернативою як клавішним, так і роторним схемам. Отже, удосконалення МСП триває безперервно, адже ефективність збирання врожаю безпосередньо впливає на продовольчу безпеку та економічні показники аграрного сектору.

1.2. Обмолот зернових і зернобобових культур із використанням аксіально-роторних молотильно-сепарувальних пристроїв

Підкреслюється, що значна частина витрат на виробництво зерна (50–55%) припадає на збирання та транспортування врожаю для подальшої обробки. Це робить актуальним постійне вдосконалення технологій збирання врожаю та використовуваної техніки з метою зниження собівартості зерна [3].

Зернозбиральний комбайн є основним інструментом для збирання різних культур, зокрема зернових, бобових, круп'яних, олійних та інших. Попри значний

прогрес у розробленні та експлуатації комбайнів, зернозбиральний комплекс загалом усе ще потребує вдосконалення – як у конструкції робочих органів і виборі їх оптимальних параметрів, так і в організації всього процесу збирання врожаю та адаптації техніки до різних умов роботи [3].

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності комбайнів є заміна традиційного тангенціального молотильного апарата та клавішного соломотряса на аксіально-роторні молотильно-сепарувальні пристрої (МСП) [3].

У таких пристроях обмолот і сепарація відбуваються одночасно: зернова маса переміщується по спіралі вздовж осі обертання ротора в зазорі між ротором і підбарабанням, де здійснюється обмолот зерна та його сепарація із зони обмолоту [3].

Перший роторний комбайн (TR 70) був випущений у США в 1974 році компанією «Sperry New Holland». Його молотильно-сепарувальний пристрій складався з двох повздовжньо розташованих роторів діаметром 432 мм. Надходна маса розподілялася на два потоки й подавалася до цих роторів, що оберталися у протилежних напрямках. Під роторами розташовувалася сепарувальна поверхня. Обмолот здійснювався за допомогою бичів, установлених паралельно, а сепарація – у суміжній зоні. Наприкінці кожного ротора маса скидалася відбійним бітером, під яким також розміщувалася сепарувальна решітка. Під молотильно-сепарувальним пристроєм містилася система очищення зерна традиційного типу [3].

У роторних комбайнах фірм «International Harvester» та «White» використовується система обмолоту й сепарації з одним ротором, розташованим уздовж корпусу машини. Зокрема, модель 1480 «International Harvester» оснащена аксіальним (роторним) молотильно-сепарувальним пристроєм (МСП), який складається з довгого ротора (2743 мм завдовжки та 762 мм у діаметрі), розташованого повздовжньо, і стаціонарного кожуха. Нижня частина кожуха виконана у вигляді підбарабання для обмолоту та решітки для сепарації [3].

Швидкість обертання ротора регулюється варіатором і є співставною зі швидкістю барабана в традиційних тангенціальних системах обмолоту. Вісь ротора нахилена під кутом 15 градусів до горизонталі, і рослинна маса подається в ротор аксіально. У передній частині ротора розташований конус із чотирма лопатями, які захоплюють подану масу та спрямовують її в зону обмолоту. Переміщення маси вздовж ротора в зоні обмолоту здійснюється за допомогою бичів із рифленням, закріплених на циліндрі ротора. Ці бичі мають як гвинтову, так і пряму форму. У зоні сепарації встановлені прямі лопаті, розміщені паралельно осі ротора [3].

Ротор обертається всередині циліндричного кожуха, відкритого з торців. На початку кожуха розташований воронкоподібний усічений конус, який з'єднується із зоною обмолоту. На внутрішній поверхні розміщені гвинтові напрямні (п'ять заходів), що сприяють інтенсивному просуванню маси в осьовому напрямку. Для полегшення подачі маси в МСП у воронкоподібному кожусі передбачені західні кишені, які розширюють більше підґрунтя конуса до ширини транспортера нахильної камери. Аксіальні гвинтові напрямні розташовані у верхній, закритій частині циліндричного кожуха, який охоплює ротор. У зоні сепарації встановлені фіксовані сепарувальні решітки, що утворюють постійний зазор із ротором. За ротором розміщений відбійний бітер, який викидає соломку з молотарки [3].

Комбайн «White 9700» оснащений одним горизонтальним ротором, розташованим уздовж корпусу. Ротор має довжину близько 4,3 метра та діаметр 80 см. Зернова маса подається в ротор аксіально, тобто вздовж його осі. Ротор закритого типу й має приймальну частину з тризаходним шнеком для первинної обробки. Перед ротором установлений бітер, який спрямовує масу в молотильно-сепарувальний пристрій (МСП) [3].

Всередині ротора розміщено три зони обмолоту з рифленими поверхнями, за якими розташовані пари бичів із подібними рифами. Перший бич (за напрямом обертання) має спеціальну лобову поверхню. Переміщення маси

вздовж ротора забезпечується бичами та напрямними, розташованими на підбарабанні, сепарувальних решітках і внутрішній поверхні кожуха ротора.

Зона обмолоту обладнана підбарабанням, що складається із семи секцій із регульованими зазорами. У зоні сепарації встановлені пруткові та пробивні решітки з фіксованим зазором відносно ротора. У цій конструкції МСП відбійний бітер відсутній [3].

Комбайни «Allis-Chalmers» (моделі №5, №6 і №7) використовують аксіальне МСП, розташоване поперек корпусу. Ротор довжиною близько 2,3 метра та діаметром 63 см складається з десяти дисків, на яких закріплені бичі з лівим нарізом [3].

Хлібна маса завширшки 1 метр подається на ротор під кутом за допомогою нахильного транспортера. Після проходження зони обмолоту з регульованим підбарабанням маса рухається по спіралі в зону сепарації. Зазори підбарабання регулюються як грубо (болтами), так і точно (ексцентриковим механізмом) [3].

Сепарувальні решітки мають фіксований зазор у 26 мм відносно ротора.

В аксіально-роторних зернозбиральних комбайнах відокремлення зерна відбувається по всій площі циліндричної поверхні кожуха. Спеціальний механізм, що рухається вперед-назад над сепарувальною решіткою, запобігає накопиченню зерна у верхній частині кожуха. Обмолочена маса підхоплюється крильчаткою на роторі та спрямовується до відбійного бітера [3].

Широке застосування та постійне вдосконалення аксіально-роторних молотильно-сепарувальних систем у зернозбиральних комбайнах спостерігається в західних країнах і США [3].

У нашій країні, починаючи з другої половини 1980-х років, також розпочали розроблення та впровадження подібних систем у конструкції зернозбиральних комбайнів. Такі системи, як правило, застосовувалися в комбайнах із великою пропускною здатністю (понад 10 кг/с), таких як СК-10 і Дон 2600ВД, із шириною молотарки понад 1,2 метра [3].

