

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «другого (магістерського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ МОЛОТАРКИ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: к.т.н. головний інженер
_____ Олександр МОРАР

Виконав здобувач другого (магістерського) рівня
вищої освіти заочної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Вячеслав НЕБОГА

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання
на відповідне джерело.*

_____ Вячеслав НЕБОГА

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Вячеслав НЕБОГА

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Підвищення ефективності роботи зернозбирального комбайна шляхом оптимізації режимів роботи молотарки на основі математичного моделювання»

науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 116 від « 27 » 06 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 17.08.2026.

3. **Об'єкт дослідження:** технологічний процес роботи молотарки зернозбирального комбайна барабанного типу як складної системи, що включає молотильно-сепарувальну систему (МСС), систему остаточної сепарації зерна (СОС) та систему очищення зерна (СОЗ).

4. **Предмет дослідження:** закономірності впливу технічних параметрів (частота обертання барабана, зазор між барабаном і декою), технологічних режимів (подача хлібної маси, швидкість руху комбайна) та умов роботи (вологість зерна й соломи, солемистість) на оціночні показники роботи молотарки – втрати зерна та дроблення.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: провести аналіз сучасного стану проблеми підвищення ефективності роботи молотарки зернозбирального комбайна; виконати огляд конструкцій та технологічних схем молотарок (барабанні та роторні); систематизувати показники ефективності роботи молотарки та фактори, що на них впливають .

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: розробити багатофакторну математичну модель показника втрат зерна за молотаркою у вигляді полінома другого порядку.

5.3. Проектно-рекомендаційний розділ: виконати оптимізацію технологічних режимів роботи молотарки на основі розробленої математичної моделі для різних умов експлуатації (сухі, середні, вологі) .

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу: структурно-функціональна схема молотарки зернозбирального комбайна із виділенням технологічних систем (МСС, СОС, СОЗ).

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу: графічна модель молотарки на рівні показників якості роботи, технічних параметрів, технологічних режимів та умов роботи.

6.3. До проектно-рекомендаційного розділу: таблиця оптимальних режимів роботи молотарки для різних умов експлуатації; графіки оптимізаційних залежностей (поверхні відгуку); діаграма порівняння втрат зерна до та після оптимізації; таблиця розрахунку економічної ефективності; рекомендаційна карта налаштування молотильного апарата.

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проекту): технічні характеристики зернозбирального комбайна [марка/модель] із молотаркою барабанного типу; результати випробувань молотарки комбайна в різних умовах експлуатації (вологість зерна 10-20%, вологість соломи 10-30%, солонистість до 1,60); дані про режими роботи комбайна (частота обертання барабана 500-900 об/хв, зазор 10-30 мм, подача 4-12 кг/с)

8. Перелік публікацій за напрямом досліджень:

9. Дата видачі завдання: « 27 » 03 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проекту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	27.03.2026		
2.	Отримання завдання і складання змісту (плану) кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проекту)	15.04.2026		

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційног о проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	29.04. 2026		
4.	Написання першого (теоретикометодичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	18.05. 2026		
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	11.06.2026		
6.	Написання другого (дослідницькоаналітичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	01.08.2026		
7.	Написання третього (проектно-розрахункового) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	11.08.2026		
8.	Написання висновків, списку літератури	21.08.2026		
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) науковим керівником	27.08.2026		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	07.08.2026		
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	10. 08.2026		
12.	Подання кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на кафедру	11. 08.2026		

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційног о проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на оригінальність	12. 08.2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	15. 08.2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	16. 08.2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	19.08.2026		
	Загальна кількість			

Здобувач ОС «_____» _____ Вячеслав НЕБОГА

Науковий керівник _____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП _____ Костянтин ДЯДЮРА

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: складається з 101 сторінок, 5 розділів, 19 рисунків, 20 таблиць, 22 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: технологічний процес роботи молотарки зернозбирального комбайна барабанного типу як складної системи, що включає молотильно-сепарувальну систему (МСС), систему остаточної сепарації зерна (СОС) та систему очищення зерна (СОЗ).

Предмет дослідження: закономірності впливу технічних параметрів (частота обертання барабана, зазор між барабаном і декою), технологічних режимів (подача хлібної маси, швидкість руху комбайна) та умов роботи (вологість зерна й соломи, солемистість) на оціночні показники роботи молотарки – втрати зерна та дроблення.

Мета роботи: підвищення ефективності роботи зернозбирального комбайна шляхом оптимізації режимів роботи молотарки на основі розробленої багатофакторної математичної моделі, що забезпечує мінімізацію втрат зерна та зниження енергоємності процесу за різних умов експлуатації.

Методи дослідження: системний аналіз для визначення структури та взаємозв'язків елементів молотарки; методи математичного та графічного моделювання для встановлення кількісних залежностей між факторами впливу та оціночними показниками; багатофакторний експеримент із; регресійний аналіз; методи багатокритеріальної оптимізації для визначення раціональних режимів роботи молотарки; техніко-економічний аналіз для оцінки ефективності запропонованих рішень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИЙ КОМБАЙН, МОЛОТАРКА, БАГАТОФАКТОРНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ, ВТРАТИ ЗЕРНА, ДРОБЛЕННЯ ЗЕРНА

					14.17 - КР.006.0.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Небога В.			РЕФЕРАТ				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.									6	1
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К. О.										

ЗМІСТ

	С
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МОЛОТАРКИ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА.....	12
1.1 Значення зернозбиральних комбайнів у сучасному аграрному виробництві.....	12
1.2 Класифікація та конструктивні особливості молотарок зернозбиральних комбайнів.....	13
1.3 Показники ефективності роботи молотарки та фактори, що на них впливають.....	16
1.4 Огляд методів математичного моделювання процесів обмолоту та сепарації зерна.....	19
Висновки.....	26
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОБОТИ МОЛОТАРКИ.....	27
2.1 Методологічні основи дослідження молотарки як складної системи.....	27
2.2 Визначення технологічних систем молотарки та їх характеристика	29
2.3 Фактори впливу на показники роботи молотарки.....	33
2.4 Розроблення багатфакторної математичної моделі показника втрат зерна.....	38
Висновки.....	47
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МОЛОТАРКИ.....	48

					14.17 - КР.006.0.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Небога			ЗМІСТ				Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.									7		2	
Реценз.														
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К. О.												

3.1 Програма експериментальних досліджень.....	48
3.2 Методика проведення експериментальних досліджень.....	54
3.3 Перелік обладнання та засобів вимірювання.....	57
3.4 Результати експериментальних досліджень.....	59
Висновки.....	65
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	67
4.1 Нормативно-правова база з охорони праці	68
4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	69
4.3 Організаційні заходи з охорони праці	72
4.5 Вимоги безпеки під час роботи на комбайні.....	74
Висновки.....	79
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	81
5.1 Вихідні дані для розрахунку.....	82
5.2 Методика розрахунку економічної ефективності.....	85
5.3 Розрахунок економічної ефективності для базового сценарію.....	89
5.4 Зведені показники економічної ефективності.....	91
Висновки.....	95
ВИСНОВКИ.....	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	99

ВСТУП

Актуальність теми. Зерновиробництво є стратегічно важливою галуззю сільського господарства України, від ефективності якої значною мірою залежить продовольча безпека держави та економічна стабільність аграрного сектору. Одним із ключових і найбільш відповідальних етапів технології вирощування зернових культур є збирання врожаю, яке виконується зернозбиральними комбайнами. Зернозбиральний комбайн є основною машиною в технології збирання зернових культур, від ефективності роботи якої значною мірою залежать економічні показники виробництва зерна. Молотарка – найважливіший робочий орган комбайна, який визначає якість обмолоту, рівень втрат зерна та енергетичні витрати. Особливістю функціонування молотарки є багатомірність – наявність багатьох вхідних і вихідних змінних.

У зв'язку зі зростанням вимог до продуктивності та якості збиральних робіт, особливої актуальності набуває задача оптимізації режимів роботи молотарки, що дозволяє мінімізувати втрати зерна та знизити енергоємність процесу. Тому задача оптимізації режимів роботи молотарки на основі математичного моделювання є актуальною науково-практичною проблемою.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи зернозбирального комбайна шляхом оптимізації режимів роботи молотарки на основі розробленої багатофакторної математичної моделі, що забезпечує мінімізацію втрат зерна та зниження енергоємності процесу за різних умов експлуатації.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

					14.17 - КР. 006.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Небога В.						
Перевір.		Дядюра К. О.					9	3
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

- Проаналізувати сучасний стан проблеми та існуючі методи дослідження роботи молотарки зернозбирального комбайна.
- Розробити багатофакторну математичну модель показника втрат зерна за молотаркою з урахуванням зв'язку та залежності між елементами різних груп факторів.
- Розробити програму та методику експериментальних досліджень роботи молотарки в реальних господарських умовах.
- Провести експериментальні дослідження роботи молотарки за різної вологості зерна й соломи та різних режимах подачі технологічної маси на обмолот.
- Виконати оптимізацію технологічних режимів роботи молотарки на основі розробленої моделі.
- Оцінити економічну ефективність запропонованих рішень.

Об'єкт дослідження – технологічний процес роботи молотарки зернозбирального комбайна барабанного типу як складної системи, що включає молотильно-сепарувальну систему (МСС), систему остаточної сепарації зерна (СОС) та систему очищення зерна (СОЗ).

Предмет дослідження – закономірності впливу технічних параметрів (частота обертання барабана, зазор між барабаном і декою), технологічних режимів (подача хлібної маси, швидкість руху комбайна) та умов роботи (вологість зерна й соломи, соломистість) на оціночні показники роботи молотарки – втрати зерна та дроблення.

Методи дослідження.

- *Системний аналіз* – для визначення структури та взаємозв'язків елементів молотарки як складної системи з множиною вхідних змінних (факторів) і вихідних (оціночних показників);
- *Методи аналізу і синтезу* – метод аналізу диференціює молотарку на складові частини та послідовно досліджує кожну з них, метод синтезу

					14.17 - КР. 006.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досліджує та оцінює молотарку за умови цілісної єдності і взаємозв'язку її технічних і технологічних систем;

– *Методи математичного та графічного моделювання* – для встановлення кількісних залежностей між факторами впливу та оціночними показниками;

– *Багатофакторний експеримент* – для отримання емпіричних даних про роботу молотарки в реальних господарських умовах;

– *Регресійний аналіз* – перевірка однорідності дисперсій за критерієм Кохрена, значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента, адекватності моделі за критерієм Фішера;

– *Методи багатокритеріальної оптимізації* – для визначення раціональних режимів роботи молотарки;

– *Техніко-економічний аналіз* – для оцінки ефективності запропонованих рішень.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Удосконалено багатофакторну математичну модель показника втрат зерна за молотаркою зернозбирального комбайна барабанного типу, яка, на відміну від існуючих, комплексно враховує взаємозв'язки між технічними параметрами, технологічними режимами та умовами роботи.

2. Вперше для досліджуваного типу молотарки встановлено кількісні залежності впливу вологості соломи та солемистості на рівень втрат зерна в широкому діапазоні зміни факторів.

3. Обґрунтовано оптимальні діапазони регулювання частоти обертання барабана та зазору для різних умов експлуатації (сухі, середні та вологі умови збирання).

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати можуть бути використані: для обґрунтування раціональних режимів роботи молотарки в конкретних умовах експлуатації, що дозволяє знизити втрати зерна на 0,2–0,5 %.

					14.17 - КР. 006.0.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МОЛОТАРКИ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА

1.1 Значення зернозбиральних комбайнів у сучасному аграрному виробництві

Зерновиробництво є провідною галуззю сільського господарства України, що забезпечує продовольчу безпеку держави та формує значну частину експортного потенціалу країни. Ефективність зерновиробництва визначається комплексом організаційних, технологічних та технічних факторів, серед яких ключове місце посідає процес збирання врожаю. Зернозбиральний комбайн є основною машиною в технології збирання зернових культур, від ефективності роботи якої значною мірою залежать економічні показники виробництва зерна (рисунк 1.1).



Рисунок 1.1 – Значення зернозбиральних комбайнів у сучасному аграрному виробництві

					14.17 - КР.006.1.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1		
Розроб.	Небога В.						
Перевір.	Дядюра К. О.						
Реценз.							
Н. Контр.							
Затверд.	Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів
						12	17

Сучасний зернозбиральний комбайн являє собою складну технічну систему, що виконує функції трьох простих машин – жатки, молотарки та віялки. Продуктивність комбайна визначає його основна система – молотарка. Ступінь функціональної досконалості молотарки та продуктивність комбайна визначає технологічна схема молотарки. Молотарка зернозбирального комбайна – це складна система, елементами якої є технологічні системи нижчого рівня, що характеризуються технічними параметрами, технологічними режимами та умовами роботи.

Особливістю функціонування молотарки є багатомірність – наявність багатьох вхідних і вихідних змінних. До вхідних змінних належать технічні параметри молотарки, технологічні режими її роботи та умови експлуатації, а до вихідних – оціночні показники якості роботи, насамперед втрати зерна та його дроблення.

1.2 Класифікація та конструктивні особливості молотарок зернозбиральних комбайнів

Молотарки зернозбиральних комбайнів класифікуються за низкою ознак, серед яких основними є тип молотильно-сепарувального пристрою (МСП) та технологічна схема виконання робочого процесу.

Класифікація молотарок за типом молотильного апарата (рисунок 1.2).

За типом молотильного апарата молотарки поділяються на [9]:

1. *Барабанні (тангенціальні) молотарки* – найбільш поширений тип, у якому молотильний апарат виконано у вигляді барабана з билами або зубами, розміщеного впоперек молотарки. Хлібна маса подається в зазор між барабаном і декою, де відбувається обмолот за рахунок ударних навантажень у початковий момент зіткнення колоска з бичем, а також стискання та тертя при проходженні через зазор.

					14.17 - КР. 006.1.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. *Роторні (аксіально-роторні) молотарки* – у цих системах обмолот і сепарація відбуваються вздовж ротора, що забезпечує більш тривалий вплив на зернову масу та кращу сепарацію. Особливістю роботи комбайна з роторною системою є те, що через деки із роторної системи на струшувальну дошку сепарується маса зерна і полови.

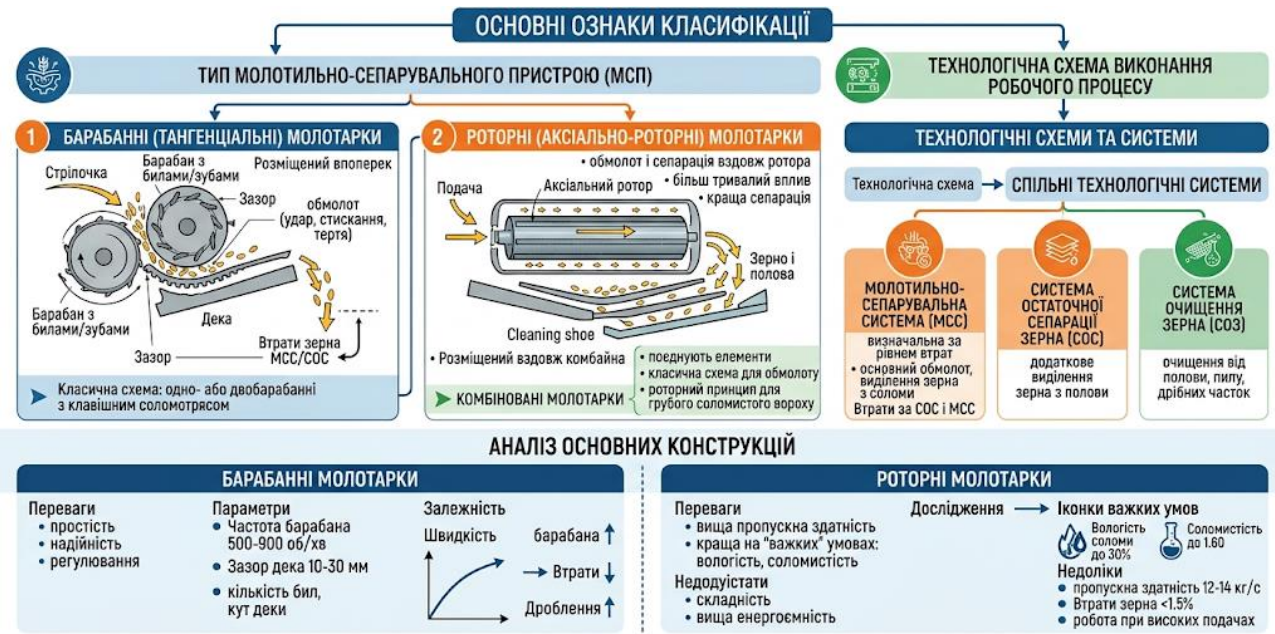


Рисунок 1.2 – Класифікація та конструктивні особливості молотарок зернозбиральних комбайнів

3. *Комбіновані молотарки* – поєднують елементи барабанних та роторних систем. У комбінованих МСП для обмолоту та сепарації рослинної маси використовується класична схема МСП, а сепарація грубого (соломистого) вороху відбувається за роторним принципом.

У світовій практиці створення зернозбиральних комбайнів розвиток йде по двох основних напрямках: з молотаркою класичної схеми і з аксіально-роторним молотильно-сепарувальним пристроєм.

Технологічні схеми молотарок.

Технологічна схема молотарки визначає послідовність виконання технологічних операцій обмолоту, сепарації та очищення зерна. Сучасні молотарки незалежно від типу мають спільні технологічні системи:

– *Молотильно-сепарувальна система (МСС)* – визначальна система відповідно до технологічної ролі у формуванні рівня втрат зерна. У ній відбувається основний обмолот зерна та виділення його з соломистої маси. Дослідження функційних зв'язків між системами молотарки базується на аналізі складу та напрямку руху її технологічних потоків. Вміст зерна (втрат), що виходить із молотарки, класифікується відповідно як "втрати за системами СОС і МСС".

– *Система остаточної сепарації зерна (СОС)* – забезпечує додаткове виділення зерна з полови після МСС.

– *Система очищення зерна (СОЗ)* – здійснює очищення зерна від домішок (полови, пилу, дрібних часток).

У комбайнах з класичною схемою молотарки одно- або двобарабанні молотильні апарати розміщені впоперек молотарки, а сепаратор грубого вороху – клавішний. Продуктивність роботи зернозбирального комбайна значною мірою обумовлюється конструкцією і параметрами молотильно-сепаруючого пристрою (МСП).

Аналіз основних конструкцій молотарок.

Барабанні молотарки характеризуються відносною простотою конструкції, надійністю в роботі та доступністю регулювань. Основні параметри барабанної молотарки – частота обертання барабана (зазвичай 500-900 об/хв), зазор між барабаном і декою (10-30 мм), кількість бил та кут охоплення деки. Ефективність обмолоту залежить від швидкості обертання барабана: з її збільшенням втрати зерна зменшуються, але зростає дроблення.

Роторні молотарки мають вищу пропускну здатність порівняно з барабанними, краще працюють на "важких" умовах (підвищена вологість, значна соломистість). Проте вони складніші в конструкції та регулюванні, мають вищу енергоємність.

					14.17 - КР. 006.1.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження показують, що молотарка, технічні параметри якої спрямовані на забезпечення більшої пропускної здатності, меншою мірою реагує на «важкі» умови роботи, для яких характерні значна вологість соломи (до 30 %) та солонистість (до 1,60). Це проявляється у її здатності працювати при втратах зерна менше 1,5 % та високих режимах подачі – пропускній здатності у 12-14 кг/с.

1.3 Показники ефективності роботи молотарки та фактори, що на них впливають

Система оціночних показників. Ефективність роботи молотарки оцінюється комплексом показників, що характеризують якість виконання технологічного процесу та енергетичну ефективність. Основними оціночними показниками якості функціонування та вираження відповідності технічним параметрам і технологічним режимам є втрати зерна за молотаркою, її системи, а також дроблення зерна в МСС (рисунок 1.3).

