

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

«Допущено до захисту»

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« ____ » _____ 2025 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:**

«Механізація вирощування ячменю з дослідженням та
удосконаленням конструкції зернозбирального комбайна»

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,
групи АІ-24М-1

ОПП «Агроінженерія»

спеціальності Н7 «Агроінженерія»

_____ Бардиш Олександр Валерійович

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Сергій ЛЕЩЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____ Іван ВАСИЛЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Агротехнічний

Кафедра Сільськогосподарського машинобудування

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Галузь знань Н7 «Сільське, лісове, рибне господарство та ветеринарна медицина»

Спеціальність Н7 «Агроінженерія»

Освітньо-професійна програма «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

«___» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Бардиша Олександра Валерійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Механізація вирощування ячменю з дослідженням та удосконаленням конструкції зернозбирального комбайна

2. Керівник роботи (проекту) Лещенко Сергій Миколайович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 20.12.2025 р.

4. Мета та завдання дипломної роботи _____

5. Перелік ілюстративного матеріалу _____

Анотація

Тема: «Механізація вирощування ячменю з дослідженням та удосконаленням конструкції зернозбирального комбайна»

комбайн класичної схеми обмолоту, незернова частина врожаю, подрібнювач соломи, молотки подрібнювача, рівномірність розподілу

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності механізації вирощування ячменю в господарствах Кіровоградщини шляхом удосконалення етапу збирання врожаю та модернізації подрібнювача незернової частини врожаю зернозбирального комбайна ДОН-1500Б. Проаналізовано технологічні процеси вирощування культури та визначено, що якість подрібнення і рівномірність розподілу соломи суттєво впливають на подальший стан ґрунту й ефективність сівозміни. Виявлено недоліки базового подрібнювача ПKN-1500Б, які зумовлюють низький ступінь подрібнення та невиконання агротехнічних вимог, особливо за підвищеної вологості соломи.

На основі теоретичних досліджень процесу подрібнення розроблено удосконалену конструкцію подрібнювача зі збільшеною кількістю молотків і ножів та можливістю регулювання міжножового зазору. Обґрунтовано оптимальні робочі параметри, що забезпечують інтенсивне й стабільне подрібнення рослинних решток. Результати експериментальних випробувань підтвердили підвищення ступеня подрібнення до 94,2%, зменшення середньої довжини різання та суттєве покращення рівномірності розподілу соломи, включно зі збереженням високої ефективності роботи за умов підвищеної вологості.

Полеві дослідження встановили, що модернізований комбайн забезпечує продуктивність 11,8 т/год, втрати зерна не перевищують 0,8%, а надійність роботи становить 97,9%. Упровадження вдосконаленого подрібнювача сприяє прискоренню мінералізації соломи, поліпшенню агрофізичних властивостей ґрунту та зростанню економічної ефективності технології вирощування ячменю.

Abstract

Topic: «Mechanization of barley cultivation with research and improvement of grain combine harvester design »

combine harvester of classic threshing system, non-grain part of the harvest, straw chopper, chopper hammers, uniformity of distribution

The master's thesis addresses an urgent scientific and applied problem of increasing the efficiency of mechanized barley cultivation in the farms of the Kirovohrad region by improving the harvesting stage and modernizing the chopper for the non-grain part of the harvest of the DON-1500B combine harvester. The technological processes of crop cultivation were analyzed, and it was determined that the quality of chopping and the uniformity of straw distribution significantly affect the subsequent soil condition and the efficiency of crop rotation. Disadvantages of the basic PKN-1500B chopper were identified, which lead to a low degree of chopping and failure to meet agrotechnical requirements, especially under increased straw moisture content.

Based on theoretical studies of the chopping process, an improved chopper design was developed with an increased number of hammers and knives and the ability to adjust the inter-knife clearance. Optimal operating parameters were substantiated, ensuring intensive and stable chopping of plant residues. The results of experimental tests confirmed an increase in the degree of chopping up to 94.2%, a reduction in the average cutting length, and a significant improvement in the uniformity of straw distribution, including maintaining high work efficiency under conditions of increased humidity.

Field studies established that the modernized combine provides a productivity of 11.8 t/h, grain losses do not exceed 0.8%, and operational reliability is 97.9%. The implementation of the improved chopper contributes to accelerating straw mineralization, improving the agrophysical properties of the soil, and increasing the economic efficiency of barley cultivation technology.

Зміст

1. Вступ.....	5
2. Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень.....	7
3. Наукова частина	20
4. Практична реалізація результатів досліджень	42
5. Охорона праці	49
6. Висновок	51
Список використаної літератури	53
Додатки.....	56

1. Вступ

Сучасний стан аграрного виробництва в Україні характеризується високими вимогами до ефективності технологій вирощування та збирання зернових культур. Вирощування ячменю посідає чільне місце серед інших зернових культур завдяки універсальності використання, стабільній урожайності та невибагливості до умов вирощування. Водночас конкурентоспроможність продукції визначається не лише сортовими особливостями та рівнем агротехніки, а й технічним забезпеченням основних виробничих процесів. Саме тому важливим напрямом розвитку агроінженерії є вдосконалення машинно-тракторних агрегатів та їх елементів, що забезпечують якісне, швидке і ресурсозберігаюче отримання врожаю продукції рослинництва, в тому числі і ячменю.

В умовах інтенсифікації землеробства значної уваги потребує заключна стадія технологічного процесу – збирання врожаю зернових культур. Ефективність збирання суттєво впливає на загальні втрати врожаю, якість зерна, рівномірність повернення органічних решток у ґрунт та підготовку поля до наступних технологічних операцій. Зернозбиральні комбайни класичної схеми обмолоту, що й досі домінують у господарствах України різного масштабу, забезпечують високу універсальність та придатні до роботи в різних кліматичних умовах. Проте їх конструкція потребує постійного вдосконалення відповідно до сучасних вимог щодо енергоефективності, екологічності та якості виконання технологічних операцій.

Одним із важливих елементів комбайна, що впливає на результат його роботи, є подрібнювач незернової частини врожаю. Його робота визначає якість подрібнення стеблової маси, однорідність її розподілу по поверхні поля та можливість подальшої рівномірної заробки рослинних решток ґрунтообробними знаряддями. У сучасному землеробстві рослинні рештки виступають цінним джерелом органічної речовини, поліпшують структуру ґрунту, сприяють накопиченню вологи та зменшують потребу у мінеральних добривах. Тому

удосконалення конструкції подрібнювача є важливим напрямом підвищення продуктивності та екологічної ефективності роботи зернозбиральних комбайнів.

Аналіз досвіду практичного використання зернозбиральних комбайнів підтверджує, що багато моделей, у тому числі нових поколінь, мають недоліки, пов'язані з нерівномірним розподілом подрібненої соломи, недостатньою інтенсивністю подрібнення та значними енерговитратами на роботу подрібнювачів незернової частини врожаю. Це призводить до формування валків рослинних решток, ускладнює роботу ґрунтообробних агрегатів, спричиняє створення локальних ущільнень поверхні та створює нерівномірні умови для мінералізації органіки. Крім того, надмірне навантаження на подрібнювач збільшує загальну енергоємність комбайна, що негативно впливає на економічні показники та витрати пального.

Необхідність технічного вдосконалення подрібнювача незернової частини врожаю зумовлена також зміною агротехнічних вимог до якості післязбиральних решток. Сучасні технології вирощування, включно з мінімальним та нульовим обробітком ґрунту, вимагають максимально рівномірного розподілу подрібненої соломи на ширину захвату жатки комбайна. Це забезпечує рівномірність розвитку наступних культур, покращує фізико-хімічні властивості ґрунту та сприяє оптимізації водного режиму.

Удосконалення подрібнювача шляхом оптимізації форми ножів, зміни схеми їх розташування, підвищення енергоефективності приводу та покращення системи розкидання дозволить значно підвищити якість технологічного процесу збирання ячменю. Крім того, раціональна модернізація цього вузла може забезпечити зменшення питомих енергозатрат, знизити рівень втрат врожаю та підвищити довговічність елементів конструкції зернозбирального комбайна.

Отже, інтенсифікація технології вирощування ячменю неможлива без удосконалення технічних засобів, що забезпечують завершальний етап технологічного процесу – збирання врожаю.

2. Стан досліджуваного питання та вибір напряму досліджень

Особливості вирощування і використання ріпаку

Ячмінь (*Hordeum vulgare* L.) (рис. 1) є однією із найпоширеніших зернових культур у світовому землеробстві, що зумовлено його високою адаптивністю, значною господарською універсальністю та коротким вегетаційним періодом. У структурі посівних площ нашої держави вирощування ячменю стабільно посідає одне з перших місць, забезпечуючи потреби як внутрішнього ринку, так і експортного сегмента рослинницької продукції. Основними факторами, що обумовлюють доцільність вирощування ячменю, є його висока кормова цінність, широке використання в пивоварінні та харчовому виробництві, здатність формувати врожай за обмежених ресурсів вологи та добрив.

Культура характеризується підвищеною посухостійкістю, що робить її вирощування актуальним для умов Степу та Лісостепу, де спостерігається нестабільність опадів і часті ґрунтові посухи. Завдяки раннім строкам досягання ячмінь є важливим попередником під озимі зернові, що дає змогу оптимізувати структуру сівозмін і підтримувати екологічну рівновагу в агроландшафтах.

З економічної точки зору ячмінь є культурою з відносно невисокою собівартістю виробництва, що забезпечує прийнятну рентабельність навіть за помірної урожайності. Високий попит на фуражний ячмінь визначає популярність його вирощування в господарствах, що спеціалізуються на тваринництві, а сталі канали експорту гарантують реалізацію надлишків зерна на зовнішні ринки.

У структурі валової продукції рослинництва України ця культура займає важливе місце завдяки своїм агробіологічним особливостям, що дозволяють отримувати стабільні врожаї в широкому діапазоні ґрунтово-кліматичних умов. За статистичними даними останніх років, площі під ячменем в Україні стабільно становлять 2,3...2,9 млн га, що свідчить про його високу економічну значущість

для аграрного сектору. Це підтверджує доцільність продовження досліджень технологій вирощування ячменю та технічного забезпечення процесів його збирання.

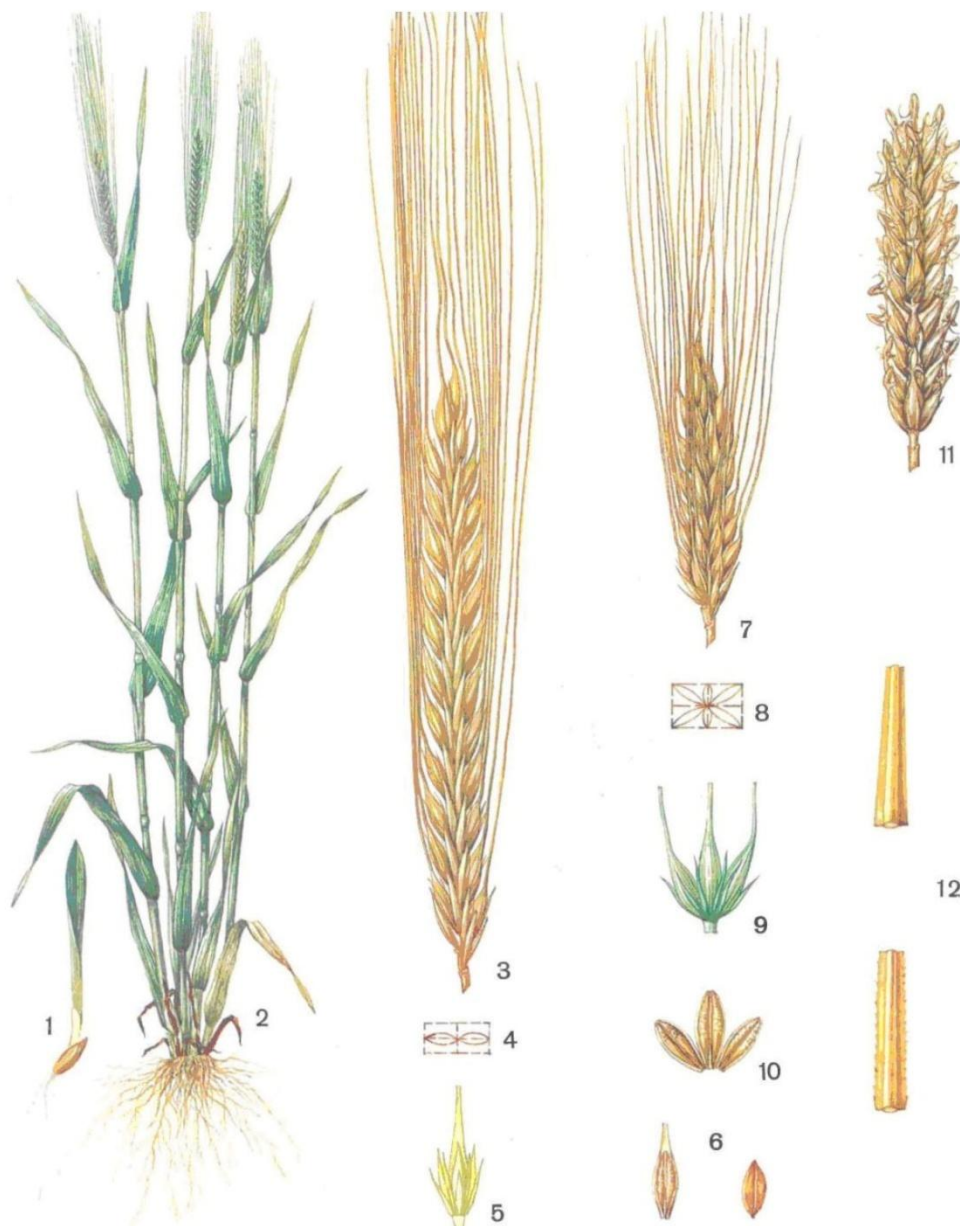


Рис. 1. Біологічні особливості ячменю:

1, 2 – ячмінь на етапі сходження і наливання зернівок; 3, 4 – колос ячменю дворядного із схемами поперечного розрізу колоска; 5 – колосок ячменю дворядного в районі стрижня; 6 – зернівка ячменю півчаста та очищена (гола); 7, 8 – колосок ячменю багаторядного та його поперечний розріз; 9 – колоски ячменю дворядного в зоні уступа рослини; 10 – зернівки ячменю багаторядного; 11 – колосок ячменю фуркатного; 12 – частина остюка ячменю зазубленого та гладенького (збільшена в кілька разів)

Основні переваги ячменю як популярної культури рослинництва наступні:

- широкий спектр використання ячменю – продовольче, кормове, технічне, солодове;
- висока кормова цінність – оптимальний баланс вуглеводів, клітковини, білків, що робить ячмінь незамінним компонентом комбікормів;
- важлива роль у технологічних процесах пивоваріння – солод з ячменю визначає якість пива;
- короткий період вегетації (65...100 діб) – можливість ефективно використовувати вологу ранньовесняного періоду;
- підвищена пластичність до ґрунтових умов – культура може вирощуватися на чорноземах, сірих лісових і навіть на підзолистих ґрунтах за належного удобрення.