Упровадження нових конструкцій молотильно-сепарувальних пристроїв (МСП) зернозбиральних комбайнів є необхідністю, оскільки підвищення ефективності та якості збирання зернових та інших культур значною мірою залежить від збільшення пропускної здатності комбайнів. Однак просте збільшення пропускної здатності без застосування інноваційних принципів обмолоту та сепарації зерна призводить до небажаних наслідків [3].

Наприклад, збільшення пропускної здатності на 1 кг/с тягне за собою збільшення маси комбайна приблизно на 1,5 тонни. Це, у свою чергу, спричиняє ущільнення ґрунту, погіршення рельєфу полів і посилення ерозійних процесів.

Крім того, комбайни з шириною молотарки понад 1,5 м досягли межі, зумовленої обмеженнями на їх транспортування залізницею. Їх експлуатація потребує значних інвестицій у доопрацювання машин у господарствах, а також у будівництво більших ремонтних майстерень та ангарів. Важливо зазначити, що номінальна пропускна здатність часто не відповідає фактичній продуктивності. Наприклад, комбайн із номінальною пропускною здатністю понад 1,6 кг/с може ефективно працювати лише за врожайності не нижче 28 ц/га [3].

Як альтернатива, комбайни з аксіально-роторною молотильно-сепарувальною системою демонструють низку переваг. Випробування показали, що їх матеріаломісткість у 1,2 раза нижча, ніж у комбайнів із традиційною молотаркою. Компактність конструкції дає змогу збільшити об'єм бункера [3].

Завдяки сепарації, що ґрунтується на дії відцентрових сил, такі машини менш чутливі до нахилів під час роботи на горбистій місцевості. За однакової подачі матеріалу аксіально-роторні комбайни знижують втрати та подрібнення зерна у 2–3 рази [3].

Експериментальні дані свідчать про багатообіцяючі результати використання комбайнів з аксіально-роторними молотильно-сепарувальними пристроями, особливо під час збирання зернових культур. Водночас необхідно враховувати й недоліки зернозбиральних комбайнів роторного типу. До них належать: підвищене енергоспоживання на привід робочих органів, зниження

ефективності роботи під час збирання вологого зерна або зерна з домішками, а також надмірне подрібнення соломи, що створює додаткове навантаження на систему очищення [3].

Попри це, широке впровадження та використання зернозбиральних комбайнів з аксіально-роторними системами обмолоту й сепарації в агропромисловому комплексі країни є виправданим і необхідним кроком. У зв'язку з цим подальші дослідження в цій галузі мають надзвичайно важливе значення [3].

1.3. Застосування пружно-демпфуючих матеріалів у молотильних пристроях

У зернозбиральних комбайнах, як класичних, так і роторних, широко використовуються молотильні барабани бильного типу. Однак, процес взаємодії бичів із зерною масою вивчений недостатньо.

Основним показником ефективності обмолоту зазвичай вважається повнота відділення зерна, що досягається за рахунок ударного впливу та інерційних сил, які виникають при коливанні стеблової маси. Однак, колосся можуть контактувати з бичами під різними кутами, що вимагає багаторазового впливу для повного обмолоту. Це, в свою чергу, збільшує ризик пошкодження зерна.

Виникає питання: як мінімізувати травмування зерна, не знижуючи ефективності обмолоту? Одним із рішень є використання неметалевих матеріалів у конструкції молотильних пристроїв. Пружно-демпфуючі властивості матеріалу робочих органів мають значний вплив на силу удару і контактний тиск, що виникають при обмолоті.

Дослідження показали, що зниження модуля пружності матеріалу (від Г104 - Г102 МН/м²) призводить до різкого зменшення сили удару і значного (приблизно в 10 разів) зниження контактного тиску [1].

Таким чином, для зменшення сили удару при обмолоті доцільно використовувати матеріали з модулем пружності в діапазоні $10^4 - 10^2$ МН/м², такі як дерево, гума, капрон і силікон (МПС(С)-1М) .

Згідно з даними В.М. Халанського, покриття ударної поверхні гумою значно знижує пошкодження насіння і підвищує поріг дроблення. Дослідник також встановив залежність пошкодження зерна від товщини гумового покриття: при товщині 1, 2 і 3 мм початок дроблення зерна спостерігався при швидкостях 16 м/с, 17,5 м/с і 18,5 м/с, відповідно [9]

Дослідження Д.Н. Бородіна показали, що заміна сталевих робочих органів у молотарці на дерев'яні або гумові підвищує стійкість зерна пшениці до пошкоджень і збільшує поріг дроблення [6]. Зокрема, перехід зі сталі (поріг дроблення 15,5 м/с) на дерево і гуму призводить до збільшення критичної швидкості до 19,6 м/с і 27,5 м/с відповідно. Ці результати узгоджуються з висновками В.М. Халанського [9].

Аналогічно, Н.П. Гречачин встановив, що покриття ударного бойка гумою товщиною всього 1 мм значно (більш ніж в 4 рази) знижує дроблення насіння сої [8].

В цілому, існує безліч досліджень, що підтверджують ефективність використання неметалевих матеріалів в робочих органах молотильних пристроїв для зниження пошкодження зерна.

З давніх часів для обмолоту бобових культур застосовувалися модифіковані стаціонарні молотарки, в яких сталеві штифти барабана замінювалися гумовими батогами (зі старих автомобільних покришок), а сталеве підбарабання – дерев'яним. Така модернізація дозволяла знизити дроблення насіння гороху на 1-6%, залежно від стану обмолочуваного матеріалу.

У п'ятдесяті роки конструкторським бюро заводу «Ростсельмаш» розроблялося і випробовувалося пристосування до комбайна РСМ-6 для збирання сої та інших зернових культур. Молотарка комбайна була модифікована шляхом заміни штифтового барабана на більший з дерев'яними планками, а

штифтове підбарабання - на рифлене. Випробування показали значне зниження дроблення насіння при використанні даного пристосування [63].

Для ефективного обмолоту сої з мінімальним дробленням насіння рекомендується підтримувати частоту обертання барабана молотарки в межах 450-500 обертів на хвилину. При низькій вологості рекомендується замінювати бичі на обрешинені [3, 8].

Початкові випробування барабанів, що використовують робочі органи з неметалевих матеріалів (включаючи гумові бичі з перероблених шин, сталеві бичі з гумовим покриттям і бичі з різними гумовими накладками), виявили істотне зниження пошкодження насіння. Однак, ці прототипи мали значні недоліки, що перешкоджали їх широкому впровадженню без подальшої конструктивної доробки. До цих недоліків відносилися невдала форма, низька надійність і нестабільний зазор між бичами і підбарабанням по всій ширині молотарки. Для вирішення цих проблем пропонувалося армувати гумові бичі металевою пластиною [3, 5].

