

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра технічного сервісу та інженерного менеджменту  
імені М.П.Момотенка

УДК 631.354.022

ПОГОДЖЕНО

Декан механіко-технологічного  
факультету

д.т.н., професор

Братішко В.В.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри технічного сервісу  
та інженерного менеджменту

імені М.П.Момотенка

Роговський І.Л.

“ ” 2023 р.

“ ” 2023 р.

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРЯМОГО  
КОМБАЙНУВАННЯ ЗЕРНОВИХ ПОДВІЙНИМ ЗРІЗОМ  
СТЕБЕЛЬ»

Спеціальність – 208 «Агроінженерія»

Освітня програма – «Агроінженерія»

Орієнтація освітньої програми – освітньо-професійна

Гарант освітньої програми:

Доктор технічних наук, проф.

«підпис»

Братішко В.В.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., доцент

«підпис»

Дев'ятко О.С.

Виконав

«підпис»

Ільченко А.О.

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра технічного сервісу та інженерного менеджменту  
імені М.П.Момотенка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри технічного сервісу та  
інженерного менеджменту  
імені М.П.Момотенка,

І.Л.Роговський

“ ” 2023 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Ільченку Андрію Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність – 208 «Агроінженерія»  
Освітня програма – «Агроінженерія»  
Орієнтація освітньої програми – освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Удосконалення технології прямого комбайнування зернових подвійним зрізом стебел».

затверджені наказом ректора НУБіП України від «30» грудня 2022 року №1943 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру: 10.11.2023 р.

Вихідні дані до роботи:

1. Особливості природно-кліматичних зон України, організації виконання виробничих процесів вирощування і збирання зернових
2. Існуючі технологічні процеси та технічні засоби для виконання виробничих процесів вирощування і збирання озимої пшениці

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Стан питання і завдання дослідження підвищення виробництва зерна пшениці і інших злакових культур
2. Теоретичні передумови процесу прямого комбайнування зернових культур з подвійним зрізом стебел
3. Методика і програма експериментальних досліджень закономірностей зміни експлуатаційно-технологічних показників елементів процесу прямого комбайнування зернових культур з високим зрізом стебел
4. Результати експериментальних досліджень експлуатаційно-технологічних показників в роботі зернозбиральних комбайнів під час збирання зернових культур прямим комбайнуванням з високим зрізом стебел
5. Оцінка ефективності результатів досліджень застосування комбайнової жниварки з подвійним зрізом стебел

Дата видачі завдання 18.09.2022 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(підпис)

О.С. Дев'ятко  
(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

І.А. Ільченко  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота містить розрахунково-пояснювальну записку на 102 стор. машиннописного тексту.

Ключові слова: закономірності, залежності, параметри процесу, пряме комбайнування, зернові культури, подвійний зріз, стебло, системний, математичний аналіз, досліди, прибуток.

Досліджено процес збирання зернових культур жнивваркою при прямому комбайнуванні та технічні засіб для його реалізації.

У ході теоретичних досліджень були використані методи системного та математичного аналізу, теоретичної механіки, опору матеріалів та комп'ютерного моделювання.

Отримано аналітичні залежності, що обґрунтовують доцільність здійснення технологічного прийому збирання зернових прямим комбайнуванням з подвійним зрізом стебел. Розроблено математичну модель процесу подвійного зрізу стебел зернових культур. Обґрунтовано конструктивно-режимні параметри ріжучого апарату з приводом, що нескінченно несе..

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	8
1.1 Резерви підвищення виробництва зерна пшениці і інших злакових культур.....	8
1.2 Технічна оснащеність зернозбиральною технікою.....	9
1.3. Шляхи підвищення продуктивності зернозбиральних комбайнів.....	13
1.4. Технологічні і фізико-механічні властивості зернових культур.....	18
1.5. Огляд і аналіз техніко-технологічних розробок.....	23
2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОЦЕСУ ПРЯМОГО КОМБАЙНУВАННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР З ПОДВІЙНИМ ЗРІЗОМ СТЕБЕЛ.....	34
2.1. Методичні підходи до формування математичної моделі та обґрунтування критерію ефективності технологічного процесу прямого комбайнування з подвійним зрізом стебел.....	34
2.2. Обґрунтування інформаційної моделі технологічного процесу зернозбирального комбайна як перетворюючої технічної системи з подвійним зрізом стебел.....	37
2.3. Математична модель процесу прямого комбайнування зернових культур з подвійним зрізом стебел.....	43
2.4. Математична модель процесу подвійного зрізу стебел.....	50
3. МЕТОДИКА І ПРОГРАМА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	60
3.1. Встановлення закономірностей зміни експлуатаційно-технологічних показників елементів процесу прямого комбайнування зернових культур з високим зрізом стебел.....	61
3.1.1. Планування експерименту при визначенні експлуатаційно-технологічних показників зернозбиральних комбайнів.....	61
3.1.2. Встановлення агробіологічної характеристики зернових культур перед прямим комбайнуванням.....	62
3.1.3. Визначення експлуатаційно-технологічних показників роботи зернозбиральних комбайнів.....	63
3.2. Встановлення закономірностей зміни параметрів технічного устрою подвійного зрізу стебел зернових культур.....	66

3.2.1. Планування активного експерименту при визначення параметрів технічного пристрою подвійного зрізу стебел.....	66
3.2.2. Опис експериментальної установки подвійного зрізу стебел зернових культур .....	67
3.3.3. Методика дослідження параметрів процесу подвійного зрізу стебел на лабораторній установці.....	69
3.4. Методика обробки експериментальних даних і оцінки похибки вимірюваних величин .....	70
4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	71
4.1. Визначення експлуатаційно-технологічних показників роботи зернозбиральних комбайнів під час збирання зернових культур прямим комбайнуванням з високим зрізом стебел.....	71
4.2. Якісні показники бункерного зерна пшениці прямим комбайнуванням з високим зрізом стебел.....	75
4.2.1. Оцінка подрібнення соломи пшениці при прямому комбайнуванні з високим зрізом стебел.....	77
4.3. Лабораторні дослідження процесу подвійного зрізу стебел зернових культур.....	79
4.3.1. Визначення мінімальної критичної швидкості різання стебел зернових культур при подвійному зрізі.....	79
4.4. Польові експерименти по дослідженню досвідченого зразка ріжучого апарату подвійного зрізу стебел.....	83
4.5. Оцінка достовірності теоретичної гіпотези роботи.....	86
4.5.1. Адекватність теоретичних і експериментальних даних.....	86
5. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	89
5.1. Економічна ефективність застосування комбайнової жнивarki з подвійним зрізом стебел.....	89
5.2. Розрахунок річного економічного ефекту.....	92
5.3. Визначення ефективності капіталовкладень.....	93
ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	98

## ВСТУП

Питання збирання зернових культур в Україні стоїть на першому місці, оскільки сільгоспвиробники щорічно недоотримують зернового матеріалу більше 5 млн. т у зв'язку з погодними умовами, відсутністю необхідної збиральної техніки, порушенням технологічних та логістичних процесів під час збирання, а також неповною реалізацією технічних можливостей сучасних зернозбиральних комбайнів.

Високопродуктивні комбайни вимагають свого технологічного завантаження в умовах роботи сільгосптоваровиробників Хмельницької області, яка, як показує наука та практика, здійснюється за рахунок застосування широкозахватних жниварок та підвищення робочої швидкості комбайна. В результаті аналізу науково-технічної літератури встановлено, що найбільш перспективним напрямом завантаження машин є підвищення робочої швидкості комбайнів за рахунок удосконалення процесу зрізу стебел та конструкції робочих органів різальних апаратів комбайнової жниварки.

Питаннями підвищення ефективності використання комбайнів під час збирання зернових культур займалися С.А. Алфьоров, Е.В. Жалнін, Е.І. Липкович, Н.І. Кленін, М.А. Пустигін, В.Д. Саклаков, Н.І. Косилов, М.М. Костянтинів та інші. Розробкам різальних апаратів для жниварок, де основним завданням було зниження соломистості хлібної маси перед обмолотом, присвячені роботи В.П. Горячкіна, А.Ш. Джембуршин, Б.И. Кутепова та інших вчених.

Однак запропоновані технологічні прийоми та конструкції різальних апаратів не забезпечують необхідні умови для зниження соломистості хлібної маси та втраг зерна. Дані рішення не дозволяють повною мірою здійснитися на практиці через складність конструкцій.

**Об'єкт досліджень.** Процес збирання зернових культур жниваркою при прямому комбайнуванні та технічний засіб для його реалізації.

**Предмет досліджень.** Закономірності, залежності, параметри процесів прямого комбайнування зернових культур та зрізу стебел.

**Метою** магістерської роботи є дослідження підвищення ефективності прямого комбайнування зернових культур з допомогою вдосконалення процесу зрізу стебел.

Для рішення поставленою цілі потрібно вирішити наступні **завдання**:

1. Провести огляд теоретичних досліджень та обґрунтувати процес та інформаційну модель прямого комбайнування зернових культур із подвійним зрізом стебел.

2. Встановити закономірності і залежності, характеризуючі підвищення ефективності використання комбайнів під час прямого комбайнування зернових культур із подвійним зрізом стебел.

3. Розробити математичну модель процесу подвійного зрізу стебел зернових культур, виявити закономірності та залежності, що характеризують зміну конструктивно-режимних параметрів роботи ріжучого апарату подвійного зрізу стебел.

4. Визначити техніко-експлуатаційні показники використання комбайнів при прямому комбайнуванні зернових культур з високим зрізом стебел та конструктивно-режимні параметри різального апарату з подвійним зрізом стебел, а також дати економічну оцінку.

## 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1. Резерви підвищення виробництва зерна пшениці і інших злакових культур

Для України проблема підвищення ефективності зернового виробництва є першорядним завданням, оскільки ця найважливіша галузь агропромислового комплексу (АПК) не лише забезпечує населення країни найважливішими видами продовольства – хлібопродукти становлять у раціоні споживача до 40% калорійності в добовому раціоні - але і має велику експортну силу (за експорту зерна Україна вийшла на третє місце в світі).

Обсяг виробництва зерна в Україні у 2022 році становив більше 86,01 млн. тонн, що на 15,6% більше, ніж у 2021 році. Сільськогосподарськими виробниками країни у 2022 році було реалізовано 65,8% валового збору зерна, а 20,9% залишилося для внутрішнього споживання, з якого 10,3% – зерно насінневого призначення. Тому отримання високих та стабільних урожаїв пшениці та інших культур було і залишається основною метою сільськогосподарства.

Культура землеробства, як правило, залежить від комплексу факторів: способів обробки ґрунту, збирання врожаю та інших. Ступінь впливу агроприйомів формування врожаю показано у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Частка агротехнічних прийомів у формуванні врожайності ярої пшениці по

Хмельницькій області, %

Пар з внесенням мінеральних добрив	Сніго-загримання	Збирання * із запізненням на 14 днів	Зяблева обробка	Посів* із запізненням на 7 днів
18	10	- 10	8	- 4

\*-зниження врожайності

З таблиці 1.1 видно, що найбільш негативно впливає на врожайність такий



агротехнічний прийом, як збирання врожаю зернових культур. Тривалість збирання врожаю по регіонах України (з урахуванням збирання різних за строками дозрівання сільськогосподарських культур) перевищує нормативні у 3–9 разів. В агротехнічний термін забирається лише близько 30% полів. Звідси втрати зерна, що перевищують 9 млн. т.

В даний час збирання зернових культур в Україні здійснюється комбайновим способом, яким збирається близько 99% зернових культур. Основу комбайнового способу збирання врожаю складають зернозбиральні комбайни, парк яких з 1990 р. і річний випуск суттєво зменшилися відповідно у 2,5 рази і в 10 раз, а навантаження на одну машину зросла в 1,9 раза (з 155 до 297 га). При загальному навантаженні на комбайн в межах 140–1010 га.

Таким чином, подальше підвищення ефективності збирання зернових культур потребує пошуку сучасних технологічних та технічних рішень.

## 1.2. Технічна оснащеність зернозбиральною технікою

В Україні посіви зернових культур займають до 16,0 млн. га, причому на Хмельницьку область припадає близько 1,2 млн. га. Статистичні дані свідчать про те, що у Хмельницькій області за період з 2018 р. по 2022 рр. площа посіву зернових культур збільшилась на 17%. У структурі посівних площ Хмельницької області на зернові припадає понад 69%. Валовий збір зерна у Хмельницькій області забезпечує на 60,0–80,0% власне виробництво. При цьому понад 60,0% зерна переробляються на харчові та кормові цілі.

Тривалість збирання зернових культур у господарствах Хмельницької області у більшості випадків перевищує допустимі агротехнічні терміни. Середній добовий темп збирання зернових не перевищує 3,0% від спільного обсягу, у зв'язку з чим збирання врожаю триває 30–40 днів замість 15–20 днів.

Внаслідок низьких темпів не дотримуються агротехнічних термінів збирання, внаслідок чого прямі втрати біологічного врожаю досягають 20,0–30,0%.

Однією з головних проблем, що перешкоджають розвитку сільського

господарства, є недостатнє забезпечення сільгосптоваровиробників технікою.

Так, аналіз чисельності зернозбиральних комбайнів у Хмельницькій області, свідчить про суттєве скорочення комбайнового парку.

Аналіз цієї залежності показує, що на початку 90-х років кількість зернозбиральних комбайнів у Хмельницькій області становила фактично 10 тис.

шт. До 2022 року їхня кількість знизилася в 6 разів. Причиною цього скорочення є те, що сільгосптоваровиробники через низьку ефективність виробничих умов не мають можливості постійно оновлювати парк зернозбиральних комбайнів, що веде до інтенсивного зношування техніки, що перебуває на балансі організації.

Так, за даними аналізу у Хмельницькій області цей показник у 2020 році становив 2 шт., 2021 року – 1,1 шт., 2022 року – 1,1 шт., що нижче, ніж у середньому по Україні (3,0 шт.), за нормативом має бути 7,8 прим. на 1000 га).

Таблиця 1.2

Кількість зернозбиральних жниварок по Хмельницькій області

Показник	Роки					2022 в % до 2018
	2018	2019	2020	2021	2022	
Комбайни зернозбиральні	2054	2000	1763	1682	1668	81,2
Доводиться комбайнів на 1000 га посівних площ зернових	3	3	2	2	2	66,7

В даний час співвідношення прямого комбайнування та роздільного способу збирання врожаю становить у господарствах у середньому 50:50 та 60:40, а в окремих домінує пряме комбайнування зернових культур.

Проведений аналіз марочного складу комбайнового парку в Хмельницькій області показав, що склад парку зернозбиральних машин сформовано комбайнами вітчизняного виробництва та країн дальнього та ближнього зарубіжжя.

Таблиця 1.3

Кількість та марочний склад зернозбиральних комбайнів по області

Марки комбайнів	Роки							2022 в % до 2016р.
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Єнісей -1200	391	345	310	264	241	237	229	58,6
СК-5 «Нива» і інші з $q < 6$ кг/с	1341	1245	980	851	767	633	540	40,3
Дон-1500 і «Акрос»	185	206	211	249	288	299	305	1,65 рази
Вектор 410/420	46	81	102	134	171	183	203	4,41 рази
Комбайни сімейства «Єнісей -950»	29	44	51	56	59	61	68	2,34 рази
Комбайни сімейства КЗС	10	17	21	32	38	94	183	13,4 рази
Комбайни іноземних марок	52	62	88	96	101	154	183	3,5 рази
Всього.	2054	2000	1763	1682	1668	1664	1669	81,2

З таблиці 1.3 видно, що загальна кількість комбайнів з року в рік скорочується. Скорочення відбувається за рахунок марок комбайнів з малої пропускною здатністю молотарки, таких, як: СК-5М «Нива» та «Єнісей-1200». Комбайновий парк оновлюється за рахунок сучасних високопродуктивних машин наступних марок: «АКРОС-530» і його модифікації, «ВЕКТОР-410/420», а також комбайнів марок "Єнісей-4000(5000)", "КЗС" і деяких зарубіжних фірм («КЛААС, Джон-Дір і інших).