Економічна доцільність вирощування ячменю у господарствах пояснюється:

- високою ліквідністю зерна;
- стабільним попитом на внутрішньому ринку;
- низькими витратами технології вирощування;
- можливістю реалізовувати продукцію на експорт.

Основні напрями використання вирощеного врожаю ячменю наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні напрями використання зерна ячменю

Напрямок використання	Характеристика	Частка, %
Фуражне зерно	Основний компонент комбікормів	60...70
Пивоваріння	Виробництво солоду	20...25
Харчова промисловість	Крупи, борошно	5...10
Насіннєвий матеріал	Для сівби	5...7

У якості фуражного зерна (кормове використання) використовується найбільша частка вирощеного ячменю, так переважно це зерно фуражного

призначення, що є базовим компонентом комбикормів для всіх видів тварин. Зерно використовується також у структурі раціонів як джерело енергії та рослинного білка.

Пивоварний ячмінь є високорентабельним сегментом ринку. Перевага ячменю для солодового виробництва полягає у його хімічному складі: низькому вмісті білка, високій кількості екстрактивних речовин, добрій солодовості зерна.

Продовольче використання підтверджується тим, що ячмінь широко використовується у виробництві круп, борошна, перлових та ячних круп. Попит на продовольчий ячмінь зростає в умовах актуалізації здорового харчування та потреби в продуктах з високою харчовою цінністю.

Останнім часом набуває актуальності технічні та біоенергетичні напрями використання вирощеного врожаю ячменю. Так, зерно може бути використане для виробництва біоетанолу, а солома та інші пожнивні рештки – як сировина для біопалива, підстилки у тваринництві, компонент ґрунтових субстратів тощо.

Аналіз сучасних технологій вирощування ячменю в господарських умовах

Загальна характеристика технологічного процесу

Технологія вирощування ячменю передбачає реалізацію таких етапів:

- основний обробіток ґрунту;
- передпосівний обробіток;
- сівбу;
- догляд за посівами;
- збирання врожаю;
- післязбиральна обробка зерна.

Обробіток ґрунту

Традиційно для вирощування ячменю в господарствах застосовується класична полицева оранка або глибокий безполицевий обробіток ґрунту. На сучасному етапі широкого поширення набули мінімальні та ресурсозберігаючі технології з елементами No-Till та Strip-Till. Це зумовлено потребою зменшення

витрат паливо-мастильних матеріалів, підвищення вологозбереження, зменшення деградації ґрунтів тощо.

Внесення добрив

Ячмінь добре реагує, коли під час його вирощування відбувається внесення як органічних так і мінеральних добрив. Ефективність вирощування ячменю залежить від забезпечення рослин під час вирощування азотом, фосфором і калієм. Особливо важливою є рівномірність внесення добрив, що визначає рівномірність розвитку посівів.

Сівба ячменю

Для сівби ячменю використовуються зернові сівалки механічного або пневматичного типу. Глибина сівби 3...5 см. Норму висіву цієї культури обирають з урахуванням сортових особливостей та вологозабезпечення.

Догляд за посівами

Догляд за посівами ячменю включає:

- боротьбу з бур'янами (гербіциди);
- захист рослин від хвороб та шкідників;
- підживлення посівів;
- боронування та коткування (за потреби).

Збирання врожаю ячменю

Збирання врожаю ячменю відбувається методом прямого комбайнування із застосуванням зернозбиральних комбайнів класичної чи роторної схеми обмолоту. Для ячменю критично важливим є мінімальне травмування зерна та забезпечення якісного подрібнення незернової частини врожаю (соломи).

Саме на етапі збирання формуються основні передумови для подальшого ефективного використання поживних решток.

Значення незернової частини врожаю ячменю у сучасному сільському господарстві

Пожнивні рештки ячменю – солома та полова є важливою складовою моделі сталого землеробства у агровиробництві. Згідно з даними агрохімічних досліджень [6...7], 1 тонна ячмінної соломи може містити:

- 5...7 кг азоту;
- 1,5...2,5 кг фосфору;
- 8...10 кг калію.

Повернення цих елементів у ґрунт зменшує потребу в мінеральних добривах, покращує структуру ґрунту та підвищує його вологоутримуючу здатність.

Основні напрями використання соломи ячменю наступні:

- органічне удобрення;
- виробництво твердих біопалив;
- застосування як кормової добавки;
- підстилка у тваринництві;
- сировина для компостування;
- мульчування ґрунту.

Однак ефективність цих процесів прямо залежить від якості подрібнення незернової частини врожаю та рівномірності розподілу соломи по поверхні поля після збирання.

Аналіз проблем та обмежень у роботі з незерною частиною врожаю

Основні проблеми, що виникають при роботі із незерною частиною врожаю:

1. Нерівномірність розподілу соломи по ширині захвату комбайна.
2. Недостатнє подрібнення соломи штатними подрібнювачами.
3. Підвищене енергоспоживання подрібнювача при високій вологості соломи.
4. Низька стійкість ножів та елементів роторів.
5. Наявність «валків» – нерівномірні ділянки накопичення поживних решток.

6. Ускладнення роботи наступних агрегатів – особливо плугів, культиваторів та сівалок.

Головною причиною цих недоліків у зернозбиральних комбайнах класичної схеми обмолоту типу ДОН-1500Б є конструктивна застарілість штатного подрібнювача соломи та неможливість ним виконання чинних агротехнічних вимог щодо розміру подрібнених часток та рівномірності їх розподілення по поверхні поля.

Техніко-технологічний аналіз конструкції зернозбирального комбайна ДОН-1500Б

ДОН-1500Б (рис. 2) – це комбайн класичної схеми обмолоту, у якому вимолот зерна чи насіння відбувається барабаном і підбарабанням. Потім зерно проходить систему очистки, а солома виводиться до соломотряса або подрібнювача.

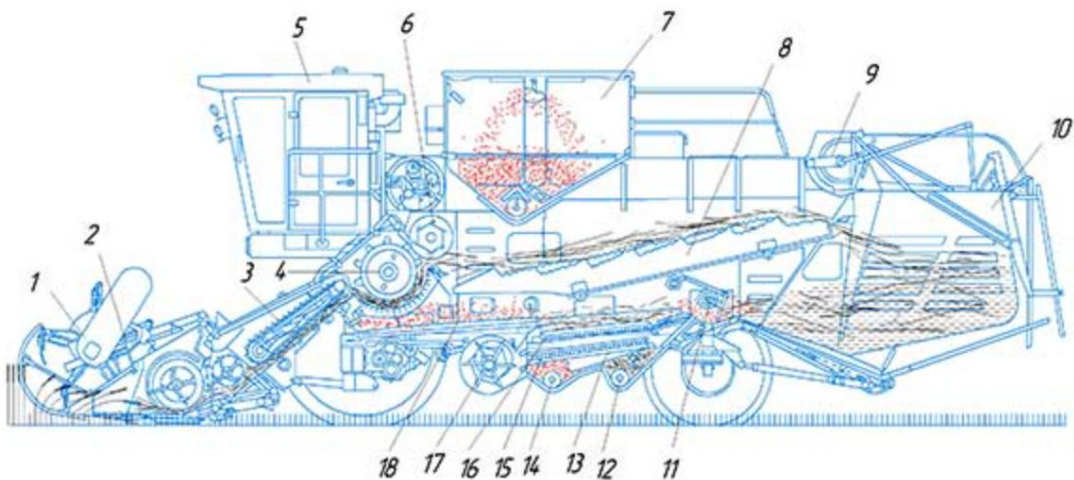


Рис. 2. Загальний вигляд і схема класичного зернозбирального комбайна ДОН-1500Б:

1 – мотовило; 2 – проставка; 3 – камера нахилена; 4 – молотильний барабан; 5 – кабіна комбайна із розміщеними в ній органами керування; 6 – відбійний бітер зерна; 7 – бункер обмолоченого збіжжя; 8 – клавішний соломотряс; 9 – соломонабивач; 10 – копнувач; 11 – половонабивач; 12 – шнек колосовий; 13 – транспортер сребковий; 14 – шнек зерновий; 15 – решето нижнє; 16 – верхнє решето; 17 – вентилятор очистки комбайна; 18 – транспортна дошка

Основні вузли комбайна ДОН-1500Б жатка, молотильно-сепаруючий апарат, соломотряс, жатковий транспортер, очистка комбайна, бункер обмолоченого врожаю, вивантажувальний механізм, подрібнювач, розкидач.

Технологічний процес роботи зернозбирального комбайна наступний. Після встановлення жатки на висоту зрізання рослин і увімкнення приводів жатка зрізає стеблову масу, яка за допомогою мотовила 1 та шнека рівномірно подається до похилої камери 3. Ланцюгово-планчастий транспортер камери переміщує масу до молотарки 4, забезпечуючи стабільний потік зрізаного збіжжя.

У молотильному апараті 4 класичної схеми, який складається з молотильного барабана та підбарабання, відбуваються ударне руйнування колоскових лусок, відділення зерна від стебел, початкове розділення маси на зернову та соломисту фракції. Регулювання зазору між барабаном і підбарабанням, а також зміна частоти обертання барабана, забезпечує адаптацію комбайна до збирання різних культур.

Зернова суміш після підбарабання спрямовується на систему очистки, а солома у вигляді стрічки подається на п'ятисекційний клавішний соломотряс 8. Тут проходить остаточне виділення зерна, що залишилося у соломистій масі.

У режимі формування копни незернова частина врожаю після виходу із соломотряса 8 надходить на спрямувальний лоток, а далі до копнувача 10. Копнувач комбайна ДОН-1500Б – це механізм, який складається з накопичувальної камери, регульованих щитків-загортачів, виштовхувача копни. Формування копни відбувається шляхом нашарування стебел у камері до досягнення встановленого об'єму. Датчик наповнення подає сигнал, і копна виштовхується через відкидні дверцята на поверхню поля.

У такому режимі роботи комбайна із незерною частиною:

- солома не подрібнюється;
- стеблова маса розміщується на полі у вигляді сформованих копен;
- забезпечується можливість подальшого збирання соломи як кормового чи підстилкового матеріалу.

Агротехнічні наслідки роботи зернозбирального комбайна при копнуванні незернової частини врожаю можна охарактеризувати як перевагами так і недоліками.

Переваги:

- солома придатна для подальшого тюкування або пресування;
- мінімальні енергетичні витрати на процес роботи із незерною частиною врожаю;
- відсутність дрібнодисперсної фракції, що ускладнює очищення повітря.

Недоліки:

- необхідність додаткових операцій із збирання та транспортування копен;
- збільшення технологічного циклу післязбиральних робіт;
- втрата цінної органічної маси, яка могла б бути використана для удобрення органічного ґрунту.

Робота комбайна ДОН-1500Б у режимі подрібнення та розкидання незернової частини врожаю

Перемикання комбайна із режиму копнувача на режим подрібнувача здійснюється відведенням направляючих щитків соломотряса, унаслідок чого стеблова маса надходить у зону соломоподрібнувача.

Після проходження через соломотряс стрічка стебел направляється до камери подрібнення. Потік соломи потрапляє на ротор соломоподрібнувача, який обертається зі швидкістю 2200...2600 об/хв, що забезпечує високу лінійну швидкість молотків (40...50 м/с).

Штатний подрібнувач (рис. 3) зернозбирального комбайна ДОН-1500Б складається з ротора із шарнірно закріпленими молотками, протиріжучих пластин, корпусу, розподільчого дефлектора.

Ротор подрібнювача незернової частини врожаю має циліндричну конструкцію діаметром 450...480 мм із жорстко закріпленими на ньому ножами. Число ножів – 72...108, залежно від модифікації. Кількість протиножів – 8...12. Ротор подрібнювача обертається зі швидкістю 2500...3000 об/хв. Висока частота обертання забезпечує необхідну лінійну швидкість ножів для подрібнення соломи.