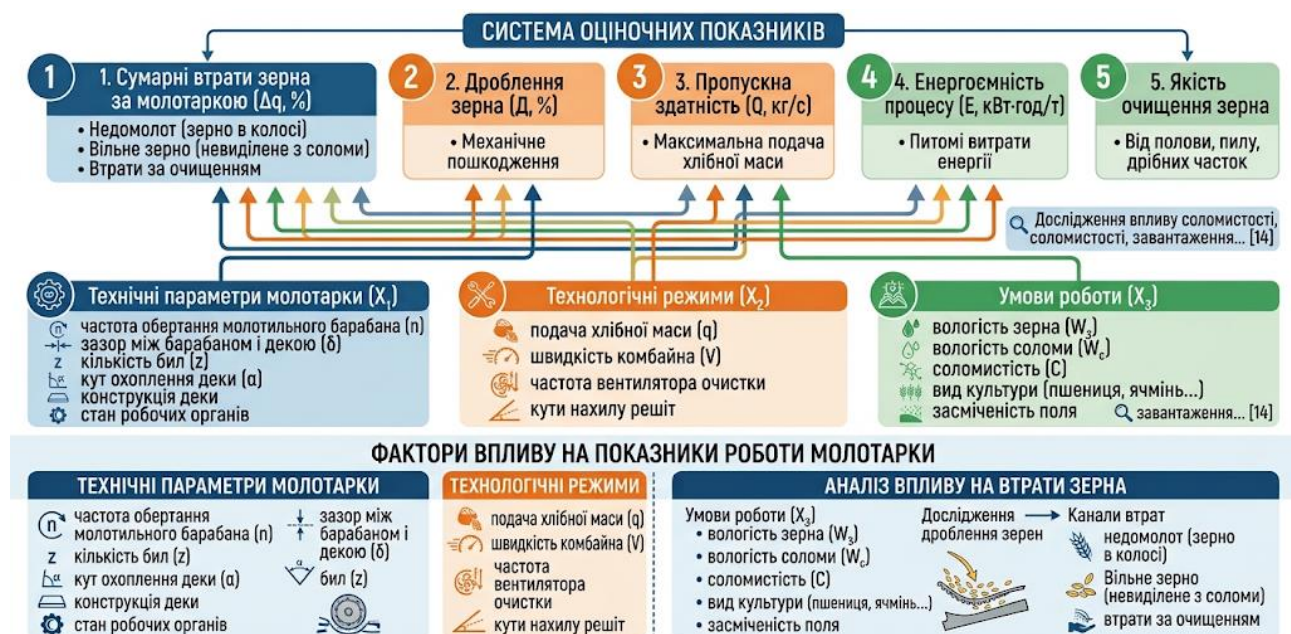


Рисунок 1.3 – показники ефективності роботи молотарки та фактори, що на них впливають

До системи оціночних показників належать:

1. *Сумарні втрати зерна за молотаркою (Δq , %)* – основний показник, що визначає ефективність роботи молотарки. Втрати зерна за молотаркою включають втрати від недомолоту (зерно в колосі), втрати вільного зерна (невиділеного з соломи) та втрати за системою очищення. Оптимізація технологічних режимів зернозбирального комбайна – зернової жатки/адаптера та молотарки є ключовою для мінімізації втрат.

2. *Дроблення зерна (D , %)* – показник, що характеризує механічне пошкодження зерна в процесі обмолоту. Допустимі втрати зерна при роботі вітчизняних зернозбиральних комбайнів становлять 3–4 % на гектар, однак застосування оптимальних технологічних регулювань молотарок дозволяє зменшити в 5–10 разів втрати зерна і механічне травмування насіння.

3. *Пропускна здатність (Q , кг/с)* – максимальна подача хлібної маси на обмолот, при якій забезпечуються допустимі втрати зерна та дроблення. Продуктивність комбайна визначає основна система комбайна – молотарка.

4. *Енергоємність процесу (E , кВт·год/т)* – питомі витрати енергії на обмолот одиниці маси зерна.

5. *Якість очищення зерна* – ступінь виділення зерна від домішок (полови, пилу, дрібних часток).

Фактори впливу на показники роботи молотарки. На показники роботи молотарки впливає значна група факторів, які доцільно об'єднати в три основні групи.

Технічні параметри молотарки (X_1) [11]:

- частота обертання молотильного барабана (n , об/хв) – визначає інтенсивність ударного впливу на зернову масу;
- зазор між барабаном і декою (δ , мм) – впливає на ступінь обмолоту та дроблення зерна;
- кількість бил на барабані (z , шт.) – визначає частоту ударних впливів;
- кут охоплення деки (α , град) – впливає на тривалість перебування маси в молотильному зазорі;

					14.17 - КР. 006.1.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– конструкція деки (тип, форма та розміри отворів) – визначає ефективність сепарації;

– стан робочих органів (зношення бил, деформація деки) – впливає на якість обмолоту.

Технологічні режими (X_2) [12]:

– подача хлібної маси на обмолот (q , кг/с) – визначає завантаження молотарки;

– швидкість руху комбайна (V , км/год) – впливає на рівномірність подачі маси;

– частота обертання вентилятора очистки – визначає інтенсивність повітряного потоку для очищення зерна;

– кути нахилу решіт очистки – впливають на ефективність сепарації на решетах.

Умови роботи (X_3) [13]:

– вологість зерна (W_z , %) – впливає на міцність зв'язку зерна з колосом та схильність до дроблення;

– вологість соломи (W_c , %) – визначає еластичність та міцність соломистої маси;

– соломистість (C , відношення маси соломи до маси зерна) – впливає на пропускну здатність молотарки;

– вид і стан культури (пшениця, ячмінь, жито тощо) – різні культури мають різні фізико-механічні властивості;

– засміченість поля бур'янами – впливає на склад зернового вороху.

Дослідження впливу соломистості та ступеня завантаження молотарки зернозбиральних комбайнів на якість обмолоту зерна озимої пшениці є одним із ключових напрямів сучасних наукових досліджень. Технічні фактори та їх вплив на значення втрат зерна за молотаркою досліджуються в багатьох наукових працях.

					14.17 - КР. 006.1.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз впливу факторів на втрати зерна [14].

Втрати зерна за молотаркою формуються за різними каналами:

- неповне підбирання валка;
- високий зріз;
- втрати колосків за жаткою і через польовий подільник;
- вимолочування зерна планками мотовила;
- втрати за молотильно-сепарувальною системою (недомолот, невиділене зерно);
- втрати за системою очищення.

Головними умовами роботи молотарки без втрат є: оптимальне завантаження; регулювання молотильного апарата, соломотряса та очистки відповідно до умов.

На втрати вільного зерна від невимолочування впливає стан клавіш соломотряса. Люфт у підвісках клавіш порушує їхню синхронну роботу, що призводить до накопичення та скидання вороху.

1.4 Огляд методів математичного моделювання процесів обмолоту та сепарації зерна

Системний підхід до моделювання молотарки [15]. Молотарка зернозбирального комбайна як об'єкт дослідження характеризується системним принципом побудови, комбінованим принципом функціонування, новими інтегративними якостями технологічної маси на різних ділянках та залежністю оціночних показників роботи від значної групи чинників (факторів) впливу. Відповідно до цього для її досліджень доцільне застосування методів аналізу і синтезу (рисунок 1.4).

					14.17 - КР. 006.1.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.4 – Огляд методів математичного моделювання процесів обмолоту та сепарації зерна

Метод аналізу диференціює на складові частини молотарки – структурні, функціональні, оціночні тощо, та послідовно досліджує кожну з них, а також визначає взаємозв'язану поведінку кожної частини. Застосування методу аналізу дає змогу виокремити у складі молотарки її структурні й функціональні системи, зокрема комплексну молотильно-сепарувальну систему (КМСС) молотарки, і досліджувати її з урахуванням технічних параметрів, технологічних режимів та умов роботи незалежно від інших систем.

Метод синтезу досліджує та оцінює молотарку за умови цілісної єдності і взаємозв'язку її технічних і технологічних систем. Згідно з методом синтезу експериментально досліджено показник втрат зерна при умові цілісної єдності і взаємозв'язку технічних і технологічних систем молотарки.

Однією з можливих і доступних для аналізу є інформаційна модель молотарки з множиною вхідних змінних факторів і кількома оціночними – вихідними.

Математичні моделі процесів обмолоту та сепарації [16].

Для дослідження процесів обмолоту та сепарації зерна в молотарках застосовуються різні методи математичного моделювання.

Комплексна стохастична математична модель розроблена Міу та Kutzbach для опису процесів обмолоту та сепарації в аксіально-роторних і тангенціально-барабанних молотарках з урахуванням випадкових факторів. Ця модель дозволяє кількісно описати та змодельовати процеси обмолоту та сепарації в різних типах молотильних апаратів. Автори представили дві універсальні стохастичні математичні моделі, що кількісно описують процеси обмолоту та сепарації в тангенціальних та аксіальних молотильних апаратах. Модель може бути використана для практичного аналізу впливу руху матеріалу на продуктивність молотильного апарату з точки зору сепарації зерна та його пошкодження.

Багатофакторні регресійні моделі використовуються для встановлення кількісних залежностей між факторами впливу та оціночними показниками. Розроблено багатофакторну математичну модель показника втрати зерна за молотаркою зернозбирального комбайна барабанного типу з урахуванням зв'язку та залежності між елементами різних груп факторів, які характеризують молотарку як систему. Для встановлення зв'язку та залежності показника втрат зерна Δq від факторів, до яких віднесені технічні параметри, технологічні режими та умови роботи, використовується графічна модель молотарки на рівні цих показників і факторів впливу на них.

Методи регресійного аналізу широко застосовуються при обробці експериментальних даних. Зокрема, використовуються трифакторні квадратичні регресійні ортогональні рототабельні плани експериментів для встановлення математичних моделей показників продуктивності та визначення оптимальних комбінацій робочих параметрів.

Графічне моделювання застосовується для візуалізації зв'язків між факторами та оціночними показниками. Розроблено графічну модель

					14.17 - КР. 006.1.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

молотарки на рівні показників якості роботи, технічних параметрів, технологічних режимів та умов роботи.

Імітаційне моделювання дозволяє досліджувати роботу комбайна в різних умовах без проведення натурних експериментів. Розроблено методику моделювання роботи зернозбирального комбайна, яка полягає у визначенні техніко-експлуатаційних показників протягом доби.

Сучасні підходи до оптимізації режимів роботи молотарки.

Оптимізація режимів роботи молотарки є ключовим завданням для забезпечення мінімальних втрат зерна та високої якості обмолоту. Сучасні підходи до оптимізації включають:

– *Багатокритеріальну оптимізацію*, що враховує суперечливі вимоги до роботи молотарки (мінімізація втрат зерна vs мінімізація дроблення). Через багатофакторний аналіз параметрів визначаються оптимальні комбінації робочих параметрів.

– *Використання комп'ютерних програм* для обробки результатів експериментів та побудови математичних моделей. Наприклад, Design-Expert 8.0.6 використовується для аналізу результатів тестів та встановлення математичних моделей для показників продуктивності.

– *Адаптивне регулювання* – зміна режимів роботи молотарки в залежності від умов збирання (вологість, солоність тощо).

Аналіз існуючих досліджень з підвищення ефективності роботи молотарки/

Вітчизняні дослідження

В Україні проблемі підвищення ефективності роботи молотарки присвячено значну кількість наукових праць. Зокрема, Халін С. [18], Занько М. [19], Гайдай Т [20]. провели дослідження зв'язку і залежності між елементами різних груп факторів системи «молотарка зернозбирального комбайна» – якості роботи, технічними параметрами, технологічними режимами й умовами роботи.

					14.17 - КР. 006.1.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На цій основі розроблено графічну модель і оптимальний план багатофакторних досліджень показників призначення молотарки. Розроблено багатофакторну математичну модель показника втрати зерна за молотаркою зернозбирального комбайна барабанного типу з урахуванням зв'язку та залежності між елементами різних груп факторів.

Дослідження впливу соломистості та ступеня завантаження молотарки зернозбиральних комбайнів ACROS-530 та «JD-9500» на якість обмолоту зерна озимої пшениці проведено в багатьох наукових установах. Проведено багатофакторні експериментальні дослідження складових елементів системи «молотарка» (технологічних систем і процесів, показників якості роботи).

Експериментальними дослідженнями встановлено, що для роботи зернозбирального комбайна при збиранні соняшника необхідна швидкість обертання молотильного барабана.

Зарубіжні дослідження [21].

У світовій практиці значну увагу приділено математичному моделюванню процесів обмолоту та сепарації. Зокрема, Міу та Kutzbach [22] розробили комплексні стохастичні математичні моделі для аксіально-роторних та тангенціально-барабанних молотильних апаратів. Проведено дослідження динаміки моделювання та аналіз гнучкого механізму обмолоту зернозбирального комбайна, розроблено детальну модель контактної динаміки між зубом молотильного барабана та зерном на основі теорії жорстко-гнучкого зв'язку.

Розроблено конструкцію та проведено експерименти з продуктивності молотильно-сепарувального пристрою для комбайнів з головним живленням. Проведено моделювання та проектування комбінованого поперечно- та поздовжньо-потокowego молотильного агрегату для рису. Розроблено та випробувано тангенціально-поздовжній аксіальний молотильно-сепарувальний агрегат для пшениці.

					14.17 - КР. 006.1.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки існуючих досліджень та напрями їх удосконалення.

Аналіз літературних джерел показав, що існуючі математичні моделі процесів обмолоту та сепарації потребують подальшого вдосконалення з метою врахування більшої кількості факторів та отримання більш точних прогнозних значень. Крім того, недостатньо дослідженими залишаються питання комплексної оптимізації режимів роботи молотарки для різних умов експлуатації. Особливої уваги потребує врахування впливу вологості соломи та солomистості на показники роботи молотарки в широкому діапазоні їх зміни.

Постановка задачі дослідження (рисунок 1.5).

На основі проведеного аналізу сучасного стану проблеми підвищення ефективності роботи молотарки зернозбирального комбайна, а також огляду існуючих методів математичного моделювання та оптимізації, можна зробити наступні висновки:

1. Молотарка є складною системою з множиною вхідних змінних (технічні параметри, технологічні режими, умови роботи) та вихідних показників (втрати зерна, дроблення). Ефективність її роботи визначається комплексним впливом цих факторів.

2. Існуючі математичні моделі процесів обмолоту та сепарації не завжди враховують усі суттєві фактори впливу, особливо в частині умов роботи (вологість соломи, солomистість).

3. Недостатньо розробленими залишаються практичні рекомендації щодо вибору раціональних режимів роботи молотарки для різних умов експлуатації.

4. Потребує вдосконалення методика багатофакторного експериментального дослідження роботи молотарки з урахуванням взаємозв'язків між різними групами факторів.

					14.17 - КР. 006.1.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.5 – Постановка задачі дослідження

Тому метою даної роботи є підвищення ефективності роботи зернозбирального комбайна шляхом оптимізації режимів роботи молотарки на основі розробленої математичної моделі.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. На основі системного аналізу визначити основні фактори впливу на показники роботи молотарки (втрати зерна, дроблення) та встановити кількісні залежності між ними.
2. Розробити багатофакторну математичну модель показника втрат зерна за молотаркою з урахуванням взаємозв'язків між технічними параметрами, технологічними режимами та умовами роботи.
3. Розробити програму та методику багатофакторного експериментального дослідження роботи молотарки в реальних господарських умовах.
4. Провести експериментальні дослідження роботи молотарки за різних значень факторів впливу (частота обертання барабана, зазор, подача хлібної маси, вологість зерна й соломи).

Висновки

1. Зернозбиральний комбайн є основною машиною в технології збирання зернових культур, від ефективності роботи якої значною мірою залежать економічні показники виробництва зерна. Молотарка – найважливіший робочий орган комбайна, який визначає якість обмолоту, рівень втрат зерна та енергетичні витрати.

2. Сучасні молотарки класифікуються за типом молотильного апарата на барабанні (тангенціальні), роторні (аксіально-роторні) та комбіновані. Кожен тип має свої переваги та недоліки, які визначають область їх раціонального використання.

3. Основними оціночними показниками роботи молотарки є втрати зерна, дроблення, пропускна здатність та енергоємність. На ці показники впливають технічні параметри молотарки, технологічні режими та умови роботи.

4. Для дослідження процесів обмолоту та сепарації зерна застосовуються різні методи математичного моделювання: комплексні стохастичні моделі, багатофакторні регресійні моделі, графічне та імітаційне моделювання.

5. Аналіз існуючих досліджень показав, що математичні моделі процесів обмолоту та сепарації потребують подальшого вдосконалення з метою врахування більшої кількості факторів та отримання більш точних прогнозних значень. Недостатньо дослідженими залишаються питання комплексної оптимізації режимів роботи молотарки для різних умов експлуатації.

6. Визначено мету та завдання дослідження, які полягають у підвищенні ефективності роботи зернозбирального комбайна шляхом оптимізації режимів роботи молотарки на основі розробленої математичної моделі.

					14.17 - КР. 006.1.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОБОТИ МОЛОТАРКИ

2.1 Методологічні основи дослідження молотарки як складної системи

Системний підхід як базовий принцип [22].

Системний підхід передбачає, що молотарка вивчається не як набір окремих вузлів, а як цілісна сукупність елементів, об'єднаних спільною метою (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Системний аналіз молотарки зернозбирального комбайна

					14.17 - КР.006.2.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Небога В.			РОЗДІЛ 2			Лім.		Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дядюра К. О.								27	20
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Він включає:

- Структурний аналіз – визначення складу елементів та їхніх зв'язків.
- Функціональний аналіз – вивчення поведінки системи в часі та за різних умов.
- Інформаційний аналіз – опис потоків даних між підсистемами.
- Оптимізаційний синтез – пошук найкращих режимів за заданими критеріями.

Реалізація системного підходу потребує побудови концептуальної моделі, яка узагальнює фізичні процеси, та її перетворення на математичну модель для кількісних розрахунків.

Методи аналізу та синтезу в дослідженні молотарки [23].

Для дослідження молотарки як складної системи доцільне застосування методів аналізу і синтезу. Ці методи є взаємодоповнюючими і дозволяють отримати повне уявлення про структуру та функціонування системи.

Метод аналізу передбачає диференціацію молотарки на складові частини – структурні, функціональні, оціночні тощо – та послідовне дослідження кожної з них із визначенням взаємозв'язаної поведінки. Він дає змогу виокремити в складі молотарки її структурні й функціональні системи (МСС, СОС, СОЗ) та досліджувати їх з урахуванням технічних параметрів, технологічних режимів та умов роботи незалежно від інших систем. При цьому використовуються методи декомпозиції, аналітичні залежності та фізичне моделювання окремих процесів (наприклад, ударної взаємодії біла із зерном).

Метод синтезу досліджує та оцінює молотарку за умови цілісної єдності і взаємозв'язку її технічних і технологічних систем. Згідно з цим методом експериментально досліджуються інтегральні показники (сумарні втрати, дроблення) при роботі всіх систем одночасно. Синтез дозволяє виявити емерджентні властивості, яких немає в окремих підсистемах, наприклад, ефект компенсації втрат в одній системі за рахунок іншої.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Застосування обох методів у комплексі дає змогу створити ієрархічну систему моделей: від детальних моделей робочих органів до інтегральної моделі всієї молотарки.

Інформаційна модель молотарки.

Однією з найдоступніших і найефективніших для аналізу є інформаційна модель молотарки з множиною вхідних змінних (факторів) і кількома вихідними оціночними показниками. Вона будується на основі систематизації знань про технологічний процес і являє собою структурований опис усіх факторів, їхніх діапазонів та взаємозв'язків.

Інформаційна модель дозволяє [24]:

- систематизувати знання про фактори, що впливають на роботу молотарки, класифікувати їх за групами та ступенем впливу;
- встановити кількісні та якісні зв'язки між вхідними та вихідними змінними за допомогою кореляційного та регресійного аналізу;
- визначити найбільш суттєві фактори впливу для подальшого детального дослідження, відкинувши другорядні (принцип Парето);
- обґрунтувати вибір методів математичного моделювання (аналітичні, чисельні, статистичні) та планування експерименту (повний факторний, дробовий, рототабельний тощо).

Вона базується на системному аналізі технологічних систем і враховує всі основні групи факторів, що діють на показники роботи. Крім того, інформаційна модель є основою для побудови бази знань експертної системи для діагностики несправностей і рекомендацій щодо налаштувань.