З даних таблиці 1.3 випливає, що за останні п'ять років кількість комбайнів з пропускною здатністю молотарки до 6,0 кг/с знижується і зростає частка комбайнів з пропускною здатністю згори 6,0-8,0 кг/с.

Незважаючи на це, основу парку зернозбиральних комбайнів складають комбайни «Єнісей-1200» і СК-5М «Нива» (з пропускною здатністю менше 6 кг/с) - 60,4%, які виконують близько 50% від всього обсягу збиральних робіт. Об'єм (50-60%), що залишився, робіт виконується високопродуктивними комбайнами

(пропускною здатністю понад 7 кг/с) складовими 17,2% від загальної кількості парку. При цьому навантаження на один комбайн складає 473 га.

Аналіз вікового складу зернозбиральних комбайнів показує, що 70-75% машин перебувають за нормативним терміном експлуатації. За середнього віку парку зернозбиральних комбайнів 13,5 років термін служби до 8 років мають 8,3%; від 8 до 10 років – 18,3% та понад 10 років – 73,4%. Зношеність машин становить 80%. Технічна готовність машин у період збирання врожаю знаходиться в межах 50,0–70,0% за нормативу 85,0–92,0%. Середній простий через відмову становить 4–6 годин. При цьому одночасно з фізичним старінням

відбувається і моральне зношування. У зв'язку з цим сільгосптоваровиробники купують зернозбиральні комбайни закордонного виробництва.

Експлуатація таких комбайнів показує, що вітчизняні зернозбиральні комбайни поступаються закордонним аналогам по продуктивності, металоємності, надійності, яка вища у кілька разів. Однак при цьому вартість їх також вище, чим вітчизняних машин. Незважаючи на це, спостерігається тенденція зростання їх числа в комбайновому парку.

Однак проблема скорочення термінів збирання врожаю, а отже, і втрат зерна при використанні імпортованих зернозбиральних комбайнів не вирішується.

Негативний вплив на тривалість термінів проведення польових робіт має такий фактор, як низька кваліфікація механізаторів. Тенденцію до зростання частки механізаторів, які мають низьку кваліфікацію, можна пояснити старінням та впливом трудових ресурсів із сільськогосподарських підприємств області.

Збільшення термінів збирання зернових культур з різних причин призводить до недобору врожаю у вигляді прямих втрат, а й непрямих, що характеризують зниження якісних показників зерна пшениці та інших культур, зокрема посівних властивостей зерна.

В даний час в деяких господарствах Хмельницької області використовується при сівбі до 50% некондиційного насіння, що тягне за собою зниження врожайності. Так, за останні п'ять років (2018–2022 рр.) у Хмельницькій області врожайність зернових культур не перевищувала 1,4–1,5

т/га, а в окремих районах області та 1,1 т/га. Більша частка (40,0–50,0%) маловрожайних полів в загальній площі посіву зернових культур означає низьку ефективність виробництва зерна, а також використання дорогих високотехнологічних зернозбиральних комбайнів з великою пропускнуою здатністю молотарки.

Таким чином, незважаючи на дії низки негативних факторів на виробництві, технічне переозброєння парку зернозбиральних комбайнів сільгосптоваровиробників Хмельницької області здійснюється за допомогою машин, що мають велику пропускну здатність молотарки. Використання даної групи зернозбиральних комбайнів Хмельницькій області во час збирання врожаю зернових культур прямим комбайнуванням на полях з малою врожайністю потребує дослідження технологічних (технічних) шляхів підвищення їх годинної продуктивності.

### 1.3. Шляхи підвищення продуктивності зернозбиральних комбайнів

Загальновідомо, що годинна продуктивність зернозбирального комбайна характеризується функцією [6, 58, 57]:

$$W_{год} = 0,1 B_{жс} V_p \tau_{см}^2 \quad (1.1)$$

де  $B_{жс}$  та  $V_p$  – відповідно ширина захвату жниварки (м) та робоча швидкість руху комбайна (км/год),

$\tau_{см}$  - коефіцієнт використання часу зміни.

З виразу (1.1) видно, що годинна продуктивність комбайна визначається насамперед шириною захвату жниварки ( $B_{жс}$ ) і робочою швидкістю руху машини.

Практика і наука свідчать, що максимальна ширина захвату жниварки обмежується можливостями оператора (комбайнера) машини. Спеціальні дослідження і практичний досвід вказують, що на прямому комбайнуванні при ширині захвату більше 7,0 метрів значно ускладнюється управління комбайном: оператор не встигає керувати ріжучим апаратом і стежити за технологічним

процесом молотарки. Встановлено, що при скошування зернових культур, коли увага оператора не відволікається для спостереження за технологічним процесом роботи молотарки, ширина захвату жнивarki можлива до 10 метрів [1, 6].

Однак у ряді робіт [6, 34,67] зазначається, що широкозахватну жниварку комбайнів для прямого комбайнування, технічно надійну, дуже важко створити, що практично підтверджує спосіб збирання зернових, запропонований В.В. Блідих, Н.І. Косиловим та іншими, та практикою в 1970-80 гг. Цей спосіб називається *безперервною технологією*, коли передбачається скошування та укладання рослинної маси в валки в фазі повної стиглості зерна жнивarkoю типу ЖВП- 9 або

аналогічним з підбором без розриву во часу високопродуктивними або високотехнологічними комбайнами сімейства «АКРОС», «ВЕКТОР», "Джон-Дір" (США), "КЛААС" (Німеччина) та іншими. Тим самим забезпечується їх технологічне завантаження за пропускну спроможністю молотарки та зростання годинної продуктивності машин, оскільки за даними робіт дослідників в умовах України при прямому комбайнуванні пропусна здатність молотарки використовується на 50,0–60,0%, а на маловрожайних та малееоломистих зернових культурах - на 30,0-40,0%.

Вищевикладене і дані робіт Блідих В.В., Косилова Н.І., Мечкала Л.Ф., Пяти М.В. свідчать про те, що годинну продуктивність високопродуктивних зернозбиральних комбайнів доцільно підвищити з допомогою збільшення робочої швидкості руху машини під час збирання зернових прямим комбайнуванням. Оскільки ступінь впливу фактора - робочої швидкості руху машини (2) на годинну продуктивність більш істотна, ніж збільшення ширини захвату (1) комбайнової жнивarki (рис. 1.Г), що практично підтверджують сучасні конструкції комбайнів. Так, комбайни фірми «Дойтц Фтор», «КЛААС» (Німеччина), «ВЕСТЕРН» (Канада), «Джон-Дір» (США), «ДОН», «ВЕКТОР» і «АКРОС» та інші мають робочу швидкість до 9,0-12,0 км/год.

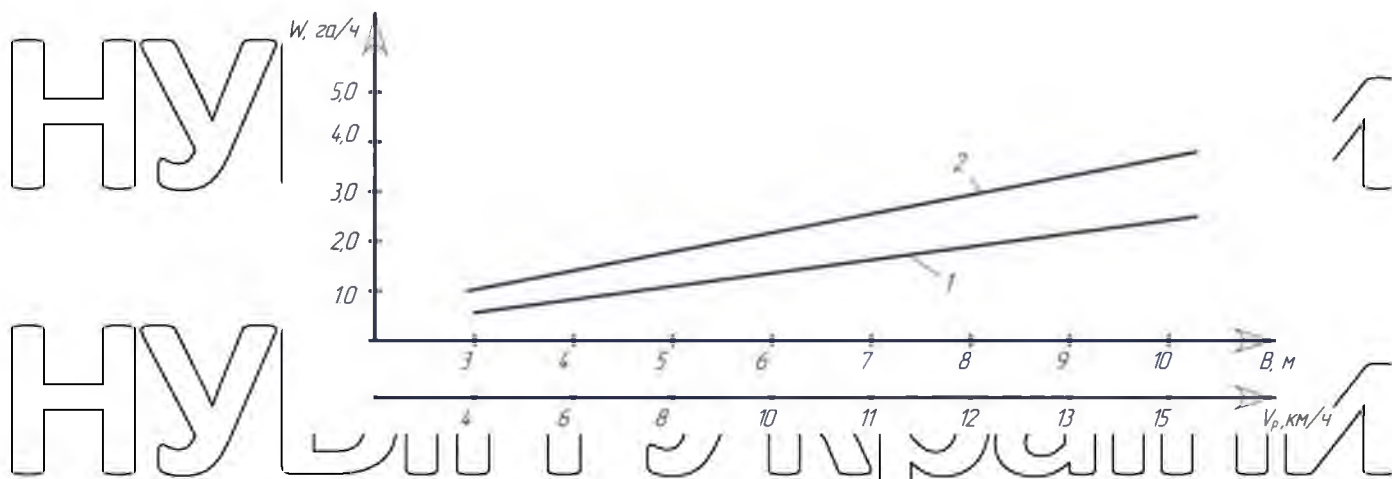


Рис. 1.1. Зміна продуктивності машини від ширини захвату жнивarki (1) і робочої швидкості машини (2)

У реальних умовах зернозбиральні комбайни працюють на швидкостях нижчих, чим максимально допустимі. В залежності від макро- і мікрорельєфу поля, стани стеблостою культури, професійних і суб'єктивних властивостей оператора та інших факторів реальні швидкості не перевищують 80-85% максимально допустимої. Отже, і найбільші реальні подачі хлібної маси, що обробляється в комбайн, і найбільші значення продуктивності комбайна за 1 година змінного часу будуть нижче на 15-20%.

Такий швидкісний режим при обмолоті хлібної маси свідчить про доцільність оснащувати конструкцію комбайна вузькозахватною жнивarkою шириною від 5 до 7 м, оскільки тільки в цьому випадку можливо забезпечити суттєве збільшення робочої швидкості руху машин.

З іншого боку, на думку зарубіжних учених, зменшення ширини захвату комбайна майже впливає продуктивність, оскільки молотильний апарат зберігає свої розміри. Вузькозахватні комбайни працюють зі швидкістю в 1,5-2,0 рази більшою, ніж комбайни з жнивarkою шириною захвату 5 метрів і більше. При збиранні пшениці вузькозахватними комбайнами на швидкості до 8,0 км/год втрати зерна становлять 1,7%, у широкозахватних у тих самих умовах, але на швидкості 4,0 км/год досягають 3,0%.

Цю закономірність підтверджує і практика використання у виробничих

умовах комбайнів «Джон-Дір» серії 9500 та інших марок на прямому комбайнуванні зернових культур, коли оператори (комбайнери) прагнуть оснащувати комбайни жниварками шириною захвату до 6-7 метрів, оскільки в цьому випадку забезпечується збільшення робочих швидкостей руху машини, а звідси і зростання годинної продуктивності комбайна.

Тим часом практикою та наукою встановлено, що максимальною швидкістю комбайна слід вважати  $V_{max} = 8,0$  км/год, тому що після цієї швидкості різко зростають втрати зерна, що пов'язано з ефективністю роботи очищення.

Крім цього, така швидкість (8,0 км/год.) не є робочою і рекомендується працювати на швидкостях 5-6 км/год. машини, що перевищують межі, допустимі медико-санітарними нормами (прискорення  $0,1$  м/с<sup>2</sup> при частоті 1,5 Гц). У разі оператор швидко втомлюється, якість роботи помітно погіршується, і це змушує оператора знижувати швидкість. З цим негативним явищем можна погодитись, коли маса зернозбирального комбайна становить 5000-7500 кг.

Практика використання високопродуктивних комбайнів типу «Дон-1500Б» (маса понад 10000 кг) свідчить, що за рахунок більшої маси і кращої ходової частини динаміка процесу руху комбайна по полю видозмінюється, і те, що було характерно для комбайнів масою 5000-7500 кг при швидкості згори 5-6 км/год, для комбайнів масою згори 10000 кг спостерігається на більш високих швидкостях до 9-10 км/год і вище залежності від агрофону поля.

У зв'язку з цим на сучасних високопродуктивних комбайнах "КААС" (Німеччина), "Джон-Дір" (США), "АКРОС" (РФ) та інших використовуються більш ефективні системи очищення, а на жниварках (хедерах) - ріжучі апарати типу "Шумахер".

Загальновідомо, що робоча швидкість комбайна ( $V_r$ ) залежить від ширини захвату жниварки ( $B_{ж}$ ), пропускної спроможності молотарки ( $q$ ), врожайності зерна ( $Y_з$ ) і солемистості ( $\delta_c$ ) культури ( $\delta_c$  - відношення маси зерна до маси соломи в культурі, що забирається). У загальному вигляді швидкість дорівнює:



$$V_p = k \cdot B_{ж} \cdot Y_3 \cdot \left( \frac{\delta_c - 1}{\delta_c} \right)^2 \quad (1.2)$$

де  $k$  - коефіцієнт пропорційності,  $k = 0,6$ .

З вирази (1.2) слід, що на поступальну швидкість зернозбирального комбайна при обмолоті хлібної маси, крім конструктивних параметрів, впливають фізико-механічні властивості і технологічні параметри прибираються культур, зокрема  $\delta_c$  - солонистість або співвідношення зерна і соломи по масі. Збільшення частки соломи ( $\delta_c$ ) призводить до зниження поступальної швидкості машини і, отже, годинної продуктивності, а також збільшення енергоємності процесу збирання хлібної маси як на стадії обмолоту колосової частини в приєднаннях, що молотильно-сепарують, так і на стадії подрібнення соломи в подрібнювально-розкидаючій системі комбайнів.

Практично усі сучасні зернозбиральні комбайни призначені для виконання технологічного процесу обробки всією скешеною хлібної маси, оскільки вони, згідно з міжнародним стандартом ISO 6689-81, оснащуються жнивальною (хедером). У міжнародному стандарті зазначається, що «... жнивальний агрегат комбайна, що включає в себе механізм для скошування, збору, скидання чи добору сільськогосподарських культур...». З визначення видно, що традиційна жнивальна (хедер) зернозбирального комбайна практично не видозмінює технологічні параметри сільськогосподарських культур, що прибираються.

Вищевикладене свідчить, що годинну продуктивність комбайнів в період збирання врожаю зернових культур прямим комбайнуванням можна підвищити за рахунок збільшення робочої швидкості руху машин. Однак у цьому випадку, як показує практика, доцільно використовувати жнивальні ширини захвату до 6-7 метрів, що не зовсім ефективно в умовах Південного Уралу через малу врожайність зернових культур. Застосування традиційної широкозахватної жниварки до 9,0 метрів - це зниження робочої швидкості руху машин та збільшення втрат зерна за жнивальною. Крім того, вся хлібна маса надходить у молотильний апарат комбайна без зміни співвідношення зерна та соломи по масі,

що позначиться на його пропускній спроможності, а отже, і на годинній продуктивності.

Таким чином, для підвищення ефективності використання високотехнологічних зернозбиральних комбайнів в умовах регіону Південного

Уралу необхідно розробити такий процес прямого комбайнування зернових

культур, у якому здійснюватиметься зміна окремих технологічних параметрів зернових культур перед їх обмолотом у молотильному апараті комбайна.

Широкозахватні жнивarki комбайнів, що застосовуються, повинні бути оснащені різальним апаратом, який забезпечуватиме роботу зернозбиральних

комбайнів на підвищених робочих швидкостях (до 2,5–2,8 м/с), що можливо

здійснити за рахунок вдосконалення конструктивно-режимних параметрів ріжучого апарату комбайнової жнивarki. Однак для вирішення даних питань у

роботі необхідно розглянути особливості технологічних та фізико-механічних властивостей зернових культур.