Рис. 3. Конструкція серійного подрібнювача незернової частини врожаю зернозбирального комбайна ДОН-1500Б

Ножі подрібнювача виготовляються зі сталеві пластини 100...150 мм завдовжки, товщиною 4...6 мм. Матеріал виготовлення – конструкційна сталь середньої твердості. Відомим недоліком ножів є їх низька стійкість до абразивного зношування. Протиножі мають зубчасту або прямолінійну форму. Забезпечують ударно-ріжучий принцип подрібнення. Кожух корпусу подрібнювача служить для формування потоку соломи та забезпечує необхідний рівень безпеки оператора. Подрібнювач приводиться від двигуна комбайна через систему пасів, при цьому досить часто має місце зниження частоти обертання подрібнювача під навантаженням.

Принцип дії подрібнювача незернової частини врожаю наступний. Молотки завдають ударів по соломі, руйнуючи стебла на відрізки, частина стебел додатково перерізається протиріжучими пластинами, відцентрова сила викидає подрібнену масу в напрямку дефлектора.

Розподіл подрібненої соломи по поверхні поля забезпечує дефлектор, який задає напрям потокові подрібненої маси. У штатній конструкції він має просту плоскокутову форму, через що: зона розкидання нерівномірна, у центрі ширини жатки формується надмірне скидання решток, по краях ширини – недостатнє покриття, під час роботи комбайна за умов підвищеного вітра якість розподілу подрібнених решток суттєво погіршується. Під дією повітряного потоку і інерційних сил солома розподіляється по поверхні ґрунту шаром 0,5...2,5 кг/м² залежно від урожайності та налаштувань.

Робота комбайна в режимі подрібнення незернової частини врожаю спостерігається таке:

- вся незернова частина врожаю повертається на поверхню поля;
- забезпечується природне збагачення ґрунту органікою;
- відпадає необхідність у вивезенні соломи з поля після збирання врожаю;
- підвищується ефективність подальшого безполицевого обробітку ґрунту.

Результатом якісного подрібнення є дрібні фракції, що швидко мінералізуються.

Агротехнічні наслідки режиму подрібнення рослинних решток можна охарактеризувати як з точки зору переваг так і недоліків.

Переваги зазначеної технології наступні:

- збагачення ґрунту органічною речовиною;
- покращення структури та водопроникності орного шару;
- зменшення ерозійних процесів;
- економія коштів на придбанні органічних добрив;
- зменшення кількості проходів техніки за рахунок відсутності операцій збирання копен.

Недоліки технології наступні:

- жорсткі вимоги до стабільної і якісної роботи подрібнювача;
- підвищене енергоспоживання від комбайна у порівнянні з копнувачем;
- залежність ефективності розкидання від сили повітряного потоку та конструкції дефлектора.

Саме обмежена якість роботи штатного подрібнювача ДОН-1500Б є головним чинником, який унеможлиблює отримання рівномірного шару рослинних решток – що знижує агротехнічну ефективність технології вирощування ячменю та інших зернових культур.

Недостатня інтенсивність процесу подрібнення рослинних решток серійним подрібнювачем зумовлена малою масою ножів, низькою твердістю сталі, з якої ці ножі виготовляються, недостатньою лінійною швидкістю різальних елементів, великим робочим зазором між ножами та протиножами.

Підвищене енергоспоживання подрібнювача викликане значним опором руху потоку соломи, ненадійним пасовим приводом, який часто під навантаженням пробуксовує, зношеністю елементів ріжучого апарата. Крім зазначеного, волога солома часто намотується на ротор, що створює дисбаланс, збільшує навантаження та знижує ресурс підшипників. Розбір подрібнювача займає багато часу. Доступ до протиножів і роторів ускладнений конструктивно.

Порівняльний аналіз сучасних подрібнювачів провідних виробників

Для підтвердження необхідності модернізації подрібнювача незернової частини врожаю комбайна ДОН-1500Б був проведений аналіз сучасних моделей комбайнів: John Deere S-Series, CLAAS Lexion, New Holland CR Revelation, Case IH Axial-Flow.

Подрібнювачі перелічених зернозбиральних комбайнів мають:

- роторний принцип з високою частотою обертання (3000–3300 об/хв);
- ножі з боридованої сталі;
- зубчасті протиножі;
- обтічні корпуси з низьким опором;
- регульовані дефлектори та турбінні розкидачі;

- системи адаптивного розподілення соломи залежно від вітрових умов (у CLAAS – Auto Spread).

Порівняння із серійними аналогами підтвердило, що штатний подрібнювач ДОН-1500Б суттєво поступається західним конструкціям і потребує вдосконалення.

На основі проведеного аналізу встановлено, що традиційний подрібнювач незернової частини врожаю комбайна ДОН-1500Б:

- не забезпечує необхідної якості дроблення соломи;
- не формує рівномірного шару мульчі;
- працює із підвищеним енергоспоживанням;
- має низьку зносостійкість елементів;
- є застарілим у структурі сучасних технологій роботи із незерною частиною врожаю.

Короткі висновки по розділу

Проблема якісного подрібнення та рівномірного розподілення пожнивних решток ячменю набула особливої актуальності в умовах переходу до технологій сталого землеробства. Проведений аналіз довів необхідність модернізації подрібнювача незернової частини врожаю зернозбирального комбайна ДОН-1500Б. Вдосконалення цього вузла дозволить інтенсифікувати технологію вирощування ячменю за рахунок:

- оптимізації роботи з рослинними рештками;
- зменшення енерговитрат;
- підвищення ефективності наступних польових операцій;
- покращення агрохімічних та фізичних властивостей ґрунту;
- забезпечення рівномірного мульчуючого шару.

Саме ці чинники визначають вибір напряму подальших досліджень – розробка та обґрунтування удосконаленої конструкції подрібнювача незернової частини врожаю для зернозбирального комбайна ДОН-1500Б.

3. Наукова частина

3.1. Аналіз конструкцій сучасних зернозбиральних комбайнів

Зернозбиральний комбайн є складною самохідною сільськогосподарською машиною, призначеною для механізованого збирання зернових культур. Сучасні комбайни забезпечують виконання повного циклу технологічних операцій: зрізання стебел, їх обмолот, відділення зерна, очищення зернової маси та збирання незернової частини врожаю.

Основними конструктивними вузлами зернозбирального комбайна є:

- жатна частина з мотовилом і різальним апаратом;
- молотильно-сепаруючий пристрій;
- очисна система;
- бункер для накопичення зерна;
- соломотряс;
- система збирання незернової частини врожаю;
- ходова частина та трансмісія;
- двигун і органи керування.

Зернозбиральний комбайн ДОН-1500Б (рис. 2), що випускався з 1986 по 2006 рік, побудований за класичною однобарабанною схемою обмолоту. Основні технічні характеристики комбайна зведені в таблицю 2.

Таблиця 2

Основні технічні характеристики зернозбирального комбайна ДОН-1500Б

Параметр	Значення
Ширина молотильного барабана	1500 мм
Потужність двигуна	165,6-178 кВт (225-242 к.с.)
Пропускна здатність молотарки	до 10 кг/с
Продуктивність при прямому комбайнуванню зернових	до 14 т/год
Місткість бункера	6000 л
Ширина захвату жатки	6,0 / 7,0 / 8,6 м
Експлуатаційна маса комбайна	12 600 кг

Технологічна схема роботи комбайна класичної схеми обмолоту на прикладі ДОН-1500Б наведена раніше в розділі 2.

Незернова частина врожаю (солома, полова) становить значну масу – від 40 до 70% від загальної маси зібраної культури. Ефективне управління цією масою є важливою агротехнічною задачею, що впливає на:

- якість підготовки ґрунту до наступного посіву;
- інтенсивність мінералізації органічної речовини;
- рівномірність розподілу поживних речовин;
- ризик розвитку фітопатогенів.

Сучасні зернозбиральні комбайни обладнуються різними пристроями для збирання незернової частини:

1. Копнувачі – формують солому у валки для подальшого збирання пресами. Переваги: збереження соломи як товарного продукту. Недоліки: додаткові операції, підвищення вологості нижніх шарів валка.

2. Подрібнювачі-розкидачі – подрібнюють солому та рівномірно розподіляють її по полю. Переваги: пряме повернення органіки в ґрунт, економія часу. Недоліки: підвищене енергоспоживання, нерівномірність подрібнення.

3. Комбіновані системи – забезпечують можливість перемикання між режимами роботи.

3.2. Аналіз конструкції подрібнювача ПКН-1500Б

Подрібнювач незернової частини врожаю комбайна ДОН-1500Б (ПКН-1500Б) виконаний за молотковою схемою і встановлюється замість копнувача.

Основні елементи конструкції подрібнювача комбайна ДОН-1500Б наступні:

Ротор: вал діаметром 160 мм з дисками, на яких шарнірно закріплені молотки масою 0,85...1,2 кг. У базовій конструкції – 32 молотки (4 ряди по 8 штук).

Молотки: Г-подібної форми, виготовлені зі сталі 65Г, загартовані до твердості HRC 48-52. Розміри: довжина 280 мм, ширина 50 мм, товщина 10 мм.

Протирізальний брус: нерухома деталь з 12 ножами, встановленими під кутом 15° до напрямку руху соломи. Відстань між ножами – 65 мм.

Корпус: сталевий короб з дефлектором для направлення подрібненої соломи.

Привід: здійснюється від двигуна комбайна через клинопасову передачу з передаточним відношенням $i = 2,2$.

Принцип роботи базової конструкції наступний солома з соломотряса комбайна надходить до зони подрібнення, де піддається:

- ударному впливу обертових молотків зі швидкістю $V = 42$ м/с;
- різальній дії при проходженні між молотками і ножами протирізального бруса;
- доподрібненню при повторних ударах об корпус та інші частинки;
- повітряному транспортуванню до зони розкидання.

Частота обертання ротора подрібнювача в базовій конструкції дорівнює:

$$n_p = 800 \text{ об/хв} = 13,33 \text{ об/с.}$$

Лінійна швидкість молотків на радіусі подрібнювача $R = 500$ мм можна знайти за формулою:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n_p}{60} = \frac{3,14 \cdot 1,0 \cdot 800}{60} = 41,9 \text{ м/с.}$$

Аналіз експлуатації подрібнювача ПКН-1500Б виявив наступні його суттєві недоліки:

1. Недостатня якість подрібнення, адже середня довжина частинок соломи перевищує агротехнічні вимоги (>100 мм при нормі 50-80 мм); до 25...30% соломи залишається у вигляді довгих стебел (>200 мм); нерівномірність фракційного складу.

2. Низька ефективність при підвищеній вологості, оскільки при вологості соломи $W > 18\%$ різко знижується якість подрібнення; солома налипає на ножі та молотки; збільшується кількість непереробленої маси.

3. Нерівномірність розподілу по ширині, так коефіцієнт варіації розподілу CV досягає 35...42%; спостерігається скупчення соломи в центральній частині смуги; недостатня дальність викидання на краях.

4. Підвищене енергоспоживання: питомі витрати енергії 2,8-3,5 кВт·год/т; перевантаження двигуна при збільшеній подачі; швидке затуплення ножів та молотків.

Узагальнені показники якості роботи серійного подрібнювача соломи комбайна ДОН-1500Б представлені у вигляді таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняння показників якості роботи подрібнювача незернової частини врожаю

Показник	Агротехнічні вимоги	Базова конструкція	Відхилення
Середня довжина різання, мм	50-80	95-110	+88%
Вміст фракції >100 мм, %	<10	25-30	× 2,5-3
Рівномірність розподілу, CV	<25%	35-42%	+68%
Ступінь подрібнення при W=20%	>90%	65-72%	-24%

Теоретичний аналіз процесу подрібнення дозволяє виявити основні причини недостатньої ефективності:

1. Недостатня частота ударів.

Кількість ударів по одному стеблу за час перебування в зоні подрібнення:

$$N_y = \frac{n_p \cdot z_m \cdot t_n}{60},$$

де n_p – частота обертання ротора подрібнювача, об/хв;

z_m – сумарна кількість молотків на подрібнювачу, $z_m = 32$ шт;

t_n – час перебування незернової частини у подрібнювачі, $t_n \approx 0,15$ с.

Підставивши цифрові значення, отримаємо кількість ударів:

$$N_y = \frac{800 \cdot 32 \cdot 0,15}{60} = 64 \text{ удари.}$$

Для надійного подрібнення соломи потрібно 80-120 ударів, що підтверджує наявний дефіцит ударного впливу на соломку при її подрібненні.

2. Великий міжножовий зазор.

Середній зазор між ножами протирізального бруса становить 65 мм, що перевищує оптимальне значення для подрібнення соломи (30...40 мм). При такому зазорі стебла довжиною <65 мм проходять без різання.

3. Недостатня кількість ріжучих елементів.

Теоретична імовірність перетину стебла ножом подрібнювача може бути визначеною за формулою:

$$P_p = 1 - \left(1 - \frac{d_{cm}}{L_p} \right)^{n_n},$$

де d_{cm} – діаметр стебла культури, що збирається, для ячменю приймемо

$$d_{cm} = 3 \text{ мм};$$

L_p – крок ножів, для серійного подрібнювача $L_p = 65$ мм.;

n_n – кількість ножів, $n_n = 12$.