Порівняльні випробування серійних і армованих сталлю гумових бичами на комбайні СК-4 при обмолоті проса показали, що армовані гумові планки знижують втрати від недомолоту в 2,58 рази і дроблення насіння в 1,5 рази. Лабораторні випробування обмолоту ярої пшениці сорту Харківська 46 з використанням армованих гумових бильних планок показали зниження травмування зерна в 1,2-1,3 рази.

У США для мінімізації пошкоджень насіння сої, квасолі та інших бобових культур у молотильних пристроях бильного типу застосовуються змінні гумові батоги та підбарабання різних конструкцій, що включають гумові планки. Подрібнення насіння сої при обмолоті комбайном John-Deer з гумовими бичами не перевищує 1-1,5% [2].

Таким чином, численні дослідження підтверджують доцільність використання пружно-демпфуючих елементів в якості матеріалів для робочих органів молотильних пристроїв. Це дозволяє значно знизити механічні

пошкодження насіння в процесі обмолоту. Важливо відзначити, що більшість досліджень проводилося на барабанно-декових (класичних) МСП, в той час як дослідження аксіально-роторних МСП в цій області обмежені.

Наші дослідження аксіально-роторного МСП при збиранні гороху і сої також продемонстрували перспективність використання пружно-демпфуючих матеріалів. Отже, дослідження щодо застосування пружно-демпфуючих в аксіально-роторних МСП є актуальними і обґрунтованими [7].

Висновки по розділу

Підвищений рівень механічних пошкоджень насіння зернових культур під час обмолоту є серйозною проблемою, що вимагає неухильного вирішення. Це пов'язано зі значними прямими та непрямими втратами врожаю через погіршення якості зерна та зниження його посівних якостей.

Аналіз існуючих досліджень міцнісних характеристик зерна пшениці в контексті обмолоту показує, що руйнування бобів відбувається переважно під дією динамічних навантажень.

Попередні експерименти виявили вплив швидкості обертання ротора, величини молотильних зазорів, обсягу поданої маси і вологості рослин на дроблення і мікропошкодження зерна. Отримані дані узгоджуються з результатами інших досліджень, присвячених впливу цих факторів на механічне пошкодження насіння зернових культур.

Однак, існують розбіжності між дослідниками щодо оптимальних режимів обмолоту зернових культур та оцінки впливу вологості насіння на процес їх травмування.

Розглянуто можливість використання пружно-демпфуючих матеріалів у конструкції робочих органів аксіально-роторного молотильного пристрою (МП). Заміна сталевих елементів на гумоармовані дозволяє істотно (у кілька разів) знизити механічне пошкодження зерна.

РОЗДІЛ 2

БУДОВА АКСІАЛЬНО-РОТОРНОГО МОЛОТИЛЬНО-СЕПАРУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ТИПУ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Аналіз конструктивних особливостей і силової взаємодії насіння зернових культур із робочими органами аксіально-роторного молотильно-сепарувального пристрою диференційованого типу

Виконаний аналіз впливу окремих конструктивних і кінематичних параметрів молотильно-сепарувального пристрою (МСП) на якісні та енергетичні показники технологічного процесу виділення насіння, а також запропонована нами класифікація способів обмолоту різними конструкціями молотильних пристроїв зернових культур стали основою для розроблення та створення принципової схеми молотильно-сепарувального пристрою, наведеної на рис. 2.1 [1].

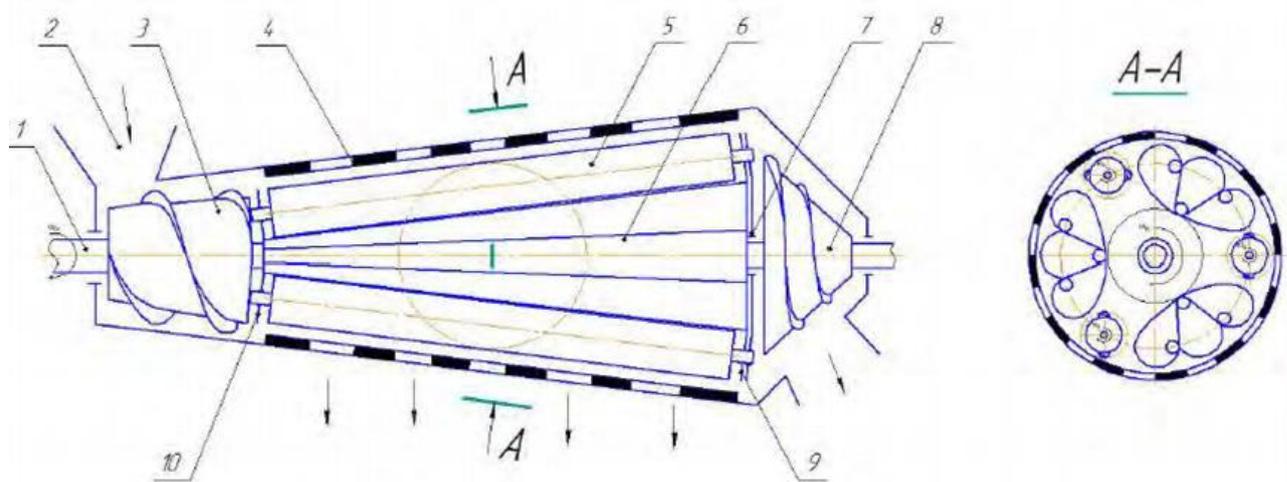


Рис. 2.1. Принципова схема молотильно-сепарувального пристрою: 1 – опорно-приводний вал аксіального ротора; 2 – завантажувальна воронка; 3 – шнек-живильник; 4 – конічне решето підбою; 5 – планетарний вальць із бичами; 6 – пружно-демпфувальний робочий орган; 7 – планетарний привід; 8 – вороховідвідний шнек; 9 і 10 – диски-води́ла з підшипниками [1].

Молотильно-сепарувальний пристрій, захищений патентами, працює таким чином. Під час обертання опорно-привідного вала – 1 зернова рослинна маса через завантажувальну воронку – 2 за допомогою шнека-живильника – 3 подається у молотильний зазор між конічним решетом підбою – 4 та ротором із планетарними вальцями з бичами – 5 і пружно-демпфувальним робочим органом – 6. У результаті ударної дії бичів, розташованих діаметрально протилежно на планетарних вальцях, руйнуються зв'язки зерна з бобами. Відбувається стиснення шару пружно-демпфувальним робочим органом, після чого бичі захоплюють ворох, забезпечуючи його спіралеподібний рух до виходу, де розміщено вороховідвідний шнек – 8. Унаслідок пружних властивостей матеріалу товщина шару частково відновлюється, а просторова решітка шару збільшується [1].

Планетарний привід – 7 та диски-води́ла – 9 і 10 захищені огорожувальними щитками, що унеможливають потрапляння до них вороху рослинної маси [1].