#### 1.4. Технологічні і фізико-механічні властивості зернових культур

Технологічні властивості зернових культур, мають значення при

обмолоті. На формування основних технологічних та фізико-механічних властивостей зернових культур впливають не тільки агрономічні, а й біологічні фактори, зумовлені культурою та сортом.

Технологічні властивості стеблостої наведено в таблиці 1.4.

Головна технологічна властивість хлібної маси – це врожай зерна, а основними є співвідношення зерна та соломи за масою, густина стеблостої, довжина рослин, засміченість, вологість зерна та соломи, вологість бур'янів, стиглість зерна. При цьому особливо несприятливий вплив на ефективність використання та якість роботи зернозбиральних машин чинить коливання цих показників не тільки на різних полях, а й у межах одного поля.

Таблиця 1.4

Показники технологічних властивостей стеблостої зернових культур

Показник	Чисельне значення	Характеристика стану стеблостою
Врожай зерна, т/га	Більше 4,0	Високоурожайний
	2,0-4,0	Середньоврожайний
	1,0-2,0	Малоурожайний
	Менш 1,0	Низьковрожайний
Довжина рослин, м	Понад 1,2	Довгорослий
	0,9-1,2	Високорослий
	0,6-0,9	Середньорослий
	Менш 0,6	Низькорослий
	Більше 500	Дуже густий
	400-500	Густий
Густота стеблостої, шт/м <sup>2</sup>	30-400	Нормальною густоти
	200-300	Середньогустий
	Менш 200	зріджений
Співвідношення зерна і соломи по масі	1:2-1:3,5	Високосоломистий
	1:1-1:2	Середньосоломистий
	1:0,3-1:1	Малосоломистий
Забураженість по масі, %	Понад 20	Сильна
	10-20	Середня
	До 10	Слабка
Вологість зерна і соломи, %	Понад 25 та 35	Сирий
	20-25 і 20-35	Дуже вологий
	15-20 і 10-20	Вологий
	7-15 і 5-10	Сухий
	Нижче 7 та 5	Пересохлий

Наука та практика показують, що найбільший ступінь варіації мають урожай соломи пшениці (коефіцієнт варіації – 30,0%), потім урожай зерна (28,1%) та густота стеблостої (19,2%). Найменший ступінь варіації – довжина рослин (8,3%) і маса 1000 зерен (5,2%). Дані значення свідчать, що покращення агротехніки вирощування дозволяє отримувати більше рівномірну густоту стояння стеблостої, а отже, і зменшити нерівномірність врожаю зерна та соломи в межах поля. Крім того, встановлено, що зі зростанням урожайності зернових культур (з 1,2 до 2,0 т/га) і густоти стеблостої (з 350 до 450 шт./м<sup>2</sup>) спостерігається

зменшення коефіцієнта варіації густоти хлібостою ярої пшениці (з 21,2% до 17,7%). Нерівномірність стеблостою викликає нерівномірну подачу хлібної маси в мелотильно-сепаруючий пристрій зернозбиральних комбайнів

Серед безлічі біометричних показників, що характеризують стан стеблостою, на якість роботи та продуктивність зернозбиральних комбайнів великий вплив надає вологість зерна та соломистості (рис. 1.2)

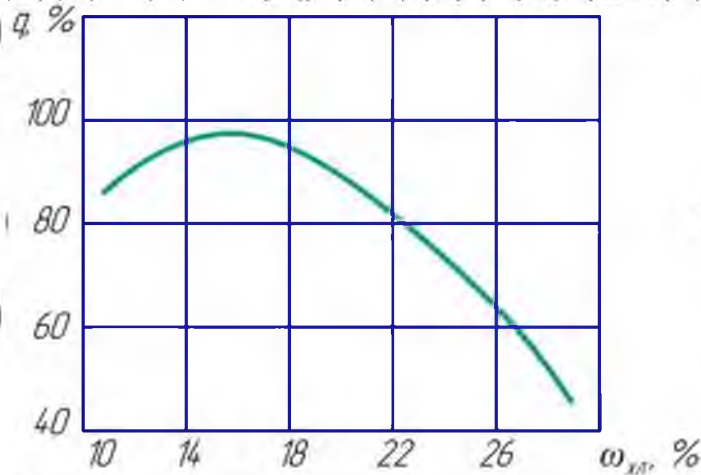


Рис. 1.2. Зміна пропускної здатності ( $q$ ) в залежності від вологості хлібної маси ( $\omega_{хл}$ ).

Ці показники (вологість зерна та соломистість) найбільш мінливі навіть у межах одного дня. Встановлено, що вологість зерна на корені протягом днів підпорядкована певній закономірності: вранці та ввечері вона вища, ніж удень, оскільки коливання вологості зерна пов'язане зі зміною відносної вологості повітря.

У ході досліджень було встановлено, що вплив вологості зерна на пропускну здатність комбайна як самостійного фактору несуттєво порівняно з соломистою масою, у зв'язку з чим у теоретичних та практичних розрахунках продуктивності комбайна даною вологістю нехтують. Однак вона суттєво впливає на механічні ушкодження зерна у процесі обмолоту хлібної маси, тобто впливає на якість роботи комбайна.

Нерівномірність вологості зерна відзначена також у колосі (метелик): у нижній частині колосків зерно, як правило, вологіше, ніж у верхній. У цьому відзначено велика широта цих відмінностей – від 10 до 44% (при середній

вологості 15,5%). До середини дня ця різниця різко скорочується, тому зерно, обмолочене комбайном в ранковий час, не є таким однорідним за вологістю окремих зерен, як зерно, збирране вдень.

Крім того, вологість окремих частин рослини відрізняється суттєво, так у зернових колосових культур у верхній частині стебла вона становить 15,0-25,0%, а в нижній - 21,0-48,0%, що підтверджено дослідженнями.

Дана закономірність розподілу в рослині по висоті стеблостою хлібної маси істотно впливає і на показник співвідношення зерна і соломи по масі, оскільки від нього залежить вимолот зерна, тобто якість роботи та ефективність використання комбайнів.

Для оцінки співвідношення зерна і соломи по масі застосовують коефіцієнт солomистості  $\delta_c$ , що визначається за виразом:

$$\delta_c = m_z / (m_z + m_c), \quad (1.3)$$

де  $m_c$  - маса солomистій частини рослини;

$m_z$  - маса зерна.

Коефіцієнт солomистості забирааних хлібів змінюється в широкіх межах: він більший у довгостеблових маловрожайних культур і менше у короткостеблових хлібів з великою врожайністю зерна. Середні значення  $\delta_c$  для

пшениці становлять 0,5...0,6. За еталон при розробці молотилок для зернових культур приймають  $\delta_0 = 0,6$ , тобто  $m_z \div m_c = 1 \div 1,5$ .

У країнах Західної Європи та США максимально можливу продуктивність зернозбиральних комбайнів визначають за втрат зерна за молотаркою в 2,0% на високоврожайній пшениці до 10 т/га. Співвідношення мас зерна та соломи штучно (за допомогою збільшення висоти зрізу рослини) знижують до 1:0,5 - 1:0,7, що відповідає значенням коефіцієнта солomистості  $\delta_c = 0,33 - 0,41$ . За таких умов продуктивність 30, 40, 50 т/год і вище цілком реальна для комбайнів з пропускною здатністю молотарки від 8-9 до 11-12 кг/с.

Загальновідомо, що зменшення солomистості оброблюваної маси культури, що прибирається, призводить до помітного підвищення пропускної спроможності молотильного апарату і різкого зростання максимально можливої

продуктивності зернозбирального комбайна. Крім того, співвідношення зерна та соломи по масі надає вплив і на якість роботи молотильного апарату комбайна: чим вища солемистість хлібної маси, тим нижча годинна продуктивність, тим більше втрати зерна за комбайном.

Так, розрахунки у роботах дослідників показують, що зменшення солемистості пшениці, відповідне зміни коефіцієнта солемистості від 0,6 до 0,4, призводить до зростання пропускної спроможності та максимально можливої продуктивності вітчизняного зернозбирального комбайна «Дон-1500Б» при втратах зерна за молотаркою 1,5% відповідно в 1,34 і 3,0 рази (Таблиця 1.5).

Таблиця 1.5  
Вплив солемистості на пропускну здатність молотарки та продуктивність комбайна

Коефіцієнт солемистості ( $\delta_c$ )	Пропускна здатність молотарки ( $q$ ), кг/с	Продуктивність комбайна ( $W$ ), т/год
0,6	8,0	11,5
0,5	9,1	19,8
0,4	10,7	34,7

Солемистість хлібної маси залежить від висоти зрізу рослин у період збирання врожаю. Так, з графічної залежності (рис. 1.5) видно, що солемистість ярого ячменю (суцільна лінія) лінійно зменшується до 2/3 висоти зрізу, потім зростає внаслідок остистості. Солемистість озимої пшениці (пунктирна та штрихпунктирна лінії) через відсутність остей зменшується з збільшенням висоти зрізу (рис. 1.3). При цьому встановлено, що найбільша маса соломи на одиницю висоти доводиться на нижню частину стебла.

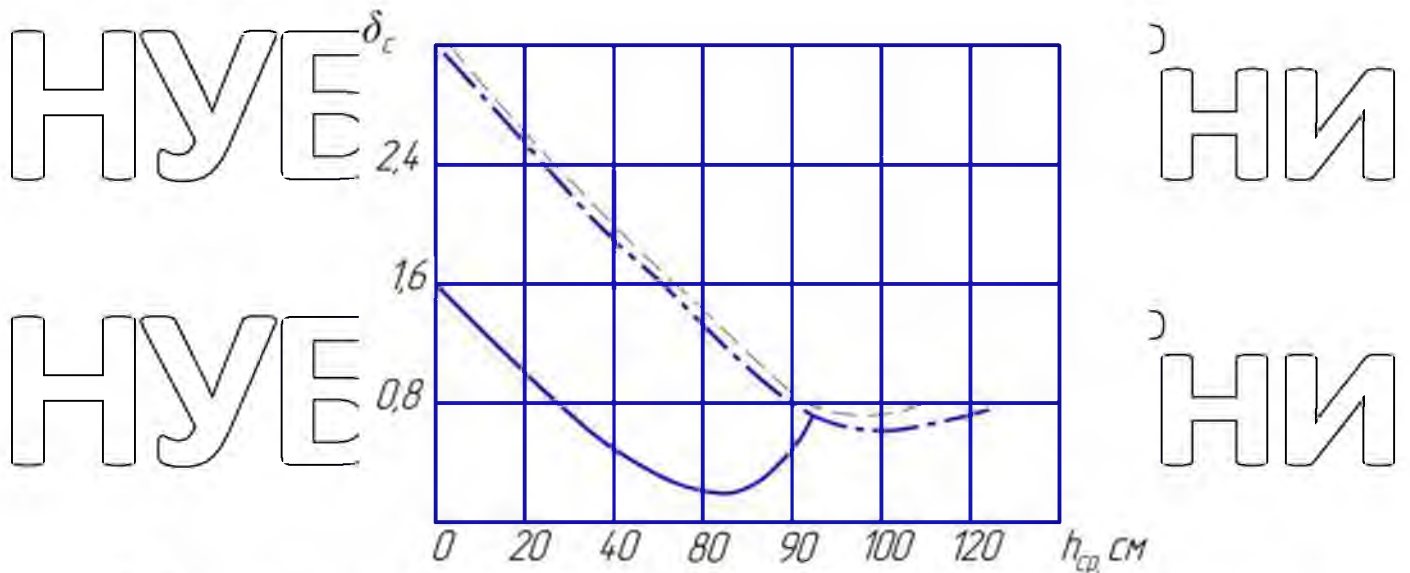


Рис. 1.3. Зміна соломистості хлібної маси в залежності від висоти зрізу

Таким чином, результати аналізу технологічних властивостей зернових

культур показують, що в момент збирання врожаю показники умовно можна розбити на дві групи: керовані та некеровані. До керованих можна віднести як довжину стеблостою так і співвідношення зерна та соломи по масі, а також частково і заміненість зернових культур, оскільки вона відсмінюється за рахунок обробки посівів гербіцидами.

Волога в рослині по висоті розподілена нерівномірно, що є однієї з причин пошуку технологічних та технічних рішень, що забезпечують відсутність технологічного впливу робочих органів комбайна на нижню частину рослин зернових культур, а отже, що змінюють співвідношення зерна та соломи по масі, що на практиці можливо здійснити за рахунок вдосконалення процесу зрізу стебел зернових культур комбайновою жниваркою. Однак для цього потрібно знати особливості фізико-механічних показників стебел.

### 1.5. Огляд і аналіз техніко-технологічних розробок

Результати огляду і аналізу науково-технічної літератури свідчать про те, що одним із напрямів підвищення ефективності робіт зернозбиральних комбайнів, особливо високотехнологічних, при збереженні їх неструктурної

схеми та пропускної здатності молотильно-сепаруючого пристрою є зменшення масової подачі рослинного матеріалу (хлібної маси). Пошук таких рішень, коли в молотарку комбайна надходить лише колосова частина або колосова частина з мінімальною довжиною стебла, проводиться у багатьох країнах.

Найбільш відомим і науково обґрунтованим способом для досягнення цього є очіс зерна на корені колосозбираючими машинами. Очісувальна жниварка дозволяє оптимізувати продуктивність комбайна і досягти максимального його завантаження. Якщо у комбайна зі звичайною жниваркою купа складається з соломи та зерна у співвідношенні 50:50, то з очисною

жниваркою це співвідношення змінюється на 80:20, де 80% – це зернова маса. Оскільки стебла не зрізуються, то при збиранні, транспортуванні та обмолоті хлібної маси, що практично не містить соломи, відбувається менше роботи, а це економія палива до 40–45 % порівняно з традиційною жниваркою. Зменшуються

навантаження на робочі органи комбайна і збільшується їх термін служби. Крім цього, очисні жниварки дозволяють здійснювати збирання при вологості зерна до 30,0% в середньому вдвічі швидше в порівнянні з класичними жниварками. До того ж такі жниварки ефективні при збиранні полеглих хлібів.

Досвід застосування колосозбираючих машин у вигляді очисних жниварок/комбайнів у виробничих умовах показав їх обмеженість, особливо для колосових культур через їх агробіологічні характеристики (стебла рослин значно розрізняються по висоті – різниця стеблостою сягає 0,5 м), по зусиллю відриву суцвіть, переживання з ґрунту, нерівномірності вологості за висотою стебла, необхідності у додаткових операціях у технології обробітку даних культур та інших причин.

Результати аналізу науково-технічної літератури свідчать про те, що по жниварках, що очісують, інформація явно перебільшена, зокрема, механічне травмування зерна вона не здатна зменшити, тому що не взаємодіє з колосом стебла, який обмолочується в молотильно-сепаруючому пристрої комбайнів. На відміну від традиційних жниварок ці машини мають велику в 1,5 рази металомісткість, звідси необхідна більше висока надійність системи



навішування і копювання комбайну. Крім того, велика маса жниворок для очісу рослин на корені - це підвищена інерційність при копюванні мікрорельєфу поля, тобто запізнення в часі, а тим більше ця проблема посилиться при підвищенні робочої швидкості руху комбайнів під час збирання.

У результаті дійшли висновку, що у сільгосптоваровиробника мають бути як традиційні, так і очисні жниварки. Це дозволить найбільш ефективно збирати врожай, виходячи з поставлених цілей і ситуації, що склалася.

У зв'язку з чим останнім часом стали звертати увагу на доцільність збирання зернових культур методом «високого зрізу», тобто зрізання верхньої колосової частини та приколосової частини рослини.

Однією з важливих біологічних особливостей зернових культур, яка підтверджує доцільність збирання верхньої, тобто колосової та приколосової частини рослин, є нерівномірність розподілу вологи у стеблі по висоті. Так, для зернових колосових культур вологість верхньої зерновмісної частини становить 15,0-25,0%, а нижньої (соломистої) - 21,0 - 48,0%, тобто у основі стебла вологи більше, ніж у приколосової частини.