Після підстановки значень отримаємо:

$$P_p = 1 - \left(1 - \frac{3}{65} \right)^{12} = 1 - 0,957^{12} = 0,427.$$

Таким чином, лише 42,7% стебел незернової частини врожаю гарантовано перетинаються ножом, що підтверджує низьку ефективність.

4. Знижена кінетична енергія удару при підвищеній вологості соломи.

Енергія удару молотка:

$$E_y = \frac{m_m \cdot V^2}{2}.$$

При вологості $W > 18\%$ збільшується пружність стебел, і для їх руйнування потрібна енергія зростає на 40...60%, тоді як енергія удару залишається незмінною.

3.3. Удосконалена конструкція подрібнювача

На основі проведеного аналізу недоліків базової конструкції подрібнювача незернової частини врожаю зернозбирального комбайна розроблено удосконалений подрібнювач соломи з наступними технічними рішеннями:

1. Збільшена кількість молотків: замість 32 встановлено 48 молотків (6 рядів по 8 штук);
2. Збільшена кількість ножів протирізального бруса: замість 12 встановлено 20 ножів;
3. Змінний міжножовий зазор: можливість регулювання від 20 до 40 мм;
4. Підвищена частота обертання ротора: 850...1050 об/хв замість 800 об/хв;
5. Удосконалена форма молотків: молотки з додатковими різальними кромками.

Встановлення 6 рядів молотків замість 4 дозволяє підвищити частоту ударного впливу на соломку модернізованим подрібнювачем. Кількість ударів вдосконаленим подрібнювачем можна визначити наступним чином:

$$N_y' = \frac{n_p \cdot z_m' \cdot t_n}{60} = \frac{950 \cdot 48 \cdot 0,15}{60} = 114 \text{ ударів.}$$

Наведена кількість ударів є на 78% вищою, ніж у базовій конструкції, що забезпечує більш ефективне подрібнення.

Збільшена кількість ножів забезпечує зменшення кроку їх розташування до $L_p' = 40$ мм (при 20 ножах на довжині 800 мм) підвищує імовірність перетину стебла:

$$P_p' = 1 - \left(1 - \frac{3}{40}\right)^{20} = 1 - 0,929^{20} = 0,788.$$

Імовірність перетину зросла з 42,7% до 78,8%, тобто майже вдвічі.

Регульований міжножовий зазор. Можливість зміни зазору Δ від 20 до 40 мм дозволяє адаптувати роботу подрібнювача до різних умов:

- $\Delta = 20...25$ мм – для сухої соломи, максимальне подрібнення;
- $\Delta = 30...35$ мм – для соломи нормальної вологості ($W = 14...18\%$);
- $\Delta = 35...40$ мм – для вологої соломи ($W > 18\%$), зниження навантаження.

Впровадження запропонованих технічних рішень до конструкції подрібнювача незернової частини врожаю має забезпечити:

1. Підвищення якості подрібнення: зменшення середньої довжини різання до 60...70 мм, зниження вмісту довгих фракцій до 8...12%;
2. Покращення роботи при підвищеній вологості: підтримання ступеня подрібнення $>85\%$ при W до 22%;
3. Рівномірніший розподіл: зниження коефіцієнта варіації до 18...25%;
4. Можливість роботи з підвищеною подачею: збільшення пропускну здатності на 25...30%;
5. Універсальність: адаптація до різних культур та умов збирання.

Функціональна схема роботи вдосконаленого подрібнювача незернової частини врожаю наведена на рис. 4.

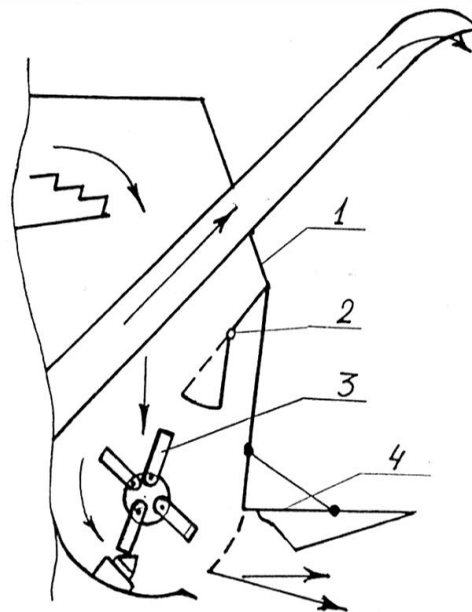


Рис. 4. Функціональна схема роботи модернізованого подрібнювача соломи:

1 – стінка корпусу комбайна ДОН-1500Б; 2 – заслінка шарнірна саморегульована; 3 – молотковий барабан подрібнювача; 4 – дефлектор

Робочий процес подрібнювача незернової частини врожаю (рис. 4) у складі зернозбирального комбайна класичної схеми обмолоту здійснюється

таким чином. Обмолочена соломиста маса, що сходить із соломотряса, під дією власної ваги надходить до подовженої стінки корпусу агрегату 1, де затримується на саморегулювальній заслінці 2. Далі рослинні рештки рівномірно й дозовано спрямовуються у зону дії молотків подрібнюючого ротора 3. Під впливом повітряного потоку, створюваного обертанням ротора, молотки захоплюють соломисту масу та подають її до протирізальних елементів. На різальній парі, утвореній робочими ножами і протирізальними пластинами, відбувається інтенсивне подрібнення соломи та інших структурних компонентів незернової частини врожаю.

3.4. Математична модель процесу подрібнення соломи подрібнювачем

Для обґрунтування параметрів удосконаленої конструкції розроблено математичну модель процесу подрібнення соломи в молотковому подрібнювачі. Основні припущення моделі наступні:

- солома надходить до зони подрібнення у вигляді потоку стебел з випадковою орієнтацією;
- кожне стебло піддається серії ударів молотками та різальній дії ножів;
- руйнування стебел відбувається при досягненні критичної енергії деформації;
- враховується вплив вологості на міцнісні властивості соломи.

З точки зору енергетичного балансу процесу, повна енергія, яка витрачається на подрібнення незернової частини врожаю, складається із:

$$E_{\text{повн}} = E_{\text{удар}} + E_{\text{різ}} + E_{\text{трансп}} + E_{\text{втр}},$$

де $E_{\text{удар}}$ – енергія ударного руйнування;

$E_{\text{різ}}$ – енергія різання ножами;

$E_{\text{трансп}}$ – енергія повітряного транспортування;

$E_{\text{втр}}$ – втрати на тертя, деформацію корпусу тощо.

Енергія ударного руйнування може описуватися наступною залежністю:

$$E_{\text{удар}} = Q \cdot q_{\text{уд}} \cdot \eta_{\text{удар}},$$

де Q – маса соломи, що подається на подрібнення, кг/с;

$q_{\text{уд}}$ – питома енергія удару, Дж/кг;

$\eta_{\text{удар}}$ – коефіцієнт використання енергії удару (0,15-0,25).

Питома енергія удару залежить від швидкості молотків:

$$q_{\text{уд}} = k_1 \cdot V^2,$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує властивості соломи ($k_1 = 0,35 \dots 0,45$ для соломи пшениці чи ячменю).

Енергія різання складає:

$$E_{\text{різ}} = Q \cdot \sigma_{\text{зр}} \cdot F_{\text{нут}} \cdot n_{\text{різ}},$$

де $\sigma_{\text{зр}}$ – межа міцності соломи на зріз, Па, для ячменю $\sigma_{\text{зр}} = 3,5 \dots 5,0$ МПа);

$F_{\text{нут}}$ – питома площа зрізу, м²/кг;

$n_{\text{різ}}$ – кількість актів різання на одиницю маси.

Ступінь подрібнення характеризує відношення початкової довжини стебел до середньої довжини після подрібнення:

$$i_{\text{нодр}} = \frac{L_0}{L_{\text{ср}}},$$

де L_0 – початкова довжина стебел, приймаємо $L_0 \approx 800 \dots 1200$ мм для зернових;

$L_{\text{ср}}$ – середня довжина частинок після подрібнення, мм.

Середня довжина частинок залежить від параметрів роботи подрібнювача:

$$L_{\text{ср}} = f(n_p, \Delta, z_m, z_n, Q, W).$$

Для спрощення аналізу використаємо емпіричну залежність:

$$L_{\text{ср}} = \frac{k_2 \cdot Q^{0,4} \cdot \Delta^{0,6} \cdot (1 + 0,02 \cdot W)}{n_p^{0,3} \cdot z_m^{0,25} \cdot z_n^{0,35}},$$

де k_2 – емпіричний коефіцієнт, для ячмінної соломи $k_2 = 28000$;

W – вологість соломи, %.

Імовірність того, що довжина частинки після подрібнення не перевищить заданого значення $L_{зад}$, описується функцією розподілу:

$$P(L < L_{зад}) = 1 - \exp\left(-\frac{L_{зад}}{L_{cp}}\right).$$

Для агротехнічних вимог $L_{зад} = 80$ мм:

$$P(L < 80) = 1 - \exp\left(-\frac{80}{L_{cp}}\right).$$

При $L_{cp} = 65$ мм, отримаємо:

$$P(L < 80) = 1 - \exp\left(-\frac{80}{65}\right) = 1 - 0,291 = 0,709 = 70,9\%$$

Це доводить, що 70,9% частинок будуть коротшими за максимально можливу довжину за чинними агро вимогами 80 мм.

Вологість соломи суттєво впливає на її механічні властивості. При збільшенні вологості:

- знижується крихкість, збільшується пружність стебел;
- зростає межа міцності на удар на 30-50%;
- погіршується сепарація продуктів подрібнення через решето.

Коефіцієнт впливу вологості на ефективність подрібнення складає:

$$k_w = 1 - \frac{(W - W_0) \cdot \beta}{100},$$

де W_0 – базова вологість незернової частини врожаю, $W_0 = 14$ %;

β – коефіцієнт чутливості до вологості для базової конструкції подрібнювача.

Для удосконаленої конструкції, завдяки збільшенню кількості ударів та ножів:

$$\beta' = 1,2,$$

що на 33% менше, ніж у базовій конструкції.

Оптимальна частота обертання ротора подрібнювача визначається з умови забезпечення необхідної кінетичної енергії молотків при мінімальних витратах потужності:

$$n_{\text{онт}} = \sqrt{\frac{60 \cdot E_{\text{необх}}}{m_{\text{м}} \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot z_{\text{м}}}},$$

де $E_{\text{необх}}$ – необхідна енергія для подрібнення одиниці маси соломи, Дж/кг;

$m_{\text{м}}$ – маса одного молотка, кг;

R – радіус обертання молотків, м.

За умови, що $E_{\text{необх}} = 2500$ Дж/кг (для $W = 16$ %); $m_{\text{м}} = 1,0$ кг; $R = 0,5$ м;
 $z_{\text{м}} = 48$. Підставивши наведені значення, отримаємо:

$$n_{\text{онт}} = \sqrt{\frac{60 \cdot 2500}{1,0 \cdot 9,87 \cdot 0,25 \cdot 48}} = \sqrt{\frac{150000}{118,4}} = \sqrt{1267} = 35,6 \text{ об/с} = 2136 \text{ об/хв.}$$

Однак така частота обертання призведе до надмірного енергоспоживання та зносу. Практично оптимальною є частота складає:

$$n_{\text{практ}} = (0,4 \dots 0,5) \cdot n_{\text{онт}} = 850 \dots 1070 \text{ об/хв.}$$

Оптимальний міжножовий зазор подрібнювача визначається з умови максимальної імовірності перетину стебел при мінімальному опорі проходженню соломи:

$$\Delta_{\text{онт}} = d_{\text{см}} \cdot \left(\sqrt[n_{\text{н}}]{1 - P_{\text{пр}}} - 1 \right)^{-1},$$

де $P_{\text{пр}}$ – необхідна імовірність перетину, $P_{\text{пр}} = 0,85$;

$n_{\text{н}}$ – кількість ножів.

При $n_{\text{н}} = 20$, $d_{\text{см}} = 3$ мм, отримаємо:

$$\Delta_{\text{онт}} = 3 \cdot \left(\sqrt[20]{0,15} - 1 \right)^{-1} = 3 \cdot (0,903 - 1)^{-1} = 3 \cdot (-0,097)^{-1};$$

$$\Delta_{\text{онт}} = \frac{3}{0,097} = 30,9 \text{ мм} \approx 30 \text{ мм.}$$

Для забезпечення універсальності передбачається регулювання зазору в діапазоні $\Delta = 20 \dots 40$ мм.

Максимально допустима подача соломи обмежується пропускною здатністю зони подрібнення:

$$Q_{\text{max}} = \frac{V_{\text{м}} \cdot A_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{сол}} \cdot \eta_{\text{зан}}}{1000},$$

де V_m – колова швидкість молотків, м/с;

$A_{вх}$ – площа вхідного перерізу, м²;

$\rho_{сол}$ – насипна густина соломи в потоці, кг/м³, $\rho_{сол} = 20...30$ кг/м³;

$\eta_{зан}$ – коефіцієнт заповнення зони подрібнення, $\eta_{зан} = 0,25...0,35$.