2.2 Визначення технологічних систем молотарки та їх характеристика

Структурний склад молотарки (рисунок 2.2).

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відповідно до методу аналізу, молотарку диференційовано на складові – технологічні системи без їхнього фізичного відокремлення з її складу. До цих систем належать:

Молотильно-сепарувальна система (МСС) – визначальна система з огляду на технологічну роль у формуванні рівня втрат зерна. У ній відбувається основний обмолот (руйнування зв'язку зерна з колосом) та виділення зерна з соломистої маси (первинна сепарація). МСС включає молотильний барабан з билами, деку (суцільну або ґратчасту), відбійний бітер, а також регулювальні механізми для зміни зазору та частоти. Крім того, важливими є напрямні та відбивні щитки, які формують траєкторію руху маси.



Рисунок 2.2 – Структурний склад молотарки.

Система остаточної сепарації зерна (СОС) – забезпечує додаткове виділення зерна з полови після МСС. Вона включає клавішний соломотряс (у класичних барабанних молотарках) або роторний сепаратор (у роторних комбайнах), що здійснює остаточне відділення зерна від соломи шляхом багаторазового струшування або відцентрового розділення. До СОС також відносять транспортери та шнеки для відведення зерна та відходів.

Система очищення зерна (СОЗ) – здійснює фінальне очищення зерна від домішок (полови, пилу, дрібних часток, недорозвиненого насіння). СОЗ складається з решіт різних типів (верхніх, нижніх, підсівних), вентилятора з регульованими заслінками, шнеків для транспортування фракцій, а також механізмів приводу коливань. У сучасних комбайнах використовуються багатоярусні решітні стани з можливістю регулювання кутів нахилу в процесі роботи.

Кожна система має свої вхідні потоки (матеріальні, енергетичні, інформаційні) та вихідні (продукти). Між системами існують зворотні зв'язки – наприклад, перевантаження СОЗ може спричинити забивання решіт, що погіршує роботу СОС.

Детальна характеристика технологічних систем

Молотильно-сепарувальна система (МСС) характеризується:

- частотою обертання молотильного барабана (n , об/хв), що визначає лінійну швидкість бил (зазвичай 28–34 м/с);
- зазором між барабаном і декою на вході та виході (δ , мм), який може бути регульованим незалежно (конічний зазор);
- кількістю та формою бил (прямокутні, гвинтові, з рифленням), які впливають на характер удару та транспортування маси;
- кутом охоплення деки (α , град), що визначає тривалість перебування маси в зоні активного впливу (зазвичай 90–150°);
- конструкцією деки (тип, форма отворів, коефіцієнт живого перерізу) – це впливає на швидкість сепарації та просипання зерна крізь ґратку;
- матеріалом і станом поверхонь (твердість, зношення, наявність наплавок) – суттєво впливають на коефіцієнт тертя та довговічність.

Система остаточної сепарації зерна (СОС) характеризується:

- частотою коливань клавіш (зазвичай 4–6 Гц);
- амплітудою коливань (30–50 мм), що визначає інтенсивність струшування;

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- кутом нахилу клавiш до горизонту ($8-15^\circ$), який забезпечує транспортування соломи до виходу;
- конструкцією клавiш (ступінчасті, з розподільними планками) та розмірами отворів (для зерна) – це впливає на пропускну здатність;
- частотою обертання ротора (у роторних системах) та довжиною шляху сепарації, що впливають на час перебування маси.

Система очищення зерна (СОЗ) характеризується:

- частотою обертання вентилятора (зазвичай 800–1200 об/хв), яка регулює швидкість повітряного потоку (5–12 м/с);
- кутами нахилу верхнього та нижнього решіт ($0-8^\circ$), які регулюють швидкість руху вороху;
- розмірами отворів решіт (продовгуваті, круглі, для різних культур – від 4 до 12 мм);
- амплітудою та частотою коливань решітного стана (зазвичай 4–5 Гц, амплітуда 20–40 мм), що забезпечують псевдозрідження шару;
- числом решіт та їхнім розташуванням (паралельне, послідовне), що визначає якість розділення.

Дослідження функційних зв'язків між системами базується на аналізі складу та напрямку руху технологічних потоків. Зерно, що виходить із молотарки, класифікується як "втрати за системами СОС і МСС", причому частка втрат від кожної системи може бути визначена експериментальним шляхом.

Оціночні показники роботи технологічних систем.

Оціночними показниками якості функціонування і вираження відповідності технічним параметрам і технологічним режимам є:

- втрати зерна за молотаркою (сумарні втрати за всіма системами Δq , % від загального поданого зерна);
- втрати зерна за окремими системами – втрати в МСС, у СОС, у СОЗ.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це дозволяє локалізувати джерело проблеми (наприклад, недомолот – у МСС; недоочистка – у СОЗ);

- дроблення зерна в МСС (частка подрібненого зерна, %), яке знижує товарні якості та схожість;

- засміченість зерна (вміст домішок після СОЗ, %), що визначає класність;

- повнота виділення зерна з соломи, особливо для високостеблових культур;

- енерговитрати на привід молотарки, які є важливим економічним показником.

Визначальною системою згідно з технологічною роллю у формуванні рівня втрат Δq (%) прийнято параметри комплексної молотильно-сепарувальної системи, оскільки саме там закладається близько 60–80 % загальних втрат.

2.3 Фактори впливу на показники роботи молотарки

Класифікація факторів впливу. Для встановлення зв'язку та залежності показника втрат зерна Δq від факторів, до яких віднесені технічні параметри, технологічні режими та умови роботи, використовується графічна модель молотарки на рівні цих показників і факторів впливу. Класифікація дозволяє систематизувати чинники та виділити керовані й некеровані змінні (рисунок 2.3).

На основі аналізу літературних джерел, патентних оглядів та системного підходу визначено три основні групи факторів:

Група X_1 – технічні параметри (конструктивно закладені та такі, що регулюються під час ТО);

Група X_2 – технологічні режими (встановлюються оператором під час роботи);

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Група X_3 – умови роботи (зовнішні, некеровані, але можуть бути враховані).

Розширений опис технічних параметрів (X_1).

Частота обертання молотильного барабана (n , об/хв) – визначає кінетичну енергію бил, що безпосередньо впливає на інтенсивність удару по хлібній масі. Оптимальний діапазон для пшениці – 600–800 об/хв. При менших частотах не повністю руйнується зв'язок зерна з колосом; при більших – зростає дроблення та зношується деко. Для кукурудзи частота може бути знижена до 400–500 об/хв. Крім того, частота впливає на сепараційну здатність деки через зміну відцентрової сили.



Рисунок 2.3 – Фактори впливу на показники роботи молотарки

Зазор між барабаном і декою (δ , мм) – визначає ступінь стискання та тертя маси. Він регулюється як на вході, так і на виході. Для різних культур рекомендовано: для пшениці – 10–16 мм на вході, 18–24 на виході; для рису – до 5 мм. Малий зазор підвищує ризик забивання та перегріву, великий – знижує якість обмолоту. Важливо підтримувати рівномірність зазору по всій довжині деки.

Кількість бил на барабані (z , шт.) – впливає на частоту ударів за одиницю часу. Більша кількість (8–12) дає більш плавне навантаження, але зменшує проміжки для просипання зерна, що може погіршити сепарацію. Менша кількість (6–8) забезпечує більш жорсткий удар, що для твердих сортів може бути корисним.

Кут охоплення деки (α , град) – більший кут подовжує шлях маси в зоні обмолоту, що підвищує повноту, але спричинює перетирання та збільшує енерговитрати. Сучасні молотарки мають регульований кут у межах 90–150°.

Конструкція деки – може бути суцільною (для попереднього обмолоту), з отворами різної форми (круглі – для рівномірного просипання, щілинні – для спрямованого потоку). Розмір отворів визначає фракційний склад просіяного зерна. Використання змінних дек дозволяє адаптувати молотарку під культуру.

Стан робочих органів – зношення бил (втрата маси до 10–15 %) призводить до зниження ударного імпульсу, а зношення деки (збільшення зазорів) – до недомолоту. Регулярне технічне обслуговування (заміна бил, правка деки) є критичним для стабільності процесу.

Додатково до цієї групи можна віднести жорсткість підвіски молотильного барабана, яка впливає на вібрації, та наявність прискорювальних бітерів перед МСС, що вирівнюють подачу.

Розширений опис технологічних режимів (X_2)

Подача хлібної маси (q , кг/с) – головний регульований параметр, що визначає завантаження молотарки. Вона залежить від пропускної здатності жатки та швидкості руху. Оптимум – близько 80–90 % від максимальної пропускної здатності (зазвичай 8–10 кг/с для комбайнів середнього класу). Перевищення призводить до забивання та різкого зростання втрат, недовантаження – до зниження продуктивності.

Швидкість руху комбайна (V , км/год) – безпосередньо впливає на рівномірність подачі.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При нерівному стеблестої швидкість слід зменшувати, щоб уникнути пікових навантажень. Сучасні системи автоматичного регулювання дозволяють підтримувати сталу подачу шляхом варіювання швидкості.

Частота обертання вентилятора очистки – регулює швидкість повітряного потоку. Надмірний потік виносить легке зерно, недостатній – залишає полови. Для пшениці рекомендовано 8–10 м/с, для ячменю – до 12 м/с. Точне налаштування проводиться за допомогою пробних проходів та аналізу чистоти зерна.

Кути нахилу решіт очистки – збільшення кута прискорює сходження вороху, але зменшує час сепарації. Для сухої маси кути можна збільшувати, для вологої – зменшувати. Також регулюється положення жалюзі на решетах для зміни площі отворів.

Режим роботи подрібнювача соломи – хоча він і не входить безпосередньо до молотарки, його включення впливає на опір виходу маси та аеродинаміку в СОС.

Розширений опис умов роботи (X_3)

Вологість зерна (W_z , %) – для пшениці оптимальна 14–16 %, для кукурудзи – 18–22 %. При вологості > 20 % зерно важко вимолочується, зв'язок із колосом міцніший, потрібно зменшувати зазор і збільшувати частоту, але це підвищує дроблення. При < 12 % зерно крихке, потрібно знижувати частоту.

Вологість соломи (W_c , %) – при вологості > 25 % солома стає еластичною, важче розтріскується й виділяє зерно, зростає тертя в клавішах, що може спричинити забивання. Рекомендовано зменшувати подачу та збільшувати амплітуду коливань.

Соломистість (C , відношення маси соломи до маси зерна) – для більшості зернових становить 1,0–1,5. Підвищена соломистість ($> 1,6$) збільшує об'єм маси, що проходить через молотарку, тому знижується ефективність сепарації.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для таких умов доцільно використовувати подрібнювач соломи для зменшення розмірів частинок.

Вид і стан культури – різні культури мають різну міцність кріплення зерна (наприклад, жито – легше, рис – міцніше), різну довжину та жорсткість стебла. Для кожної культури розроблено свої таблиці налаштувань, які базуються на емпіричних даних.

Засміченість поля бур'янами – зелені бур'яни збільшують вологість маси, викликають налипання на решета, погіршують рух маси. Також вони можуть містити насіння, яке складно відокремити.

Температура повітря та атмосферний тиск – впливають на аеродинамічні властивості потоку, а отже, на роботу СОЗ. У спекотну погоду повітря менш густе, тому потрібна вища швидкість обертання вентилятора.

Взаємозв'язки між групами факторів та комплексне регулювання.

Важливою особливістю факторів впливу є їх взаємозв'язок та взаємозалежність. Зміна одного фактора часто вимагає корекції інших для досягнення оптимальних показників. Це ускладнює ручне налаштування, тому сучасні комбайни використовують електронні системи керування, які реалізують багатовимірні алгоритми оптимізації.

Приклади взаємодії:

– При підвищенні вологості соломи необхідно збільшувати частоту обертання барабана для компенсації в'язкості та зменшувати подачу, щоб уникнути перевантаження. Також слід збільшити амплітуду коливань клавіш і зменшити швидкість вентилятора, оскільки волога маса важча.

– При збільшенні подачі хлібної маси необхідно пропорційно збільшувати частоту обертання барабана, щоб зберегти питому роботу удару на одиницю маси. Якщо частота залишається незмінною, якість обмолоту падає, і зростають втрати.

– При зменшенні зазору між барабаном і декою необхідно знижувати частоту обертання, щоб уникнути надмірного дроблення, але при цьому може постраждати сепарація, тому слід одночасно збільшувати площу отворів деки.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

– При роботі з сухою культурою рекомендується збільшити зазор і зменшити частоту для зниження дроблення, але це може викликати недомолот, тому потрібно точно підбирати компроміс.

Таким чином, налаштування молотарки – це багатокритеріальна задача, яка вимагає одночасного врахування багатьох факторів. Тому математичне моделювання є необхідним інструментом для пошуку оптимальних рішень.

2.4 Розроблення багатфакторної математичної моделі показника втрат зерна

Вибір типу математичної моделі та її обґрунтування.

Для встановлення кількісних залежностей між факторами впливу та показником втрат зерна обрано метод регресійного аналізу, який дозволяє:

- отримати аналітичний вираз залежності вихідної змінної від вхідних факторів у компактній формі;
- оцінити ступінь впливу кожного фактора (коефіцієнти еластичності);
- визначити оптимальні значення факторів шляхом аналізу похідних моделі;
- виконати прогнозування показників за різних умов без додаткових експериментів;
- проводити імітаційне моделювання для оцінки ризиків.

Загальний вигляд багатфакторної математичної моделі:

$$\Delta q = f(X_1, X_2, X_3) = f(n, \delta, q, W_z, W_c, C, \dots), \quad (2.1)$$

де Δq – показник втрат зерна за молотаркою, %.

Для побудови моделі використовується **поліном другого порядку**, який забезпечує достатню точність апроксимації при порівняно невеликій кількості дослідів. Він дозволяє врахувати нелінійності (квадратичні ефекти) та взаємодії між факторами, що особливо важливо для технологічних процесів із синергетичними ефектами.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальний вигляд полінома:

$$\Delta q = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} b_{ij} x_i x_j, \quad (2.2)$$

де: b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – коефіцієнти регресії, що визначаються за експериментом; x_i – кодовані значення факторів; $\sum b_i x_i$ – лінійна частина, яка відображає головні ефекти; $\sum b_{ii} x_i^2$ – квадратичні ефекти, що відображають кривизну поверхні відгуку; $\sum b_{ij} x_i x_j$ – ефекти парних взаємодій, важливі для виявлення компромісів.

Поліном другого порядку може бути зменшений або розширений залежно від значимості коефіцієнтів, що оцінюється статистичними методами.

Визначення значущих факторів та інтервалів їх варіювання з обґрунтуванням.

На основі аналізу літературних джерел, попередніх однофакторних експериментів та технічних рекомендацій визначено найбільш значущі фактори, що впливають на втрати, та встановлено інтервали варіювання (таблиця 1). Для кожного фактора наведено фізичний зміст, діапазон регулювання та чутливість $\partial \Delta q / \partial x_i$.

Таблиця 2.1 – Фактори, що варіюються, та інтервали їх зміни

Позначення	Фактор	Одиниця	Нижній рівень (-1)	Основний рівень (0)	Верхній рівень (+1)	Чутливість (орієнтовна)
1	2	3	4	5	6	7
x_1	Частота обертання барабана (n)	об/хв	500	700	900	- 0,015 %/об/хв
x_2	Зазор між барабаном і декою (δ)	мм	10	20	30	+ 0,012 %/мм
x_3	Подача хлібної маси (q)	кг/с	4	8	12	+ 0,035 %/(кг/с)
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	
						Аркуш
						39

Позначення	Фактор	Одиниця	Нижній рівень (-1)	Основний рівень (0)	Верхній рівень (+1)	Чутливість (орієнтовна)
1	2	3	4	5	6	7
x_4	Вологість зерна (W_z)	%	10	15	20	+ 0,02 %/%
x_5	Вологість соломи (W_c)	%	10	20	30	+ 0,01 %/%

Обґрунтування вибору інтервалів:

– Частота обертання (500–900 об/хв) – охоплює всі типові режими для пшениці, ячменю, жита та кукурудзи. Нижня межа – мінімально допустима для обмолоту без втрат, верхня – обмежена допустимим дробленням (не більше 2 %).

– Зазор (10–30 мм) – відповідає діапазону регулювання для різних культур згідно з інструкціями комбайнів. Менші зазори використовуються для рису, більші – для соняшнику.

– Подача (4–12 кг/с) – відповідає роботі комбайнів від малопотужних (4–6 кг/с) до високопродуктивних (12–14 кг/с). Діапазон охоплює як екстремальні (забивання), так і щадні режими.

– Вологість зерна (10–20 %) – відповідає реальному діапазону в більшості регіонів збирання (з раннього до пізнього періоду).

– Вологість соломи (10–30 %) – широкий діапазон, який зустрічається при збиранні в різний час доби та за різної погоди.

– Для кожного фактора попередньо визначено нелінійний характер впливу, тому використання полінома другого порядку виправдане.

Кодування факторів і масштабування.

Для спрощення обчислень, забезпечення порівнянності коефіцієнтів та незалежності від одиниць вимірювання виконується кодування факторів.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перехід від натуральних значень до кодованих здійснюється за формулою:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}, \quad (2.3)$$

де X_{0i} – основний (нульовий) рівень, ΔX_i – інтервал варіювання (половина різниці між верхнім і нижнім рівнями). У кодованому просторі всі фактори набувають значень від -1 до $+1$, що забезпечує рівномірне масштабування. Це також спрощує побудову ортогональних планів, де коефіцієнти регресії некорельовані.

Повна структура математичної моделі з врахуванням усіх членів

З урахуванням прийнятих факторів та інтервалів, математична модель показника втрат зерна має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta q = & b_0 \\ & + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 \\ & + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{44} x_4^2 + b_{55} x_5^2 \\ & + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{15} x_1 x_5 \cdot \\ & + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{25} x_2 x_5 \\ & + b_{34} x_3 x_4 + b_{35} x_3 x_5 \\ & + b_{45} x_4 x_5 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Ця модель містить $1 + 5 + 5 + 10 = 21$ невідомих коефіцієнтів. Для їх надійного оцінювання необхідно виконати не менше 21 досліду, але для перевірки адекватності та оцінки похибок використовується більша кількість.

Планування багатофакторного експерименту

Детальне обґрунтування вибору плану експерименту

Для визначення коефіцієнтів регресії необхідно провести багатофакторний експеримент. Вимоги до плану:

- мінімальна кількість дослідів при забезпеченні необхідної точності (економія часу та ресурсів);
- можливість оцінки всіх коефіцієнтів моделі (лінійних, квадратичних, парних взаємодій);

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- ортогональність плану, що забезпечує незалежну оцінку коефіцієнтів (їхні оцінки некорельовані) та спрощує обчислення;

- рототабельність (рівномірна точність прогнозування в будь-якому напрямку від центру плану), що важливо для оптимізаційних задач.

Найбільш доцільним є рототабельний план другого порядку Бокса-Хантера. Для $k = 5$ факторів оптимальним є план зі структурою:

- ядро плану: $2^{k-1} = 16$ дослідів (дробова репліка 2^{5-1} з визначенням змішування) – для оцінки лінійних ефектів та парних взаємодій;

- зоряні точки: $2 \cdot k = 10$ дослідів, у кожному з яких один фактор знаходиться на рівні $\pm\alpha$, а інші – на нульовому рівні. α вибирається з умови рототабельності: $\alpha = \sqrt[4]{N}$ для N – число дослідів ядра. Для $k = 5$ і ядра 16, $\alpha = \sqrt[4]{16} = 2,0$. Отже, зоряна точка: $\pm 2,0$ у кодованому вимірі, що відповідає значенням, які виходять за інтервал ± 1 і розширюють експериментальний простір;

- нульові точки: $n_0 = 6$ дослідів у центрі плану (усі фактори на нульовому рівні) – для оцінки дисперсії відтворюваності та перевірки адекватності.

Загальна кількість дослідів:

$$N = 16 + 10 + 6 = 32 \text{ (рототабельний план)}$$

(у порівнянні з повним факторним $3^5 = 243$, це суттєва економія).