Наявність більш вологої нижньої частини стебла, ніж верхня, як правило, негативна дається ознаки на пропускну здібності молотарки, отже, і робочої швидкості руху і годинної продуктивності комбайна. Тому технологічно доцільно відокремити нижню частину соломини від стебла з колосом до подачі його в молотильний апарат комбайну.

Волога нижня основа стебла залишається на полі, а це означає, що можна розпочинати роботу раніше і закінчувати пізніше. При цьому витрата палива на тону зерна зменшується, знижуються витрати на досушування. За рахунок цього за даними робіт науковців у важких умовах збирання можна збільшити продуктивність комбайна на 20,0 - 50,0%, оскільки кожен сантиметр довжини нижньої частини стебла, що не надійшло до молотильного апарату комбайна, дозволить підвищити продуктивність машини на 1,5-2,0%. Так, у низці робіт дослідників зазначається, що стеблостою слід зрізати на висоті близько 0,20 м, а максимумально до 0,30 м (при висоті стеблостою до 1,0 м). Оскільки в цьому

діапазоні зрізу стебел комбайнова жнивarka ще автоматично копіює рельєф поля. Це важливо тому, що при високому зрізі швидкість руху комбайна становить до 2,8 м/с (10,0 км/год). Діяльність М.А. Бурянова зазначається, що при русі комбайна зі швидкістю 3,4 м/с (12,2 км/год) внаслідок виникаючих вагань максимальне відхилення боковин жнивarki складає 0,45 м, а при швидкості 2,5 м/с (9,0 км/год) і 1,67 м/с (6,0 км/год) відповідно 0,32 і 0,24 м. Працювати з ще більшою висотою зрізу не має сенсу через утворення додаткових проблем: поганого копіювання жнивarkою рельєфу поля, збільшення додаткових навантажень на вузли та агрегати як жнивarki, так і зернозбирального комбайна, що віддзеркалюється на надійності машини.

Згідно з агротехнічними вимогами, висота зрізу 0,20 м є граничною, оскільки зріз вище 0,20 м, як правило, причина великих втрат зерна колосом. В роботі Алфьорова С.А., зазначається, що при збиранні короткостеблової пшениці на висоті 0,17 м втрати становлять 50 кг/га, а при висоті 0,21 м вони збільшуються до 112 кг/га, тобто втрати зерна за жнивarkою дорівнюють 0,8 % (за агротехнічними вимогами за жнивarkою – 0,5%).

Попередні дослідження висоти стеблостою зернових культур у виробничих умовах на прикладі Хмельницької області показали, що найбільш ймовірні втрати зерна у вигляді колосу в інтервалі висоти стеблостою 0,2 – 0,3 м. Між іншим, результати аналізу стеблостою пшениці даного діапазону свідчать про те, що в цьому інтервалі присутні в основному недорозвинені продуктивні рослини та «підгін» (сходи від самоосипання зерна попередніх років). У колосі даних рослин найчастіше відсутня зернівка або є в кількості 1-2 штуки, як правило, недорозвинені, щуплі і важко відділяються при обмолоті колоса.

Дослідження такого прийому збирання зернових культур у 1960–70 роках у Німеччині показали його перевагу тільки на неполеглому та рівномірному за висотою хлібостою. У Франції було запропоновано комбайн із роздільним зрізом колосової та стеблової частин рослин. Жнивarka мала два різучі апарати, розташовані на різних рівнях. Аналогічна жнивarka машина була запропонована Н.А. Димчинським. Дослідження зі скошування пшениці на високому зрізі

(0,35-0,45 м) показали, що обмолот колосової частини рослин вимагає менших витрат енергії на одиницю пропускної спроможності, підвищується пропускна спроможність молотарки в порівнянні зі звичайним зрізом, знижується енергоємність технологічного процесу, покращуються якісні показники обмолоту-сепарації, проте втрати зерна за жнивваркою зростають тим більше, чим менше вирівняність рослин по висоті та вище ступінь видягання.

ІМЕСГ запропонував колосозбиральну машину, процес роботи якої полягає в наступному: мотовило 1 (рис. 1.4,а) підводить стебла до ріжучого апарату 2, зрізана колосова частина направляється шнеком 5 збірник. Колоски, що залишилися на стеблах, зриваються гребінцем 3, встановленою під платформою жнивної частини, і направляються в збірку шнеком 4 [20].

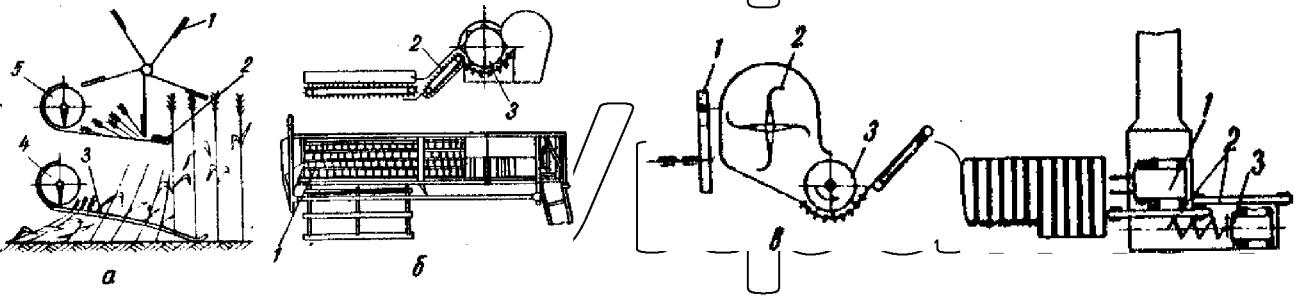


Рис. 1.4. Пристрої для збирання і обробки колосової частини рослин хлібної маси: (а) - колосозбиральна машина ІМЕСГ; (б) - колосозбиральна машина

Інший варіант такого пристрою розроблений ІМЕСГ (рис. 1.4, б): різальний апарат 1 зрізає рослини на звичайній висоті; похилий транспортер 2 подає їх до ножа, який розрізає та ділить хлібну масу на колосову та комлеву частини. Остання потрапляє в збірник, колосова частина надходить у молотильно-сепаруючий пристрій 3, в якому колосся, що містяться в ній, обмолочуються і зерно виділяється через ґрати підбарабання. Солома виводиться межі молотильного апарату. Випробування показали, що втрати зерна із соломою зазвичай не перевищували 0,5%. Однак за великих подачах та високій

соломистості хлібної маси (1:5,2 – 1:6,0) сепарація зерна підбарабанням знижувалася, і втрати зерна із соломною досягали 1,5%.

З вищевикладеного випливає, що реалізація прямого комбайнування зернових культур із високим зрізом стебел дає позитивний ефект. За інформацією центру сільськогосподарських технологій і механізації (Нордхаузен, Німеччина), внаслідок цього вироблення можна збільшити на 25–40%. Крім того, витрата палива знижується на 9–12 л/год, зменшується знос молотарки та подрібнювача-розкидача соломи. Зводиться до мінімуму перенесення вологи від соломи до зерна, і, як показали виробничі спостереження,

знижуються втрати зерна після очищення до 1,0 т/га. Загалом застосування методу «високий зріз» в сучасних умовах Західної Європи може дати економічний ефект від 30 до 70 євро/га (1800–4200 грн./га на 2024 р.).

З однієї сторони, можна, можливо підвищити продуктивність комбайна, а з інший - решта в поле солома заввишки 0,35-0,4 м, для збирання якого необхідні додаткові витрати технічних (мульчувальник), трудових, фінансових та тимчасових коштів. Так, на думку зарубіжних фахівців, витрати на застосування мульчувача оцінюються в 20–30 євро/га (1200-1800) грн./га).

У роботі Смолінського С.В., Мироненка В.Г. зазначається, що використання соломи як добрива також спричинить суттєві втрати. А розмови про те, що знаряддя (традиційно застосовувані для лушення стерні) здатні вирішити проблему, що виникає, не більше, ніж розмови Ні двослідна борона, ні, тим більше, дисковий лушитель не в змозі «заорати» подрібнений об'єм рослинної маси. Навіть для такої зброї, як важка V-подібна дискова борона, знадобиться далеко не один і не два робочі проходи, а це перевитрата палива. Не варто забувати і про якісний бік таких заходів - достатньому подрібненні і рівномірному розподілі рослинних залишків, що для дискових знарядь є практично нездійсненним завданням.

Виходячи з позитивних та негативних сторін раніше розроблених технологічних та технічних рішень у галузі вдосконалення збирання зернових культур прямим комбайнуванням, слід визнати, що найбільш раціональним є

метод «подвійного зрізу» стебел по висоті різальним апаратом комбайнової жниварки.

У цьому випадку процес прямого комбайнування зернових культур з подвійним зрізом стебел буде характеризуватись трьома видами продукту: стерня ( $H_{cm}$ ), соломина певною довжини ( $\Delta l_i$ ) як проміжний продукт і основний продукт (колосова та приколосова частина) для подальшого технологічного впливу робочими органами комбайна. Практично це означає, що на полі є рослинні залишки на корені та на поверхні поля.

Загальновідомо, що стерня на корені зберігає близько 37,0% зимових опадів, оскільки поверхня поля, вкрита рослинними рештками на корені, впливає на уловлювання снігу.

Наявність двох складових рослинних залишків на поверхні поля впливатиме і на процес інфільтрації (інфільтрація – проникнення атмосферних та поверхневих вод у ґрунт по капілярах та субкапілярних порах та іншими порожечками).

Крім цього, здійснюється захист поверхні ґрунту від енергії краплі протягом осінніх, весняних та літніх місяців, коли ще не з'явилося велике листя для прийняття енергії краплі та пропускання води. Рослинні залишки на поверхні поля вбирають енергію краплі, захищають ґрунтові агрегати та збільшують розмір макропор, а це, у свою чергу, знижує відтік.

Крім того, рослинні залишки на поверхні ґрунту не тільки захищають ґрунтові агрегати, а й одночасно впливають на швидкість випаровування, особливо на початковій стадії, після випадання опадів, оскільки потенціал повітря завжди негативний по відношенню до потенціалу ґрунту.

Залишені на поверхні ґрунту рослинні залишки практично відображають сонячну енергію та вітер, а отже, охолоджують поверхню ґрунту, що впливає на початкову швидкість випаровування води, особливо на першій стадії, тому що випаровування вологи з ґрунту на першій стадії залежить від умов навколишнього середовища (швидкість вітру і т.д.) та струму води на поверхні.

Позитивна роль рослинних залишків на поверхні ґрунту проявляється в тому,

що втрати води з ґрунту протягом 35-денного періоду без опадів становлять 23 мм із непокритого ґрунту, 20 мм – при покладених рослинних рештках, 19 – при 75% покладених залишках та 25% залишків на корені та 15 мм – при 50,0% покладених залишків та 50,0% залишків на корені на поверхні.

Вищевикладене свідчить про позитивну роль рослинних залишків як на корені, так і на поверхні поля. Тільки «виникає» питання, якою має бути довжина рослинних залишків, покладених на поверхні поля? Зокрема соломини проміжного продукту, що утворюється в процесі подвійного зрізу стебел при прямому комбайнуванні зернових колосових культур, оскільки інтенсивність перегнивання соломи безпосередньо пов'язана зі ступенем її подрібнення (таблиця 1.6).

Таблиця 1.6

Інтенсивність розкладання соломи залежно від її подрібнення

Довжина подрібнення соломи, мм	Кількість днів, необхідних для перегнивання 50 % соломи (за масі) при 20°С
50	54
20	47
10	30
5	29
Менш 1 мм	14

В роботі А.Н. Леженкіна зазначається, що «найповніше розкладається солома довжиною 0,1-0,2 м. Збільшення довжини різання соломи призводить до уповільнення процесу її розкладання...». При цьому інтенсивність розкладання соломи у ґрунті визначає і тип ґрунту. Так, на суглинистих ґрунтах коефіцієнт розкладання соломи становить 0,95, на піщаних ґрунтах – 0,88, на кислих – 0,12, а на важких глинистих ґрунтах – 0,26.

Таким чином, із вищевикладеного випливає, що для підвищення технологічної ефективності процесу прямого комбайнування зернових культур доцільно використовувати метод «високого зрізу», в якому здійснюється подвійний зріз стебел. Наявність подвійного зрізу стебел забезпечує утворення трьох видів продуктів стерні, основного продукту в вигляді колосовий та

приколосової частини стебла та проміжного продукту в вигляді соломи стебла.

При цьому залежно від висоти стеблостої хлібної маси та з урахуванням розкладання соломи в ґрунті доцільно утворювати проміжний продукт довжиною від 0,10 до 0,20 м, тому що в цьому випадку розкладання соломи в ґрунті йде більше інтенсивно. Залишення на поле поживних залишків і їх накопичення має сприяти відновленню та збільшенню фауни ґрунту та органічних відходів, що дуже важливо для природно-кліматичних умов регіону.

### Висновки і завдання дослідження

У сучасних умовах збирання зернових культур практично здійснюється комбайновим способом, в якому основною машиною є зернозбиральний комбайн з класичним та аксіально-роторним молотильно-сепаруючим пристроєм. При цьому у сільськогосподарському виробництві застосовується як пряме комбайнування (однофазний), так і роздільний (двофазний) спосіб збирання врожаю зернових культур.

В умовах Лісостепу на прикладі Хмельницької області видно, що комбайновий парк складається з машин із пропускнуою здатністю молотарки 5,0 – 6,0 кг/с і 7,5 кг/с і вище. Результати аналізу технічного переозброєння комбайнового парку в умовах Хмельницької області свідчать про те, що заміна як фізично, так і застарілих машин здійснюється насамперед за рахунок придбання комбайнів з пропускнуою здатністю молотарки 7,5 кг/с і вище. Так, за період з 2007 року по 2012 рік частка їх у комбайновому парку у Хмельницькій області зросла у 2,9 рази.

Техніко-економічні показники виробничої діяльності сільгосптоваровиробників свідчать про те, що високопродуктивні або високотехнологічні зернозбиральні комбайни, що широко застосовуються на збиранні зернових культур прямим комбайнуванням, частка яких становить 40,0 – 50,0% і більше, а окремих господарствах взагалі переважають. Виробниче завантаження комбайнів у разі практично вирішується застосуванням широкозахватної комбайнової жнивarki чи збільшенням робочої швидкості

руху машини зі зменшенням ширини захвату жниварки (хедера), що найчастіше роблять на практиці.

Огляд та аналіз науково-технічної літератури показав, що найбільш перспективним є технологічний процес прямого комбайнування зернових культур, у якому застосовуються широкозахватні жниварки (більше 7,6 метрів) без зниження робочої швидкості руху комбайна, що можливо здійснити за рахунок зміни технологічних властивостей зернових культур.

Зернові культури під час збирання врожаю характеризуються технологічними властивостями, з якими пов'язані і фізико-механічні.

Технологічні властивості зернових культур у момент збирання врожаю умовно можна розбити на дві групи – керовані та некеровані. При цьому окремі показники технологічних властивостей зернових культур можуть бути змінені за допомогою керування їх фізико-механічними властивостями. До таких показників відноситься співвідношення зерна та соломи по масі, з яким пов'язана довжина стеблостою хлібної маси.

У науково-технічній літературі наголошується, що волога у стеблі зернових культур розподіляється нерівномірно за висотою. У верхній частині зернових колосових культур вона становить 15,0-25,0%, а в нижній – 21,0-48,0%.

Наявність більш вологої нижньої частини стебла, ніж верхньої, як правило, негативно позначається на пропускній здатності молотарки, а отже, і на робочій швидкості та на годинній продуктивності комбайну. У зв'язку з чим технологічно доцільно відокремити нижню частину соломини від стебла з колосом до подачі його в молотильний апарат комбайна, що практично можливо здійснити за допомогою методу «високого зрізу» стебел різальним апаратом комбайнової жниварки.