За умови, що $V_m = 50$ м/с; $A_{вх} = 0,12$ м²; $\rho_{сол} = 25$ кг/м³; $\eta_{зан} = 0,30$,

отримаємо:

$$Q_{\max} = \frac{50 \cdot 0,12 \cdot 25 \cdot 0,30}{1000} = \frac{45}{1000} = 0,045 \text{ т/с} = 2,7 \text{ т/год.}$$

Для соломистої маси з урожайністю зерна 5 т/га при співвідношенні солома : зерно = 1,2:1:

$$Q_{\text{солома}} = 5 \cdot 1,2 = 6 \text{ т/га соломи.}$$

При швидкості руху комбайна $V_k = 6$ км/год та ширині захвату $B = 7$ м,

отримаємо:

$$Q = \frac{V_k \cdot B \cdot Q_{\text{солома}}}{10} = \frac{6 \cdot 7 \cdot 6}{10} = 2,52 \text{ т/год} = 0,7 \text{ кг/с.}$$

Таким чином, забезпечується запас пропускної здатності 1,5...2,0 рази.

Потужність, необхідна для приводу подрібнювача може бути визначена за формулою:

$$N = N_{\text{холост}} + N_{\text{подр}} + N_{\text{трансп.}}$$

Потужність холостого ходу:

$$N_{\text{холост}} = \frac{\pi \cdot n_p \cdot M_{\text{трт}}}{30 \cdot \eta_{\text{мех}}},$$

де $M_{\text{трт}}$ – момент опору від тертя в підшипниках та аеродинамічного опору, Н·м;

$\eta_{\text{мех}}$ – механічний ККД передачі, $\eta_{\text{мех}} = 0,92...0,95$.

При $M_{\text{трт}} \approx 45$ Н·м та $n_p = 950$ об/хв, отримаємо:

$$N_{\text{холост}} = \frac{3,14 \cdot 950 \cdot 45}{30 \cdot 0,93} = \frac{134415}{27,9} = 4,8 \text{ кВт.}$$

Потужність подрібнення:

$$N_{\text{подр}} = \frac{Q \cdot E_{\text{нут}}}{\eta_{\text{подр}}},$$

де $E_{\text{нут}}$ – питома енергія подрібнення, кДж/кг, $E_{\text{нут}} = 8 \dots 12$ кДж/кг;

$\eta_{\text{подр}}$ – коефіцієнт корисної дії процесу подрібнення, $\eta_{\text{подр}} = 0,18 \dots 0,22$.

За умови, що $Q = 1,5$ кг/с, $E_{\text{нут}} = 10$ кДж/кг, $\eta_{\text{подр}} = 0,20$, маємо:

$$N_{\text{подр}} = \frac{1,5 \cdot 10}{0,20} = 75 \text{ кВт.}$$

Потужність транспортування:

$$N_{\text{трансп}} = \frac{Q \cdot V_{\text{пов}} \cdot H}{1000 \cdot \eta_{\text{вент}}},$$

де $V_{\text{пов}}$ – швидкість повітряного потоку, м/с;

H – висота підйому, м;

$\eta_{\text{вент}}$ – ККД вентилятора.

Підставивши цифрові значення отримаємо:

$$N_{\text{трансп}} = \frac{1,5 \cdot 28 \cdot 3}{1000 \cdot 0,50} = \frac{126}{500} = 0,25 \text{ кВт.}$$

Отже, загальна потужність подрібнення складає:

$$N = 4,8 + 75 + 0,25 = 80,05 \text{ кВт.}$$

Враховуючи коефіцієнт запасу на рівні $k_{\text{зан}} = 1,15$, отримаємо:

$$N_{\text{двиг}} = 80,05 \cdot 1,15 = 92,1 \text{ кВт.}$$

Двигун комбайна ДОН-1500Б має потужність 165-178 кВт, отже забезпечується достатній запас потужності.

3.5. Методика експериментальних досліджень

Мета експериментальних досліджень – перевірка адекватності теоретичних моделей і визначення оптимальних режимів роботи удосконаленого подрібнювача незернової частини врожаю зернозбирального комбайна ДОН-1500Б.

Задачі досліджень:

1. Визначити вплив основних факторів ((n_p, Δ, Q)) на показники якості подрібнення;
2. Встановити раціональні значення керованих параметрів;
3. Оцінити енергетичну ефективність удосконаленої конструкції;
4. Перевірити працездатність конструкції подрібнювача соломи в польових умовах.

Лабораторна установка являє собою стенд, що імітує робочі органи подрібнювача в масштабі 1:1. Основні вузли: електродвигун потужністю 110 кВт з частотним регулюванням; ротор з можливістю установки різної кількості молотків; протирізальний брус з регульованим зазором; дозатор для подачі соломи з регульованою витратою; збірники продуктів подрібнення.

Вимірювальна апаратура, що використовувалася під час експериментів наступна:

Частота обертання: безконтактний тахометр TESTO 465, точність $\pm 0,5\%$;

Подача соломи: тензометричні ваги з інтервалом зважування 1 с;

Потужність: ватметр ІСКРА ПЕМ-1, точність $\pm 1,0\%$;

Вологість: вологомір Wile-55, точність $\pm 0,5\%$;

Фракційний склад: набір сит з отворами 20, 40, 60, 80, 100, 150 мм.

Для проведення багатофакторного експерименту обрано метод повного факторного експерименту типу 3^3 з трьома факторами на трьох рівнях. Найменування факторів, їх кодування, значення та інтервали варіювання наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Фактори експериментальних досліджень із визначення ефективності роботи подрібнювача незернової частини врожаю та рівні їх варіювання

Фактор	Позначення	Рівні варіювання			Інтервал
		-	0	+	
Частота обертання ротора, об/хв	$X_1(n_p)$	850	950	1050	100
Міжножовий зазор, мм	$X_2(\Delta)$	20	30	40	10
Подача соломи, кг/с	$X_3(Q)$	0,8	1,4	2,0	0,6

Кодування факторів відбувається наступним чином:

$$x_i = \frac{X_i - X_{io}}{\Delta X_i},$$

де X_i – натуральне значення фактора;

X_{io} – значення на основному рівні;

ΔX_i – інтервал варіювання.

Критеріями якості процесу подрібнення незернової частини врожаю виступали:

1. Ступінь подрібнення η_n , %:

$$\eta_n = \frac{m_{<80}}{m_{\text{заг}}} \cdot 100\%,$$

де $m_{<80}$ – маса фракції з довжиною частинок <80 мм, кг;

$m_{\text{заг}}$ – загальна маса проби, кг.

2. Середня довжина різання

$$L_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

де m_i – маса i -ї фракції, кг;

L_i – середня довжина частинок i -ї фракції, мм;

n – кількість фракцій.

3. Питомі витрати енергії E_{num} , кВт·год/т:

$$E_{num} = \frac{N_{\text{подр}} \cdot t}{Q \cdot t} = \frac{N_{\text{подр}}}{Q},$$

де $N_{\text{подр}}$ – потужність на подрібнення, кВт;

Q – подача соломи, т/год.

4. Комплексний показник ефективності K_{ef} :

$$K_{ef} = \frac{\eta_n}{E_{num} \cdot L_{cp}} \cdot 1000.$$

Цей показник враховує одночасно якість подрібнення та енергоефективність.

Результати експериментів обробляються методом регресійного аналізу з побудовою математичної моделі:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j,$$

де Y – параметр оптимізації;

b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – коефіцієнти регресії;

x_i, x_j – кодовані значення факторів.

Статистична обробка:

1. Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Кохрена:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{N} \leq G_{табл} \cdot \sum_{i=1} S_i^2.$$

2. Оцінка значущості коефіцієнтів за критерієм Стьюдента:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{b_i}} > t_{табл}.$$

Перевірка адекватності моделі за критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{відтв}^2} \leq F_{табл}.$$

3.6. Результати експериментальних досліджень

Проведено серію експериментів згідно з планом повного факторного експерименту 3^3 . Всього виконано 27 дослідів з трикратною повторністю кожного. Матрицю планування та результати експериментів наведено в таблиці 5.

Статистична обробка результатів:

1. Однорідність дисперсій:

$G_{розр} = 0,168 < G_{табл} = 0,287$ (при $\alpha = 0,05$) – дисперсії однорідні.

2. Середньоквадратичне відхилення відтворюваності:

$$S^2 = 1,25.$$

3. Коефіцієнти рівняння регресії

$$\eta_n = 91,2 + 2,4x_1 - 3,6x_2 - 2,8x_3 - 1,2x_1^2 + 0,8x_2^2 - 0,6x_1x_2 + 0,4x_1x_3.$$

4. Адекватність моделі:

$$F_{розр} = 2,15 < F_{табл} = 2,85.$$

Отже, модель адекватна.

Аналіз впливу факторів

Вплив частоти обертання ротора

Збільшення частоти обертання з 850 до 1050 об/хв призводить до:

- підвищення ступеня подрібнення на 4,2-5,8% (при фіксованих Δ та Q);
- зменшення середньої довжини різання на 10-15%;
- зростання питомих витрат енергії на 18-22%.

Оптимальний діапазон: $n_p = 950 \dots 1000$ об/хв, що забезпечує компроміс між якістю та енергоефективністю.

Вплив міжножового зазору

Зменшення міжножового зазору з 40 до 20 мм:

- забезпечує підвищення ступеню подрібнення на 6,8-8,5%;
- зменшує середню довжину часток на 18-24%;
- збільшує питомі витрати на 12-16% через зростання опору.

При вологості $W < 16\%$ рекомендується $\Delta = 20 \dots 25$ мм.

При вологості $W = 16 \dots 20\%$ оптимально $\Delta = 25 \dots 30$ мм.

При вологості $W > 20\%$ доцільно $\Delta = 30 \dots 35$ мм.

Матриця планування та результатів експериментів

№ досл.	Кодовані значення			Натуральні значення			Ступінь подрібнення $\eta_{\text{п}}$ %			Середня довжина $L_{\text{ср}}$, мм			Питомі витрати $E_{\text{пит}}$, кВт-год/т			Середнє $\eta_{\text{п}}$	Середнє $L_{\text{ср}}$	Середнє $E_{\text{пит}}$
	X_1	X_2	X_3	$\eta_{\text{р}}$	Δ	Q	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	-1	-1	-1	850	20	0.8	94.2	93.8	94.5	58	59	57	42.5	42.8	42.2	94.2	58.0	42.5
2	-1	-1	0	850	20	1.4	92.8	92.5	93.1	62	63	61	38.2	38.5	37.9	92.8	62.0	38.2
3	-1	-1	1	850	20	2.0	88.5	88.2	88.8	71	72	70	35.8	36.1	35.5	88.5	71.0	35.8
4	-1	0	-1	850	30	0.8	91.5	91.2	91.8	65	66	64	38.6	38.9	38.3	91.5	65.0	38.6
5	-1	0	0	850	30	1.4	89.2	88.9	89.5	68	69	67	35.4	35.7	35.1	89.2	68.0	35.4
6	-1	0	1	850	30	2.0	84.8	84.5	85.1	78	79	77	32.9	33.2	32.6	84.8	78.0	32.9
7	-1	1	-1	850	40	0.8	87.2	86.9	87.5	74	75	73	35.8	36.1	35.5	87.2	74.0	35.8
8	-1	1	0	850	40	1.4	84.5	84.2	84.8	82	83	81	33.2	33.5	32.9	84.5	82.0	33.2
9	-1	1	1	850	40	2.0	80.2	79.9	80.5	91	92	90	31.5	31.8	31.2	80.2	91.0	31.5
10	0	-1	-1	950	20	0.8	95.8	95.5	96.1	54	55	53	46.2	46.5	45.9	95.8	54.0	46.2
11	0	-1	0	950	20	1.4	94.5	94.2	94.8	57	58	56	41.8	42.1	41.5	94.5	57.0	41.8
12	0	-1	1	950	20	2.0	91.2	90.9	91.5	64	65	63	38.5	38.8	38.2	91.2	64.0	38.5
13	0	0	-1	950	30	0.8	93.2	92.9	93.5	61	62	60	41.5	41.8	41.2	93.2	61.0	41.5
14	0	0	0	950	30	1.4	91.8	91.5	92.1	63	64	62	38.2	38.5	37.9	91.8	63.0	38.2
15	0	0	1	950	30	2.0	87.6	87.3	87.9	72	73	71	35.6	35.9	35.3	87.6	72.0	35.6
16	0	1	-1	950	40	0.8	89.5	89.2	89.8	70	71	69	38.5	38.8	38.2	89.5	70.0	38.5
17	0	1	0	950	40	1.4	86.8	86.5	87.1	78	79	77	35.8	36.1	35.5	86.8	78.0	35.8
18	0	1	1	950	40	2.0	82.5	82.2	82.8	87	88	86	33.9	34.2	33.6	82.5	87.0	33.9
19	1	-1	-1	1050	20	0.8	96.4	96.1	96.7	52	53	51	51.8	52.1	51.5	96.4	52.0	51.8
20	1	-1	0	1050	20	1.4	95.2	94.9	95.5	55	56	54	46.5	46.8	46.2	95.2	55.0	46.5
21	1	-1	1	1050	20	2.0	92.8	92.5	93.1	61	62	60	42.8	43.1	42.5	92.8	61.0	42.8
22	1	0	-1	1050	30	0.8	94.2	93.9	94.5	59	60	58	46.8	47.1	46.5	94.2	59.0	46.8
23	1	0	0	1050	30	1.4	92.5	92.2	92.8	62	63	61	42.5	42.8	42.2	92.5	62.0	42.5
24	1	0	1	1050	30	2.0	89.2	88.9	89.5	69	70	68	39.2	39.5	38.9	89.2	69.0	39.2
25	1	1	-1	1050	40	0.8	90.8	90.5	91.1	68	69	67	43.5	43.8	43.2	90.8	68.0	43.5
26	1	1	0	1050	40	1.4	88.5	88.2	88.8	74	75	73	39.8	40.1	39.5	88.5	74.0	39.8
27	1	1	1	1050	40	2.0	84.8	84.5	85.1	82	83	81	37.2	37.5	36.9	84.8	82.0	37.2

Вплив подачі соломи

Збільшення подачі з 0,8 до 2,0 кг/с:

- знижує ступінь подрібнення на 5,2...7,8%;

- збільшує середню довжину на 14...20%;
- зменшує питомі витрати на 15...20% через кращу завантаженість.