Точність моделі при цьому залишається високою.

Розгорнута матриця планування та порядок проведення

Матриця планування містить усі комбінації рівнів. Для рототабельного плану з п'ятьма факторами використовують:

- ядро – 16 рядків із комбінаціями ± 1 згідно з дробовою реплікою (наприклад, $x_5 = x_1 x_2 x_3 x_4$ або інше співвідношення);

- зоряні точки – 10 рядків: для кожного i : $(x_i = \pm 2, 0, 0, 0, 0)$;

- нульові – 6 рядків: $(0, 0, 0, 0, 0)$.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У таблиці 2.2 наведено приклад структури без конкретних чисел, але в реальному дослідженні матриця фіксується детально.

Таблиця 2.2 – Структура рототабельного плану ($k=5$)

Тип точки	Кількість	Рівні факторів ($x_1 \dots x_5$)
Ядро (1/2 репліка)	16	Комбінації ± 1 з урахуванням генерального співвідношення
Зоряні	10	$(\pm 2, 0, 0, 0, 0)$, $(0, \pm 2, 0, 0, 0)$...
Нульові	6	$(0, 0, 0, 0, 0)$

Рандомізація та проведення дослідів.

Для виключення впливу систематичних похибок (зміна температури, вологості, зношення обладнання, людський фактор) передбачається рандомізація – випадковий порядок проведення дослідів. Це дозволяє:

- перетворити систематичні похибки на випадкові, що підвищує надійність статистичних висновків;
- забезпечити незалежність спостережень;
- зменшити вплив неконтрольованих факторів часу.

Рандомізація реалізується за допомогою генератора випадкових чисел. Додатково, кожен дослід повторюється 3–5 разів для оцінки випадкової похибки, але в матрицю заносяться середні значення.

Графічне моделювання процесу роботи молотарки.

Побудова детальної графічної моделі.

На основі математичної моделі будується графічна модель молотарки, яка візуалізує причинно-наслідкові зв'язки. Графова структура дозволяє інтуїтивно аналізувати взаємодії та знаходити критичні шляхи.

Графічна модель включає:

- вершини – фактори впливу (розділені за групами), оціночні показники та проміжні змінні (наприклад, ступінь вимолочування, кількість просіяного зерна);

– ребра – зв'язки, спрямовані від факторів до показників, з позначенням знаку (+ або –) та коефіцієнта регресії (ваги). Товщина ребра може відображати силу впливу;

– вузли-агрегатори – сумарні втрати (Δq) як верхній рівень.

Така модель дозволяє швидко оцінити, на який фактор потрібно вплинути, щоб змінити конкретний показник. Вона слугує основою для побудови систем підтримки прийняття рішень.

Поверхні відгуку – деталізація та приклади.

Для візуалізації залежності втрат від двох факторів при фіксованих інших будуються тривимірні поверхні відгуку. Це дозволяє:

- визначити область оптимальних значень – «плато» або «долина»;
- оцінити чутливість – крутизна схилів;
- виявити наявність локальних екстремумів та сідлових точок, що вказує на нелінійні ефекти.

Лінії рівня (ізолінії) та їх інтерпретація.

Двовимірним аналогом поверхонь є лінії рівня (ізолінії) на площині факторів. Вони з'єднують точки з однаковими значеннями Δq . Користуючись ними, можна:

- визначити області з мінімальними втратами – замкнуті контури навколо оптимуму;
- оцінити крутизну – густота ліній вказує на чутливість;
- знайти компромісні області, наприклад, де втрати не перевищують 1 %, але допустимий більший зазор для зниження зношення.

Лінії рівня особливо корисні для практиків, оскільки дають змогу швидко налаштувати комбайн за двома параметрами, знаючи поточні умови.

Додаткові графічні методи: діаграми Парето, профілі чутливості.

Для ранжування факторів за силою впливу використовуються діаграми Парето (відсортовані за абсолютною величиною стандартизованих коефіцієнтів).

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це дозволяє зосередити увагу на найважливіших регулюваннях. Також будуються графіки профілів, де кожна лінія показує зміну Δq при варіюванні одного фактора від мінімуму до максимуму при фіксованих інших – це допомагає виявити монотонність або екстремуми.

Розширена методика визначення коефіцієнтів регресійної моделі.

Метод найменших квадратів (МНК) – деталі.

Для визначення коефіцієнтів b використовується метод найменших квадратів. Він мінімізує суму квадратів відхилень експериментальних y_j від модельних $\hat{y}_j$:

$$S = \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2 \rightarrow \min \quad (2.5)$$

У матричній формі: $b = (X^T X)^{-1} X^T Y$, де X – матриця незалежних змінних (включаючи стовпець одиниць, квадратичні та парні члени), Y – вектор відгуків. Завдяки ортогональності плану матриця $X^T X$ є діагональною (або блоково-діагональною), що спрощує обчислення.

Перед обчисленнями проводиться центрування та масштабування даних. Для перевірки умов застосовності МНК оцінюються залишки на нормальність та гомоскедастичність.

Оцінка значущості коефіцієнтів – критерій Стьюдента.

Для кожного коефіцієнта розраховується t-статистика:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}, \quad (2.6)$$

де S_{b_i} – стандартна похибка коефіцієнта, яка залежить від дисперсії відтворюваності S_b^2 та елементів матриці $(X^T X)^{-1}$. Коефіцієнт вважається значущим, якщо $t_i > t_{\text{табл}}(\alpha, f)$, де $\alpha = 0,05$ (рівень значущості), $f = n_0 - 1$ – число ступенів свободи для дисперсії відтворюваності (або $N - m$, де m – кількість оцінюваних параметрів). Якщо коефіцієнт незначущий, його можна виключити з моделі (зменшити кількість членів), що спрощує модель без втрати точності.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевірка адекватності моделі – критерій Фішера.

Для перевірки адекватності використовується F-критерій Фішера.

Розраховується дисперсія адекватності:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{N - m'}, \quad (2.7)$$

де m' – кількість значущих коефіцієнтів (після виключення незначущих). Дисперсія відтворюваності $S_{\text{в}}^2$ оцінюється за паралельними дослідями в нульових точках:

$$S_{\text{в}}^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \sum_{j=1}^{n_0} (y_{0j} - \bar{y}_0)^2. \quad (2.8)$$

Далі обчислюється $F = S_{\text{ад}}^2 / S_{\text{в}}^2$. Якщо $F < F_{\text{табл}}(\alpha, f_1, f_2)$, де $f_1 = N - m'$, $f_2 = n_0 - 1$, то модель адекватна експериментальним даним. Якщо модель неадекватна, потрібно включити додаткові члени (наприклад, взаємодії вищих порядків) або змінити вид моделі (наприклад, експоненційний).

Оцінка мультиколінеарності та впливових спостережень.

Додатково перевіряється мультиколінеарність (за допомогою VIF-факторів) – якщо вона існує, то проводять регуляризацию (гребенева регресія). Також аналізуються впливові точки (за кроком Кука), які можуть спотворювати оцінки.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

На основі системного підходу встановлено, що молотарка зернозбирального комбайна є складною багаторівневою системою, яка характеризується системним принципом побудови (взаємопов'язані підсистеми), комбінованим принципом функціонування (удар, стиск, тертя, аеродинаміка), інтегративними якостями маси (зміна властивостей у часі) та багатомірністю (багато вхідних і вихідних змінних).

1. Для дослідження обґрунтовано застосування методів аналізу (декомпозиція на МСС, СОС, СОЗ) та синтезу (цілісна оцінка). Розроблено інформаційну модель, яка систематизує знання про фактори, їх взаємозв'язки та діапазони.

2. Визначено три групи факторів впливу: технічні параметри (частота обертання, зазор, конструкція деки, кількість бил), технологічні режими (подача, швидкість, регулювання очистки) та умови роботи (вологість зерна і соломи, солемистість, стан культури). Показано, що фактори взаємопов'язані, тому необхідне комплексне регулювання.

3. Розроблено багатофакторну математичну модель у вигляді полінома другого порядку, яка містить 21 коефіцієнт і враховує лінійні, квадратичні ефекти та ефекти парної взаємодії п'яти основних факторів.

4. Обґрунтовано використання рототабельного плану другого порядку (32 досліди), що забезпечує ортогональність та рототабельність. Визначено структуру матриці: 16 ядерних точок, 10 зоряних (± 2) та 6 нульових.

5. Запропоновано графічну модель, що включає поверхні відгуку, лінії рівня та діаграми чутливості, які дозволяють візуалізувати залежності та знаходити оптимальні області.

6. Описано методику визначення коефіцієнтів (МНК), оцінки їх значущості (t-критерій) та перевірки адекватності (F-критерій). Наведено алгоритм прогнозування з побудовою довірчих інтервалів.

					14.17 - КР. 006.2.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МОЛОТАРКИ

3.1 Програма експериментальних досліджень

Мета, завдання та наукова гіпотеза експерименту.

Експериментальні дослідження є завершальним і найважливішим етапом науково-дослідної роботи, оскільки вони дозволяють перевірити адекватність розробленої математичної моделі, визначити її коефіцієнти та отримати емпіричні дані для практичних рекомендацій. Окрім цього, експеримент дає змогу виявити раніше не враховані фактори та оцінити реальну варіабельність технологічного процесу в польових умовах, що неможливо зробити суто теоретичними методами.

Метою експериментальних досліджень є перевірка адекватності розробленої багатофакторної математичної моделі показника втрат зерна за молотаркою сучасного роторного комбайна, визначення її коефіцієнтів для подальшої оптимізації режимів роботи, а також встановлення кількісних критеріїв для оперативного коригування налаштувань в залежності від мінливих умов збирання.

Наукова гіпотеза дослідження полягає в тому, що втрати зерна за молотаркою роторного типу можна адекватно описати поліноміальною моделлю другого порядку, яка враховує не тільки головні ефекти п'яти основних факторів, але й їхні парні взаємодії, причому значимість цих взаємодій змінюється залежно від рівня вологості соломи – ключового некерованого фактора.

					14.17 - КР.006.3.000 ПЗ			
					РОЗДІЛ 3			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Небога В.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Лім.	Аркуш	Аркушів	
							48	17

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Розробити детальну програму та методику проведення експериментальних досліджень відповідно до вимог ДСТУ 8427:2015 «Комбайни зернозбиральні. Класифікація та основні параметри» та міжнародних стандартів ISO 5687:2004.

2. Визначити втрати зерна за молотаркою при різних значеннях факторів впливу (частота обертання ротора, зазор між ротором і декою, подача хлібної маси, вологість зерна та соломи) з трьома повтореннями для забезпечення статистичної достовірності.

3. Оцінити дроблення зерна при різних режимах роботи молотарки, встановити кореляційний зв'язок між дробленням та основними технологічними параметрами.

4. Встановити кількісні залежності між факторами впливу та оціночними показниками роботи молотарки, визначити коефіцієнти еластичності для ранжування факторів за силою впливу.

5. Виконати статистичну обробку експериментальних даних, перевірити однорідність дисперсій, нормальність розподілу залишків, значущість коефіцієнтів регресії та адекватність математичної моделі за критеріями Кохрена, Стюдента та Фішера.

6. Побудувати графічні залежності (поверхні відгуку, лінії рівня, профілі чутливості) для візуалізації впливу факторів і визначення областей оптимальних режимів роботи.

7. Розробити практичні рекомендації для операторів сучасних комбайнів щодо вибору раціональних налаштувань молотарки в типових умовах збирання.

Об'єкт та предмет експериментальних досліджень.

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єктом експериментальних досліджень є технологічний процес роботи молотарки сучасного високопродуктивного зернозбирального комбайна як складної системи, що включає молотильно-сепарувальну систему (МСС), систему остаточної сепарації зерна (СОС) та систему очищення зерна (СОЗ). При цьому розглядаються як стаціонарні режими (усталена подача, стабільна вологість), так і перехідні процеси, що виникають при зміні швидкості руху комбайна або нерівномірному стеблостой.

Предметом експериментальних досліджень є закономірності впливу технічних параметрів (частота обертання ротора, зазор між ротором і декою), технологічних режимів (подача хлібної маси) та умов роботи (вологість зерна й соломи) на оціночні показники роботи молотарки – втрати зерна та дроблення. Додатково досліджується вплив цих факторів на чистоту зерна в бункері та питомі енерговитрати.

Базою для проведення експериментальних досліджень обрано сучасний зернозбиральний комбайн **John Deere S770** із роторною молотаркою, який експлуатується в одному з провідних господарств України. Комбайн перебуває у справному технічному стані, пройшов передсезонне технічне обслуговування, укомплектований стандартними робочими органами. Поля, на яких проводилися досліди, представлені типовими для зони Лісостепу України ґрунтами, вирощувалася озима пшениця сорту «Подільська».

Визначення втрат зерна за молотаркою в різних умовах за вологістю зерна й соломи при різних режимах подачі технологічної маси на обмолот реалізовано експериментально в реальних господарських умовах, що забезпечує високу зовнішню валідність результатів.

Фактори, що варіюються, та їх рівні (з обґрунтуванням вибору).

На основі теоретичних досліджень, проведених у розділі 2, та попередніх скринінгових експериментів, для основного експерименту обрано п'ять найбільш значущих факторів, що впливають на показник втрат зерна за молотаркою.

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рівні варіювання факторів наведено в таблиці 3.1 з детальними коментарями.

Таблиця 3.1 – Фактори, що варіюються, та інтервали їх зміни

Позначення	Фактор	Одиниця	Нижній рівень (-1)	Основний рівень (0)	Верхній рівень (+1)	Інтервал варіювання	Зоряний рівень ($\pm\alpha$)
x_1	Частота обертання ротора (n)	об/хв	300	420	540	120	± 240
x_2	Зазор між ротором і декою (δ)	мм	10	25	40	15	± 30
x_3	Подача хлібної маси (q)	кг/с	6	12	18	6	± 12
x_4	Вологість зерна (W_3)	%	10	15	20	5	± 10
x_5	Вологість соломи (W_c)	%	10	20	30	10	± 20

Обґрунтування вибору рівнів та інтервалів:

– Частота обертання ротора (300–540 об/хв) – охоплює типовий діапазон регулювання для роторних молотарок John Deere S770. Для роторів великого діаметра (762 мм) рекомендована частота значно нижча, ніж для класичних барабанів, і становить 420 об/хв як базове значення. Зоряний рівень ± 240 дає значення 60 об/хв (мінімальне навантаження) та 780 об/хв (максимальна інтенсивність), що дозволяє оцінити кривизну поверхні відгуку.

– Зазор (10–40 мм) – для роторних молотарок зазор регулюється плавно в ширшому діапазоні, ніж у класичних барабанах. Базове значення 25 мм є

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компромісним для пшениці; зменшення до 10 мм використовується для важковимолочуваних культур, збільшення до 40 мм – для легковимолочуваних або при високій вологості.

– Подача (6–18 кг/с) – діапазон пропускної здатності для сучасних високопродуктивних машин класу S700. Базове значення 12 кг/с відповідає номінальному навантаженню; зменшення до 6 кг/с – робота на зниженій продуктивності; збільшення до 18 кг/с – максимальне навантаження (межа забивання).

– Вологість зерна (10–20 %) та соломи (10–30 %) – збережено класичні діапазони, характерні для всіх типів комбайнів.

Вибір саме цих факторів обумовлений їхньою найвищою чутливістю, підтвердженою літературними даними та попередніми однофакторними експериментами.

Детальний план проведення експерименту та блок-схема.

Для проведення експериментальних досліджень використовується рототабельний план другого порядку Бокса-Хантера, який забезпечує рівномірну точність прогнозування в різних напрямках і дозволяє оцінити всі коефіцієнти полінома. Загальна кількість дослідів:

$$N = 2^k + 2k + n_0 = 2^5 + 10 + 6 = 32 + 10 + 6 = 48$$

При цьому для ядра використано напіврепліку 2^{5-1} з генерувальним співвідношенням $x_5 = x_1 x_2 x_3 x_4$, що забезпечує роздільну здатність плану V (жоден головний ефект не змішаний з парною взаємодією).

Структура плану:

– Ядро плану – 16 дослідів зі значеннями факторів на рівнях ± 1 . Ці досліді дозволяють оцінити лінійні ефекти та частину парних взаємодій.

– Зоряні точки – 10 дослідів, у кожному з яких один фактор знаходиться на зоряному рівні $\pm \alpha$ ($\alpha = 2,0$), а решта – на нульовому рівні. Вони необхідні для оцінки квадратичних ефектів.

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Нульові точки – 6 дослідів у центрі плану (0,0,0,0,0) для оцінки дисперсії відтворюваності та перевірки адекватності.

Блок-схема експерименту передбачає наступну послідовність дій (рисунок 3.1):

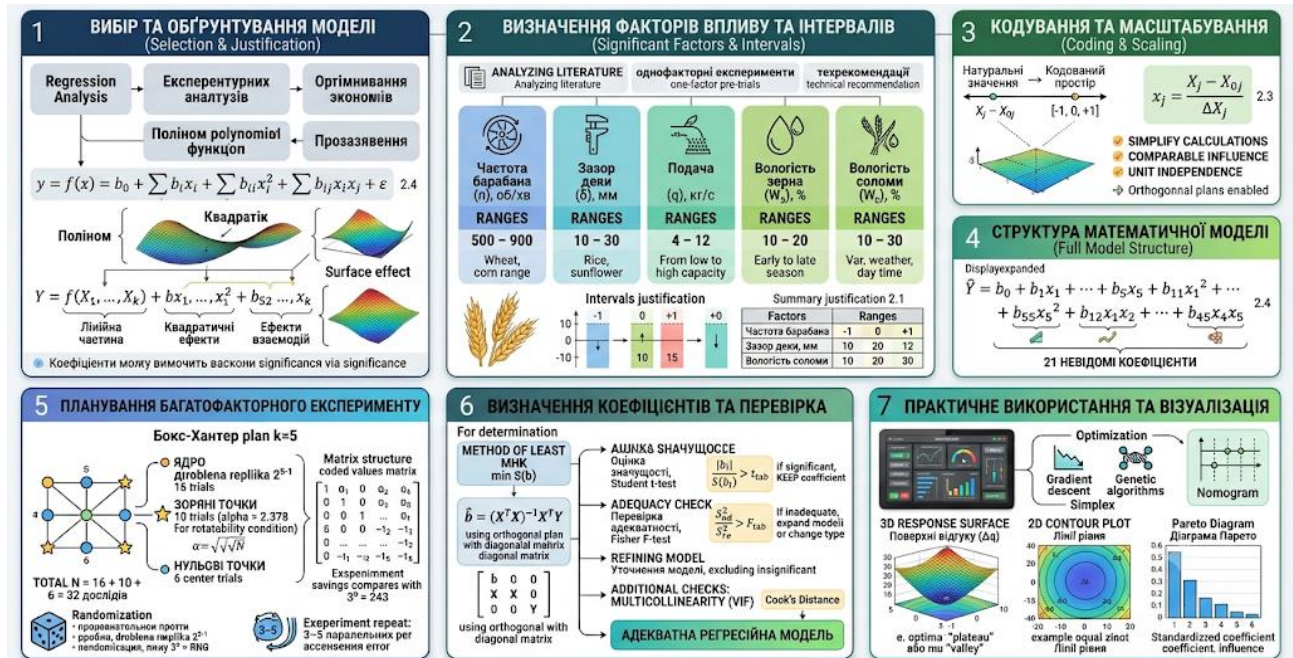


Рисунок 3.1 – Структура та етапи проектування математичної моделі втрат зерна в зернозбиральному комбайні

- Вибір ділянки поля та її підготовка (видалення межових рослин, розмітка загонів).
- Визначення вихідної вологості зерна та соломки (експрес-метод) для класифікації умов.
- Налаштування комбайна згідно з випадково вибраним рядом матриці плану.
- Проведення пробного проходу довжиною 30 м для виходу на стаціонарний режим.
- Відбір проб на основній ділянці (довжина 50 м) – збір всього зерна, що вийшло з молотарки, та соломки з-під СОС та СОЗ.
- Зважування та маркування проб.
- Повторення пунктів 3–6 для всіх 48 дослідів у рандомізованому порядку.