В результаті аналізу раніше існуючих технологічних та технічних рішень у галузі вдосконалення прямого комбайнування зернових культур встановлено, що метод «високого зрізу» стебел різучим комбайновим апаратом жниварки доцільно здійснювати у вигляді подвійного зрізу стебел. Оскільки в цьому випадку зменшується довжина стебла з колосом, а отже, і солоमितість хлібної



маси, що позначиться на пропускній здатності молотарки та робочій швидкості руху комбайна. Одночасно з цим утворюється проміжний продукт у вигляді соломини стебла завдовжки від 0,10 до 0,20 м, який залишається на поверхні поля без технологічного впливу робочих органів комбайну. Практично на поле утворюються три виду рослинних продуктів – це стерня, проміжний продукт у вигляді соломини стебла довжиною від 0,10 до 0,20 м та подрібненої соломи після подрібнювача-розкидача соломи (ПРС) комбайна.

Вищесказане дозволило нам висунути **наукову гіпотезу**, що за допомогою зменшення довжини стебла за допомогою методу «високого зрізу», в якому здійснюється подвійний зріз стебел, можливо, зменшити соломистість хлібної маси, отже, підвищити пропускну здатність молотарки, що позначиться на робочій швидкості руху і годинниковий виробник. Крім того, в подальшому забезпечиться збереження вологи в ґрунті та покращиться родючість.

Метою даної є підвищення ефективності прямого комбайнування за рахунок удосконалення процесу зрізу стебел зернових культур.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОЦЕСУ ПРЯМОГО КОМБАЙНУВАННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР З ПОДВІЙНИМ ЗРІЗОМ СТЕБЛА

### 2.1. Методичні підходи до формування математичної моделі та обґрунтування критерію ефективності технологічного процесу прямого комбайнування з подвійним зрізом стебел

Відповідно до методології системного аналізу математичні моделі динамічних систем, якими є технологічні об'єкти механізації рослинництва, можуть бути схильні до декомпозиції (мета декомпозиції в технічному плані - спростити завдання формування складної системи шляхом розгляду її по частинам), що дозволяє проводити аналіз на кількісному рівні за допомогою комп'ютерних технологій.

У загальному вигляді технологічний процес прямого комбайнування зернових культур із подвійним зрізом стебел можна описати як:

$$(S_1, R, R_V S, S R_V, X_S, Z_S, V_S, \varphi, \xi) \quad (2.1)$$

де  $S_1$  - простір вхідних величин системи ( $S$ );

$R$  - безліч відносин зв'язку системи ( $S$ );

$R_V S$  - безліч складових частин системи механіко-технологічного простору, від яких виходять потоки до системи ( $S$ );

$S R_V$  - безліч складових частин системи механіко-технологічного простору, до яких спрямовані вихідні потоки системи ( $S$ );

$X_S$  - простір внутрішніх величин системи ( $S$ );

$Z_S$  - простір параметрів стану системи ( $S$ );

$V_S$  - простір вихідних величин системи ( $S$ );

$\varphi$  - функція часу переходу від одного стану системи до іншому;

$\xi$  - функція часу переходу від одного стану системи до іншому.

З виразу (2.1) випливає, що процес прямого комбайнування зернових культур з подвійним зрізом стебел характеризується внутрішньою структурою  $S_1, R$ , поведінкою  $X_S, Z_S, V_S, \varphi, \xi$  та режимом функціонування  $R_V, S, S R_V, X_S$

У системі механіко-технологічного простору. У загальному вигляді система рівнянь, що описують процес механічної взаємодії стебло - робітник орган, складається з рівнянь руху робітника органу і об'єкта впливу або силової дії робочого органу та об'єкта впливу в механіко-технологічному просторі технічного пристрою машини.

У математичних моделях присутні два види величин – зовнішні, які для даної моделі є відомими, та внутрішні, які обчислюються із співвідношень моделі, якщо відомі початковий стан процесу та всі зовнішні величини. Зовнішні величини, в свою чергу, можна розділити на три групи:

- величини, які є характеристиками даного процесу;
- величини, які описують вплив на процес, що вивчається, деяких зовнішніх по відношенню до нього процесів;
- величини управління, які знаходяться в розпорядженні керуючих органів, за допомогою яких можна впливати на процес.

Зовнішні величини, які є управляючими, підлягають експериментальному визначенню.

Виходячи з вимог процесу подвійного зрізу стебел зернових культур формуються конструктивні, геометричні та кінематичні параметри технічного пристрою. Враховуючи фізико-механічні властивості стебел зернових культур, механічна дія робочих органів технічного пристрою призводить до зміни стану стебел за їх довжиною та утворенням проміжного продукту у вигляді певної довжини нижньої частини стебла.

На рис. 2.1 показано формування механіко-математичної моделі для ріжучого апарату з подвійним зрізом стебел з урахуванням вимог до проміжного продукту та технологічного процесу. З рисунка 2.1 слід, що взаємодія робочих органів ріжучого апарату подвійного зрізу стебел зернових культур наводить до зміни стану стебел (переходить стану спокою в нестійкий стан) та їх якісних характеристик. Під впливом сили різання утворюється поперечний зріз стебел, що змінює їх кількісну характеристику по довжині з освіткою окремого проміжного продукту – стеблової частини.

Основний продукт - це зрізані фрагменти стебел з колосом пшениці.

Проміжний продукт - це соломину певної довжини нижньої частини стебла.

У разі інтерес становлять властивості, які характеризують якісно-кількісні показники процесу подвійного зрізу стебел. Стебла зернових культур (пшениця) повинні мати чистий поперечний зріз без "надривів".

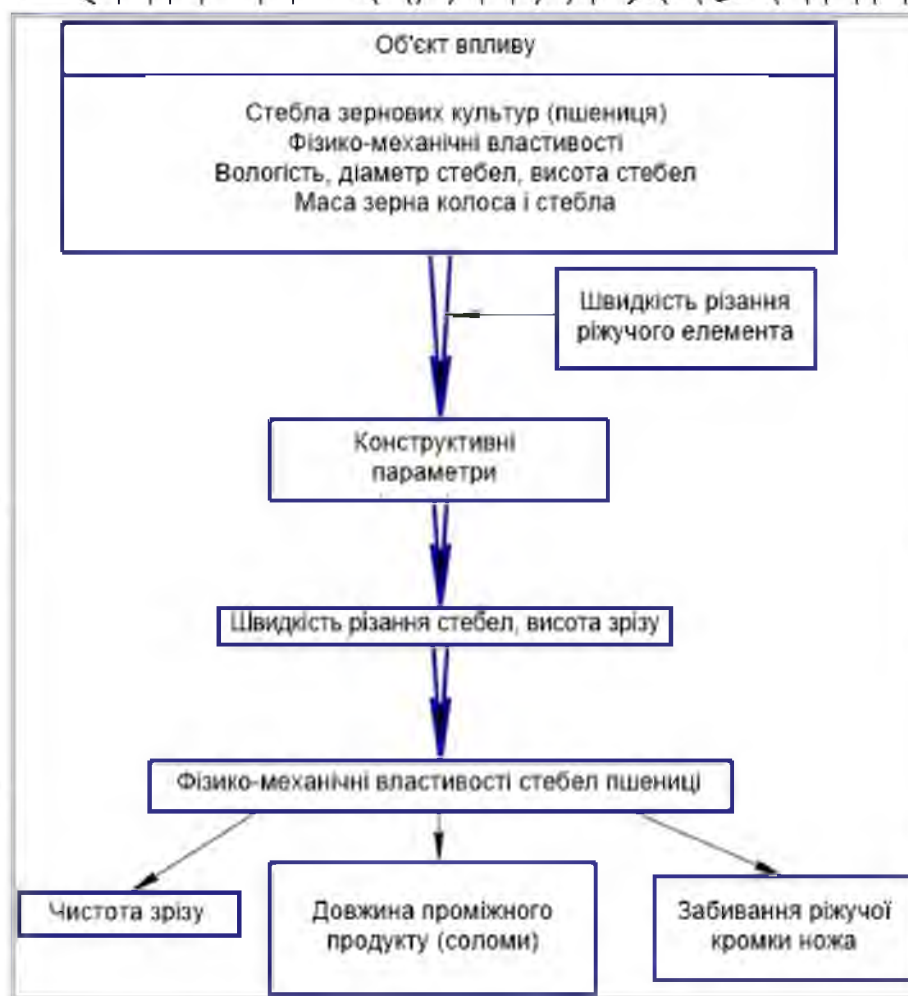


Рис. 2.1. Формування математичної моделі процесу подвійного зрізу стебел зернових культур на основі системного аналізу

З урахуванням цих вимог до результату процесу подвійного зрізу стебел зернових культур необхідно підходити з позиції векторної оптимізація.

## 2.2. Обґрунтування інформаційної моделі технологічного процесу зернозбирального комбайна як перетворюючої технічної системи з подвійним зрізом стебел

Загальновідомо, що збиральний процес у вигляді прямого комбайнування зернових культур є складною багатопараметричною системою, схема функціонування якої має ієрархічну структуру, що включає моделі окремих процесів, явищ та їх взаємозв'язку.

З метою встановлення причинно-наслідкових зв'язків між процесами, що визначають ефективність використання зернозбиральних комбайнів, а отже, і виконання збиральних робіт, розглянемо фактори, що впливають на неї. Різноманітність їх можна розбити на чотири групи: агротехнічні, природно-кліматичні, організаційно-господарські та конструктивні. Результати аналізу груп факторів показують, що ефективність використання зернозбиральних комбайнів під час збиральних робіт залежить від величини втрат робочого часу з організаційних, технічних та технологічних причин. Організаційно-технічні простої усуваються шляхом прийняття оперативних заходів організаційного характеру, а технічні – шляхом ремонту чи заміни справним комбайном несправного.

Для технологічних простоїв, на думку П.Ф.Прибиткова, А.М.Плаксина та інших, немає дієвих заходів, оскільки при експлуатації зернозбиральних комбайнів у період збирання врожаю переважають раптові відмови, спричинені, як правило, порушеннями технологічного процесу та правил експлуатації машин. У зв'язку з чим ці відмови в умовах експлуатації не піддаються прогнозу. Крім того, випадковий характер технологічних простоїв комбайнів визначається і природно-кліматичними умовами.

У багатьох роботах зазначається, що на ефективність використання зернозбиральних комбайнів найбільше вплив здійснюють зміни фізико-механічних властивостей рослин та технологічних властивостей зернових культур, які в момент збирання врожаю умовно можна розбити на дві групи: керовані та некеровані. До керованих факторів можна віднести співвідношення

зерна та соломи по масі, з яким пов'язана довжина стеблостою. За допомогою зміни довжини стебел під час збирання врожаю можливо змінювати співвідношення зерна і соломи по масі, отже, і проводити ефективніше використання комбайнів при прямому комбайнуванні зернових культур.

У загальному вигляді технологічний вплив робочих органів машини на рослину в період збирання зернових культур прямим комбайнуванням можна подати у вигляді схеми рис. 2.2.

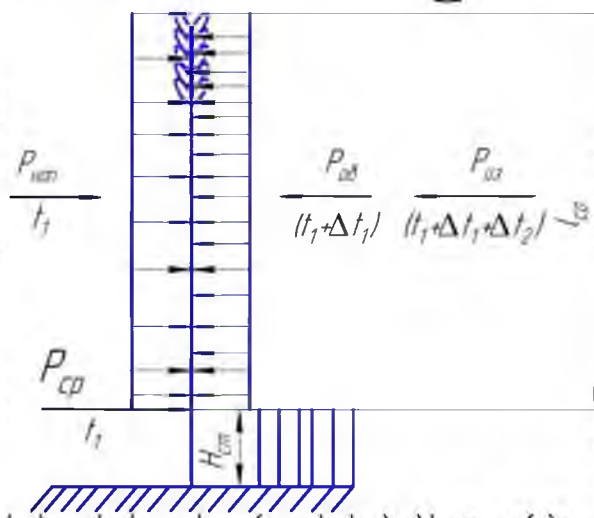


Рис. 2.2. Схема технологічного впливу робочих органів машини під час прямого комбайнування зернових культур

З схеми рис. 2.2 видно, що в період збирання врожаю зернозбиральними комбайнами з боку ріжучого апарату комбайнової жнивирки діє сила  $P_{cp}(t_1)$ , яка характеризує процес зрізу рослини під час їх скошування, і діє дана сила згідно зі схемою впоперек стебла. Через певний проміжок часу ( $\Delta t_1$ ), тобто через  $(t_1 + \Delta t_1)$  діє сила  $P_{us}(t_1 + \Delta t_1)$ , яка характеризує процес обмолоту «стебло + колос» довжиною  $l_{cpc}$ . Зі схеми рисунка 2.3 видно, що вона впливає на всю довжину стебла ( $l_{cpc}$ ) та/або  $(l_c - H_{cm})$ . Потім діє сила  $P_{us}(t_1 + \Delta t_1 + \Delta t_2)$ , яка характеризує процес подрібнення соломини стебла. При цьому можливий випадок, коли  $P_{us}(t_1 + \Delta t_1 + \Delta t_2) = 0$ , тобто подрібнення соломи не здійснюється.

Практика і наука свідчать, що в ході руху комбайна з підвищеним швидкості переміщення жнивирки по полі починає посилюватися швидкісний і

пружний натиск ( $P_{нат}$ ) хлібостою як середній пружного середовища зі своєю щільністю ( $\rho$ ) і модулем Юнга ( $E$ ). Швидкісний ( $P_{ск}$ ) і пружний натиск ( $P_{упр}$ ) хлібостою можна подати у вигляді виразу:

$$P_{ск} = V_m^2 \cdot \frac{\rho}{2} \text{ та } P_{упр} = \varepsilon \cdot E, \quad (2.2)$$

де  $V_m$  - швидкість машини на полі, м/с;

$\rho$  - первісна густина хлібної маси, кг/м<sup>3</sup>;

$\varepsilon = \Delta\rho/\rho$  - відносна деформація, де  $\Delta\rho$  - зміна густини хлібної маси, кг/м<sup>3</sup>;

$E$  - модуль Юнга, Н/м<sup>2</sup>.

Загалом тиск напору хлібної маси ( $P_{нат}$ ) при прямому комбайнуванні зернових культур дорівнює:

$$P_{нат} = P_{ск} * P_{упр} \quad (2.3)$$

Натиск хлібної маси ( $P_{нат}$ ) зростає при жорсткому малоподатливому хлібостої, що характерно для короткостеблових сортів пшениці.

Вищевикладене та результати аналізу фізико-механічних та технологічних властивостей зернових культур дозволяють розробити структурну схему технологічного процесу збирання зернових культур з подвійним зрізом стебел при прямому комбайнуванні (рис. 2.3), в якій перетворюються входні дії у вигляді умов функціонування  $X(T_q)$  у вихідні  $Y(T_q)$ , що визначають кількісні та якісні показники роботи.