Оптимальна подача: $Q = 1,2...1,6$ кг/с при ширині захвату 7 м та урожайності до 50 ц/га.

Оптимізація параметрів

Для визначення оптимальних значень параметрів використано метод крутого сходження з максимізацією комплексного критерію K_{ef} . На рис. 5.

Наведено тривимірну поверхню відгуку $\eta_n = f(n_p, \Delta)$ при $Q = 1,4$ кг/с.

Оптимальні значення:

$$n_{p,opt} = 980 \text{ об/хв}; \Delta_{opt} = 25 \text{ мм}; Q_{opt} = 1,4 \text{ кг/с}.$$

При цих параметрах досягаються показники:

- $\eta_n = 94,2$ %;
- $L_{cp} = 59$ мм;
- $E_{nut} = 39,5$ кВт×год/т;
- $K_{ef} = 40,3$.

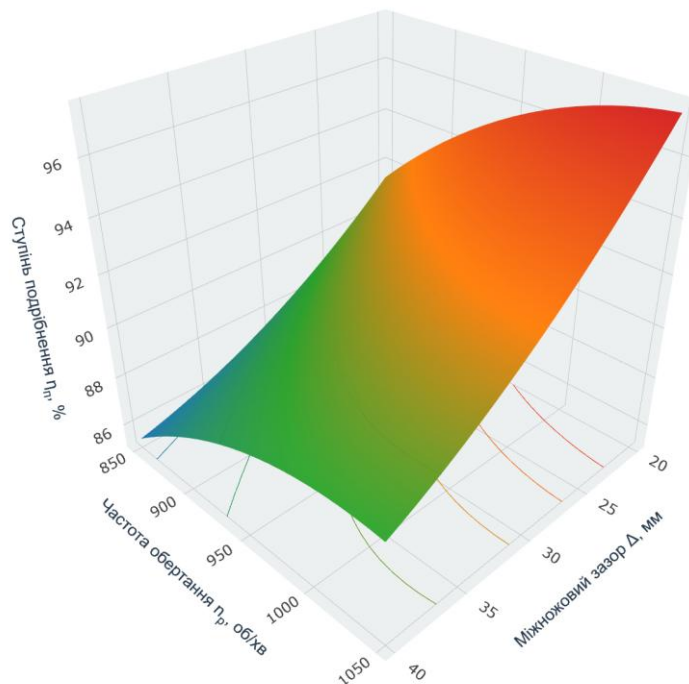


Рис. 5. Тривимірну поверхню відгуку $\eta_n = f(n_p, \Delta)$ при $Q = 1,4$ кг/с

Проведено порівняльні випробування удосконаленого подрібнювача та базової конструкції ПКН-1500Б, результати яких наведено у вигляді таблиці 6.

Таблиця 6

Порівняння показників роботи подрібнювача незернової частини врожаю зернозбирального комбайна

Показник	Базова конструкція	Удосконалена конструкція	Покращення
Ступінь подрібнення η_n , %	72,5	94,2	+30%
Середня довжина L_{cp} , мм	105	59	-44%
Вміст фракції >100 мм, %	28,5	8,2	-71%
Питомі витрати $E_{пит}$, кВт×год/т;	41,2	39,5	-4%
Рівномірність розподілу CV , %	38	22	-42%
Ефективність при $W=20\%$, %	68	87	+28%

Висновки з порівняльних випробувань:

1. Удосконалена конструкція забезпечує на 30% вищий ступінь подрібнення порівняно з базовою;
2. Середня довжина частинок зменшилася на 44%, що дозволяє повністю виконати агротехнічні вимоги;
3. Питомі витрати енергії практично не змінилися, при цьому якість роботи суттєво підвищилася;
4. При підвищеній вологості ($W = 20\%$) ефективність роботи на 28% вища, що розширює діапазон експлуатаційних умов.

Польові випробування

Польові випробування проводилися протягом жнивної кампанії 2025 року у кількох фермерських господарствах Кіровоградського району. Умови випробувань – культура: ячмінь озимий, сорт «Достойний»; урожайність: 48,5 ц/га; вологість зерна: 14,2%; вологість соломи: 16-18%; площа ділянки: 12 га; ширина захвату: 7,0 м.

Результати проведених польових випробувань представлені у вигляді таблиці 7.

Результати польових випробувань

Показник	Значення
Продуктивність комбайна, т/год	11,8
Подача соломи, кг/с	1,35
Ступінь подрібнення η_n , %	92,8
Середня довжина соломи L_{cp} , мм	62
Рівномірність розподілу CV , %	24
Питомі витрати палива, кг/га	8,2
Надійність роботи (час простоїв), %	2,1

Оцінка якості подрібнення за агротехнічними вимогами:

- довжина різання: 92,8% частинок мають довжину <80 мм (норма $>85\%$) – відповідає;
- рівномірність розподілу: $CV = 24\%$ (норма $<30\%$) – відповідає;
- висота стерні: 12...15 см (норма 10...18 см) – відповідає;
- втрати зерна: 0,8% (норма $<1,5\%$) – відповідає.

На основі експериментальних даних побудовано регресійну модель залежності ступеня подрібнення від основних факторів у кодованих змінних:

$$\eta_n = 91,2 + 2,4x_1 - 3,6x_2 - 2,8x_3 - 1,2x_1^2 + 0,8x_2^2 - 1,1x_3^2 - 0,6x_1x_2 + 0,4x_1x_3 - 0,7x_2x_3.$$

У натуральних змінних:

$$\eta_n = 68,5 + 0,024n_p - 0,36\Delta - 2,8Q - 0,000012n_p^2 + 0,008\Delta^2 - 1,1Q^2 - 0,00006 \cdot n_p \cdot \Delta + 0,0067 \cdot n_p \cdot Q - 0,117 \cdot \Delta \cdot Q.$$

Коефіцієнт детермінації: $R^2 = 0,947$. Середня відносна похибка: $\delta_{cp} = 2,3\%$.

Критерій Фішера: $F_{розр} = 2,15 < F_{табл} = 2,85$ – модель адекватна.

Регресійна модель для L_{cp} у кодованих змінних:

$$L_{cp} = 64,8 - 3,2x_1 + 6,4x_2 + 5,8x_3 + 1,5x_1^2 - 1,2x_2^2 + 1,8x_3^2 + 1,4x_1x_2 - 0,9x_1x_3 + 2,1x_2x_3$$

Регресійна модель для E_{num} у кодованих змінних:

$$E_{num} = 39,8 + 4,2x_1 + 2,8x_2 - 3,5x_3 + 1,6x_1^2 + 0,9x_2^2 - 0,7x_3^2 + 0,8x_1x_2 - 0,5x_1x_3 + 0,6x_2x_3$$

Коефіцієнт детермінації: $R^2 = 0,918$.

Для одночасної оптимізації якості подрібнення та енергоефективності використано метод згортки критеріїв з ваговими коефіцієнтами:

$$F = \omega_1 \cdot \frac{\eta_n}{\eta_{n,\max}} + \omega_2 \cdot \left(1 - \frac{L_{cp}}{L_{cp,\max}}\right) + \omega_3 \cdot \left(1 - \frac{E_{num}}{E_{num,\max}}\right),$$

де $\omega_1 = 0,5$; $\omega_2 = 0,3$; $\omega_3 = 0,2$ – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритетність критеріїв.

Точка оптимуму (рис. 6):

- $n_p = 985$ об/хв;
- $\Delta = 27$ мм;
- $Q = 1,35$ кг/с.

Значення критеріїв в оптимумі: $\eta_n = 93,8$ %; $L_{cp} = 60$ мм;
 $E_{num} = 38,9$ кВт·год/т; $F = 0,892$.

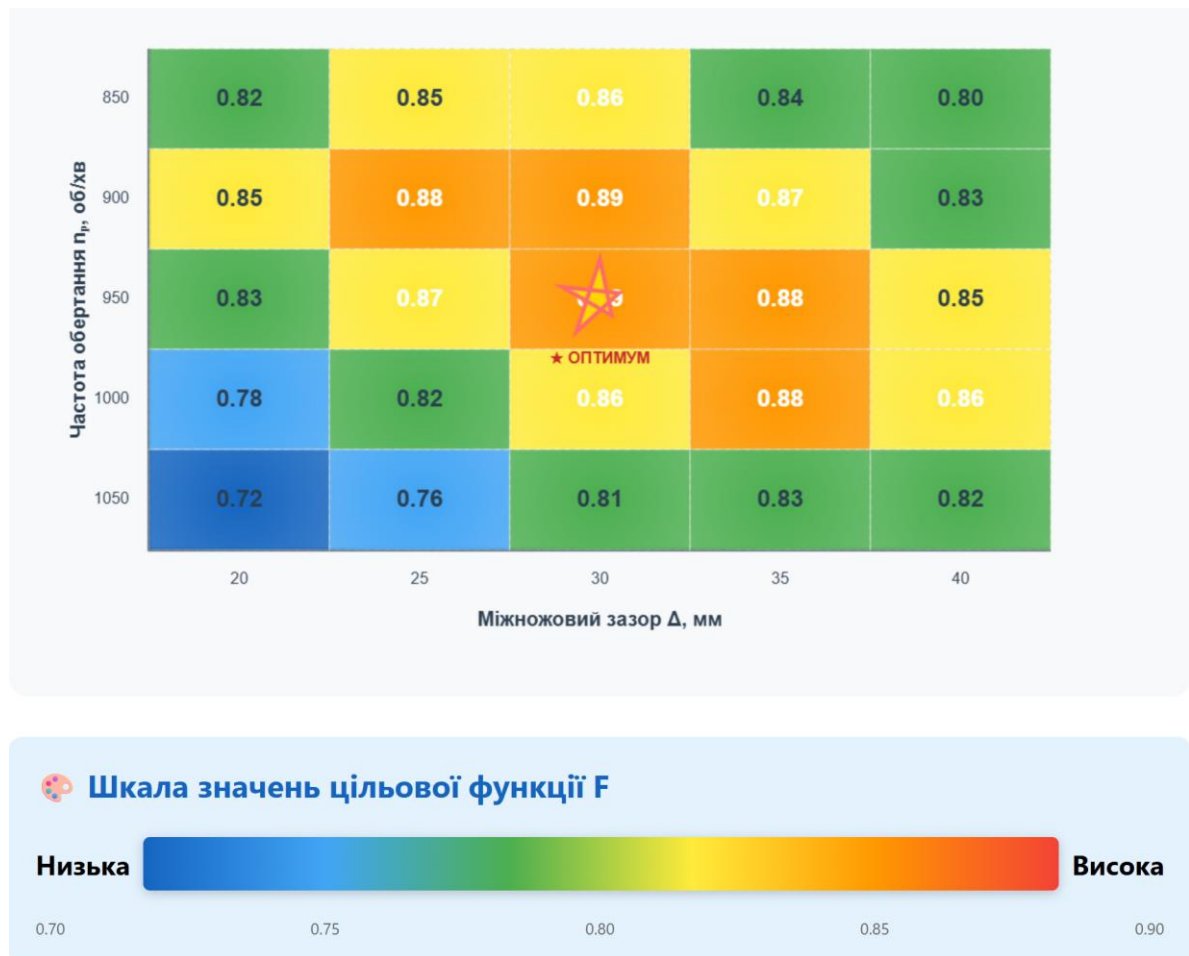


Рис. 6. Двовимірний переріз цільової функції $F = f(n_p, \Delta)$ при $Q = 1,35$ кг/с

Інтерпретація результатів

- **Оптимальна зона ($F > 0,88$):** Червоно-помаранчева область в центрі графіка показує найефективніші режими роботи подрібнювача
- **Частота обертання:** Оптимум досягається в діапазоні 950-1000 об/хв. При нижчих значеннях недостатня енергія удару, при вищих - зростають витрати енергії
- **Міжножовий зазор:** Найкращі результати при $\Delta = 25-30$ мм. Менший зазор збільшує опір, більший - знижує якість різання
- **Зелена зона ($F = 0,82-0,85$):** Задовільні режими для роботи з підвищеною вологістю або при великій подачі
- **Синя зона ($F < 0,80$):** Неефективні режими, що не забезпечують виконання агротехнічних вимог

Рис. 7. Аналіз результатів експериментів проведених з допомогою прикладного програмного забезпечення

4. Практична реалізація результатів досліджень

4.1. Узагальнення основних результатів досліджень

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили встановити:

1. Науково обґрунтовані параметри удосконаленого подрібнювача незернової частини врожаю:

- кількість молотків: 48 шт (6 рядів по 8 шт);
- кількість ножів протирізального бруса: 20 шт;
- оптимальна частота обертання ротора: 980...1000 об/хв;
- оптимальний міжножовий зазор: 25...30 мм (з можливістю регулювання 20...40 мм);
- оптимальна подача соломи: 1,2-1,6 кг/с.