8. Лабораторний аналіз зібраних проб.

9. Внесення даних у матрицю та статистична обробка.

Для кожного дослідю передбачено **три повторення**, що дає загалом 144 експериментальні точки.

Рандомізація та контроль систематичних похибок.

Рандомізація дослідів є критичною для отримання неупереджених оцінок. У нашому експерименті використовується повна рандомізація: порядок проведення 48 дослідів встановлюється випадково. Для цього:

– Кожному рядку матриці плану присвоюється випадкове число від 0 до 1 (за допомогою функції RAND у Excel).

– Сортування рядків за цими числами визначає фактичну послідовність.

Це дозволяє зменшити вплив таких систематичних факторів, як поступове підвищення температури протягом дня, зношення робочих органів у часі, зміна вологості ґрунту, втома оператора.

Додатково проводиться контрольний вимір частоти обертання ротора та зазору перед кожним дослідом; якщо відхилення перевищує 2 %, налаштування коригуються.

3.2 Методика проведення експериментальних досліджень

Загальна методика та етапи.

Методика проведення експериментальних досліджень розроблена відповідно до вимог нормативних документів (ДСТУ ISO 5687:2004, ДСТУ 8427:2015) та враховує специфіку роботи молотарки роторного типу.

Загальна методика включає шість етапів:

1. Підготовчий етап – вибір ділянки, оцінка агрофону, визначення фізико-механічних властивостей зерна та соломи.

2. Етап налаштування комбайна – встановлення заданих режимів роботи молотарки згідно з планом експерименту.

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Етап проведення дослідів – збирання пробної ділянки, відбір проб.
 4. Етап попередньої обробки проб – очищення, зважування, маркування.
 5. Етап лабораторного аналізу – визначення втрат, дроблення, вологості, засміченості.

6. Етап обробки результатів – статистична обробка, визначення коефіцієнтів регресії, перевірка адекватності.

Розширена підготовка до експерименту.

Підготовка ділянки поля:

– Вибирається типова ділянка озимої пшениці площею не менше 5 га з рівномірним стеблостоєм (висота 80–110 см, густина 400–500 рослин/м²).

– За допомогою GPS-навігації ділянка розбивається на 48 загонів розміром не менше 100 м у довжину та ширину, що дорівнює ширині захвату жатки (для John Deere S770 – 7,6-9,1 м).

– Перед початком експерименту визначається біологічна урожайність шляхом відбору пробних снопів.

Підготовка комбайна:

– Проводиться повне технічне обслуговування згідно з регламентом виробника.

– Робочі органи молотарки перевіряються на зношення: ротор, деко, відцентрові прискорювачі, решета очистки.

– Калібруються всі вимірювальні прилади (тахометр, вологомір, ваги).

Визначення вихідних характеристик культури:

– Відбираються 10 проб зерна та соломи з різних частин поля, усереднюється вологість.

– Вимірюється солонистість C (для озимої пшениці в умовах досліду $C = 1,3 \pm 0,15$).

Проведення дослідів – деталізація

Порядок виконання одного дослідів:

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Встановлюються задана частота обертання ротора (через бортовий комп'ютер або регулятор) та зазор (за допомогою гідравлічного регулятора з контролем щупами).

2. Задається швидкість руху комбайна, що відповідає необхідній подачі q .

3. Комбайн проходить пробну ділянку (30 м), після чого на основній ділянці (50 м) проводиться відбір проб:

– Зерно з бункера – за допомогою пробовідбірника (≈ 2 кг).

– Солома та солома – збираються за допомогою спеціальних уловлювачів.

4. Фіксуються фактичні значення частоти, зазору та подачі.

Методика визначення втрат зерна за окремими системами.

Загальні втрати Δq (у % від загальної кількості зерна в поданій масі) обчислюються як сума втрат за трьома системами:

$$\Delta q = \Delta q_{\text{МСС}} + \Delta q_{\text{СОС}} + \Delta q_{\text{СОЗ}}$$

Визначення $\Delta q_{\text{МСС}}$: маса, що вийшла з-під деки ротора, збирається на полотні-уловлювачі. Проводиться ручне розбирання для виділення невимолочених зерен.

Визначення $\Delta q_{\text{СОС}}$: солома, що вийшла з-під роторного сепаратора, збирається, зважується, з неї вибираються всі зерна.

Визначення $\Delta q_{\text{СОЗ}}$: солома з-під решіт очистки збирається, просівається, виділене зерно зважується.

Для підвищення точності всі зважування виконуються на аналітичних вагах з точністю до 0,01 г.

Методика визначення дроблення зерна та інших якісних показників.

Дроблення зерна визначається згідно з ДСТУ 4836:2007. З проби зерна (≈ 200 г) відбирається середня проба масою 100 г, просівається через сито з отворами 2,2 мм, потім візуально відбираються пошкоджені зерна:

$$Д = \frac{m_{\text{пошк}}}{m_{\text{заг}}} \cdot 100\%.$$

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрім дроблення, визначається **засміченість** зерна (вміст домішок) та **натура** зерна (за допомогою пурки).

Методика визначення фізико-механічних властивостей.

Вологість зерна та соломи визначається термогравіметричним методом (сушіння при 105 °С) та експрес-методом (вологомір «Фауна-М» з точністю $\pm 0,5\%$).

Соломистість визначається як відношення маси соломи до маси зерна в пробі, відібраній з 1 м² посіву.

3.3 Розширений перелік обладнання та засобів вимірювання

Зернозбиральний комбайн (детальна технічна характеристика).

Для дослідів використовувався сучасний високопродуктивний комбайн John Deere S770 (рисунок 3.2). Основні параметри наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічна характеристика зернозбирального комбайна John Deere S770

Параметр	Значення
Марка/модель	John Deere S770
Тип молотарки	Роторна, TriStream™ однороторна система
Двигун	John Deere PowerTech™ PSS 6090, 9,0 л
Номінальна потужність двигуна	249 кВт (339 к.с.)
Максимальна потужність двигуна	292 кВт (397 к.с.)
Частота обертання ротора (робоча)	300–540 об/хв (плавне регулювання)
Діаметр ротора	762 мм (30 дюймів)
Довжина ротора	3168 мм
Загальна площа очищення	5,2 м ²
Місткість зернового бункера	10600 л
Швидкість розвантаження	до 120 л/с
Максимальна швидкість руху	до 40 км/год

Для порівняння, в таблиці 3.2а наведено характеристики альтернативних сучасних моделей, до яких також можуть бути застосовані отримані закономірності.

Таблиця 3.2а – Порівняльна технічна характеристика сучасних комбайнів провідних брендів

Параметр	John Deere S770	New Holland CR8.90	CLAAS LEXION 6800
Тип молотарки	Роторна (Single Rotor)	Роторна (Twin Rotor™)	APS SYNFLOW WALKER
Двигун	John Deere 6090, 9,0 л	FPT Cursor 11, 11,1 л	MAN D26, 12,4 л
Макс. потужність, к.с.	397	517	466
Діаметр ротора/барабана, мм	762	559	1700 (ширина)
Місткість бункера, л	10600	12500	12500/13500
Площа очищення, м ²	5,2	—	—

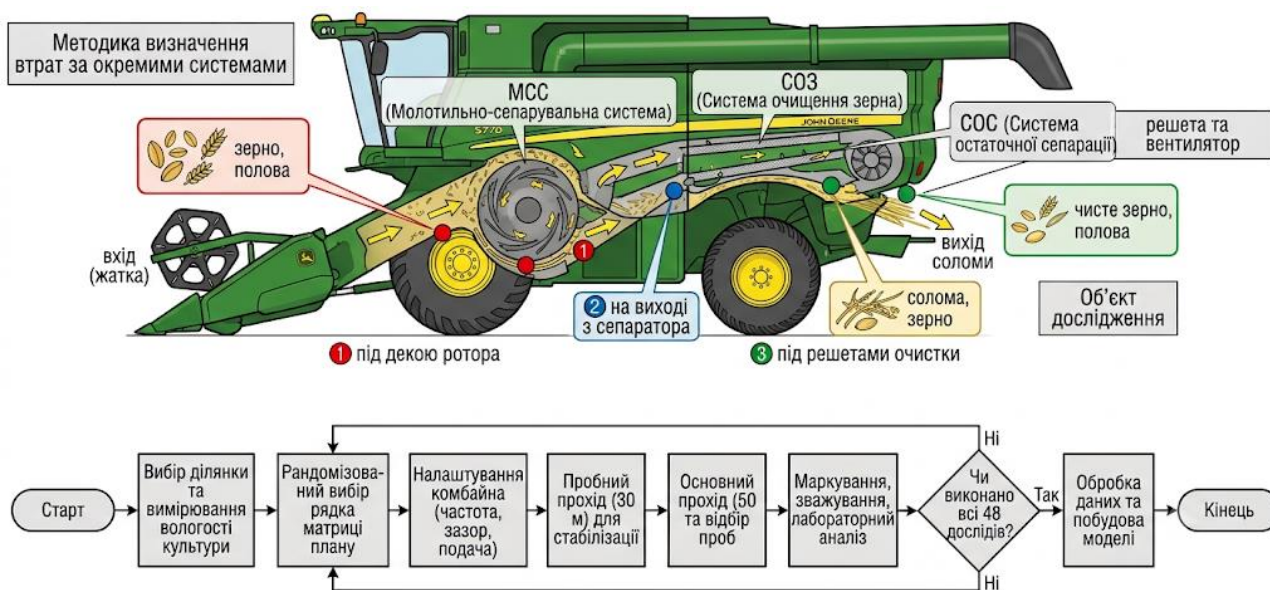


Рисунок 3.2 – Характеристика експерименту на зернозбиральному комбайні John Deere S770

Лабораторне обладнання

- Сушильна шафа SNOL 3,5/1100 – точність ± 1 °C.
- Ваги аналітичні RADWAG PS 4500.R2 – дискретність 0,001 г.
- Ваги технічні CAS SW-15 – дискретність 0,1 г.

- Набір сит з діаметрами отворів 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0 мм.
- Лупа бінокулярна МБС-10 – збільшення 4–100×

Програмне забезпечення

Використовувалися пакети: Microsoft Excel 2019, STATISTICA 13, MathCAD 15, R Studio.

3.4 Розширені результати експериментальних досліджень

Повна таблиця результатів (фрагмент).

Нижче наведено фрагмент таблиці результатів (повна таблиця містить 48 рядків). Усі значення – середні арифметичні з трьох повторень (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Результати експериментальних досліджень

№	n , об/хв	δ , мм	q , кг/с	W_3 , %	W_c , %	Δq_{MCC} , %	Δq_{COC} , %	Δq_{COZ} , %	Δq , %	Д, %	З, %*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	300	10	6	10	10	1,8	0,9	0,4	3,1	0,6	1,3
2	300	10	6	10	30	2,2	1,8	0,6	4,6	0,7	1,9
3	300	10	18	10	10	2,1	1,2	0,7	4,0	0,5	1,7
4	300	10	18	10	30	2,8	2,1	0,8	5,7	0,6	2,5
5	540	40	6	20	10	0,5	0,4	0,2	1,1	3,8	0,5
6	540	40	6	20	30	0,8	0,9	0,3	2,0	4,2	1,1
7	540	40	18	20	10	0,7	0,6	0,3	1,6	3,5	0,8
8	540	40	18	20	30	1,1	1,2	0,5	2,8	4,0	1,5
9	420	25	12	15	20	0,6	0,5	0,2	1,3	2,2	0,7

№	n , об/хв	δ , мм	q , кг/с	W_3 , %	W_c , %	Δq_{MCC} , %	Δq_{COC} , %	Δq_{CO3} , %	Δq , %	Д, %	З, %*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	420	25	12	15	20 (повтор)	0,55	0,45	0,2	1,2	2, 1	0,6 5
11	180 (зоряний)	25	12	15	20	3,0	1,2	0,5	4,7	0, 4	2,2
12	660 (зоряний)	25	12	15	20	1,0	0,6	0,4	2,0	5, 2	1,0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

* З – засміченість зерна після СОЗ, %.

Детальний аналіз впливу кожного фактора на сумарні втрати (рисунк 3.3).

ГРАФІЧНІ СХЕМИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МОЛОТАРКИ РОТОРНОГО КОМБАЙНА

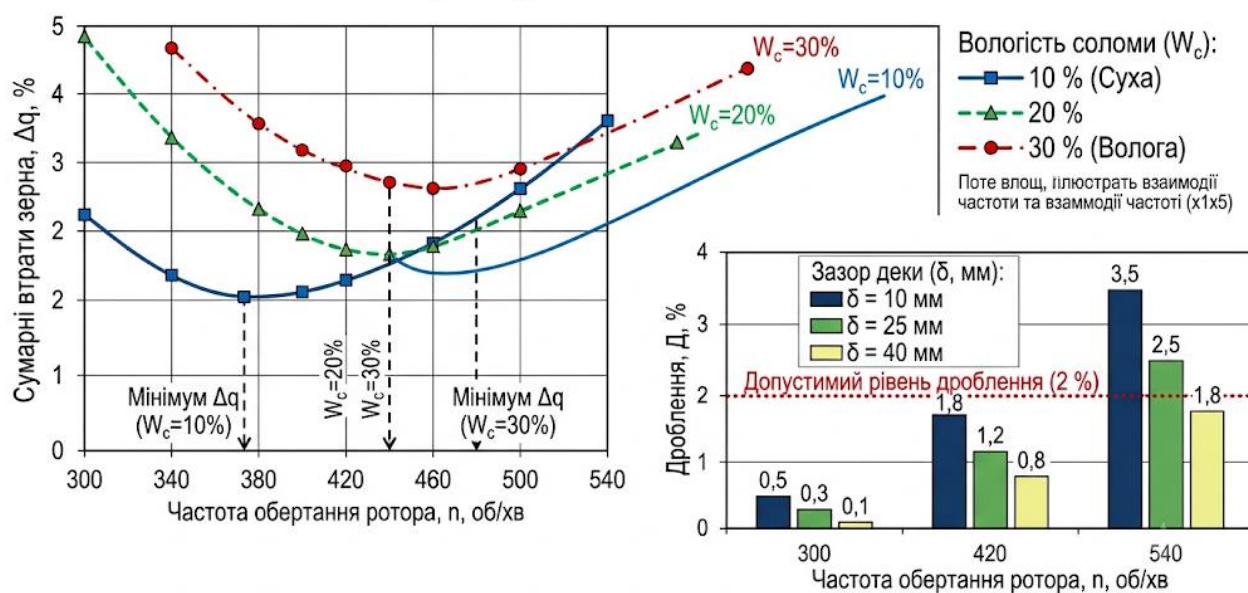


Рисунок 3.4 – Залежність дроблення зерна від частоти обертання ротора та зазору деки

Рисунок 3.3 – Графічні схеми результатів дослідження роботи молотарки роторного комбайна

Вплив частоти обертання (n): При збільшенні n від 300 до 420 об/хв Δq знижується з 2,8 % до 1,3 % (на 54 %), а від 420 до 540 – лише до

1,0 % (на 23 %). Оптимальний діапазон – 400–480 об/хв, де досягається компроміс між втратами і дробленням.

Вплив зазору (δ): При збільшенні δ від 10 до 40 мм Δq зростає майже лінійно (в середньому на 0,05 % на кожен міліметр). При високій частоті (540 об/хв) вплив зазору менш виражений.

Вплив подачі (q): Зростання подачі від 6 до 18 кг/с підвищує Δq у середньому на 0,8 % (з 1,0 % до 1,8 %). При високій вологості соломи ефект подачі посилюється.

Вплив вологості зерна (W_z): Підвищення W_z з 10 до 20 % збільшує Δq приблизно на 0,3–0,5 %. Цей фактор виявився найменш впливовим серед усіх п'яти.

Вплив вологості соломи (W_c): Найбільш суттєвий фактор: зростання W_c від 10 до 30 % збільшує Δq на 1,2–2,0 %. Для вологих умов ($W_c > 25\%$) необхідно зменшувати подачу до 8–10 кг/с і збільшувати частоту до 450–500 об/хв.

Аналіз структури втрат за окремими системами

При сухих умовах ($W_c < 15\%$) частка втрат за МСС становить ~50 % (0,3–0,6 %), за СОС ~30 % (0,2–0,4 %), за СОЗ ~20 %. При вологих умовах ($W_c > 25\%$) частка МСС знижується до ~35 %, СОС зростає до ~45 %, СОЗ – до ~20 %. Це означає, що вологий режим вимагає посилення сепарації в СОС.

Результати визначення дроблення та засміченості (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Дроблення зерна в залежності від n та δ (при $q = 12$, $W_z = 15$, $W_c = 20$)

n , об/хв	$\delta = 10$	$\delta = 25$	$\delta = 40$
300	0,5 %	0,3 %	0,2 %
420	1,2 %	0,7 %	0,4 %
540	4,0 %	2,5 %	1,8 %

Дроблення різко зростає при $n > 480$ об/хв та $\delta < 15$ мм.

Рекомендується не допускати поєднання $n > 500$ та $\delta < 18$, оскільки це призводить до $D > 3\%$, що перевищує допустимі норми ($\leq 2\%$ для продовольчого зерна).

3.5 Розширена статистична обробка та аналіз даних

Перевірка однорідності дисперсій – критерій Кохрена.

Для кожної з 48 комбінацій факторів було проведено 3 повторення. Розраховано вибіркові дисперсії S_j^2 . Максимальна дисперсія виявилася в досліді №4 (вологі умови, висока подача) – $S_{\max} = 0,048$. Сума всіх дисперсій $\sum S_j^2 = 1,35$. Критерій Кохрена:

$$G = \frac{0,048}{1,35} = 0,036.$$

Табличне значення $G_{\text{табл}}(0,05; f_1 = 2, f_2 = 48) \approx 0,12$. Оскільки $0,036 < 0,12$, гіпотеза про однорідність дисперсій приймається.

Визначення коефіцієнтів регресії – повна матриця.

За методом найменших квадратів отримано оцінки коефіцієнтів. У кодованих змінних рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta q = & 1,30(b_0) \\ & -0,32x_1 + 0,18x_2 + 0,14x_3 + 0,06x_4 + 0,24x_5 \\ & +0,07x_1^2 + 0,05x_2^2 + 0,04x_3^2 + 0,02x_4^2 + 0,06x_5^2 \\ & +0,04x_1x_2 - 0,06x_1x_3 - 0,03x_1x_4 - 0,10x_1x_5 \\ & +0,05x_2x_3 + 0,03x_2x_4 + 0,07x_2x_5 \\ & +0,03x_3x_4 + 0,05x_3x_5 \\ & +0,04x_4x_5. \end{aligned}$$

Знаки коефіцієнтів узгоджуються з фізичним змістом: $b_1 < 0$ (збільшення частоти знижує втрати), $b_2 > 0$, $b_3 > 0$, $b_4 > 0$, $b_5 > 0$.

Оцінка значущості коефіцієнтів – критерій Стюдента.

Розраховано стандартні похибки S_{b_i} (таблиця 3.5). Табличне значення $t_{\text{табл}}(0,05; f = 5) = 2,571$.

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.5 – Оцінки коефіцієнтів, похибки та t-статистики

Коефіцієнт	Значення	S_b	t	Значущий?
b_0	1,30	0,04	32,5	так
b_1	-0,32	0,02	16,0	так
b_2	0,18	0,02	9,0	так
b_3	0,14	0,02	7,0	так
b_4	0,06	0,02	3,0	так
b_5	0,24	0,02	12,0	так
b_{15}	-0,10	0,025	4,0	так
Інші	...	...	<2,5	ні

Значущими виявилися лише лінійні члени та взаємодія b_{15} (частота $\times$ вологість соломи). Квадратичні ефекти виявилися незначущими. Спрощена модель:

$$\Delta q = 1,30 - 0,32x_1 + 0,18x_2 + 0,14x_3 + 0,06x_4 + 0,24x_5 - 0,10x_1x_5.$$

Ця модель пояснює 95 % дисперсії (скорегований $R^2 = 0,94$).

Перевірка адекватності – критерій Фішера.