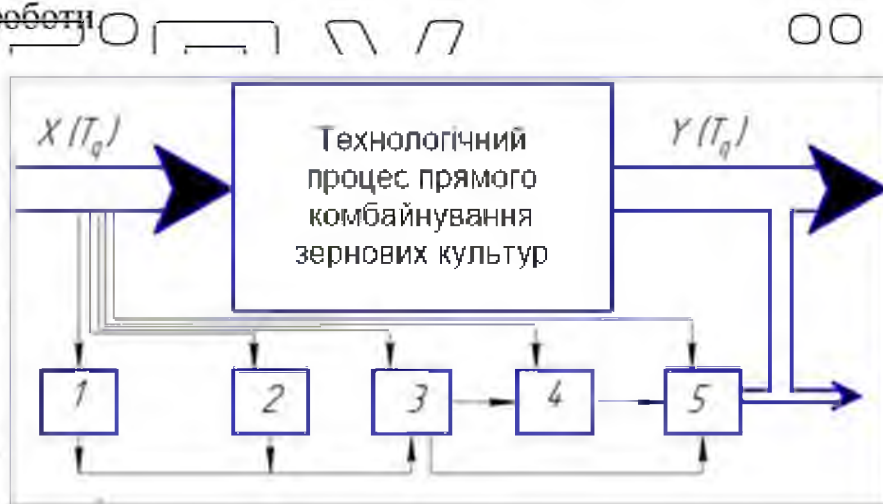


Рис. 2.3. Структурна схема моделі функціонування технологічного процесу прямого комбайнування зернових культур з подвійним зрізом стебел

Підсистемами в даній системі (рис. 2.4) є в основному послідовно з'єднані

в часі технологічні процеси, що виконуються технічними підсистемами зернозбирального комбайна перетворюючої технічної системи, такі як: 1 - зріз стебла на висоті ( $h_1$ ); 2 - зріз стебла на висоті ( $h_2 = \Delta l$ ) та розкидання соломини довжиною ( $\Delta l$ ) на поверхні поля; 3 - обмолот продукту «колос + частина соломини» завдовжки ( $l_2$ ); 4 - сепарація великого вороху (солома), подрібнення та розкидання соломи по полю; 5 - сепарація дрібного вороху, розкидання по полю підлоги. У загальному вигляді вищевикладене можна подати у вигляді схеми рис. 2.4.

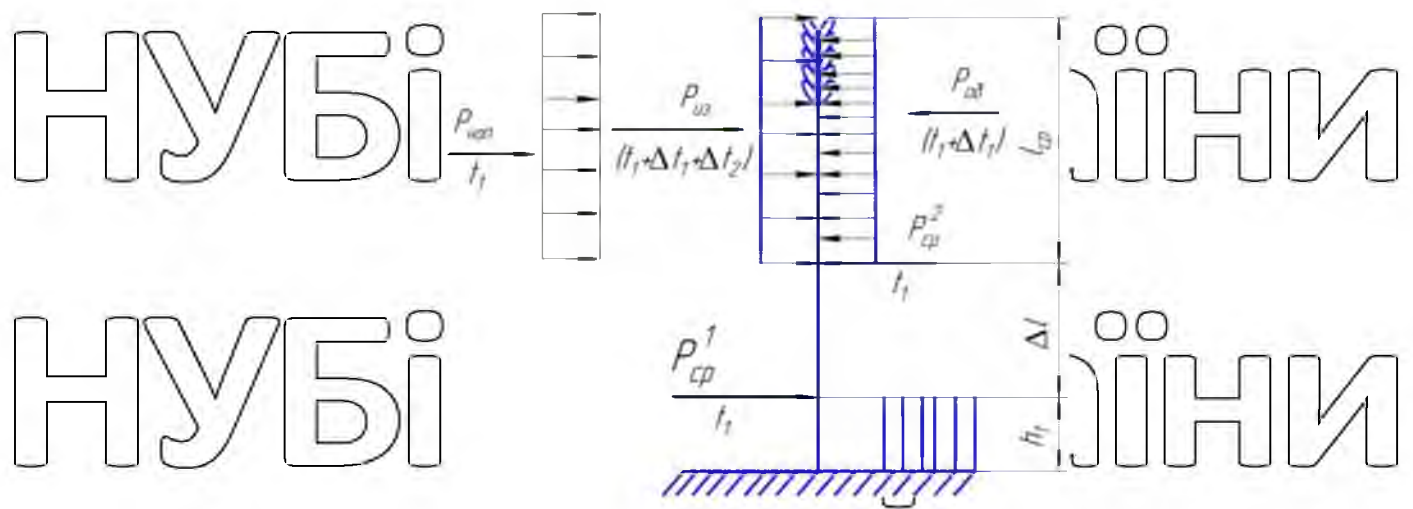


Рис. 2.4. Схема технологічного впливу робочих органів машини при прямому комбайнуванні зернових культур із подвійним зрізом стебел.

Зі схеми рисунка 2.5 видно, що першою операцією в технологічному ланцюзі прямого комбайнування зернових культур з подвійним зрізом стебел є зріз рослин на корені, який виконує перетворююча технічна підсистема - різальний апарат комбайнової жниварки.

Зернозбиральний комбайн, як перетворююча технічна система, працює у виробничих умовах, де постійно змінюються зовнішні впливи імовірної природи. Такими факторами, як впливає з вищевикладеного, є: нерівномірність поверхні поля  $Z(t)$  або  $Z(s)$ , що викликає коливання комбайнової жниварки і різучого апарату, так і зернозбирального комбайна; врожайність соломки  $Y_c(t)$  або  $Y_c(s)$  і зерна  $Y_z(t)$  або  $Y_z(s)$ ; висоти стеблостої  $H_c(t)$  або  $H_c(s)$ ; вологість зерна



$\omega_z(t)$  або  $\omega_z(s)$ ; вологість соломки  $z(t)$  або  $z(s)$ ; вологість ґрунту  $n(t)$  або  $n(s)$ ; густота стеблостої  $N_c(t)$  або  $N_c(s)$ ; пониклість стебел  $K_{nc}(t)$  або  $K_{nc}(s)$ ; засміченість поля  $z_c(t)$  або  $z_c(s)$ ; висота стеблостої  $l_s(t)$  або  $l_s(s)$ ; діаметр стеблостою  $d_s(t)$  або  $d_s(s)$  та інші.

Всі зовнішні впливи та вихідні показники роботи зернозбирального комбайна як перетворюючої технічної системи слід розглядати як випадкові функції (процеси) часу  $(t)$  або шляху  $(s)$ .

У загальному вигляді технологічний процес зернозбирального комбайна як перетворюючої технічної системи, складовою якої є технічна підсистема – ріжучий апарат, можна подати у вигляді інформаційної моделі побудованої за принципом «вхід-вихід» (рис. 2.5).

На вхід моделі діє вектор  $\Gamma$ -функція  $(X)$  умов роботи:

$$X = \{z(t), V_c(t), V_s(t), l_c(t), d_c(t), \omega_z(t), \omega_c(t), \omega_n(t), N_c(t), K_{nc}(t), z_c(t)\}. \quad (2.4)$$

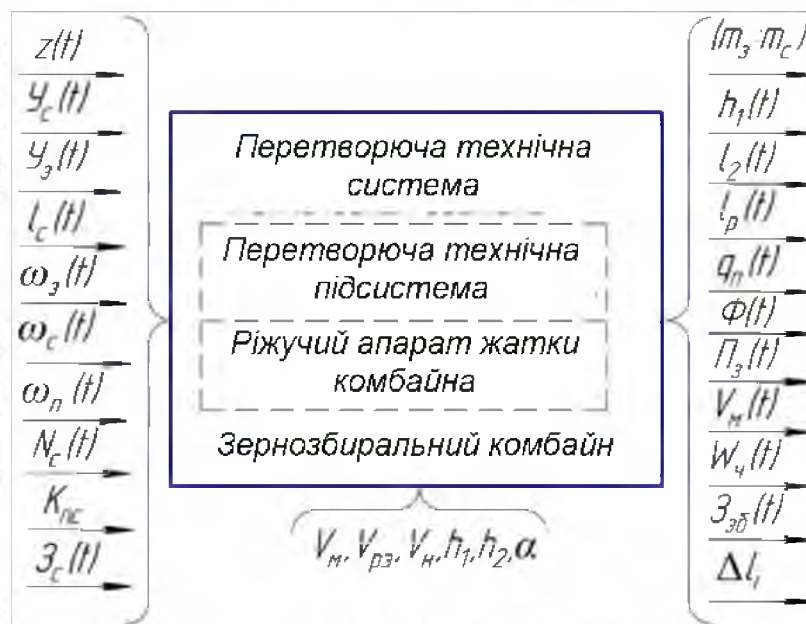


Рис. 2.5. Інформаційна модель технологічного процесу зернозбирального комбайна як перетворюючої технічної системи з подвійним зрізом стебел зернових культур.

Як вихідна змінна приймається вектор  $V$  – функція кількісних показників виконання технологічного процесу збирання зернових культур з подвійним зрізом стебел:

$$V = \{(m_s/m_c), h_1(t), l_2(t), l_p(t), \Delta l_i(t), q_n(t), \Phi(t), \Pi_3(t), V_m(t), W_u(t), z_{30}(t)\}, \quad (2.5)$$

де  $(m_s/m_c)$  - співвідношення зерна та соломи по масі;

$h_1(t)$  - висота зрізу або стерні, м;

$l_2 = (h_1 + \Delta l_i)(t)$  - висота зрізу стебла, м;

$l_p(t)$  - довжина різання соломи, м;

$q_n(t)$  - пропускна здатність молотарки комбайна, кг/с;

$\Phi(t)$  - фракційний склад вороха, частка або %;

$\Pi_3(t)$  - сумарні втрати зерна за машиною, %;

$V_m(t)$  - робоча швидкість комбайна, м/с;

$W_{\text{год}}(t)$  - годинна продуктивність комбайна, т/год або га/год;

$z_{30}(t)$  - засміченість бункерного зерна, %.

Керуючими впливами в моделі є висота установки нижньої ( $h_1$ ) і верхньої ( $h_2$ ) ріжучої лінії ріжучого апарату комбайнної жнивarki, робоча швидкість руху ( $V_m$ ) зернозбирального комбайна, швидкість ріжучого елемента ( $V_{pe}$  або  $V_n$ ) ріжучого апарату, кут нахилу ріжучого елемента ( $\alpha$ ) до горизонту. У ході досліджень приймаємо припущення, що швидкості зрізу стебел верхнього та нижнього ріжучого елемента рівні між собою, тобто  $V_{pe}^B = V_{pe}^H$ . Вологість ґрунту ( $\omega_{п}$ ) є нормальною і становить 20–25%, що забезпечує рух комбайна по полю практично без буксування, а отже, не впливає на швидкісний режим роботи зернозбирального комбайна. При цьому обмолот зернових культур здійснюється у фазі початку повної стиглості зерна, то є при вологості зерна  $\omega_z = 18,0-20,0\%$  і вологості соломи  $\omega_s = 20,0-22,0\%$ .

Таким чином, результати обґрунтування інформаційної моделі технологічного процесу зернозбирального комбайна як перетворюючої технічної системи, в якій є перетворююча технічна підсистема – різальний апарат подвійного зрізу стебел, свідчить про те, що при прямому комбайнуванні зернових культур утворюється три види продукту: рослинні залишки на корені стерні; рослинні залишки у вигляді проміжного продукту певною довжини соломини на поверхні поля; рослинний продукт «стебло + колос», який зазнає технологічного впливу з боку робочих органів зернозбирального комбайна, що й

розглянемо далі.

### 2.3. Математична модель процесу прямого комбайнування зернових культур з подвійним зрізом стебел

Загальновідомо, що годинна продуктивність зернозбирального комбайна в період збирання зернових культур залежить від численних факторів і, зокрема, при виконанні процесу прямого комбайнування може бути представлена у вигляді функціональної залежності:

$$W_{год} = f(U_z, U_c, B_{ж}, V_m, q, \delta_c, \omega_c, \omega_z, \omega_{бур}, H_{ст}, l_{срс}, P_c, N_c, Z_3, V_n, d_c, K_k), \quad (2.6)$$

де  $U_z$  - врожайність хлібний маси по зерна, т/га;

$U_c$  - врожайність хлібний маси з обліком рослинної маси, т/га;

$B_{ж}$  - Ширина захвату жниварки, м. Виходячи з вищевикладеного в теоретичних дослідженнях, приймаємо еталонну ширину захвату жниварки, тобто  $B_{ж} = 6$  м;

$V_m$  - робоча швидкість комбайна, м/с;

$q$  - пропускна здатність молотарки комбайна, кг/с;

$\delta_c$  - коефіцієнт соломистості хлібний маси;

$\omega_c$  - вологість рослинної частини хлібний маси, %;

$\omega_z$  - вологість зерна хлібний маси, %;

$\omega_{бур}$  - вологість бур'янів, %;

$H_{ст}$  - висота стерні, м;

$l_{срс}$  - довжина зрізаного стебла, м;

$P_c$  - похилість стебластиї, частка або %;

$N_c$  - густина стебластиї хлібний маси, шт./м<sup>2</sup>;

$Z_3$  - Забур'яненість хлібної маси, частка або %;

$d_3$  - Діаметр стебла, м;

$V_n$  - швидкість ножа ріжучого апарату, м/с;

$K_k$  - кваліфікація оператора зернозбирального комбайну.

В загальному вигляді годинна продуктивність (га/год) зернозбирального комбайна може бути представлена в вигляді виразу:

$$W_{\text{зод}} = 0,1 \cdot B_{\text{жс}} \cdot V_M \cdot \tau_m, \quad (2.7)$$

де  $\tau_m$  - Коефіцієнт, враховує втрати часу по технологічних причин,  $\tau_m = 0,77-0,83$ .

Ширина (м) захвату жнивarki ( $B_{\text{жс}}$ ) комбайна з вирази (2.7) залежить від наступних факторів:

$$B_{\text{жс}} = \frac{q}{V_M \cdot Y_z \cdot \left(1 + \frac{1}{\delta_c}\right)}, \quad (2.8)$$

Пропускна здатність молотарки (кг/с) комбайна визначається з наступного виразу:

$$q = 0,6q_n \left(1 + \frac{1}{\delta_c}\right) \cdot \chi, \quad (2.9)$$

де  $q_n$  - паспортна пропускна спроможність молотарки комбайна, кг/с. У розрахунках  $q_n = 8,5$  кг/с, так як в районі досліджень (на прикладі Хмельницькій області) технічне переозброєння комбайнів здійснюється за рахунок машин з цією пропускною здатністю молотарки;

$\chi$  - коефіцієнт, що враховує вплив коливань подачі хлібної маси на пропускну здатність молотарки,  $\chi = 0,95...0,97$ .

При прямому комбайнуванні зернових культур у виробничих умовах у стеблостої, крім продуктивних рослин, є суцвітні, а також непродуктивні стебла, бур'яни, тому з урахуванням засміченості вираз (2.9) набуде вигляду :

$$q = 0,6q_n \left(1 + \frac{1-\varepsilon}{\delta_c + \varepsilon}\right) \cdot \chi, \quad (2.10)$$

де  $\varepsilon$  - коефіцієнт, що характеризує засміченість хлібної маси, частка або %. Виходячи з виразу (2.8) і (2.9), запишемо рівність, тобто:

$$B_{\text{жс}} \cdot V_M \cdot Y_z \cdot (1 + \delta_c) = 0,6q_n \left(1 + \frac{1-\varepsilon}{\delta_c + \varepsilon}\right). \quad (2.11)$$

Тоді після перетворень отримаємо, що:

$$V_M = \frac{0,6q_{\Pi} \left(1 + \frac{1}{\delta_c + \varepsilon}\right) \chi}{B_x \cdot Y_z \cdot (1 + \delta_c)} \quad (2.12)$$

де  $V_M$  - робоча швидкість руху комбайна, м/с (км/год).

на підставі виразів (2.7) і (2.12) можна, можливо записати, що годинна продуктивність комбайна (га/год) дорівнює:

$$W_{\text{год}} = 21,6 \frac{q_{\Pi} \left(1 + \frac{1}{\delta_c + \varepsilon}\right) \chi}{Y_z \cdot (1 + \delta_c)} \cdot \tau_T \quad (2.13)$$

Вираз (2.12) дозволяє розглянути зміну робочої швидкості комбайна в залежності від технологічних властивостей зернових культур, таких як співвідношення зерна та соломи за масою через коефіцієнт солومистості, тобто

$V_M = f(\delta_c, \varepsilon)$ . Результати розрахунків представлені рис. 2.6.