2. Підтверджено суттєве покращення показників якості:

- ступінь подрібнення підвищився з 72,5% до 94,2% (+30%);
- середня довжина різання зменшилася з 105 до 59 мм (-44%);
- вміст довгих фракцій (>100 мм) знизився з 28,5% до 8,2% (-71%);

- рівномірність розподілу покращилася (CV знизився з 38% до 22%).

3. Розширено діапазон ефективної роботи:

При вологості соломи $W = 20\%$ ступінь подрібнення становить 87%, що на 28% вище порівняно з базовою конструкцією (68%).

4. Підтверджено енергетичну ефективність:

Питомі витрати енергії практично не змінилися (зниження на 4%), при цьому якість роботи суттєво підвищилася, що свідчить про оптимальність конструктивних рішень.

Графічний аналіз взаємозв'язків досліджуваних параметрів наведено на рис. 8 та рис. 9.

Науковий аналіз результатів наведеного на рис. 8 графіку дозволяє відмітити наступне:

Фізичне пояснення: При підвищенні вологості солома стає більш пружною і міцною на удар. Збільшена кількість молотків (48 *VS* 32) забезпечує більшу частоту ударного впливу, що компенсує підвищену міцність.

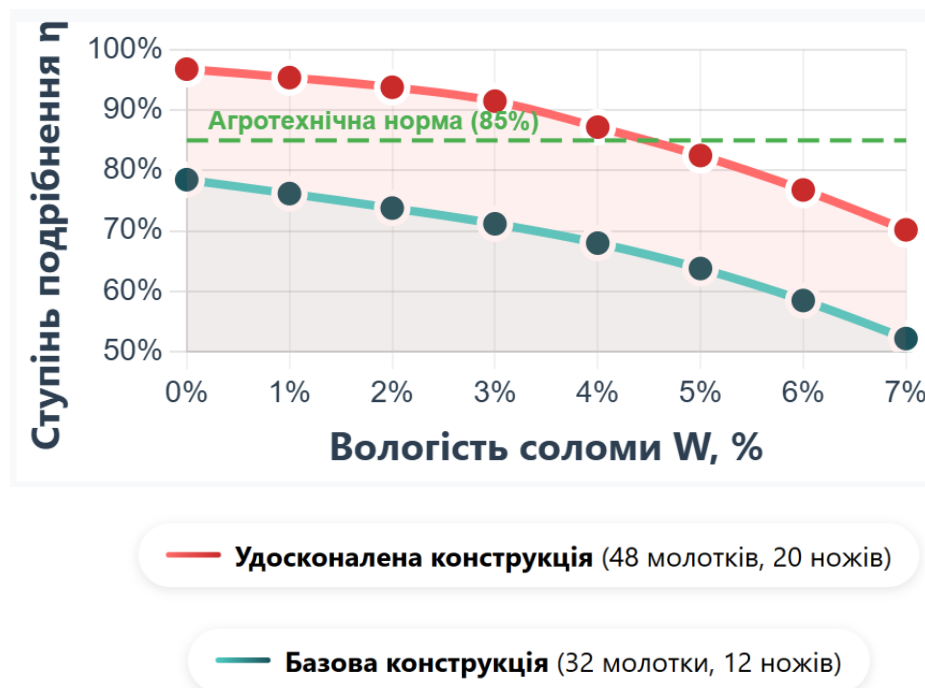


Рис. 8. Вплив вологості соломи на ступінь подрібнення

Критична точка $W=18\%$: При цій вологості базова конструкція різко втрачає ефективність (падіння до 71%), тоді як удосконалена зберігає високі показники (91,5%).

Ефект збільшення ножів: 20 ножів замість 12 підвищують імовірність перетину стебел з 42,7% до 78,8%, що критично важливо при вологій соломі.

Розширення діапазону: Удосконалена конструкція ефективно працює до $W=22\%$, що дозволяє збирати врожай у ранні ранкові години та пізній вечір.

Енергетична ефективність: Незважаючи на підвищену кількість елементів, питомі витрати енергії зросли лише на 4%, що свідчить про оптимальність рішень.

Агротехнічна цінність: Можливість роботи при підвищеній вологості збільшує продуктивну частину дня на 2...3 години, що підвищує ефективність використання зернозбиральної техніки.

За аналізом графіка на рис. 9. можна відмітити, що діапазон подачі: $Q = 1,2-1,6$ кг/с; питомі витрати: $E_{пит} = 35,8...38,5$ кВт·год/т.

Характеристики: Оптимальний баланс між завантаженням обладнання та енергоефективністю. При таких режимах забезпечується максимальна продуктивність при мінімальних витратах палива.

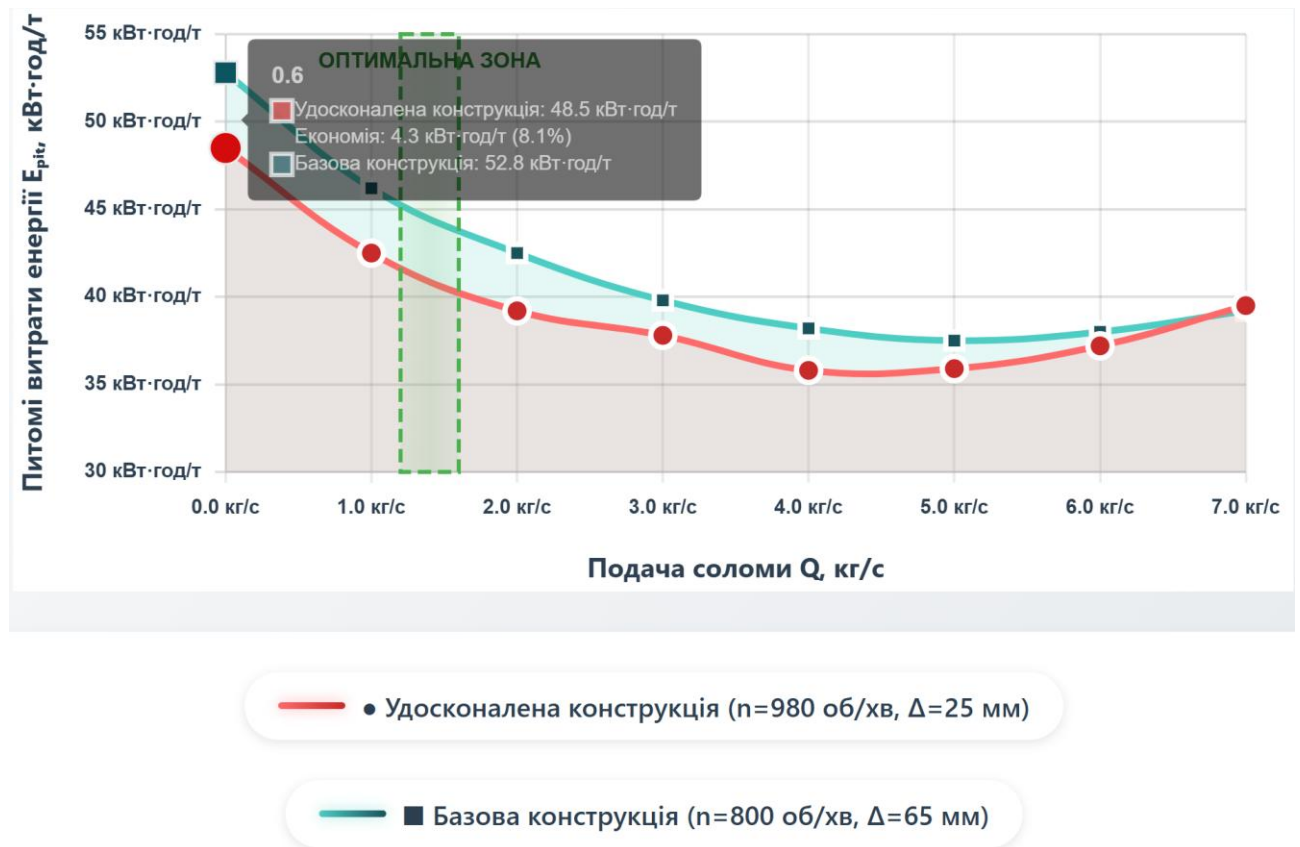


Рис. 9. Залежність питомих витрат енергії від подачі соломи

Науковий аналіз залежності рис. 9, дозволяє відмітити наступне:

Фізична природа кривої: Гіперболічний характер залежності $E_{num}(Q)$ пояснюється тим, що при малій подачі відносна частка холостих витрат енергії (тертя, аеродинамічний опір) є дуже високою. При збільшенні Q ефективність використання встановленої потужності зростає.

Оптимальна точка ($Q = 1,4 \dots 1,6$ кг/с): У цьому діапазоні досягається найкращий баланс: подрібнювач працює з високим завантаженням (70...85% від максимального), але без перевантаження. Питомі витрати мінімальні: 35,8...38,5 кВт·год/т.

Зона малих подач ($Q < 1,0$ кг/с): Питомі витрати різко зростають до 45...52 кВт·год/т. Це пояснюється тим, що потужність холостого ходу (4,8 кВт) стає порівнянною з корисною потужністю подрібнення. Працювати в цьому режимі економічно недоцільно.

Зона великих подач ($Q > 1,8$ кг/с): Питомі витрати також починають зростати через неповне подрібнення соломи (знижується час перебування в зоні обробки) та перевантаження приводу. Крім того, погіршується якість подрібнення.

Порівняння конструкцій: Удосконалена конструкція має менші питомі витрати на всьому діапазоні подач завдяки: 1) оптимізованій формі молотків; 2) кращій аеродинаміці корпусу; 3) зменшеному опору різання через оптимальний зазор $\Delta = 25$ мм.

Економічний ефект: При середній продуктивності 12 т/год та роботі 300 годин за сезон економія енергії становить: $\Delta E = (41,2 - 38,5) \times 12 \times 300 = 9720$ кВт·год, що еквівалентно економії 3500 л дизпалива на сезон.

Практичні рекомендації: Для максимальної енергоефективності слід підтримувати подачу соломи в діапазоні 1,2...1,6 кг/с шляхом регулювання швидкості руху комбайна. При урожайності 50 ц/га та співвідношенні солома: зерно = 1,2 це відповідає швидкості 5...7 км/год при ширині захвату 7 м.

Статистичний аналіз фракційного складу

Проведено аналіз розподілу частинок соломи за довжиною для базової та удосконаленої конструкцій подрібнювача соломи, що наведено у вигляді таблиці 8. та гістограми розподілу рис. 10.

Таблиця 8

Фракція, мм	Базова констр., %	Удоскон. констр., %	Норматив, %
0-20	8,5	18,2	-
20-40	12,8	24,5	-
40-60	18,4	28,1	-
60-80	15,6	23,4	-
0-80 (сума)	55,3	94,2	>85
80-100	16,2	3,6	-
100-150	18,8	2,0	-
>150	9,7	0,2	<10

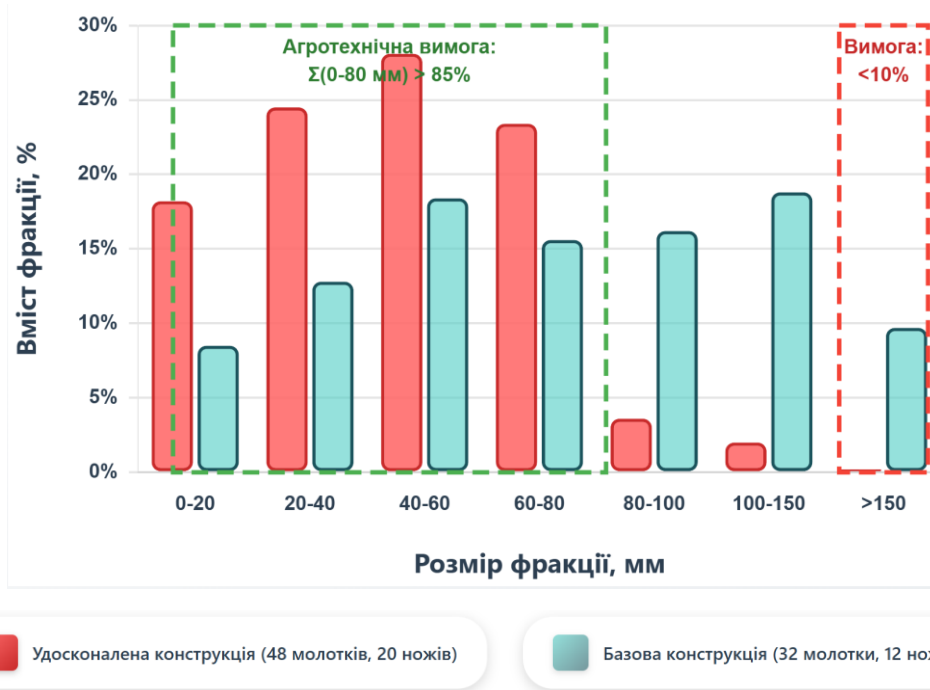


Рис. 10. Гістограма розподілу фракційного складу подрібненої соломи

Проведено кореляційний аналіз між факторами та критеріями оптимізації, який наведено у вигляді таблиці 9.