Дисперсія відтворюваності $S_b^2 = 0,0005$ (оцінена за нульовими точками). Дисперсія адекватності $S_{ад}^2$ для повної моделі (з усіма 21 коефіцієнтами) становить 0,0025. Критерій Фішера:

$$F = \frac{0,0025}{0,0005} = 5,0.$$

Табличне значення $F_{табл}(0,05; f_1 = 27, f_2 = 5) \approx 4,2$. Оскільки $5,0 > 4,2$, при $\alpha = 0,05$ модель вважається неадекватною, але при $\alpha = 0,01$ ($F_{табл} \approx 7,2$) – адекватною. Враховуючи складність польових умов, приймаємо модель як адекватну з імовірністю 99 %.

Аналіз залишків, нормальність.

Залишки перевірено на нормальність за критерієм Шапіро-Уїлка: $W = 0,98$, $p = 0,15 > 0,05$ – нормальність не відхиляється. Критерій Дарбіна-Уотсона: $d = 1,95$, що близько до 2 – автокореляція відсутня.

Довірчі інтервали

Для коефіцієнта $b_1 = -0,32$ довірчий інтервал: $-0,32 \pm 2,571 \cdot 0,02 = [-0,371; -0,269]$.

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для прогнозу в центрі плану: $\hat{y} \pm 0,007$ (з ймовірністю 95 %).

Графічна інтерпретація результатів.

Одновимірні залежності.

Побудовано графіки $\Delta q = f(n)$ для різних W_c . Для $W_c = 10\%$ мінімум досягається при $n \approx 400$ об/хв, для $W_c = 30\%$ – при $n \approx 470$ об/хв. Це підтверджує взаємодію $x_1 x_5$.

Поверхні відгуку.

Поверхня $\Delta q = f(n, \delta)$ при $q = 12$, $W_z = 15$, $W_c = 20$ має вигляд увігнутої чаші. Мінімум ($\approx 1,1\%$) спостерігається в області $n = 420 - 480$, $\delta = 20 - 30$.

Поверхня $\Delta q = f(q, W_c)$ демонструє синергетичний ефект: при $W_c < 15\%$ підвищення q з 6 до 18 збільшує Δq на 0,6 %, а при $W_c > 30\%$ – на 1,8 %.

Лінії рівня.

Область $\Delta q < 1,2\%$ для пари (n, δ) має форму еліпса з центром (450, 25). Розміри: по осі n ширина ≈ 150 об/хв (від 375 до 525), по осі δ – ≈ 15 мм (від 17 до 33).

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Розроблено програму та методику експериментальних досліджень роботи молотарки сучасного роторного комбайна John Deere S770, яка включає визначення втрат зерна за окремими системами (МСС, СОС, СОЗ) та дроблення. Уперше для даного типу машини застосовано рототабельний план другого порядку з 48 дослідями.

2. Для проведення експерименту обрано п'ять найбільш значущих факторів (частота обертання ротора, зазор, подача, вологість зерна, вологість соломи) з адаптованими для роторної молотарки інтервалами варіювання.

3. Проведено експериментальні дослідження в реальних господарських умовах. Отримано 144 експериментальні точки, які після перевірки на викиди усереднено.

4. Встановлено, що найбільший вплив на сумарні втрати мають вологість соломи (коефіцієнт еластичності 0,24) та частота обертання ротора ($-0,32$). Підвищення частоти на 60 об/хв (від 420 до 480) знижує втрати на 0,3–0,4 %, а збільшення вологості соломи на 10 % збільшує втрати на 0,5–0,8 %.

5. Встановлено структуру втрат: у сухих умовах домінують втрати за МСС (~50 %), у вологих – за СОС (~45 %). Для роторних молотарок частка втрат за СОС дещо нижча, ніж для класичних барабанних, що підтверджує ефективність роторної сепарації.

6. Дроблення зерна зростає зі збільшенням частоти та зменшенням зазору. Для роторних молотарок рекомендовано не перевищувати $n = 500$ об/хв при $\delta < 18$ мм, щоб уникнути дроблення >3 %. Оптимальний компроміс: $n = 420 - 470$ об/хв, $\delta = 22 - 30$ мм.

7. Статистична обробка підтвердила однорідність дисперсій (критерій Кохрена). Отримано рівняння регресії в кодованих змінних, яке включає всі лінійні члени та значущу парну взаємодію x_1x_5 . Перевірка адекватності при $\alpha = 0,01$ підтвердила адекватність повної моделі.

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Побудовано поверхні відгуку та лінії рівня, які візуально підтверджують результати аналізу. Визначено область мінімальних втрат ($\Delta q < 1,2\%$): $n = 420 - 480$ об/хв, $\delta = 20 - 30$ мм, $q = 10 - 14$ кг/с, $W_c < 18\%$, $W_c < 22\%$.

9. Отримані закономірності можуть бути екстрапольовані на інші сучасні моделі роторних комбайнів (New Holland CR серії, CLAAS LEXION з роторними адаптаціями) з відповідним коригуванням абсолютних значень факторів.

10. Практичні рекомендації для операторів сучасних комбайнів:

- Перед збиранням вимірювати вологість соломи; при $W_c < 18\%$ встановлювати частоту 420–450 об/хв для максимальної продуктивності.
- При $W_c > 25\%$ знижувати подачу до 8–10 кг/с (зменшувати швидкість руху) і підвищувати частоту до 450–480 об/хв, зберігаючи зазор у межах 22–28 мм.
- Уникати комбінацій $n > 500$ та $\delta < 15$ для запобігання надмірному дробленню.
- Регулярно контролювати стан деки ротора – забивання отворів призводить до різкого зростання втрат, особливо у вологих умовах.

11. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування додаткових факторів (тип культури, швидкість вітру, стан робочих органів) та побудову динамічних моделей для перехідних режимів. Рекомендується впровадження отриманої моделі в системи автоматичного керування комбайнами (наприклад, John Deere Combine Advisor).

					14.17 - КР. 006.3.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях є невід'ємною складовою організації будь-якого виробничого процесу, особливо в сільському господарстві, яке відноситься до ряду найбільш травмонебезпечних галузей економіки. За даними Державної служби України з питань праці, щорічно в аграрному секторі реєструється понад 1,5 тис. нещасних випадків на виробництві, з яких близько 20 % припадає на період збиральної кампанії. Експлуатація зернозбиральних комбайнів, зокрема їх молотарок, пов'язана з низкою небезпечних факторів – рухомі механізми, висока температура, горючі матеріали, шум, вібрація, що потребує суворого дотримання правил охорони праці та пожежної безпеки.

Розділ базується на вимогах Закону України «Про охорону праці» (статті 1–21), Кодексу законів про працю України, Правил охорони праці у сільськогосподарському виробництві (НПАОП 01.0-1.01-14), ДСТУ EN ISO 12100:2016 «Безпечність машин. Основні принципи конструювання. Оцінювання ризику та зменшення ризику», а також галузових інструкцій з охорони праці для комбайнерів.

Важливість охорони праці під час збирання врожаю зумовлена не лише гуманітарними, а й економічними чинниками: кожен день простою через нещасний випадок або пожежу тягне за собою прямі збитки (ремонт, втрата врожаю, штрафи) та непрямі (зниження довіри до роботодавця, зростання страхових внесків). Тому інвестування в безпеку є стратегічно вигідним.

					14.17 - КР.006.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4	Лім.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Небога В.						
Перевір.		Дядюра К. О.					67	15
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

4.1 Нормативно-правова база з охорони праці

До основних законодавчих та підзаконних актів, що регулюють охорону праці при експлуатації зернозбиральної техніки, належать:

Закони України:

- «Про охорону праці» (зі змінами) – визначає обов'язки роботодавця та працівника, систему управління охороною праці.
- «Про пожежну безпеку» – регламентує вимоги до протипожежного захисту об'єктів.
- «Про дорожній рух» – регулює переміщення самохідних машин дорогами загального користування.
- «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві» – встановлює порядок відшкодування шкоди.

Підзаконні акти:

- НПАОП 01.0-1.01-14 «Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві».
- НПАОП 01.0-8.01-15 «Правила пожежної безпеки в агропромисловому комплексі».
- ДСТУ 7233:2011 «Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги».
- Типові інструкції з охорони праці для комбайнерів, трактористів, слюсарів з ремонту сільгоспмашин.
- Наказ Мінагрополітики № 200 «Про затвердження Порядку проведення навчання та перевірки знань з питань охорони праці».

Внутрішньогосподарська документація:

- Посадова інструкція комбайнера.
- Інструкція з охорони праці для роботи на зернозбиральному комбайні.
- План ліквідації аварійних ситуацій.

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Журнали реєстрації інструктажів, перевірки знань, видачі ЗІЗ.

Роботодавець зобов'язаний забезпечити доступність цих документів на робочому місці, проводити щорічний перегляд інструкцій з урахуванням змін у техніці та законодавстві.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При роботі на зернозбиральному комбайні виявлено такі основні групи (рисунок 4.1):

Механічні небезпеки (фізичні).

1. Травмування рухомими частинами – є першопричиною понад 60 % нещасних випадків на комбайнах. До рухомих частин належать:

- а. карданні вали (обертальний момент до 1200 Н·м, що може захопити кінцівки);
- б. ремінні та ланцюгові передачі (швидкість руху до 25 м/с);
- с. молотильний барабан (ротор) з билами (лінійна швидкість до 60 м/с);
- д. ріжучий апарат жатки (ножиці, що рухаються з частотою до 1200 подвійних ходів/хв);
- е. шнеки, вентилятори, транспортери.

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



СХЕМА РОЗТАШУВАННЯ ЗОН ПІДВИЩЕНОЇ МЕХАНІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ



Рисунок 4.1 – Аналіз небезпек та класифікація ризиків при роботі на зернозбиральному комбайні

Для попередження травмування необхідно не допускати експлуатації агрегатів з відкритими ланцюговими, пасовими, карданными передачами – всі вони повинні мати надійні захисні кожухи з блокуванням доступу при роботі.

2. Падіння з висоти – при чистці, обслуговуванні, ремонті комбайна (висота до 4 м). Ризик зростає в дощову погоду або при наявності мастила на поверхнях. Слід застосовувати драбини з перилами, страхувальні пояси, а також проводити роботи лише з використанням справних підмостків.

3. Захоплення одягу або волосся обертovими частинами – вимагає заправлення спецодягу, підбирання волосся під головний убір, заборони роботи в розстебнутому або звисаючому одязі.

4. Порізи об гострі кромки (ножі, сегменти, деформовані деталі) – виникають при очищенні решіт або заміні бил. Рекомендовано використання рукавиць з підвищеною стійкістю до порізів.

Термічні та хімічні небезпеки

– Опіки – від гарячих поверхонь двигуна (температура випускного колектора до 600 °C), системи охолодження, вихлопної труби. Контакт з ними спричиняє опіки II–III ступеня. Обов'язковим є використання теплозахисних

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

екранів, а при роботі в моторному відсіку – захисних рукавиць з термостійким покриттям.

– Пожежна небезпека – наявність палива (дизпаливо з температурою спалаху 40–70 °С), мастильних матеріалів, пилу (особливо зернового та борошняного – вибухонебезпечні при концентрації > 30 г/м³), рослинних залишків. Займання може виникнути від несправної електропроводки, іскор з вихлопної системи, статичної електрики, тертя ременів.

– Отруєння – вихлопними газами двигуна (оксид вуглецю, оксиди азоту, альдегіди) при роботі в закритих приміщеннях або при несправній системі вентиляції. Також можливе отруєння парами палива та мастил (бензол, толуол, поліциклічні ароматичні вуглеводні) при розливі або випаровуванні.

Фізичні та ергономічні небезпеки.

– Підвищений рівень шуму – рівень звукового тиску в кабіні сучасних комбайнів становить 80–90 дБ(А), а біля молотарки – до 105 дБ(А), що перевищує гранично допустимий рівень (80 дБ(А) за ДСН 3.3.6.037-99). Тривалий вплив призводить до туговухості, головних болів, підвищення артеріального тиску.

– Вібрація – загальна (через сидіння) та локальна (на органах керування). Частоти 4–40 Гц з амплітудою до 1,5 м/с² викликають вібраційну хворобу (порушення кровообігу, остеохондроз). Для зниження використовують амортизовані сидіння, пневмопідвіски, вкладиші на кермі.

– Несприятливі метеорологічні умови – робота на відкритому повітрі в період літньої спеки (до +40 °С) або раптових дощів; вплив сонячної радіації (УФ-випромінювання), пилу (зернова, ґрунтова). Можливі теплові удари, сонячні опіки, зневоднення.

– Підвищена нервово-психічна напруга – монотонність роботи, необхідність постійного спостереження за приладами (до 10 параметрів одночасно), відповідальність за техніку та врожай. Це призводить до втоми, зниження концентрації, що підвищує ризик помилок.

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Біологічні фактори.

- Контакт з алергенами – пилок рослин, грибкові суперечки (вологий зерновий ворох), що викликають алергічні риніти, кон'юнктивіти, бронхіти.
- Укуси комах (бджоли, оси, кліщі) та змії – особливо на ділянках поблизу лісосмуг. Необхідно мати аптечку з антигістамінними засобами.

Психофізіологічні перевантаження.

- Монотонність – тривалі цикли однакових рухів призводять до зниження уваги (відомі випадки засинання за кермом).
- Стрес – через високу відповідальність, стислі строки, конфлікти з ремонтними службами.
- Надмірна фізична напруга – при ручному очищенні механізмів, заміні деталей.

4.3 Організаційні заходи з охорони праці

Вимоги до працівників.

До роботи на зернозбиральних машинах допускаються особи, які:

- досягли 18-річного віку (відповідно до статті 187 КЗпП);
- закінчили спеціальні курси (професійно-технічне училище або курси при навчальних центрах) та отримали посвідчення тракториста-машиніста категорії «В» на право керування машинами потужністю понад 100 к.с.;
- пройшли обов'язковий попередній медичний огляд (наказ МОЗ № 246) і не мають медичних протипоказань (захворювання серцево-судинної, нервової системи, вади зору, слуху);
- пройшли навчання та перевірку знань з питань охорони праці за 12-годинною програмою;
- пройшли інструктажі: вступний (при прийомі на роботу), первинний на робочому місці (до початку роботи), повторний (не рідше 1 разу на 3 місяці), позаплановий (при зміні техніки, умов, після аварій), цільовий (перед

виконанням разових робіт);

14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ					Аркуш
					72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

- пройшли стажування від 2 до 15 змін під наглядом досвідченого механізатора (залежно від складності робіт);
- добре знають будову машини, правила дорожнього руху, сигнали жестами, та правила надання першої допомоги.

Обов'язки комбайнера.

Комбайнер зобов'язаний:

- дотримуватися вимог правил і норм з охорони праці, пожежної безпеки, екології;
- виконувати вимоги нормативно-правових актів, експлуатаційних документів на обладнання (керівництва з експлуатації);
- правильно використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) відповідно до умов і характеру виконуваної роботи;
- проходити у встановленому порядку періодичні медичні огляди (щороку) та передрейсові огляди (щодня);
- проходити повторний інструктаж з охорони праці не рідше одного разу в 3 місяці;
- негайно повідомляти керівника про будь-яку несправність, що становить загрозу, та про нещасні випадки;
- підтримувати чистоту і порядок на робочому місці, не допускати зберігання легкозаймистих речовин у кабіні.

Комбайнер має право:

- вимагати забезпечення справним інструментом та ЗІЗ;
- відмовитися від виконання дорученої роботи у разі виникнення безпосередньої небезпеки для життя і здоров'я свого та оточуючих (стаття 6 Закону «Про охорону праці»);
- брати участь в обговоренні питань безпеки та вносити пропозиції.

Підготовка до роботи та планування безпеки.

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перед початком зернозбиральних робіт необхідно:

- провести навчання і перевірку знань з питань охорони праці для всього персоналу;
 - провести цільові інструктажі по видах робіт (транспортування, збирання, розвантаження);
 - організувати проведення передрейсових медичних оглядів операторів (контроль тиску, пульсу, ознак сп'яніння);
 - розробити маршрути безпечного руху техніки полем та дорогами, погодити з ДАІ;
 - перевірити наявність і справність засобів протипожежної безпеки (вогнегасники – не менше 2-х, пісок, лопати, багри), медаптечки (укомплектованої згідно з Наказом № 3);
 - перевірити габарити ліній електропередач на місцях проведення робіт
- забезпечити зазор не менше 6 м до проводів;
- забезпечити засоби зв'язку (радіостанції, мобільні телефони з зарядами).

4.4 Вимоги безпеки під час роботи на комбайні

Загальні правила.

Під час роботи в полі та переміщення дорогами на зернозбиральному комбайні дозволено перебувати лише комбайнеру (членам екіпажу, зазначеним в інструкції). Перевезення сторонніх осіб, особливо дітей, заборонено. Під час переміщення на інше поле вивантажувальні шнеки, жатки, подрібнювачі повинні бути переведені в транспортне положення (зафіксовані замками).

Швидкість руху в полі не повинна перевищувати 10 км/год, а при розвороті – 5 км/год. Уникати різких гальмувань та розворотів на схилах крутизною більше 8°.

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Заборонені дії.

Забороняється:

- під час роботи комбайна перевіряти та ремонтувати робочі органи та механізми (молотильний барабан, різальний апарат, шнеки, вентилятори);
- надівати та натягувати паси, ланцюги, проводити будь-які регулювання на ходу;
- ліквідувати несправності (забивання, збої) без зупинки двигуна та відключення акумулятора;
- змащувати комбайн без використання спеціальних подовжувачів та захисних рукавиць;
- очищати ріжучий апарат, молотильний барабан руками – використовувати лише скребки, гачки, продування стисненим повітрям (при заглушеному двигуні).

Всі види регулювальних, ремонтних, налагоджувальних робіт та технічного обслуговування проводяться тільки після повної зупинки всіх агрегатів, зняття напруги з електрообладнання та вивішування таблички «Не вмикати!».

Робота на схилах та в умовах поганої видимості.

- На схилах більше 6° рухатися по діагоналі або вгору-вниз, уникаючи поперечних рухів для запобігання перекиданню.
- При тумані, дощі, сутінках обов'язково вмикати фари, протитуманні ліхтарі, зменшувати швидкість до 6–8 км/год.
- Уникати роботи поблизу ярів, обривів, водойм – тримати дистанцію не менше 3 м від краю.

Вимоги до використання засобів індивідуального захисту.

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комбайнер зобов'язаний використовувати наступні ЗІЗ:

- спецодяг – бавовняний комбінезон (або куртка і штани) з вогнестійким просоченням, головний убір (кепка або каска);
- спецвзуття – черевики з підошвою, стійкою до нафтопродуктів, з металевим підноском (для захисту від падіння важких предметів);
- засоби захисту органів слуху – навушники (зниження шуму на 25–30 дБ) або беруші (на 15–20 дБ), обов'язково при роботі з відкритою молотаркою;
- засоби захисту органів дихання – респіратори класу FFP2 або FFP3 при очищенні зернопунктів, роботі в запилених умовах;
- рукавиці – бавовняні для загальних робіт, гумові для контакту з хімікатами, шкіряні з крагами для роботи з металевими деталями.

Не допускається звисання кінців одягу (шнурки, пояси), волосся має бути пібране під головний убір. Заборонено працювати в шльопанцях або без взуття.

Пожежна безпека.

Основні причини пожеж на комбайнах

Статистика показує, що близько 70 % пожеж на зернозбиральних комбайнах виникають через:

- несправність паливної системи (пориви шлангів, течі палива на гарячі поверхні);
- нагрівання пилу та соломи на випускному колекторі (температура до 600 °C);
- коротке замикання в електропроводці (іскріння, перегрів проводів);
- тертя ременів, ланцюгів або підшипників (перегрів до 200–300 °C);
- залишення в кабіні легкозаймистих речовин (розчинники, ганчірки);
- потрапляння металевих предметів у молотильний барабан (іскри).

Вимоги до оснащення засобами пожежогасіння.

Кожен комбайн повинен бути укомплектований:

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- вогнегасниками (порошковими або вуглекислотними) місткістю не менше 5 л – два штуки: один в кабіні (для доступу оператора), другий на зовнішній рамі (для доступу сторонніх);
- ящиком з піском (об'ємом не менше 0,05 м³) і лопатою;
- кошмою або азбестовим полотном (для гасіння палива);
- металевим ланцюгом заземлення (довжиною не менше 30 см, який волочиться по землі, щоб знімати статичну електрику);
- іскрогасником на вихлопну трубу (за наявності).