Решітчасте підбарабання виконано у формі зрізаного конуса з кутом твірної близько 80° , при цьому кут охоплення ротора становить 360° . Каркас сепаратора послідовно зібраний із планок прямокутного перерізу та поздовжніх круглих прутків, між якими розташовані поперечні прутки, що утворюють просторову решітку зі змінним живим перерізом від входу до виходу; форма отворів — трапецієподібна [1].

Із усього різноманіття механічних впливів (стискання, тертя, зсув, вільний та невірний удар тощо) у молотильних апаратах найпоширенішими є саме ударні дії. Тому надзвичайно важливо знати гранично допустиму силу зіткнення робочого органу із зерном [1].

Числове значення сили удару має забезпечувати руйнування бобів, але не перевищувати межі міцності насіння за динамічного навантаження. Під час удару пружно-пластичних тіл, до яких належать і насіння гороху та сої, об жорстку поверхню у зіткнених тілах виникають пластичні та пружні деформації [1].

Однак пластична складова сили удару за своєю величиною є значно меншою за пружну і становить лише 5–7 % від загальної сили удару [1].

Тому надалі, під час теоретичного аналізу, ми враховуватимемо лише пружну складову сили удару, приймаючи її за повну силу при динамічному навантаженні зерна [1].

Під час обмолоту насіння зернових культур зазнає ударних навантажень як з боку бичів ротора так і внаслідок зіткнення одне з одним та з планками підбарабання [1].

2.2 Опис експериментальної установки для дослідження молотильно-сепарувального пристрою

Експериментальна установка з молотильно-сепарувальним пристроєм (МСП) має привід планетарного ротора через клинопасову передачу, закриту захисним кожухом (рис. 1), від електродвигуна 1LA7164 – 2AA60 з такими технічними характеристиками [2]:

- частота обертання вихідного валу 900 хв^{-1} ;
- потужність двигуна 4 кВт;
- маса двигуна 48 кг.

Досліджуване МСП інтегроване в конструкцію серійної молотарки МС-400 та досліджувалося в лабораторних умовах. Основні вузли молотильно-сепарувального пристрою наведені на рис. 2.2 [2].

Дослідження основних закономірностей роботи аксіально-роторного МСП здійснювалося шляхом встановлення різних режимів обмолоту (частота обертання ротора, молотильний зазор) та відбирання проб результатів обмолоту після кожної зміни режиму роботи на експериментальних робочих органах [2].

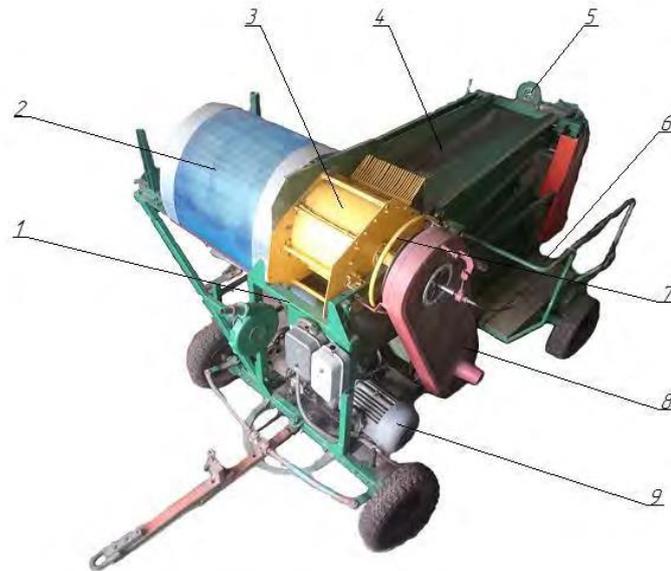


Рис. 2.2. Експериментальна установка: 1 – основа; 2 – молотильно-сепарувальний пристрій; 3 – шнек-живильник; 4 – подаючий транспортер; 5 – тахометр контролю обертів ротора; 6 – майданчик оператора; 7 – штурвал регулювання обертів ротора; 8 – захисний кожух клинопасового варіатора; 9 – електродвигун [2].

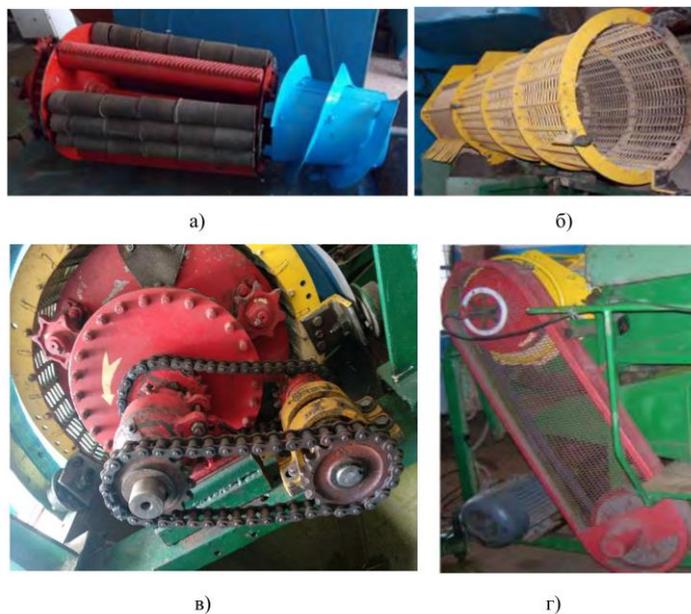


Рис. 2.3. Основні вузли молотильно-сепарувального пристрою: а) загальний вигляд барабана зі шнеком-живильником; б) загальний вигляд сепаратора (прутково-планчастого підбарабання); в) планетарний привід (ланцюгово-цевочне зачеплення); г) загальний вигляд приводу (клинопасовий варіатор) [2].

Транспортер забезпечує рівномірну подачу зернової маси в молотарку. Він розташований горизонтально і складається з рами, електродвигуна та стрічки, натягнутої між двома барабанами: ведучим і веденим. Привід ведучого барабана здійснювався приводною станцією за допомогою двигуна постійного струму [2].

Зміна секундної подачі досягалася шляхом регулювання швидкості стрічки транспортера та щільності укладання зернової маси на певній ділянці її довжини [2].

2.3. Експериментальне обладнання, прилади та апаратура

До ланцюга електродвигуна для реєстрації витрати потужності було підключено вимірювальний комплект К-505, що складається з ватметра, амперметра та вольтметра (рис. 2.4, рис. 2.5).