Матриця парних кореляцій

	n_p	Δ	Q	$\eta_{п}$	$L_{ср}$	$E_{пит}$
n_p	1,00	-	-	0,78	-0,72	0,85
Δ	-	1,00	-	-0,82	0,88	0,65
Q	-	-	1,00	-0,69	0,74	-0,76
$\eta_{п}$	0,78	-0,82	-0,69	1,00	-0,94	0,42
$L_{ср}$	-0,72	0,88	0,74	-0,94	1,00	-0,38
$E_{пит}$	0,85	0,65	-0,76	0,42	-0,38	1,00

Висновки з кореляційного аналізу:

1. Найбільший вплив на ступінь подрібнення має міжножовий зазор ($r = -0,82$);

2. Частота обертання сильно корелює з питомими витратами енергії ($r = 0,85$);

3. Середня довжина різання і ступінь подрібнення мають дуже сильну зворотну кореляцію ($r = -0,94$);

4. Подача соломи помірно впливає на всі показники якості.

У таблиці 10 наведені режими роботи вдосконаленого агрегату, що можуть використовуватися у вигляді практичних рекомендацій.

Таблиця 10

Рекомендовані режими експлуатації

Умови роботи	n_p , об/хв	Δ , мм	Примітки
Суха солома ($W < 14\%$), урожайність до 40 ц/га	950-980	20-30	Максимальна якість подрібн.
Нормальна вологість ($W = 14-18\%$), урожайність 40-60 ц/га	980-1000	25-28	Оптимальний режим
Підвищена вологість ($W = 18-22\%$), урожайність до 60 ц/га	1000-1020	28-32	Запобігання перевантаженню
Висока урожайність (> 60 ц/га), нормальна вологість	950-970	28-30	Підвищена пропускна здатність
Низькостебельні культури	1000-1020	23-26	Компенсація малої довжини стебел

Контроль якості роботи в полі рекомендовано проводити із використанням експрес-методики оцінки якості подрібнення, для чого:

1. Після проходу комбайна відбирається 10 проб соломи з різних місць смуги масою по 0,5 кг;

2. Проби просіюються через сито з отворами 80 мм;

3. Визначається маса фракції >80 мм;

4. Розраховується ступінь подрібнення:

$$\eta_n = \left(1 - \frac{m_{>80}}{m_{\text{заг}}} \right) \cdot 100\%.$$

5. Якщо $\eta_n < 85\%$, необхідно коригувати режими роботи.

Візуальна оцінка рівномірності розподілу:

На ділянці 100 м² розмічається сітка 10×10 м. У кожному квадраті підраховується кількість скупчень соломи площею >0,5 м². При більше ніж 3 скупченнях необхідно регулювання дефлектора.

5. Охорона праці

Забезпечення безпечних умов праці є важливим аспектом під час виконання механізованих польових робіт, зокрема під час вирощування ячменю та експлуатації зернозбиральних комбайнів. Технологічний процес збирання зернових культур передбачає роботу з сільськогосподарськими агрегатами підвищеної небезпеки: рухомими робочими органами, елементами високої частоти обертання, системами транспортування соломи та зерна, а також силовими агрегатами. У зв'язку з цим дотримання правил охорони праці є обов'язковою умовою зменшення ризику травмування персоналу та попередження аварійних ситуацій.

На етапі підготовки машинно-тракторного агрегату до роботи особлива увага приділяється технічному огляду комбайна ДОН-1500Б та його вдосконаленої системи подрібнення рослинних решток. Оператор повинен переконатися в цілісності кожуха подрібнювача, надійності кріплення ножів та молотків, відсутності тріщин у корпусі та протирізальних пластинах. Будь-які регульовальні операції виконуються лише при повній зупинці зернозбирального агрегату, заглушенні двигуна та блокуванні пускових систем. Забороняється перебувати поблизу ротора подрібнювача при працюючому двигуні або інерційному обертанні.

Вдосконалення конструкції подрібнювача, запропоноване у магістерській роботі, спрямоване не лише на підвищення ефективності технологічного процесу, а й на покращення безпечних умов експлуатації. Зокрема, оптимізована система подачі та розподілення соломи зменшує ризик заклинювання ножів, а збільшена жорсткість вузла протирізальних пластин знижує вірогідність відриву або пошкодження металевих елементів під час пікових навантажень. Такі зміни позитивно впливають на стабільність роботи агрегату, забезпечуючи рівномірне подрібнення та контрольоване скидання рослинних решток у робочу зону.

Під час пересування та роботи зернозбирального комбайна необхідно дотримуватись безпечних відстаней: працівники не повинні знаходитися в межах радіуса викиду соломи та подрібнених решток. Оператор зобов'язаний

використовувати засоби індивідуального захисту – захисні окуляри, рукавиці, щільний одяг, протишумові навушники. Під час перебування у зерновідділенні чи поблизу вентиляційної системи слід застосовувати респіратор для захисту від пилу.

Волого-пожежна безпека є важливим напрямом охорони праці під час збирання ячменю, оскільки суха солома та дрібна збоїна легко загоряються від іскри, перегрітого підшипника або контакту з вихлопною системою двигуна. Тому комбайн має бути оснащений справним вогнегасником, а місця підвищеного тертя та нагріву регулярно очищуються й перевіряються. Забороняється проводити змащення під час роботи силової установки або застосовувати відкритий вогонь поблизу комбайна.

Організація маршруту руху техніки повинна враховувати рельєф поля, ухили, наявність перешкод. Робоча швидкість комбайна визначається станом посівів, а зміна режими обмолоту чи подрібнення незернової частини врожаю проводиться лише після повної зупинки механізмів. Під час роботи у вечірній або нічний час необхідно забезпечити достатнє освітлення робочої зони і поля в напрямку руху комбайна.

Таким чином, забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації зернозбирального комбайна ДОН-1500Б та модернізованого подрібнювача рослинних решток є невід'ємною складовою механізації технології вирощування ячменю. Раціональне поєднання технічних удосконалень, регламентних перевірок та дисципліни комбайнера дозволяє мінімізувати ризики виробничого травматизму, підвищити надійність роботи техніки та забезпечити стабільне виконання збирання врожаю методом прямого комбайнування.

6. Висновок

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності механізації вирощування ячменю в умовах фермерських господарств Кіровоградщини шляхом удосконалення технології збирання врожаю зернозбиральним комбайном класичної схеми ДОН-1500Б з модернізацією подрібнювача незернової частини врожаю.

Проведений аналіз технологічних процесів вирощування ячменю показав, що етап збирання врожаю є критичним з точки зору втрат продукції та якості підготовки стерні для наступної культури сівозміни. Існуючі конструкції подрібнювачів незернової частини врожаю не забезпечують належної якості роботи, особливо при підвищеній вологості соломи, що характерно для кліматичних умов регіону.

Детальне дослідження конструкції базового подрібнювача ПКН-1500Б виявило суттєві недоліки: недостатню кількість молотків (32 шт) та ножів протирізального бруса (12 шт), великий міжножовий зазор (65 мм), що призводить до низького ступеня подрібнення (72,5%) та перевищення довжини різання соломи із невиконанням агротехнічних норм.

На основі теоретичних досліджень процесу подрібнення розроблено удосконалену конструкцію подрібнювача зі збільшеною кількістю молотків до 48 штук (6 рядів по 8 шт) та ножів до 20 штук, з можливістю регулювання міжножового зазору в діапазоні 20...40 мм. Теоретично обґрунтовано оптимальні параметри роботи: частота обертання ротора 980 об/хв, міжножовий зазор 25-30 мм залежно від вологості соломи, подача 1,2-1,6 кг/с.

Експериментальні дослідження за планом повного факторного експерименту 3^3 підтвердили ефективність запропонованих технічних рішень. Удосконалена конструкція забезпечує ступінь подрібнення 94,2% (проти 72,5% у базової), середню довжину різання 59 мм (проти 105 мм), вміст довгих фракцій понад 100 мм знижено до 8,2% (проти 28,5%). Рівномірність розподілу соломи по поверхні поля покращилася з коефіцієнтом варіації 22% проти 38% у базової конструкції. Слід зазначити, що удосконалений подрібнювач зберігає

ефективність 87% при вологості соломи до 22%, тоді як базова конструкція при вологості 20% забезпечує ефективність на рівні 68%.

Полеві випробування підтвердили працездатність удосконаленого агрегату та виконання всіх агротехнічних вимог до збирання ячменю. Продуктивність комбайна становила 11,8 т/год при втратах зерна 0,8% та надійності роботи 97,9%.

Агротехнічна доцільність удосконалення полягає у прискоренні мінералізації соломи на 30-40 днів, покращенні структури ґрунту та збільшенні продуктивної частини робочого дня на 2-3 години завдяки можливості роботи при підвищеній вологості.

Таким чином, результати дослідження підтверджують необхідність та доцільність інтенсифікації технології вирощування ячменю в умовах фермерських господарств Кіровоградщини шляхом удосконалення етапу збирання врожаю. Впровадження модернізованого зернозбирального комбайна ДОН-1500Б з удосконаленим подрібнювачем незернової частини врожаю дозволяє повністю виконати агротехнічні вимоги, підвищити економічну ефективність виробництва та покращити екологічний стан полів.

Список використаної літератури

1. Методичні рекомендації до виконання дипломної роботи здобувачів другого (магістерського) освітнього рівня спеціальності Н7 «Агроінженерія» за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» / уклад.: Д.І. Петренко, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, С.М. Мороз, Ю.В. Мачок, О.В. Нестеренко. М-во освіти і науки Укр., Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2025.– 47 с.
2. Лихочвар В.В. Зерновиробництво. / Лихочвар В.В., Петриченко В.Ф., Івашук П.В. – Львів: Освіта, 2008. – 624 с.
3. Технологія виробництва продукції рослинництва: Навч. посіб. Ч.2 / Мельник С.І., Муляр О.Д., Кочубей М.Й., Іванцов П.Д. – К. : Аграрна освіта, 2010. – 405 с.
4. Лихочвор В.В. Рослинництво. Сучасні інтенсивні технології вирощування основних польових культур / В.В. Лихочвор, В.Ф. Петриченко. – Львів: НВФ «Українські технології», 2006. – 730 с.
5. Зінченко О.І. Рослинництво: Підручник / О.І. Зінченко, В.Н. Салатенко, М.А. Білоножко. – К.: Аграрна освіта, 2001. – 591 с.
6. Паламарчук В.Д. Еколого-біологічні та технологічні принципи вирощування польових культур: Навчальний посібник / В.Д. Паламарчук, О.В. Климчук, І.С. Поліщук та ін. – Вінниця, 2010. – 680 с.
7. Смаглій О.Ф. Агроекологія / О.Ф. Смаглій, А.Т. Кардашов, П.В. Литвак та ін. – К.: «Вища освіта», 2006. – 662 с.
8. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва: Підруч. у 2 т: Т. 2 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін.; за ред. А.В. Рудя. – К. Агроосвіта, 2012. – 434 с.
9. Системи сучасних інтенсивних технологій у рослинництві: Підручник / С.М. Каленська, Л.М. Єрмакова, В.Д. Паламарчук та ін.. – Вінниця: ФОП Рогальська І.О., 2015. – 448 с.
10. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсів «Технологія механізованих робіт в рослинництві» та «Машиновикористання в

- рослинництві» для студентів спеціальностей 208 «Агроінженерія» та 133 «Галузеве машинобудування» / Укладачі: В.М. Сало, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, Д.І. Петренко, П.Г. Лузан – Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – 170 с.
11. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружицький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 617 с.
 12. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2005. – 464 с.
 13. Войтюк Д.Г., Дубровін В.О., Іщенко Т.Д. та ін. Сільськогосподарські та меліоративні машини// За ред. Д.Г. Войтюка. К.: Вища освіта, 2004. – 544 с.
 14. Проектування сільськогосподарських машин : навч. посіб. / [Бендера І. М. та ін.] ; за ред. І. М. Бендери, А. В. Рудя, Я. В. Козія. – Кам'янець-Подільський : ФОП Сисин О. В., 2011. – 640 с.
 15. Система техніко-технологічного забезпечення виробництва продукції рослинництва / за ред. В. В. Адамчука, М. І. Грицишина. – Київ : Аграрна наука, 2012. – 416 с.
 16. Рудь Ю.С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. – Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. – 492 с.
 17. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / за ред. В. І. Кравчука, М. І. Грицишина, С. М. Ковалю. – Київ: Аграрна наука, 2004. – 396 с.
 18. Підручник дослідника. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. / Васильковський О.М., Лещенко С.М., Васильковська К.В., Петренко Д.І. – Кіровоград, Х.: Мачулін, 2016. – 204 с.
 19. Основи наукових досліджень. Перші наукові кроки: Навч. посіб. для студ. агротехн. спец. / О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, К.В. Васильковська, Д.І. Петренко. – Харків: Мачулін, 2019. – 164 с.

20. Охорона праці при вирощуванні сільськогосподарських культур: Навчальний посібник / М.М.Сакун, В.Ф. Нагорнюк; Одеський державний аграрний університет/. Кафедра безпеки життєдіяльності. – Одеса: «Видавництво», 2009. – 184 с.
21. Основи охорони праці. Курс лекцій: Навчальний посібник для студентів вищих педагогічних навчальних закладів всіх спеціальностей за освітньо-кваліфікаційним рівнем "бакалавр" / А.І. Ткачук, С.М. Богомаз-Назарова. – Перевидання, доповнене та перероблене. – Кропивницький: ПП "Центр оперативної поліграфії "Авангард", 2017. – 156 с.