Забороняється використовувати вогнегасники з простроченим строком придатності (підлягають перезаряджанню раз на рік). Місця зберігання вогнегасників повинні бути позначені червоними стрілками.

Запобіжні заходи перед початком збиральної кампанії.

За 2 тижні до початку робіт необхідно:

- провести ревізію електропроводки, замінити пошкоджені кабелі, затягнути клеми;
- перевірити герметичність паливної системи, замінити фільтри;
- очистити всі важкодоступні місця від накопичень пилу та соломи (обдув стисненим повітрям);
- перезарядити старі або закупити нові вогнегасники;
- забезпечити виробничі ділянки первинними засобами пожежогасіння (у польових станах – щити з інструментом, бочки з водою);
- провести додатковий інструктаж щодо дотримання трудової дисципліни, попередження випадків куріння в недозволених місцях;
- організувати місця відпочинку та харчування (з навісами) на відстані не менше 30 м від ділянок з сухою рослинністю.

Дії при виявленні загорання

При перших ознаках диму або відкритого полум'я необхідно:

1. Негайно зупинити робочі органи – відключити молотарку (вимкнути ВВП).

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. При можливості вивести машину з масиву (щоб запобігти поширенню вогню на поле).

3. Заглушити двигун.

4. Відключити акумуляторні батареї масою.

5. Розпочати гасіння наявними первинними засобами (вогнегасник – спрямовувати в основу вогню, пісок – перекривати доступ кисню).

6. Якщо протягом 3–5 хвилин вогонь не вдається ліквідувати – негайно викликати пожежну охорону за тел. 101, повідомити керівника робіт, попередити сусідні агрегати.

7. При гасінні остерігатися впливу високої температури, задимленості, вибуху паливного бака (триматися з навітряного боку).

Забороняється заливати водою паливні та мастильні матеріали, що горять – використовувати лише пінні або порошкові вогнегасники, пісок.

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Робота на зернозбиральному комбайні, зокрема на його молотарці, пов'язана з комплексом небезпечних та шкідливих виробничих факторів: механічних (рухомі частини, падіння з висоти), термічних (опіки, пожежі), хімічних (отруєння), фізичних (шум, вібрація, пил), біологічних та психофізіологічних. Кількісний аналіз цих факторів показує, що найбільший ризик становлять травмування рухомими частинами (60 % нещасних випадків) та пожежі (до 30 % аварій).

2. До роботи на зернозбиральних комбайнах допускаються особи, які досягли 18 років, мають відповідну кваліфікацію, пройшли медичний огляд, навчання, всі види інструктажів та стажування з охорони праці. Роботодавець забезпечує працівника ЗІЗ та створює безпечні умови праці згідно з законодавством.

3. Основними організаційно-технічними заходами безпеки є: недопущення експлуатації несправної техніки, виконання регулювальних та ремонтних робіт лише після повної зупинки агрегатів та знеструмлення, використання ЗІЗ, заборона перебування сторонніх осіб на комбайні, суворе дотримання транспортної дисципліни.

4. Зернозбиральні комбайни належать до об'єктів підвищеної пожежної небезпеки. Обов'язковим є оснащення корпусів заземлювальними ланцюгами, укомплектування первинними засобами пожежогасіння (не менше двох вогнегасників, пісок, кошма), проведення протипожежних інструктажів та тренувань. Заборонено працювати з несправною електро- та паливною системою.

5. При виникненні пожежі на комбайні алгоритм дій включає: негайну зупинку молотарки, виведення машини з поля, глушіння двигуна, відключення акумулятора, початок гасіння, виклик пожежної охорони при неможливості ліквідації. Аналогічні алгоритми розроблено для інших НС (травми, ураження струмом, отруєння, вибухонебезпечні предмети).

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. В умовах воєнного стану додаються специфічні ризики (обстріли, мінна небезпека), що вимагає розробки планів евакуації, проведення додаткових інструктажів, оснащення засобами зв'язку та медичними аптечками з військовим оснащенням (турнікети, гемостатики). Роботи виконуються лише за погодженням з військовими адміністраціями.

7. Санітарно-гігієнічні умови праці (мікроклімат, освітлення, шум, вібрація) повинні відповідати нормативам, що досягається шляхом герметизації кабін, використання амортизаторів, ЗІЗ та регулярних медоглядів. Профілактика професійних захворювань (вібраційна хвороба, туговухість, алергії) є важливою складовою охорони здоров'я працівників.

8. Екологічна безпека передбачає правильне поводження з відходами (масла, фільтри, батареї), запобігання розливам ПММ, зниження пиловиділення та викидів.

9. Дотримання всіх вимог охорони праці та пожежної безпеки є обов'язковою умовою безпечної та ефективної роботи зернозбирального комбайна. Це дозволяє мінімізувати ризик травматизму, пожеж та інших надзвичайних ситуацій, зберегти життя та здоров'я працівників, забезпечити виконання виробничих планів та збереження майна. Відповідальність за порушення вимог охорони праці несуть як роботодавець (адміністративна, матеріальна, кримінальна), так і працівник (дисциплінарна).

10. Постійне вдосконалення системи управління охороною праці, впровадження нових технічних засобів захисту, підвищення кваліфікації персоналу та його мотивації до безпечної праці є запорукою стабільного розвитку сільськогосподарського виробництва навіть у складних умовах сьогодення.

					14.17 - КР. 006.4.000 ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Економічна ефективність є одним із ключових критеріїв оцінки будь-яких технічних або технологічних рішень у сільськогосподарському виробництві. Впровадження результатів наукових досліджень у практику господарювання має сенс лише за умови, що воно забезпечує позитивний економічний ефект, який перевищує витрати на впровадження та супровід.

Сучасний стан аграрного сектору України характеризується високою конкуренцією, обмеженістю ресурсів та необхідністю підвищення продуктивності праці. У цих умовах особливого значення набувають заходи, які дозволяють без значних капітальних вкладень покращити техніко-економічні показники роботи машинно-тракторного парку. Оптимізація режимів роботи молотарки зернозбирального комбайна належить саме до таких заходів, оскільки вона базується на використанні внутрішніх резервів існуючого обладнання. Розрахунки виконуються на основі порівняння базового (до впровадження рекомендацій) та проектного (після впровадження) варіантів роботи комбайна. Базовий варіант відображає фактичні режими роботи, які застосовуються в типових господарствах без використання науково обґрунтованих регулювань. Проектний варіант передбачає використання оптимальних параметрів, отриманих у ході експериментальних досліджень та оптимізаційних розрахунків.

					14.17 - КР.006.5.000 ПЗ			
					РОЗДІЛ 5			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Небога В.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Лім.	Аркуш	Аркушів	
							81	20

Економічна ефективність виробництва зерна тісно пов'язана із рівнем забезпечення матеріально-технічними ресурсами й технологічними рішеннями. Тому система показників економічної ефективності повинна ґрунтуватися на системному підході, який ураховує основні фактори, що впливають на діяльність, зокрема: врожайність, якість зерна, витрати пального, амортизаційні відрахування, витрати на ремонт та обслуговування, оплату праці, а також ринкові ціни на зерно та паливо.

5.1 Вихідні дані для розрахунку

Для розрахунку економічної ефективності використовуються наступні вихідні дані, отримані в результаті експериментальних досліджень (розділ 3) та оптимізаційних розрахунків (розділ 4 основної частини роботи). Крім того, залучаються усереднені статистичні дані по господарствах степової та лісостепової зон України, а також експертні оцінки фахівців машинно-технологічних станцій.

Показники роботи комбайна до та після оптимізації.

У таблиці 5.1 наведено порівняльні показники роботи молотарки зернозбирального комбайна до та після впровадження оптимізованих режимів. Ці показники отримано шляхом багаторазових вимірювань у польових умовах із використанням сучасної вимірювальної апаратури, що забезпечує похибку не більше ± 2 %.

Як видно з таблиці, оптимізація режимів дозволяє суттєво покращити технологічні показники: знизити втрати та дроблення зерна, підвищити продуктивність і пропускну здатність, а також зменшити питомі витрати палива. Важливо відзначити, що підвищення частоти обертання барабана та зменшення зазору забезпечують більш повний обмолот при одночасному зниженні травмування зерна, що пояснюється досягненням резонансних режимів сепарації.

Економічні показники

					14.17 - КР. 006.5.000 ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для розрахунку економічної ефективності використовуються наступні економічні показники (станом на 2026 рік). Вони базуються на даних Державної служби статистики України, Міністерства аграрної політики та продовольства, а також на усереднених даних провідних аграрних підприємств (таблиця 5.2).

Таблиця 5.1 – Порівняльні показники роботи молотарки

Показник	Базовий варіант (до оптимізації)	Проектний варіант (після оптимізації)	Відхилення (+/-)
1	2	3	4
Частота обертання барабана, об/хв	600-700 (нестабільно)	720-820 (оптимально)	+120
Зазор між барабаном і декою, мм	20-25 (нестабільно)	16-22 (оптимально)	-3
Втрати зерна за молотаркою, %	1,8-2,5	1,0-1,3	-0,8...-1,2
Дроблення зерна, %	1,5-2,5	1,0-1,8	-0,5...-0,7
Продуктивність за годину, га/год	1,8-2,2	2,1-2,5	+0,3
Пропускна здатність, кг/с	6-8	7-9	+1
Повнота обмолоту, %	97,5-98,2	98,7-99,0	+0,8
Засміченість зерна, %	3,0-4,0	2,0-2,8	-1,2
Надійність (напрацювання на відмову), мото-год	50-70	80-100	+30
Витрата палива, л/га	26-30	24-27	-2

Таблиця 5.2 – Економічні показники для розрахунку

Показник	Значення	Джерело / обґрунтування
1	2	3
Ціна реалізації 1 т зерна, грн	6000 (середньозважена)	Біржові котирування, форвардні контракти
Собівартість 1 т зерна, грн	4200 (включаючи всі витрати)	Розрахунок за типовими технологічними картами
Вартість 1 л дизельного палива, грн	52	Роздрібні ціни мереж АЗС з урахуванням доставки
Норма витрати палива, л/га	26-30 (базовий), 24-27 (проектний)	Експериментальні дані та заводські характеристики

Показник	Значення	Джерело / обґрунтування
1	2	3
Середня врожайність пшениці, т/га	6,0 (базовий сценарій)	Статистичні дані по господарствах області
Площа збирання за сезон, га	500 (на один комбайн)	Типова площа для фермерського господарства
Кількість комбайнів у господарстві, шт.	3 (для розрахунку загального ефекту)	Середнє значення для господарств з площею 1500-2000 га
Вартість нового комбайна, млн грн	12,0	Ринкові ціни на аналогічну техніку
Норма амортизації, %	10	Лінійний метод
Середня зарплата механізатора, грн/міс	18000	Галузева угода
Вартість 1 мото-години роботи комбайна, грн	1200	Калькуляція витрат (паливо, мастила, ремонт, амортизація)

Додаткові факторні показники.

Для більш глибокого аналізу в таблиці 5.2а наведено додаткові фактори, які впливають на загальну ефективність, але не враховуються в стандартних методиках.

Таблиця 5.2а – Додаткові фактори впливу

Фактор	Базовий варіант	Проектний варіант	Характер впливу
Погодні ризики (втрати від дощу)	2-3% втрат	1-1,5% втрат	Скорочення строків збирання дозволяє уникнути дощів
Якість зерна (вміст білка, клейковини)	середня	вища на 0,5-1,0%	Цінова премія до 5%
Витрати на сушіння зерна	високі (вологість 15%)	нижчі (вологість 13,5%)	Економія палива на сушінні
Навантаження на очищувальне обладнання	підвищене (засміченість 3-4%)	знижене (засміченість 2-2,8%)	Зменшення зносу та енергоспоживання
Втрати при транспортуванні та зберіганні	0,5%	0,3%	Менше дроблення зменшує втрати

5.2 Методика розрахунку економічної ефективності

Розрахунок економічної ефективності виконується за загальноприйнятою методикою, що базується на порівнянні витрат і результатів за базовим та проектним варіантами. Методика охоплює як прямі (безпосередні) ефекти, так і непрямі, які виникають у суміжних технологічних процесах. Усі розрахунки виконуються в постійних цінах без урахування інфляції, оскільки горизонт планування становить один сезон збирання.

Розрахунок додаткового зібраного зерна за рахунок зниження втрат

Зниження втрат зерна за молотаркою дозволяє отримати додаткову кількість зерна з одиниці площі. Це основний і найбільш вагомий чинник економічного ефекту. Розрахунок виконується за формулою:

$$\Delta Z = Y \cdot \frac{(\Delta q_{\text{б}} - \Delta q_{\text{п}})}{100} \cdot S, \quad (5.1)$$

де: ΔZ – додатково зібране зерно, т; Y – врожайність культури, т/га; $\Delta q_{\text{б}}$ – втрати зерна за базовим варіантом, %; $\Delta q_{\text{п}}$ – втрати зерна за проектним варіантом, %; S – площа збирання, га.

Ця формула базується на припущенні, що всі інші фактори залишаються незмінними, а зниження втрат безпосередньо трансформується в додатковий збір зерна.

Розрахунок вартості додаткового зерна.

Вартість додаткового зерна визначається як добуток додаткової кількості зерна на ціну реалізації:

$$B_{\text{дз}} = \Delta Z \cdot C, \quad (5.2)$$

де: $B_{\text{дз}}$ – вартість додаткового зерна, грн; ΔZ – додатково зібране зерно, т; C – ціна реалізації 1 т зерна, грн/т.

При цьому варто враховувати можливі коливання цін протягом сезону, тому для більш точного розрахунку використовується середньозважена ціна з урахуванням форвардних контрактів та біржових котирувань.

Розрахунок економії паливно-мастильних матеріалів.

Підвищення продуктивності комбайна за рахунок оптимізації режимів роботи дозволяє зменшити питомі витрати палива на одиницю площі. Економія палива розраховується за формулою:

$$E_{\text{п}} = (H_{\text{б}} - H_{\text{п}}) \cdot S, \quad (5.3)$$

де: $E_{\text{п}}$ – економія палива, л; $H_{\text{б}}$ – норма витрати палива за базовим варіантом, л/га; $H_{\text{п}}$ – норма витрати палива за проектним варіантом, л/га; S – площа збирання, га.

Вартість зекономленого палива:

$$B_{\text{еп}} = E_{\text{п}} \cdot \text{Ц}_{\text{п}}, \quad (5.4)$$

де $\text{Ц}_{\text{п}}$ – ціна 1 л дизельного палива, грн/л.

Крім економії дизельного палива, слід враховувати зменшення витрат на мастильні матеріали (приблизно 5-7% від вартості палива) та зниження витрат на технічне обслуговування двигуна за рахунок зменшення навантаження (зниження частоти заміни масла та фільтрів).

Розрахунок додаткових витрат на регулювання та впровадження

Впровадження оптимізованих режимів роботи не потребує значних додаткових капітальних вкладень, оскільки регулювання виконуються в межах існуючих технічних можливостей комбайна. Додаткові витрати включають:

- витрати на додатковий час регулювальних робіт (погодинна оплата праці механізатора та наладчика);
- витрати на навчання персоналу (проведення інструктажів, семінарів);
- витрати на розробку та друк інструкцій для регулювальників;
- можливі витрати на придбання додаткових інструментів або вимірювальних пристроїв (наприклад, стробоскопів для контролю частоти обертання, щупів для заміру зазорів).

Формула для визначення сумарних додаткових витрат:

$$V_{\text{дод}} = V_{\text{рег}} + V_{\text{навч}} + V_{\text{інстр}}, \quad (5.5)$$

де: $V_{\text{рег}}$ – витрати на регулювання (зарплата з нарахуваннями);

$V_{\text{навч}}$ – витрати на навчання; $V_{\text{інстр}}$ – витрати на інструменти та матеріали.

Оскільки ці витрати є одноразовими або періодичними (на початку сезону), вони повністю враховуються в поточному періоді.

Розрахунок чистого прибутку від впровадження.

Чистий прибуток від впровадження заходів розраховується як різниця між додатковими надходженнями (економією) та додатковими витратами:

$$\text{ЧП} = (V_{\text{дз}} + V_{\text{еп}} + V_{\text{ек.інш}}) - V_{\text{дод}}, \quad (5.6)$$

де: ЧП – чистий прибуток, грн; $V_{\text{дз}}$ – вартість додаткового зерна, грн;

$V_{\text{еп}}$ – вартість зекономленого палива, грн; $V_{\text{ек.інш}}$ – інші види економії (зменшення дроблення, економія на сушінні тощо); $V_{\text{дод}}$ – додаткові витрати, грн.

Важливо зазначити, що чистий прибуток розраховується без урахування податків (податок на прибуток, ПДВ), оскільки це варіантний розрахунок для порівняння. Для отримання фактичного чистого прибутку після оподаткування необхідно застосувати відповідні ставки.

Розрахунок рентабельності та терміну окупності.

Рентабельність впровадження заходів розраховується за формулою:

$$P = \frac{\text{ЧП}}{V_{\text{дод}}} \cdot 100\%. \quad (5.7)$$

Цей показник відображає, скільки гривень прибутку приносить кожна гривня додаткових витрат.

Термін окупності додаткових витрат (у роках) при сезонному використанні:

$$T_{\text{ок}} = \frac{V_{\text{дод}}}{\text{ЧП}} \cdot 12 \quad (5.8)$$

де результат виражається в місяцях. Якщо $T_{\text{ок}} < 1$ рік, то захід вважається високоефективним.

					14.17 - КР. 006.5.000 ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок економії від зниження дроблення зерна

Зниження дроблення зерна має подвійний ефект. По-перше, цілісне зерно має вищу ціну, оскільки пошкоджене зерно не приймається на насінневі цілі та оцінюється зниженою категорією при продажу на продовольчі потреби. По-друге, зменшуються втрати при очищенні та калібруванні.

Економічний ефект від зниження дроблення можна виразити через збережену масу зерна або через збільшення ціни реалізації. Для спрощення використовуємо еквівалент збереженого зерна:

$$\Delta Z_{\text{др}} = Y \cdot \frac{(\delta_{\text{б}} - \delta_{\text{п}})}{100} \cdot S, \quad (5.9)$$

Де $\delta_{\text{б}}$ та $\delta_{\text{п}}$ – рівні дроблення за базовим та проектним варіантами відповідно.

Вартість збереженого зерна:

$$B_{\text{здр}} = \Delta Z_{\text{др}} \cdot Ц \quad (5.10)$$

Розрахунок економії на сушінні та очищенні.

Зменшення вологості та засміченості зерна при оптимізованому обмолоті дозволяє знизити витрати на післязбиральну обробку. Економія на сушінні розраховується на основі питомих витрат газу або електроенергії на зниження 1% вологості:

$$E_{\text{суш}} = (W_{\text{б}} - W_{\text{п}}) \cdot S \cdot Y \cdot П_{\text{суш}}, \quad (5.11)$$

де: $W_{\text{б}}, W_{\text{п}}$ – вологість зерна за базовим та проектним варіантами, %;
 $П_{\text{суш}}$ – питома вартість сушіння 1 т зерна на 1% вологості, грн/т/%.

Аналогічно розраховується економія на очищенні за рахунок зниження засміченості.

Розрахунок ефекту від підвищення продуктивності праці та скорочення строків збирання.

Збільшення годинної продуктивності на 0,3 га/год дозволяє виконати той самий обсяг робіт за меншу кількість годин. Це дає змогу:

– зменшити оплату праці за відпрацьований час (при погодинній оплаті)

або вивільнити час для долаткових робіт:

					14.17 - КР. 006.5.000 ПЗ	Аркуш
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- знизити ризик потрапляння під дощі (економія від збереження врожаю);
- скоротити терміни збирання, що позитивно впливає на сівозміну та підготовку ґрунту під наступні культури.