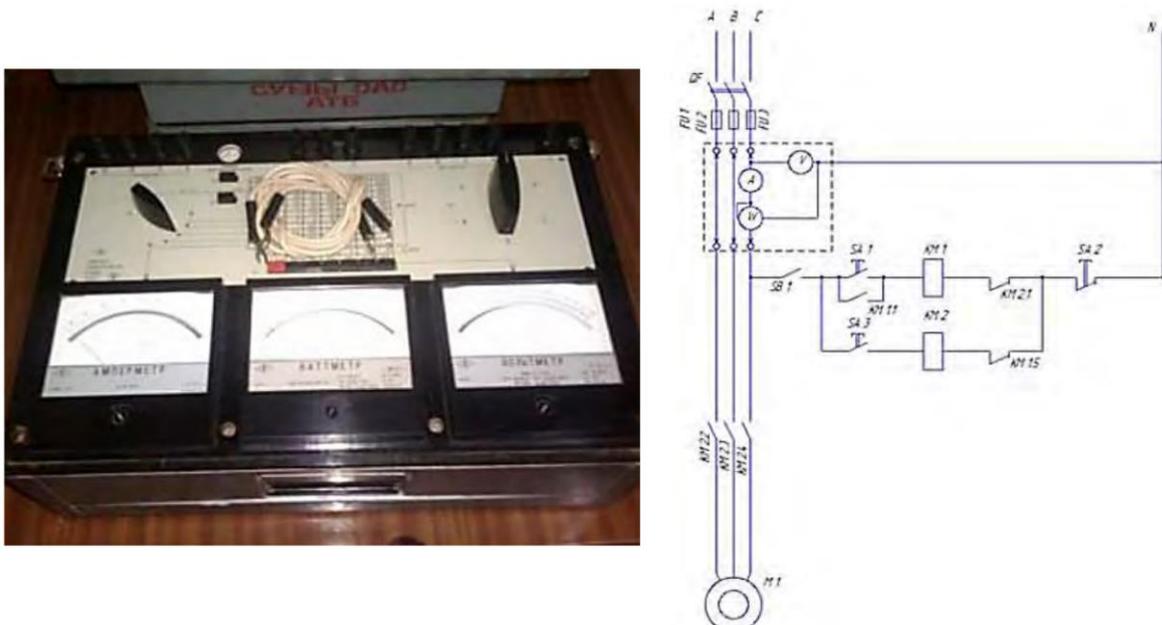


Рис. 2.4. Обладнання для визначення потужності, необхідної для обмолоту, з електричною схемою підключення (комплект вимірювальний К-505).

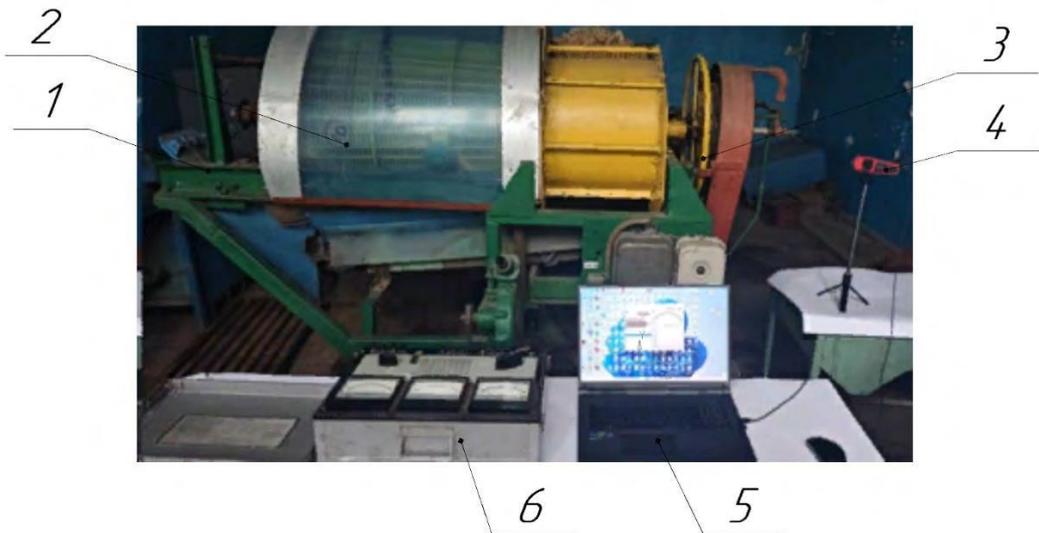


Рис. 2.5. Прилади та обладнання для проведення експериментальних досліджень: 1 – експериментальна молотарка; 2 – молотильно-сепаруюче пристосування; 3 – штурвал регулювання обертів ротора; 4 – цифровий безконтактний тахометр UT-372, зі штативом і кабелем інтерфейсу USB; 5 – портативний персональний комп'ютер; 6 – комплект вимірювальний К-505.

Частота обертання робочих органів МСП контролювалася цифровим безконтактним тахометром UT372 (рис. 2.5) з вбудованим лазерним маркером і наявністю USB-порту для підключення ПК (рис. 2.6)



Рис. 2.6. Цифровий безконтактний тахометр UT372.

Якість роботи молотарки оцінюємо не тільки кількістю вутолоченого зерна, але і ступенем його пошкоджень, для цього проведені дослідження з визначення макро- і мікропошкоджень зерна при обмолоті.

Пошкодження визначалися методом просвічування на діафаноскопі та огляду під лупою 20-кратного збільшення забарвлених гістологічним барвником (тетразолом) зерен [5, 7]. Діафаноскоп для визначення кількості травмованого зерна представлений на рис. 2.7.



Рис. 2.7. Діафаноскоп для визначення кількості травмованого зерна.

Зернова маса попередньо скошувалася і в снопах доставлялася до місця випробувань. Оскільки іноді за умовами дослідів була потрібна різна вологість, то рослинна маса насичувалася до необхідної концентрації. Визначалися вміст зерна і незернової частини, довжина стебел, коефіцієнти тертя насіння і продуктів обмолоту, вологість, вагові та розмірні показники насіння, зусилля відриву бобів від стебел, міцність насіння і зерен в статичних умовах, міцність зв'язку окремих елементів рослини і їх руйнівність.

Для визначення кількості вологи, що міститься в рослинах, насінні та продуктах обмолоту, застосовуються сушильні шафи та електровологоміри.

Методи визначення вологості розрізняють прямі та непрямі. Непрямі базуються на використанні залежності вологості матеріалу від його електропровідності.

Відповідність вологості зерна контролювалася із застосуванням стандартної методики, при цьому проби для виділення навівок повинні важити не менше 50 г [6].

Висновки по розділу

Розроблено експериментальну установку для реалізації конструктивно-технологічних параметрів планетарного аксіально-роторного МСП диференційованого типу. Розроблено програму та методику експериментальних досліджень. Запропоновано перелік необхідного експериментального обладнання, а також вимірювальної та реєструючої апаратури.

РОЗДІЛ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБМОЛОТУ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ МСП ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОЇ ДІЇ

Вологістю обмолочуваного матеріалу важко керувати, тому для поліпшення достовірності результатів експерименту досліди проводилися з вологістю зернової маси в межах 15,2...16,8%.

З раніше проведених досліджень випливає, що МСП може досягти максимальної пропускної здатності 3,5 кг/с і подачу матеріалу не можна збільшити вище цієї межі, оскільки це призведе до забивання камери обмолоту і сепарації зерна.