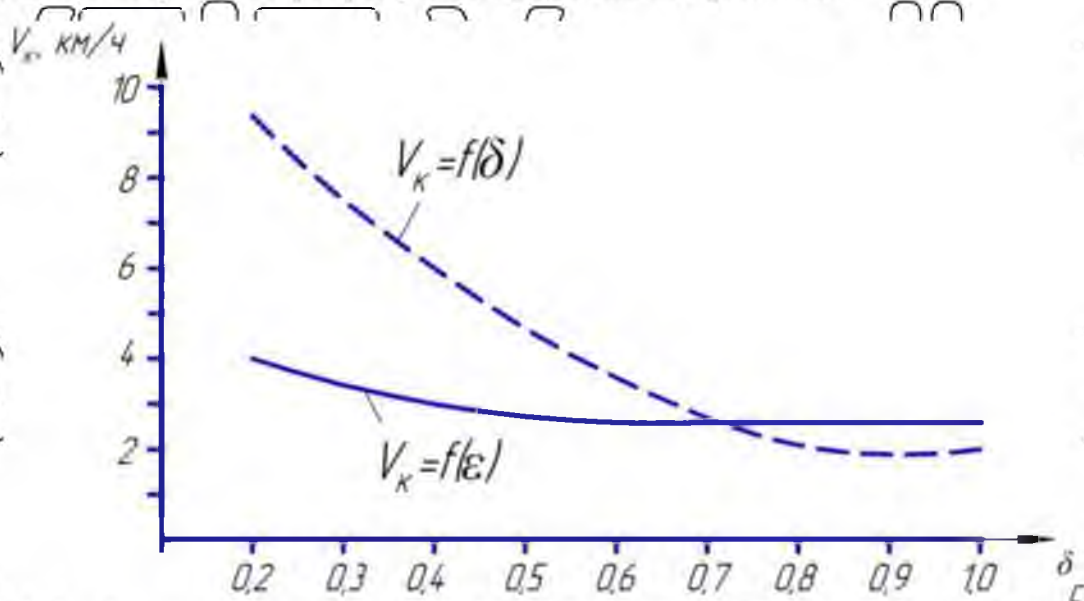


Рис. 2.6. Зміна робочої швидкості руху ( $V_M$ ) комбайна залежно від солумистості ( $\delta_c$ ) та засміченості ( $\varepsilon$ ) хлібної маси

З графічних залежностей (рис. 2.7) видно, що зі збільшенням як солумистості ( $\delta_c$ ), так і засміченості ( $\varepsilon$ ) хлібної маси при її обмолоті спостерігається зниження робочої швидкості комбайна, а отже, і годинної

продуктивності, що в результаті позначиться на термінах збирання та втрати врожаю.

Причому із залежностей (рис. 2.7) слід, що зміна робочої швидкості комбайна інтенсивніше впливає такий чинник, як солومистість хлібної маси ( $\delta_3$ ), який визначається співвідношенням  $(m_c/m_c + m_z)$ , тобто співвідношенням зерна ( $m_z$ ) і соломи ( $m_c$ ) по масі, а це є не що інше, як технологічна властивість хлібної маси. Величиною співвідношення зерна ( $m_z$ ) і соломи ( $m_c$ ) по масі можна керувати під час прямого комбайнування зернових культур за допомогою зміни довжини стебел, що зрізаються, що і розглянемо далі.

Численними дослідженнями було встановлено, що засміченість хлібної маси (стеблостою) надає подвійний вплив на годинну продуктивність комбайна, внаслідок того, що, з одного боку, бур'яни збільшують вологість хлібної маси, а з іншого – зменшують відносний вміст зерна у ній. Крім того, виявлено, що навіть за кондиційної вологості хлібної маси (14,0–16,0%) вологість бур'янів коливається у великих межах (80,0–85,0%) та фактор вологості бур'янів впливає більше на продуктивність комбайна, ніж їхня питома маса в загальній рослинності. Виходячи з цього, була виведена загальна залежність пропускної спроможності молотарки комбайна від основних технологічних властивостей або агробіологічних факторів зернових колосових культур:

$$q = 0,6q_{\text{н}} \left( 1 + \frac{1-\varepsilon}{\delta_c + \varepsilon} \right) \cdot \chi \left( 6,67 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\text{нч}}^3 - 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_{\text{нч}}^2 + 0,158 \cdot \omega_{\text{нч}} - 0,179 \right) \cdot \left( 1 - \frac{13,8 - 0,1}{Y_3^2 - Y_3} \right) \quad (2.14)$$

де  $\omega_{\text{нч}}$  - вологість незерновий частини врожаю (НЧУ), %;

$Y_3$  - врожайність зерна, кг/м<sup>2</sup>. При цьому необхідно мати в виду, що

$$Y_{\text{хл}} = Y_3 \cdot (1 + \delta_c) - \text{врожайність хлібний маси, кг/м}^2.$$

Величина вологості незерновий частини врожаю ( $\omega_{\text{нч}}$ ) може бути визначено за формулою:

$$\omega_{\text{нч}} = \frac{\omega_c \cdot \delta_c (1 - \varepsilon) + \omega_{\text{бур}} \cdot \varepsilon (1 + \delta_c)}{\delta_c + \varepsilon}, \quad (2.15)$$

де  $\omega_c$  - вологість соломини стебла під час прямого комбайнування зернових культур, %;

$\omega_{бур}$  - вологість бур'янів рослин хлібної маси, %.

У розрахунках діапазон вологості соломки стебла приймаємо в межах від 40,0 до 15,0%. Хоча практика показує, що при вологості соломи до 58,0% комбайни можуть збирати зернові культури, незважаючи на те, що в цих умовах їх технологічні можливості використовуються тільки на 10,0-15,0%. У зв'язку з чим і приймаємо обмеження по вологості стебла соломки у вищевказаному діапазоні. Нижня межа вологості відповідає кондиційній вологості зерна. Практика свідчить, що за прямого комбайнування зернових культур вологість соломки стебла найчастіше становить 18,0...20,0% і від.

В результаті розрахунків за формулами (2.14) та (2.15) отримано зміну вологості незернової частини врожаю ( $\omega_{нч}$ ) та пропускної спроможності молотарки комбайна ( $q$ ) залежно від вологості соломки стебла та бур'янів при різному ступені засміченості ( $\epsilon$ ) хлібної маси. На основі яких побудовано графічні залежності, що представлені на рис. 2.7.

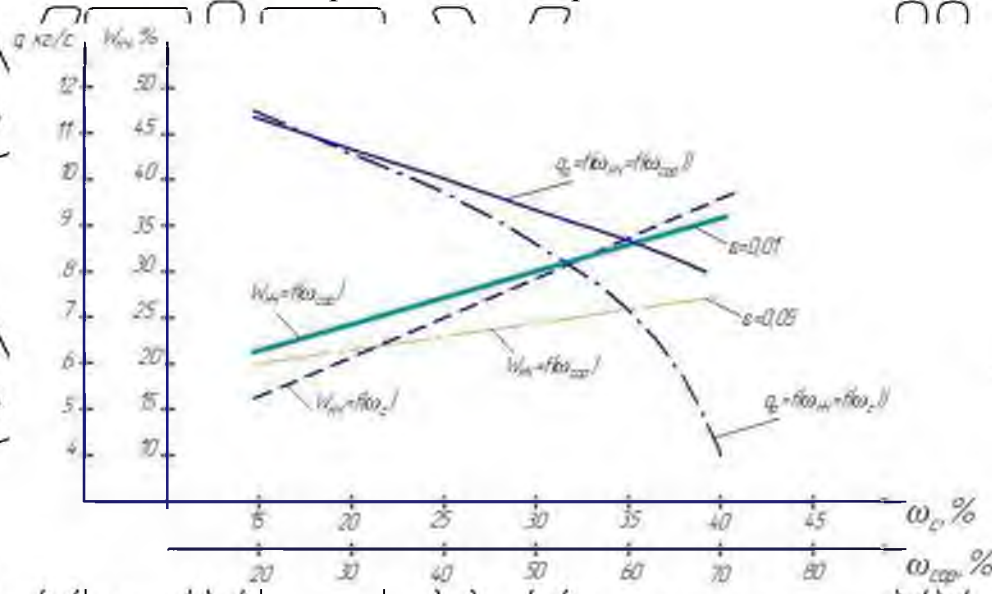


Рис. 2.7. Зміна вологості незернової частини врожаю ( $\omega_{нч}$ ) і пропускної спроможності молотарки ( $q$ ) комбайна в залежності від вологості соломки стебла ( $\omega_c$ ) та бур'янів ( $\omega_{бур}$ ).

З графічних залежностей рис. 2.8 випливає, що незалежно від об'єкта впливу (соломина стебла або бур'яни) відбувається збільшення вологості незернової частини врожаю (НЧУ) з підвищенням вологості як соломки стебла,

так і бур'янів, а внаслідок цього і зниження пропускну здатності молотарки комбайна, що, в свою черга, віддзеркалюється на робочій швидкості руху комбайна та годинної продуктивності.

В результаті теоретичних досліджень була отримана аналітична залежність виду  $\delta_c = f(\Delta l_i)$ , яка характеризується наступним виразом:

$$\delta_c = a \cdot \Delta l_i^2 - b \cdot \Delta l_i + c \quad (2.16)$$

де  $\Delta l_i$  - зменшення довжини соломини стебла від основи на лінії зрізу стерні, м. Величина  $\Delta l_i$  (0; 0,20) м;

$a, b, c$  - коефіцієнти пропорційності. Визначаються досвідченим шляхом.

Тоді робочу швидкість руху ( $V_M$ ) комбайна (формула 2.12) з враховуючи зміни коефіцієнта соломистості ( $\delta_c$ ) в залежності від висоти зрізується частини стебел можна, можливо записати як:

$$V_M = 0,6q_{II} \cdot \frac{1 + \frac{\Gamma - \varepsilon}{a \cdot \Delta l_i^2 - b \cdot \Delta l_i + c + \varepsilon}}{B_{sc} \cdot Y_{zr} \cdot (a \cdot \Delta l_i^2 - b \cdot \Delta l_i + c + \varepsilon)} \quad (2.17)$$

де  $\Delta l_i$  - зменшення довжини соломини стебла при їх зрізі, м;

$a, b, c$  - коефіцієнти пропорційності. Визначаються дослідним шляхом.

Результати розрахунку робочої швидкості руху ( $V_M$ ) комбайна та графічна залежність на рис. 2.8 показують, що зменшення довжини соломини стебла при їх зрізі під час скошування прямим комбайнуванням зернових культур позитивно впливає на робочу швидкість руху машин. З графічної залежності рис. 2.8 видно, що робоча швидкість руху комбайна ( $V_M$ ) найбільш інтенсивно збільшується при зменшенні довжини соломини стебла ( $\Delta l_i$ ) під час їх скошування при прямому комбайнуванні на довжині проміжного продукту від 0 до 0,10 м від вершини точки зрізу стерні, де найвища вологість соломини.



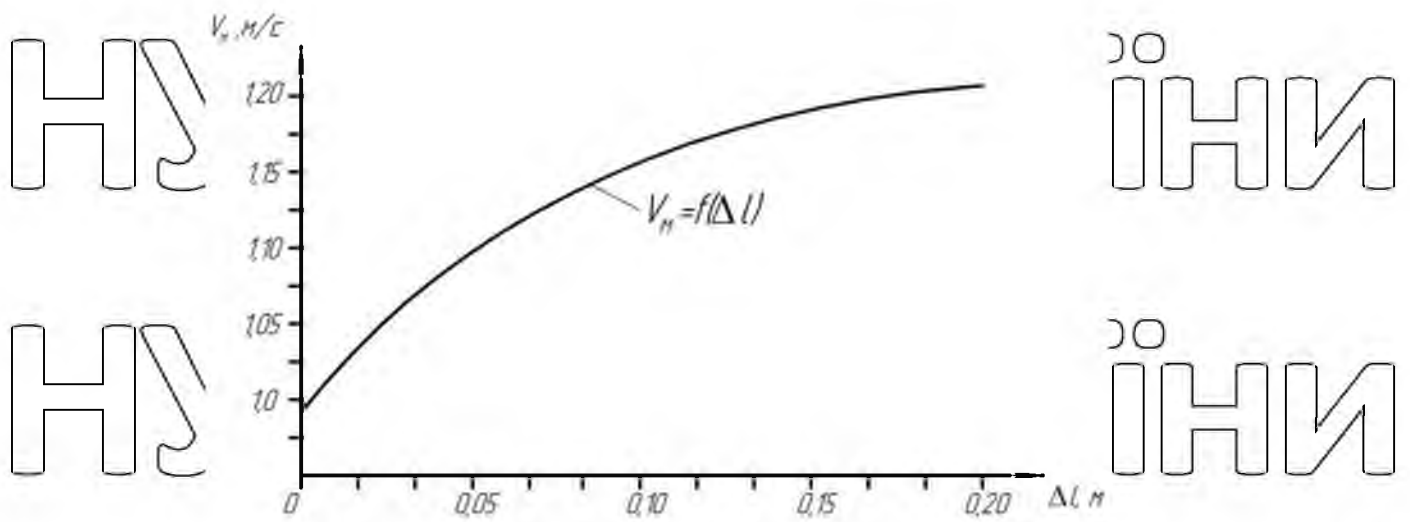


Рис. 2.8. Зміна робочої швидкості руху ( $V_m$ ) комбайна залежно від зменшення довжини соломини стебла ( $\Delta l$ ) від лінії зрізу під час прямого комбайнування зернових культур

При цьому дані таблиці 2.1 свідчать, що зменшення довжини соломини стебла від лінії зрізу при утворенні стерні до 0,10 м сприяє збільшенню робочої швидкості руху комбайна ( $V_m$ ) до 22,81% порівняно з традиційним прямим комбайнуванням зернових культур.

Таблиця 2.1

Зміна робочої швидкості руху комбайна ( $V_m$ ) залежно від зменшення довжини соломини стебла

Показник	Зменшення довжини соломини стебла під час її скошування при прямому комбайнуванні, $\Delta l$ , м			
	0	0,10	0,15	0,20
Робоча швидкість руху, м/с	0,95	1,16	1,19	1,22
Відсоток збільшення робочої швидкості, %	-	+22,81	+2,56	+5,0
	-	-	0	+2,56

Таким чином, зменшення соломистості хлібної маси (за рахунок зміни співвідношення зерна та соломи за масою за допомогою зменшення довжини стебел зернових культур в момент їх скошування при прямому комбайнуванні

дозволяє підвищити пропускну спроможність молотарки, а отже, робочу швидкість руху та годинну продуктивність комбайна, що в результаті позначиться на термінах збирання та врат врожаю. Відповідно до методологічних положень для реалізації даного технологічного прийому при прямому комбайнуванні зернових культур необхідний технічний пристрій у вигляді ріжучого апарату комбайнової жниварки нового типу.

#### 2.4. Математична модель процесу подвійного зрізу стебел

Прийнято вважати, що при русі комбайнової жниварки з сегментно-пальцевим різальним апаратом стебла рослин сільськогосподарських культур між двома сусідніми пальцями спочатку відгинаються перпендикулярно бічних поверхонь протиріжучих пластин та сегментів ножа один одному (рис. 2.9, де  $P_{cp}$  - сила зрізу;  $F_{AB}$  - сила інерції стебла для ділянки  $AB$ ;  $F_{BC}$  - сила інерції стебла для ділянки  $BC$ ;  $l_2$  - довжина ділянки  $BC$ ;  $H_{cm}$  - довжина ділянки  $AB$ ).

Рис. 2.9. Схема сил, діючих на стебло при зрізі сегментно-пальцевим



Потім стебла, ущільнюючись до дотику, перешкоджають збільшенню розмаху своїх коливань, утворюють пучок і зрізаються. При цьому кількість стебел, що зрізаються, зменшується в міру руху ножа.