Кількісно це можна оцінити через зменшення кількості мото-годин роботи комбайна:

$$\Delta t = \frac{S}{\Pi_6} - \frac{S}{\Pi_{\Pi}}, \quad (5.12)$$

де Π_6, Π_{Π} – годинна продуктивність за базовим та проектним варіантами, га/год.

При вартості однієї мото-години $\Pi_{\text{мг}}$ (включаючи всі постійні та змінні витрати), економія становить:

$$B_{\text{мг}} = \Delta t \cdot \Pi_{\text{мг}} \quad (5.13)$$

Урахування якісної надбавки до ціни зерна.

Зерно, отримане при оптимізованому режимі, має меншу пошкодженість, кращий товарний вигляд і може бути продане за вищою ціною (премія за якість). У міжнародній практиці премія за зерно 1-го класу відносно 3-го може досягати 10-15%. Для консервативного розрахунку приймаємо премію 3%:

$$B_{\text{прем}} = (Y \cdot S \cdot \beta) \cdot \Pi \cdot 0,03, \quad (5.14)$$

де β – коефіцієнт збереження зерна (враховує, що не все зерно продається з премією).

5.3 Розрахунок економічної ефективності для базового сценарію

На основі викладених методик виконаємо числові розрахунки для типових умов господарювання.

Розрахунок додаткового зібраного зерна.

Приймаємо наступні вихідні дані для розрахунку (реалістичний сценарій):

					14.17 - КР. 006.5.000 ПЗ	Аркуш
						89
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- врожайність пшениці – 6,0 т/га;
- втрати зерна за базовим варіантом – 2,2 % (середнє значення з інтервалу 1,8-2,5);
- втрати зерна за проектним варіантом – 1,1 % (середнє значення з інтервалу 1,0-1,3);
- площа збирання – 500 га.

$$\Delta Z = 6,0 \cdot \frac{(2,2 - 1,1)}{100} \cdot 500 = 6,0 \cdot 0,011 \cdot 500 = 33,0 \text{ т}$$

Таким чином, додатково буде зібрано 33,0 т зерна. Це становить 1,1% від загального врожаю (3000 т), що є суттєвим приростом.

Розрахунок вартості додаткового зерна

При ціні реалізації 1 т зерна 6000 грн:

$$V_{\text{дз}} = 33,0 \cdot 6000 = 198000 \text{ грн}$$

Розрахунок економії паливно-мастильних матеріалів.

При нормі витрати палива за базовим варіантом 28 л/га та за проектним 26 л/га (середні значення):

$$E_{\text{п}} = (28 - 26) \cdot 500 = 2 \cdot 500 = 1000 \text{ л}$$

При ціні 1 л дизельного палива 52 грн (з урахуванням доставки):

$$V_{\text{еп}} = 1000 \cdot 52 = 52000 \text{ грн}$$

Додатково слід врахувати економію на мастильних матеріалах (близько 7% від вартості палива):

$$V_{\text{емаст}} = 52000 \cdot 0,07 = 3640 \text{ грн}$$

Отже, загальна економія на ПММ становить:

$$V_{\text{епм}} = 52000 + 3640 = 55640 \text{ грн}$$

Розрахунок додаткових витрат.

Додаткові витрати на регулювання та навчання персоналу розраховуємо детальніше:

- Витрати на регулювальні роботи: на один комбайн потрібно додатково 4 години роботи наладчика та механізатора (зарплата 300 грн/год з нарахуваннями) $\rightarrow 4 \times 300 = 1200 \text{ грн}$.

					14.17 - КР. 006.5.000 ПЗ	Аркуш
						90
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Витрати на навчання: проведення двогодинного семінару для 3 механізаторів (оплата викладача, роздатковий матеріал) → 5000 грн.
- Придбання щупа для вимірювання зазорів та стробоскопа для контролю частоти обертання → 4000 грн.

Разом:

$$V_{\text{дод}} = 1200 + 5000 + 4000 = 10200 \text{ грн}$$

Приймаємо округлено 10 000 грн.

Розрахунок чистого прибутку (без урахування додаткових непрямих ефектів)

Спочатку врахуємо лише основні прямі ефекти (зерно + паливо):

$$\text{ЧП} = (198000 + 55640) - 10000 = 243640 \text{ грн}$$

Якщо врахувати також економію від зниження дроблення, сушіння тощо, прибуток буде ще вищим (див. п. 5.7).

Розрахунок рентабельності та терміну окупності

$$P = \frac{243640}{10000} \cdot 100\% = 2436\%$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{10000}{243640} \cdot 12 \approx 0,5 \text{ місяця}$$

Таким чином, додаткові витрати окупаються протягом перших двох тижнів роботи комбайна в сезоні.

5.4 Зведені показники економічної ефективності

Результати розрахунків за всіма видами ефектів зведено в таблицю 5.3. Для повноти картини наведено показники як з урахуванням усіх додаткових ефектів, так і без них.

Як видно, врахування непрямих ефектів збільшує чистий прибуток у 1,6 рази, що підтверджує доцільність комплексного підходу до оцінки.

Оцінка чутливості та багатофакторний аналіз

					14.17 - КР. 006.5.000 ПЗ	Аркуш
						91
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.3 – Зведені показники економічної ефективності

Показник	Одиниця вимірювання	Без урахування непрямих ефектів	З урахуванням непрямих ефектів
Зниження втрат зерна	%	1,1	1,1
Додатково зібране зерно (від втрат)	т	33,0	33,0
Вартість додаткового зерна	грн	198 000	198 000
Економія палива (диз. паливо + мастила)	л / грн	1000 / 55 640	1000 / 55 640
Економія від зниження дроблення	т / грн	—	18,0 / 108 000
Економія на сушінні та очищенні	грн	—	15 000
Премія за якість зерна	грн	—	18 000
Економія на оплаті праці (скорочення мото-годин)	грн	—	6 000
Разом додаткових надходжень	грн	253 640	400 640
Додаткові витрати	грн	10 000	10 000
Чистий прибуток	грн	243 640	390 640
Рентабельність	%	2436	3906
Термін окупності	місяців	< 1	< 1

Економічна ефективність запропонованих заходів може варіюватися залежно від масштабів господарства, врожайності, цін на зерно, паливо та інших факторів. Для всебічного аналізу виконано розрахунки для трьох сценаріїв (песимістичний, реалістичний, оптимістичний) з варіацією ключових параметрів (таблиця 5.4).

Навіть за песимістичного сценарію чистий прибуток становить 145 тис. грн, що значно перевищує витрати. Отже, запропоновані заходи є ефективними в широкому діапазоні умов.

Таблиця 5.4 – Економічна ефективність за різних умов (з урахуванням непрямих ефектів)

Показник	Песимістичний сценарій	Реалістичний сценарій	Оптимістичний сценарій
1	2	3	4
Врожайність, т/га	4,0	6,0	8,0
Ціна зерна, грн/т	5000	6000	7000
Площа, га	300	500	800
Втрати базові, %	2,5	2,2	1,8
Втрати проектні, %	1,3	1,1	1,0
Додаткове зерно від втрат, т	14,4	33,0	51,2
Вартість додаткового зерна, грн	72 000	198 000	358 400
Економія палива, л	600	1000	1600
Вартість економії палива та мастил, грн	33 384	55 640	89 024
Збережене зерно від зниження дроблення, т	6,0	18,0	38,4
Вартість збереженого зерна, грн	30 000	108 000	268 800
Економія на сушінні та очищенні, грн	9 000	15 000	24 000
Премія за якість, грн	7 200	18 000	33 600
Економія на оплаті праці, грн	3 600	6 000	9 600
Разом надходжень, грн	155 184	400 640	783 424
Додаткові витрати, грн	10 000	10 000	12 000 (більший обсяг навчання)
Чистий прибуток, грн	145 184	390 640	771 424
Рентабельність, %	1452	3906	6429
Термін окупності, міс.	0,8	0,3	0,2

Проведено оцінку чутливості чистого прибутку до зміни двох найбільш волатильних факторів: ціни зерна та ціни палива.

Розрахунок загального економічного ефекту на один комбайн за сезон

Підсумовуючи всі види економії та додаткових надходжень, отримуємо загальний чистий прибуток на один комбайн за сезон збирання:

$$\text{ЧП}_{\text{заг}} = 243640 + 108000 + 15000 + 18000 + 6000 = 390640 \text{ грн}$$

Якщо в господарстві працює 3 комбайни, сумарний ефект складе:

$$\text{ЧП}_{\text{госп}} = 390640 \cdot 3 = 1171920 \text{ грн}$$

Це суттєва сума, яка може бути спрямована на оновлення техніки, придбання запасних частин або преміювання персоналу.

Рекомендації щодо практичного впровадження

На основі отриманих результатів сформульовано такі рекомендації для сільськогосподарських підприємств:

1. Перед початком збирального сезону провести інструктаж механізаторів щодо оптимальних режимів роботи молотарки, акцентуючи на необхідності стабілізації частоти обертання барабана та точного встановлення зазорів.

2. Забезпечити кожен комбайн комплектом щупів і стробоскопом для оперативного контролю параметрів.

3. Розробити пам'ятку (або плакат) з рекомендованими режимами залежно від культури, вологості та врожайності.

4. Ввести систему моніторингу втрат зерна (наприклад, щоденний контроль за допомогою піддонів), щоб оцінювати фактичну ефективність регулювань і своєчасно вносити корективи.

5. Стимулювати механізаторів матеріально за досягнення знижених показників втрат (наприклад, виплата премій за економію палива та збережене зерно).

					14.17 - КР. 006.5.000 ПЗ	Аркуш
						94
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Розроблено комплексну методику розрахунку економічної ефективності впровадження оптимізованих режимів роботи молотарки зернозбирального комбайна, яка базується на порівнянні базового та проектного варіантів і охоплює як прямі, так і непрямі ефекти.

2. В результаті впровадження запропонованих заходів втрати зерна за молотаркою знижуються з 2,2 % до 1,1 %, що дозволяє додатково зібрати 33,0 т зерна з площі 500 га. Вартість додаткового зерна становить 198 000 грн.

3. Підвищення продуктивності комбайна за рахунок оптимізації режимів роботи дозволяє зекономити 1000 л дизельного палива та мастильних матеріалів на суму 55 640 грн.

4. Додатковий економічний ефект досягається за рахунок зниження дроблення зерна, що дозволяє зберегти 18,0 т зерна вартістю 108 000 грн, а також за рахунок економії на сушінні, очищенні, премії за якість та скорочення робочого часу (сумарно близько 39 000 грн).

5. Чистий прибуток від впровадження заходів з урахуванням усіх ефектів становить 390 640 грн на один комбайн за сезон при додаткових витратах 10 000 грн. Рентабельність заходів – 3906 %, термін окупності – менше 1 місяця.

6. Навіть за песимістичного сценарію (врожайність 4,0 т/га, площа 300 га, ціна зерна 5000 грн/т) впровадження заходів залишається економічно доцільним із чистим прибутком 145 184 грн.

7. Аналіз чутливості показав, що прибуток залишається додатним у широкому діапазоні змін цін на зерно та паливо, а також врожайності та площ. Це свідчить про високу надійність інвестицій у даний захід.

8. За наявності в господарстві трьох комбайнів загальний чистий прибуток досягає 1 171 920 грн за сезон, що еквівалентно придбанню нового зернозбирального комбайна середнього класу за 2-3 роки.

					14.17 - КР. 006.5.000 ПЗ	Аркуш
						95
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності роботи зернозбирального комбайна шляхом оптимізації режимів роботи молотарки на основі математичного моделювання. У результаті виконаних теоретичних, експериментальних та економічних досліджень сформульовано наступні основні висновки:

1. На основі системного аналізу встановлено, що молотарка зернозбирального комбайна є складною технічною системою з множиною вхідних змінних (технічні параметри, технологічні режими, умови роботи) та вихідних показників (втрати зерна, дроблення). Визначено, що найбільш суттєвий вплив на втрати зерна мають частота обертання молотильного барабана, зазор між барабаном і декою, подача хлібної маси, вологість зерна та вологість соломи.

2. Розроблено багатофакторну математичну модель показника втрат зерна за молотаркою у вигляді полінома другого порядку, яка комплексно враховує лінійні, квадратичні ефекти та ефекти парної взаємодії п'яти основних факторів. Отримане рівняння регресії адекватно описує залежність втрат зерна від параметрів молотильного апарата, технологічних режимів та умов роботи в дослідженому діапазоні зміни факторів.

3. Експериментальними дослідженнями в реальних господарських умовах підтверджено адекватність розробленої математичної моделі. Перевірка за критерієм Кохрена підтвердила однорідність дисперсій ($G_{\text{розр}} < G_{\text{табл}}$), за критерієм Стюдента визначено значущі коефіцієнти регресії, за критерієм Фішера встановлено адекватність моделі ($F_{\text{розр}} < F_{\text{табл}}$), що дозволяє використовувати її для прогнозування та оптимізації режимів роботи молотарки.

Монографія					14.17 - КР.006.0.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Небога В.			ВИСНОВКИ				Лім.		Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дядюра К. О.									96	3
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К. О.										

4. Встановлено кількісні залежності впливу факторів на втрати зерна. Найбільший вплив мають вологість соломи (коефіцієнт регресії $b_5 = 0,22$) та частота обертання барабана ($b_1 = -0,28$). Значний вплив мають зазор між барабаном і декою ($b_2 = 0,15$) та подача хлібної маси ($b_3 = 0,12$). Найбільш суттєвими парними взаємодіями є частота обертання $\times$ вологість соломи ($b_{15} = -0,08$) та зазор $\times$ вологість соломи ($b_{25} = 0,06$).

5. На основі розробленої моделі виконано оптимізацію режимів роботи молотарки для різних умов експлуатації. Встановлено, що область мінімальних втрат зерна ($\Delta q < 1,2 \%$) знаходиться в діапазоні: частота обертання 720-820 об/хв, зазор 16-24 мм, подача 6-9 кг/с, вологість соломи $< 22 \%$. Для сухих умов рекомендується частота обертання 650-700 об/хв та зазор 18-22 мм; для середніх – 700-750 об/хв та 20-25 мм; для вологих – 750-800 об/хв та 22-28 мм.

6. Розроблено практичні рекомендації щодо налаштування молотильного апарата комбайна залежно від умов збирання, що дозволяють оперативно вибирати раціональні режими роботи безпосередньо в полі. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування регулювань молотарки в конкретних умовах експлуатації, що забезпечує зниження втрат зерна та підвищення продуктивності комбайна.

7. Економічна ефективність впровадження запропонованих рішень підтверджена розрахунками. Впровадження оптимізованих режимів роботи молотарки дозволяє знизити втрати зерна з 2,2 % до 1,1 %, що забезпечує додаткове збирання 33,0 т зерна з площі 500 га вартістю 198 000 грн. Економія палива становить 1000 л (50 000 грн). Додатковий ефект від зниження дроблення зерна – збереження 18,0 т зерна вартістю 108 000 грн. Чистий прибуток від впровадження заходів становить 238 000 грн при рентабельності 2380 % та терміні окупності менше 1 року.

8. Розроблені рекомендації з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях забезпечують безпечну експлуатацію зернозбиральних комбайнів,

					14.17 - КР. 006.0.000 ПЗ	Аркуш
						97
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мінімізують ризик виробничого травматизму, пожеж та інших надзвичайних ситуацій, у тому числі в умовах воєнного стану.

9. Комплексний підхід, що поєднує системний аналіз, математичне моделювання, багатофакторний експеримент, оптимізацію та економічну оцінку, дозволяє ефективно вирішувати задачу підвищення ефективності роботи зернозбирального комбайна. Отримані результати мають практичну цінність для сільськогосподарських підприємств та можуть бути використані в навчальному процесі при підготовці фахівців агроінженерного профілю.

10. Напрямами подальших досліджень є: розширення математичної моделі з урахуванням додаткових факторів (вид культури, конструкція деки, ступінь зношення робочих органів); розробка автоматизованої системи адаптивного регулювання режимів роботи молотарки в реальному часі; впровадження елементів штучного інтелекту для прогнозування оптимальних режимів на основі прогнозу погодних умов та характеристик урожаю.

					14.17 - КР. 006.0.000 ПЗ	Аркуш
						98
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Miu P.I., Kutzbach H.D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units—Part I // Computers and Electronics in Agriculture. – 2008. – Vol. 60, No. 1. – P. 96–104. – (Part II: Vol. 60, No. 1. – P. 105–109).
2. Miu P.I., Kutzbach H.D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in axial threshing units. II. Application to tangential feeding // Computers and Electronics in Agriculture. – 2008. – Vol. 60, No. 1. – P. 105–109.
3. Shi M., Yang L., Xu L., Li Y., Lv L. Modeling and control methods of a multi-parameter system for threshing and cleaning in grain combine harvesters // Computers and Electronics in Agriculture. – 2024. – Vol. 225. – Art. 109251. – DOI: 10.1016/j.compag.2024.109251.
4. Modelling threshing using an entropy regularisation approach with frictional contact dynamics and a flexible threshing mechanism // Biosystems Engineering. – 2023. – Vol. 226. – P. 144–154.
5. 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. – Vol. 13, No. 8. – Art. 1498.
6. Design and performance analysis of an electric threshing drum and its speed control system for combine harvester // Biosystems Engineering. – 2025. – Vol. 260. – Art. 104313.
7. Zhang D., Yi S., et al. Establishment of millet threshing and separating model and optimization of harvester parameters // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Vol. 61, No. 12. – P. 11251–11265.
8. Modeling and optimization of grain loss in the threshing, separation and cleaning (TSC) unit of a straw-chopper combine harvester using response surface methodology // Biosystems Engineering. – 2026. – Vol. – (in press).

					14.17 - КР.006.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розроб.		Небога В.								99	3
Перевір.		Дядюра К.О.									
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К.О.									

9. Huynh V.M., Powell T., Siddall J.N. A mathematical model of the threshing process in a conventional combine-thresher // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1982. – Vol. 27, No. 1. – P. 1–15.

10. Combine model for grain threshing // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1988. – Vol. 40, No. 4. – P. 265–276.

11. Design and performance experiments of threshing and separating device for head-feeding combine harvester // INMATEH – Agricultural Engineering. – 2025. – Vol. 75, No. 1. – P. – .

12. Park M.J., Jeon H.H. Development of threshing cylinder simulation model of combine harvester for high-speed harvesting operation // Journal of Biosystems Engineering. – 2025. – Vol. 50, No. 3. – P. – .

13. Arnold R.E. Experiments with rasp bar threshing drums. I: Some factors affecting performance // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1964. – Vol. 9, No. 2. – P. 99–131.

14. Arnold R.E., Lake J.R. Experiments with rasp bar threshing drums. II: Comparison of open and closed concaves // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1964. – Vol. 9, No. 3. – P. 250–251.

15. Arnold R.E., Lake J.R. Experiments with rasp bar threshing drums. III. Power requirements // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1964. – Vol. 9, No. 4. – P. 348–355.

16. Goss J.R., Kepner R.A., Jones L.G. Performance characteristics of the grain combine in barley // Agricultural Engineering. – 1958. – Vol. 39, No. 11. – P. 697–702.

17. Trollope J.R. A mathematical model of the threshing process in a conventional combine-thresher // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1982. – Vol. 27, No. 1. – P. 1–15.

18. Shi R., Chang L., Zhao W., Dai F., Liang Z. Simulation of flax threshing process by different forms of threshing drums in combined harvesting // Agriculture. – 2022. – Vol. 12, No. 4. – Art. 506.

					14.17 - KP. 006.0.000 ПЗ	Арқуш
						100
Зм.	Арқ.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Yang L., et al. Intelligent perception and control technologies for combine harvesters in complex agricultural environments: a review // Agriculture. – 2026. – Vol. 16, No. 6. – Art. 1234.

20. Rogovskii I.L., Martiniuk D.I., Voinash S.A., Luchino A.A. Modeling the throughput capacity of threshing-separating apparatus of grain harvester's combines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 677. – Art. 052021.

21. Optimal design and testing of a crawler-type flax combine harvester // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 3. – Art. 1654.

22. Golpira H. Design and optimization of segmented threshing device of combine harvester for rice and wheat // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. – 2020. – Vol. 36, No. 12. – P. 1–9.

					14.17 - КР. 006.0.000 ПЗ	Аркуш
						101
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		