У раніше проведених теоретичних і експериментальних дослідженнях визначена раціональна окружна швидкість бичів для гороху $V_e = 17,8$ м/с і для сої $V_e = 18,2$ м/с з умови раціонального співвідношення швидкостей обертання ротора і планетарних вальців в оберненому русі.

Швидкість повітря, що проходить через МСП, залежить від частоти обертання ротора і регулюється зміною частоти обертання ротора.

Таким чином, швидкість повітря так само, як і окружна швидкість руху бичів, залежить від частоти обертання ротора. Тому ці два фактори є залежними і з них для подальших досліджень обрано один фактор – окружна швидкість бичів.

Прийнятий план експерименту був реалізований з довірчою ймовірністю $\alpha = 0,95$ і граничною похибкою $-\Delta = \pm 3\sigma$ при трикратній повторюваності дослідів. Для обробки отриманих даних використано програму STATISTICA for Windows фірми Statsoft (USA), версія 12.0

Програма STATISTICA for Windows, версія 12.0 дозволяє визначити оптимальні значення по кожному фактору, що забезпечують мінімальну енергоємність процесу обмолоту і сепарації зернових культур.

Поверхні відгуку залежностей факторів при обмолоті пшениці представлені на рис. 3.1, при обмолоті ячменю – рис. 3.2.

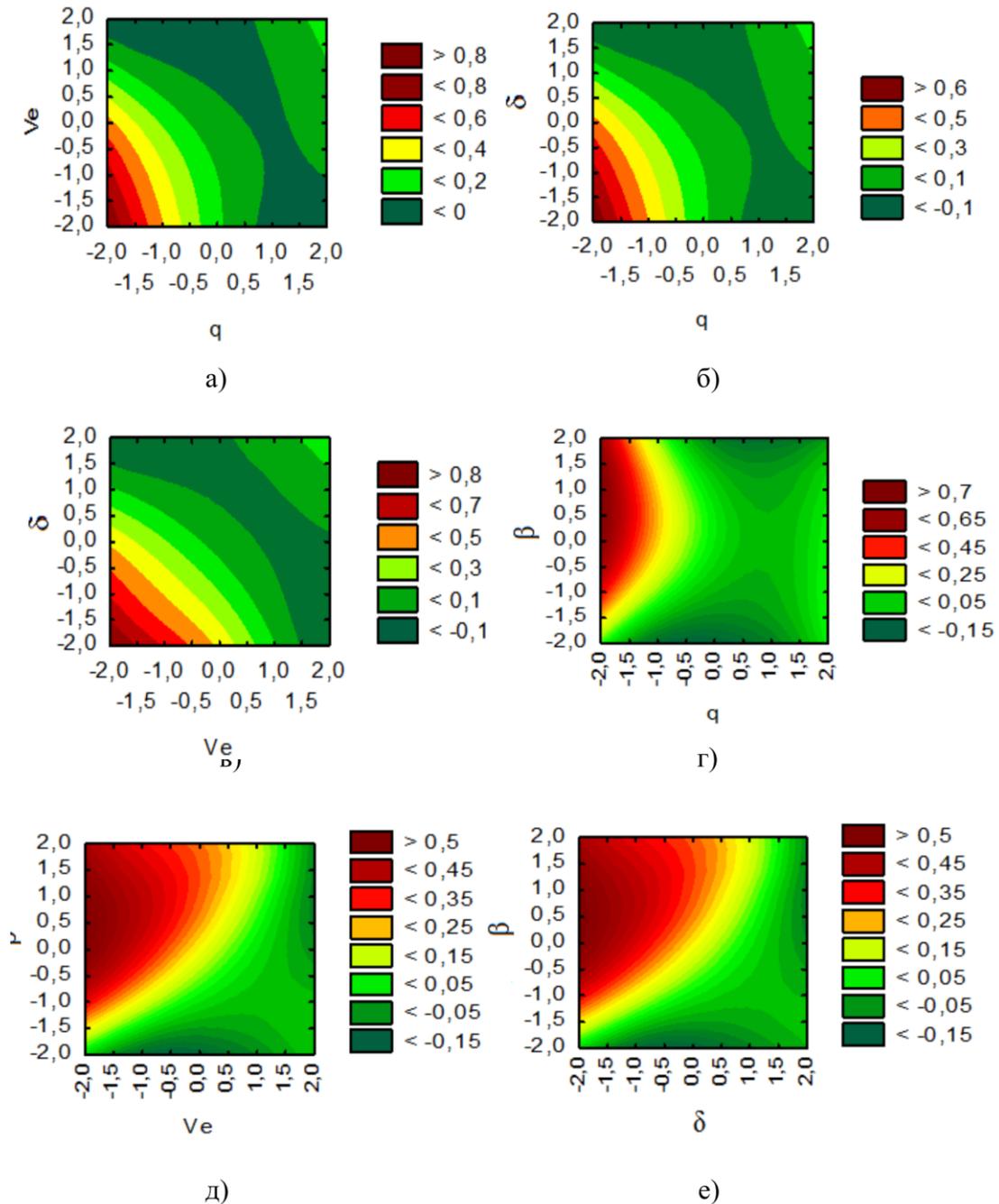


Рис. 3.1. Поверхні відгуку залежностей факторів при обмолоті пшениці: а) зміна подачі та лінійної швидкості обертання батога; б) зміна зазору та лінійної швидкості обертання батога; в) зміна зазору та подачі; г) зміна кута пружно-демпфуючого елемента і лінійної швидкості обертання батога; д) зміна кута е пружно-демпфуючого елемента і подачі; е) зміна кута пружно-демпфуючого елемента і зазору.

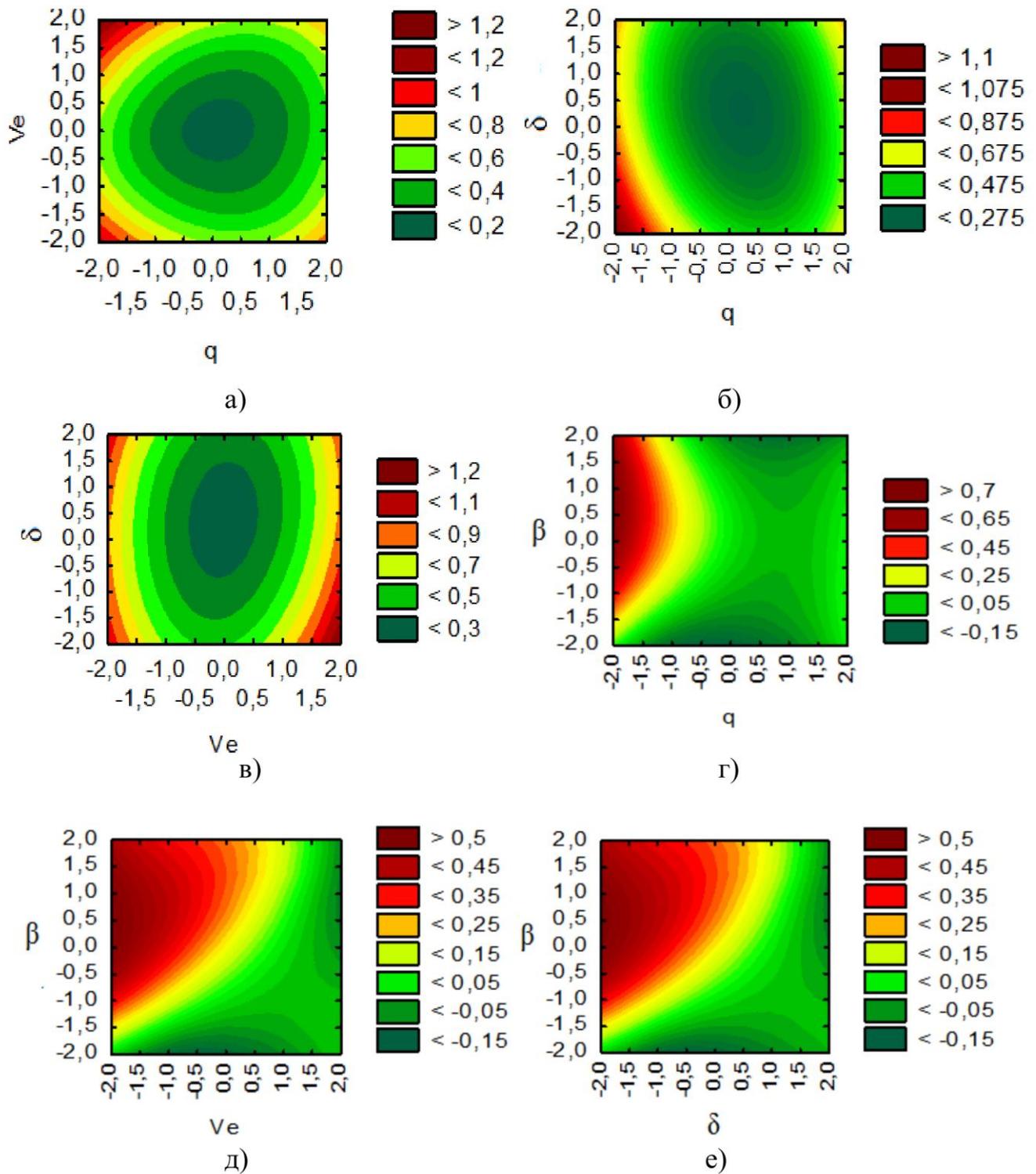


Рис. 3.2. Поверхні відгуку залежностей факторів при обмолоті ячменю: а) подачі та лінійної швидкості обертання батога; б) зміна зазору та подачі; в) зміна кута пружно-демпфуючого елемента та подачі; г) зазору і лінійної швидкості обертання батога; д) зміна кута пружно-демпфуючого елемента і лінійної швидкості обертання батога; е) зміна кута еластичного елемента і зазору.

Аналізуючи поверхні відгуків отриманих нами моделей, особливий інтерес представляють значення зазору на виході між аксіальним ротором і конічним підбарабанням, ми прийшли до висновку: фактично недосяжний оптимум за третім фактором ХЗ – зазор між ротором і підбарабанням на виході.

Якщо враховувати вплив на недомолот, то в парі з лінійною швидкістю батога він прагне до нуля, а в парі з подачею хлібної маси на обмолот перевищує значення 10 мм. Аналогічні протиріччя наочно проглядаються і за його впливом на інші параметри оптимізації. Це свідчить про те, що величина зазору повинна бути диференційованою, тобто регульованою залежно від конкретних умов роботи молотильно-сепаруючого пристрою.

При цьому недомолот і дроблення прийняті тому, що є основними і до того ж діаметрально протилежними показниками одного і того ж технологічного процесу.

Інші показники, як мікропошкодження, сепарація зерна, ступінь перебивання соломи тощо, є супутніми. Ці залежності можна представити в класичному вигляді (наприклад, сепарація залежно тільки від секундної подачі тощо).

За допомогою перерізів поверхонь відгуків $U_{не}$ і U_p призначають режим, що забезпечує задану величину подачі при мінімальному допуску на дроблення зерна і його недомолот. Наприклад, що допускає мінімальне дроблення зерна 0,21% і недомолот 0,45% при величині зазору на виході з осьового ротора, що дорівнює 6 мм, відповідає мінімальне значення подачі q від 2,9 до 3,3 кг/с, при окружній швидкості обертання робочих елементів планетарних вальців на виході із зони обмолоту близько 20 м/с. Цьому значенню швидкості відповідає кількість обертів ротора 375 хв^{-1} і планетарних вальців – 790 хв^{-1} при обмолоті ячменю оптимальної вологості.

При виборі режимних факторів МСП диференційованого обмолоту, з метою забезпечення найбільшої ефективності його роботи, ці рівняння можуть бути використані для встановлення раціональних значень секундної подачі,

лінійної швидкості робочих елементів ротора і зазорів, як на виході, так і на вході в молотильну камеру. Адекватність отриманих моделей була перевірена за критерієм Фішера.

Отримані моделі адекватні при рівні значущості 0,05, тобто вони добре узгоджуються з результатами експерименту і з довірчою ймовірністю 0,95 придатні для опису впливу досліджуваних конструктивних і робочих параметрів аксіально-роторного МСП диференційованої дії на якісні та енергетичні показники його роботи.

Висновки по розділу.

Встановлено оптимальні значення (поєднання) досліджуваних факторів, що відповідають мінімальній енергоємності процесу, яка дорівнює 4,86...6,09 кДж/кг при заданій якості обмолоту зернобобової маси, знаходяться в межах: подача – 2,85...3,15 кг/с, зазор на виході із зони обмолоту – 6,0...6,2 мм, кут установки пружно-демпфуючого елемента обертового ротора – 56,6...58,6 град., окружна швидкість бичів у середньому перерізі аксіального ротора – 17,8...18,2 м/с. В результаті лабораторних експериментальних досліджень встановлено: раціональне конструктивне виконання сепаруючого прутково-планчастого підбарабання змінного «живого» перетину; раціональне конструктивне виконання осьового ротора суміщеного типу – 3 планетарних вальця і пружно-демпфуючі елементи на трьох осях підвісу; раціональне значення кількості бичів – 6 шт; раціональна лінійна швидкість обертання рифів батогів у зворотному русі – 15,2...21,4 м/с, що підтверджує результати теоретичних досліджень МСП диференційованого обмолоту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті проведеного аналізу способів обмолоту пристроїв і технологій, що передбачають застосування серійно випускається техніки для обмолоту зернових культур, була запропонована конструкція МСП і методика технологічного розрахунку конструкційних параметрів і кінематичного режиму роботи робочих органів при найбільш якій роботі пристрою.

При графоаналітичному аналізі математичних моделей і поверхонь відгуку встановлено: найбільший вплив на енергоємність процесу мають фактори X_1 – подача зернової маси і X_2 – лінійна швидкість батога; оптимальні значення (поєднання) досліджуваних факторів, що відповідають мінімальній енергоємності процесу, яка дорівнює 4,86...6,09 кДж/кг при заданій якості обмолоту зернової маси знаходяться в межах: подача – 2,85...3,15 кг/с, зазор на виході із зони обмолоту – 6,0...6,2 мм, кут установки пружно-демпфуючого елемента ротора – 56,6...58,6 град., окружна швидкість бичів в середньому перерізі аксіального ротора – 17,8...18,2 м/с.

В результаті лабораторних експериментальних досліджень встановлено: раціональне конструктивне виконання сепаруючого прутково-планчастого підбарабання змінного «живого» перетину; раціональне конструктивне виконання аксіального ротора суміщеного типу; раціональна лінійна швидкість обертання бичів у зворотному русі – 15,2...21,4 м/с, що підтверджує результати теоретичних досліджень МСП диференційованого обмолоту; при такому виконанні показники роботи МСП мають оптимальні значення: продуктивність – до 3,2 кг/с; недомолот – 1,09% при обмолоті пшениці і 1,26% при обмолоті ячменю; дроблення насіння 0,68% при обмолоті ячменю і 1,29% при обмолоті пшениці; якість роботи відповідає агротехнічним вимогам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дерев'янюк Д.А., Нонік Д.М. Аналіз конструктивних особливостей і силової взаємодії насіння зернових культур із робочими органами аксіально-роторного молотильно-сепарувального пристрою диференційованого типу. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.
2. Нонік Д.М. Опис експериментальної установки для дослідження молотильно-сепарувального пристрою Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 75-77.
3. Дерев'янюк Д.А., Нонік Д.М. Обмолот зернових і зернобобових культур із використанням аксіально-роторних молотильно-сепарувальних пристроїв. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 111-115.
4. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Іванишин В. В. Про розробку й створення в Україні сільськогосподарських машин сучасного рівня. *Зб. наук. пр. ВНАУ*. Вінниця, 2012. № 11, т. 2(66). С. 8–13.
5. Матвійшин А., Олексюк В. Аналіз конструкцій молотильно-сепаруючих пристроїв зернозбиральних комбайнів. *Матеріали XVIII наук. конф. ТНТУ ім. І. Пулюя (29–30 жовт. 2014 р.)*. Тернопіль: ТНТУ, 2014. С. 80.
6. Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Недовесов В. І. Обґрунтування параметрів молотильно-сепаруючого пристрою тангенціального типу зернозбирального комбайна: монографія. Київ: Компрінт, 2016. 238 с.

7. Купін О. О. Аналіз конструкцій молотильно-сепаруючих пристроїв зернозбиральних комбайнів. *Матеріали наук. конф. ХНТУСГ ім. П. Василенка*. Харків, 2018. С. 87–89.
8. Смолінський С., Марченко В. Який комбайн ліпший – класичний чи роторний? *Agroexpert*. 2016. № 5. URL: <https://agroexpert.ua/akii-kombain-lipsii-klasicinii-ci-rotornii> (дата звернення: 10.12.2025).
9. Іванишин В. В., Іліяшик В. В., Дуганець В. І. Аналіз конструктивних особливостей та експлуатації зернозбиральних комбайнів *Claas Lexion 750, 760 Terra Trac* на збиранні сільськогосподарських культур. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2019. Вип. 30. С. 258–267
10. Бурлака О. А., Яхін С. В., Падалка В. В., Бурлака А. О. 100 тон за годину, а що далі? Порівнюємо та аналізуємо характеристики флагманських моделей високопродуктивних зернозбиральних комбайнів. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2021. № 3. С. 270–278.
11. CLAAS (офіційний сайт виробника). URL: <http://www.claas.com> (дата звернення: 10.12.2025).
12. John Deere (офіційний сайт виробника). – URL: <https://www.deere.com> (дата звернення: 10.12.2025).
13. New Holland Agriculture (офіційний сайт виробника). URL: <https://agriculture.newholland.com/uk-ua/ukraine> (дата звернення: 10.12.2025).
14. Miu P. Combine harvesters: Theory, modeling, and design. CRC Press. Boca Raton, 2015. 499 p.
15. Yadav D. K., Singh J., Kumar P. Combine harvesters: A review of developments in grain harvesting and processing. *International Journal of Agriculture Extension and Social Development*. 2025. 8(4). P. 568–572.
16. Sheychenko V. O., Anelak M. M., Kuzmych A. Y., Hrytsaka O. M., Dudnikov I. I., Tolstushko N. P. Investigation of the grain separation process in the three-drum threshing-separating device of a combine harvester. *Mechanization in Agriculture*. 2018. 64(2). P. 42–45.

17. Tian Q. L., Feng X., Wang Z., Zhang Z., Xiong Y. Design and performance assessment of dual-speed axial threshing and separation for paddy rice combines. *Applied Engineering in Agriculture*. 2021. 37(6). P. 1015–1022.
18. Wang F., Liu Y., Li Y., Ji K. Research and experiment on variable-diameter threshing drum with movable radial plates for combine harvester. *Agriculture*. 2023. 13(8). P. 1487.
19. Liu A., Li P., Xie F., Looch G. A., Wang X., Zhu L., Ji B. Design and experiment of adaptive adjustment of threshing gaps based on feed rate monitoring of soybean combine harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. 237. P. 110687.
20. Yue D., Wang Q., He Q., Li D., Yu Q., Geng D., Li M. A study of the distribution of the threshed mixture by a double longitudinal axial flow corn threshing device. *Agriculture*. 2024. 14(2). P. 166.
21. Abdeen M. A., Wu W., Salem A. E., Elbeltagi A., Salem A., Metwally K. A. et al. The impact of threshing unit structure and parameters on enhancing rice threshing performance. *Scientific Reports*. 2025. 15. P. 6250.
22. Yang R., Wang P., Qing Y., Chen D., Chen L., Sun W. Discrete element simulation optimization design and testing of low-damage flexible drum threshing elements suitable for high-quality seed harvesting. *Scientific Reports*. 2025. 15. P. 13601.
23. Spokas L., Adamčuk V., Bulgakov V., Nozdrovický L. The experimental research of combine harvesters. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. 62(3). P. 106–112.
24. Buehlmeier R. Threshing unit for combine harvesters for optimized crop conveyance. U.S. Patent No. 8,231,447 B2. 2012.
25. Koudela C. A. Universal threshing concave for an agricultural combine. U.S. Patent No. 12,439,856 B2. 2025.