На відміну від сегментно-пальцевих, конструктивні особливості ріжучих

апаратів з нескінченно тягово-ріжучим елементом з наявністю малої густоти стебел сприяють тому, що стебла рослин в залежності від їх розташування поверхні поля можуть значно відгинатися в поздовжньому та поперечному напрямках до моменту їх зустрічі з різальним елементом.

Під дією ріжучого елемента апарату з нескінченно тягово-ріжучим приводом центр ваги стебла рослин описує дугу і, відхиляючись, починає вагатися. Разом зі стеблом і колос здійснює коливальний рух у різних напрямках із певною швидкістю (рис. 2.10).

$P_{cp}^e, P_{cp}^n$  – сила зрізу відповідно у верхній та нижній точках стебла;  $F_{AB}$  – сила інерції стебла для ділянки  $AB = H_{cm}$ ;  $F_{BD}$  – Сила інерції стебла для ділянки  $BD = \Delta l = (0,10-0,15 \text{ м})$ ;  $F_{DB}$  – сила інерції стебла для ділянки  $DB = \Delta l_i = (0,10-0,15)$ ;  $F_{DC}$  – сила інерції стебла для ділянки  $DC = l_2$ .

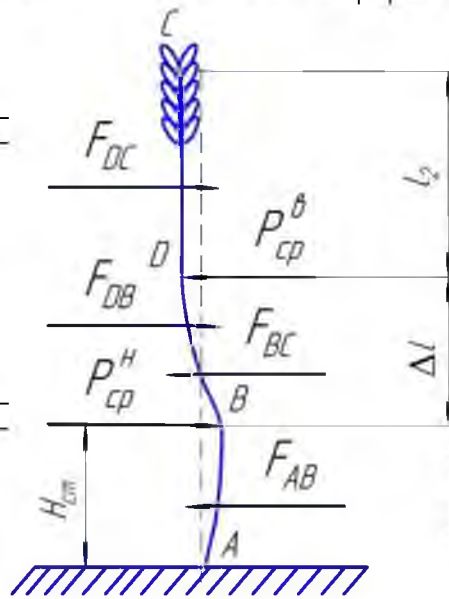


Рис. 2.10. Розрахункова схема сил, діючих при подвійному зрізі стебла різальним апаратом з нескінченно несучим приводом ріжучого елемента

При великих швидкостях різання стебло піддається впливу кружної сили інерції ( $P_{cp}$ ), отже, для описи процесу коливання рослини (Пшениці) розглянемо зріз вільного стебла (рис. 2.10). При цьому стебло розглядаємо як защемлену одним кінцем балку з однієї ступенем свободи.

З огляду на те що стебло є складною конструкцією, тилом різного опору вигину.

то будемо рахувати, що площа його поперечного перерізу постійна.

Браховуючи зроблені припущення, розв'яжемо задачу про переміщення системи із зосередженою в точці  $B$  і  $D$  докладених сил  $P_{cp}^u$  і  $P_{cp}^e$ , причому  $P_{cp}^u = P_{cp}^e$  масою  $m_{np}^u = m_{np}^e$ , під дією зазначених сил, змінюються во часу  $P_{cp} \cdot \Delta t$ .

Рівняння руху такої системи в загальному вигляді:

$$F_{yup} - P(t) = F_{in}, \quad (2.18)$$

де  $F_{yup}$  - сила пружності, відповідна пружному переміщенню  $\lambda = 1$ , чи інакше жорсткість системи;

$F_{in}$  - сила інерції еквівалентної системи.

$$F_{in} = m_{np} \frac{d^2 y}{dt^2}$$

де  $m_{np}$  - маса, зосереджена в точці прикладення сили  $P_{cp}$ .

З рівняння (2.18) слідує, що  $P(t) = F_{yup} - F_{in}$  або

$$P(t) = F_{yup} - m_{np} \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2.19)$$

Загальновідомо, що частота коливань дорівнює:

$$\omega = \sqrt{\frac{F_{yup}}{m \cdot l}} \quad (2.20)$$

де  $\omega$  - частота вагань системи,  $s^{-1}$ ;

$l$  - довжина ділянки стебла від основи до крапки удару, м;

$m$  - наведена маса ударяючого тіла до точки удару, кг.

Величину  $F_{yup}$  можна, можливо визначити з виразу (2.20) як

$$(\omega)^2 = \left( \sqrt{\frac{F_{yup}}{m}} \right)^2, \text{ тоді}$$

$$F_{yup} = \omega^2 \cdot l \cdot m \quad (2.21)$$

Вносячи зміни до виразу (2.19) з урахуванням виразу (2.21), отримаємо:

$$P(t) = \omega^2 \cdot l \cdot m - m_{np} \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2.22)$$

При ударі по стеблі останньому повідомляється імпульс:  $P \cdot \Delta t = m_{np} \cdot V_p$ , де  $V_p$  - швидкість тіла, що ударяється, м/с;  $m_{np}$  - маса, зосереджена в точці докладання сили. Тоді вираз (2.22) з урахуванням рівності  $P \cdot \Delta t = m_{np} \cdot V_p$  має

таке рішення:

$$y = \frac{m_{np} \cdot V_p}{M \cdot \omega} \sin \omega t \quad (2.23)$$

де  $y$  - переміщення точки приведення маси стебла, а саме прогин в місці удару;

$M$  - маса, зосереджена в точці удару, причому  $M = m_{np} + m$ , де  $m$  - прикладена до точки удару маса тіла, що ударяється, кг.

Для випадку подвійного зрізу стебел в загальному вигляді  $M$  можна, можливо записати як:

$$M = (m_{np}^e + m_2) + (m_{np}^h + m_1) \quad (2.24)$$

де  $m_1$  та  $m_2$  - відповідно наведена до точки удару нижнього і верхнього ріжучого елемента маса тіла, що ударяється (стебла), кг;

$m^h$  і  $m^e$  - маса, зосереджена в точці докладання сили  $P^h$  і  $P^e$  відповідно нижнього та верхнього тягово-ріжучого елемента ріжучого апарату жнивarki, кг. При цьому величина  $m_{np}^h = m_{np}^h$  та  $m_{np}^e = m_{np}^e$ ;

$\omega$  - частота вагань системи,  $s^{-1}$ .

Тоді вираз (2.28) для випадку подвійного зрізу стебел можна, можливо записати:

$$\begin{cases} y = \frac{m_{np}^e \cdot V_p}{(m_{np}^e + m_2) \cdot \omega} \sin \omega t \\ y = \frac{m_{np}^h \cdot V_p}{(m_{np}^h + m_1) \cdot \omega} \sin \omega t \end{cases} \quad (2.25)$$

З виразу (2.25) слід, що прогин стебла у місці удару прямо пропорційний швидкості тіла, що ударяється ( $V_p$ ) і назад пропорційний масі ( $M$ ), зосередженої в точці удару, тобто зрізу стебла.

Якщо в процесі зрізу стебел, як правило, до леза ріжучого елемента нижньої та верхньої тягової гілки ріжучого апарату підводиться група стебел числом ( $n$ ), то час зрізання визначиться як сума:

$$t_{cp} = \sum_{i=1}^n t_{cp}^{cm} \quad (2.26)$$

де  $n$  - число стебел в підведеній групі, шт.

Для зменшення величини  $t_{cp}$  вирази (2.26) необхідно зменшити величину часу зрізу  $t_{cp}^{cm}$  за допомогою зміни лінійної швидкості ріжучих елементів за рахунок оборотів валів приводу ріжучого апарату, що в свою черга позначиться і величині відгину стебел ( $f_{гд}$ ) ділянці  $AB$  і особливо ділянці  $DC$ , і якісних показниках процесу зрізу рослин.

При цьому необхідно врахувати той факт, що при виконанні процесу зрізу стебел утворюється не тільки їх відгин, а й вигин, який можна приблизно у наступному вигляді: частини стебла до моменту їх контакту з ріжучою кромкою елемента не мають кривизни (рис. 2.11).

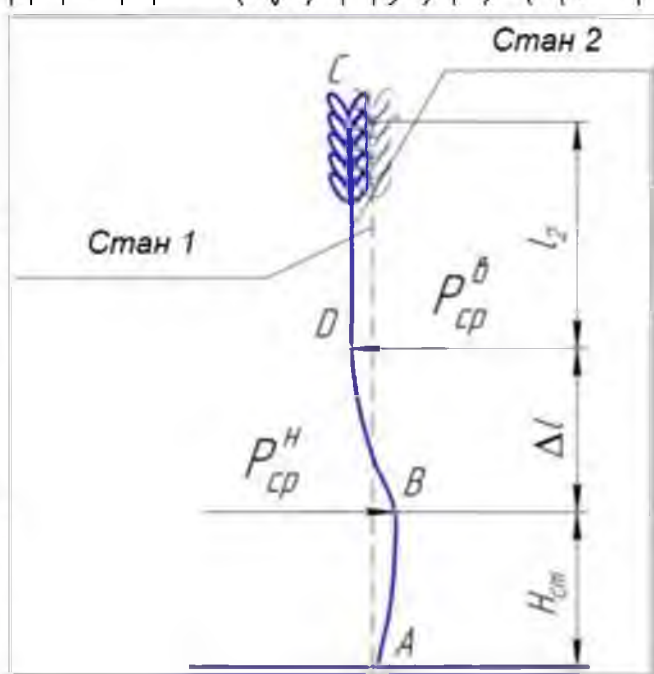


Рис. 2.11. Розрахункова схема сил, що діють на стебло у процесі подвійного зрізу

Кривизна частин стебла утворюється (стан 2) і зростає в момент їх контакту з ріжучою кромкою елементів у точках  $D$  на ділянці стебла  $BD$  або  $\Delta l$ , і частково

на ділянці  $AB$  або  $H_{cm}$ , тобто на відстань  $(H_{cm} + \Delta l_i)$  та  $H_{cm}$  від опори стебла. Кожен вигнуту ділянку стебла можна розглядати як бачку, завантажену по кінцях силами  $+P_{cp}^n$  та  $-P_{cp}^e$  - діючими у взаємно протилежні сторони. При цьому можливі два випадку, коли  $+P_{cp}^n(t) = -P_{cp}^e(t)$  і  $+P_{cp}^n(t_1) \neq -P_{cp}^e(t_2)$ , тобто дія сил може бути одночасно або різночасно.

З рис. 2.11 слід, що вигнуте стебло впливає зусиллям від вигину на ріжучі кромки елементів ріжучого апарату тільки близько точок  $B$  і  $D$ . Кожне стебло впливає зусиллям на ріжучу крайку елементів від вигину, яку, згідно з роботою, можна представити як:

$$\begin{cases} +P_{cp}^e \\ -P_{cp}^e \end{cases} = \begin{cases} \frac{E \cdot J_c}{H_{cm} + \Delta l_i} \\ \frac{E \cdot J_c}{H_{cm}} \end{cases} \quad (2.27)$$

де  $H_{cm}$  - відстань від точки  $A$  загортання стебла у ґрунті до точки  $B$  прикладання сили  $-P_{cp}^n$ , тобто висота стерні, м;  
 $\Delta l_i$  - відстань від точки  $A$  прикладання сили  $-P_{cp}^n$  до точки прикладання  $+P_{cp}^e$ , то є проміжний продукт соломини.

Жорсткість стебла  $(E \cdot J_c)$ , яка, як показують дослідження, залежить від його фізико-механічних властивостей та діаметра  $(d_c)$ , змінюється по висоті стебла згідно з виразом (2.36):

$$d_c = r - z \cdot l_c^2 - w l_c \quad (2.28)$$

де  $l_c$  - довжина стебла від основи до колоса (нижня, середня, приколосова частина), м;

$r, z, w$  - коефіцієнти обумовлені досвідченим шляхом.

Система рівнянь вирази (2.27) справедливі для випадку, коли  $+P_{cp}^n(t) = +P_{cp}^e(t)$ , то є додані одночасно. При цьому можливий випадок, коли  $-P_{cp}^n(t_2) \neq -P_{cp}^e(t_1)$ , тобто сили прикладені до стебла рівномірно, причому  $t_2 \gg t_1$ , що означає зріз стебла в точці  $B$  із запізненням на величину  $\Delta t$  тому  $t_2 = t_1 + \Delta t$ . Даний випадок можна відобразити системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{cp}^e = \frac{E \cdot J_c}{H_{cm} + \Delta l} \\ P_{cp}^h = \frac{E \cdot J_c}{H_{cm}} \end{array} \right. \quad (2.29)$$

Через будь-яке переріз ріжучою кромки елементів ріжучого апарату в одну секунду проходить число стебел  $L_{pk} / d_c$  де  $L_{pk}$  – довжина ріжучої кромки елемента, м;  $d_c$  – діаметр одного стебла, м.

Число одночасно згинальних стебел дорівнює  $\frac{L_{pk}}{d_c} \cdot \frac{V_m}{V_p}$ , де  $V_m$  – робоча

швидкість зернозбирального комбайна, м/с;  $V_p$  – поступальна швидкість ріжучої кромки елементів, м/с. Зусилля всіх згинальних на ріжучі кромки елементів в випадку, коли  $+P_{cp}^h(t) = -P_{cp}^e(t)$  дорівнює:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum P_{cp}^e = \frac{E \cdot J_c \cdot L_{pk} \cdot V_m}{(H_{cm} + \Delta l) \cdot d_{c2} \cdot V_p} \\ \sum P_{cp}^h = \frac{E \cdot J_c \cdot L_{pk} \cdot V_m}{H_{cm} \cdot d_{c1} \cdot V_p} \end{array} \right. \quad (2.30)$$

де  $d_{c1}$  і  $d_{c2}$  – відповідно діаметр стебла в точках зрізу  $B$  і  $D$ , м.

У цьому випадку необхідно враховувати той факт, що число одночасно згинальних стебел при одночасно подвійному їх зрізі визначатиме діаметр стебла  $d_{c1}$  у точці  $B$ , оскільки він завжди більший за діаметр стебла  $d_{c2}$  точки  $D$  ( $d_{c1} > d_{c2}$ ).

З системи рівнянь виразу (2.30) випливає, що зусилля згинальних стебел на ріжучі кромки елементів залежить від місць застосування сил технологічного впливу робочих органів ріжучого апарату по висоті стебла ( $H_{cm}$  і  $H_{cm} + \Delta l$ ).

Крім цього, з виразу (2.30) випливає, що зусилля згинальних стебел на ріжучі кромки елементів визначаються робочою швидкістю ( $V_m$ ) зернозбирального комбайна та поступальною швидкістю ( $V_p$ ) ріжучих елементів. З рівнянь видно, що зусилля ( $P_{ze}$ ) згинальних стебел прямо пропорційні робочій



швидкості зернозбирального комбайна і обернено пропорційні швидкості ріжучою кромки односторонніх елементів різального апарату. Практично це означає, що зі збільшенням робочої швидкості руху ( $V_u$ ) зернозбирального комбайна зусилля згинальних стебел на ріжучі кромки елементів збільшуються, їх можна зменшити тільки за рахунок зміни швидкості ( $V_p$ ) ріжучої кромки елементів у більшу сторону.

Крім того, з рівнянь виразу (2.30) видно, що фізико-механічні властивості (жорсткість) стебла диференційовані за його висотою. Диференціація жорсткості стебла по висоті через різний діаметр (більший у основи ( $d_{c1}$ ) і менший у приколосової частини ( $d_{c2}$ )) свідчить про необхідність передбачити додаткову опору для стебла у ріжучих елементів верхньої гілки ріжучого апарату з нескінченно-несучим приводом.

Таким чином, викладене вище свідчить, що для реалізації процесу подвійного зрізу стебел необхідно звести до мінімуму їх відгин, а також вигин стебел під час зрізу, що можливо здійснити за рахунок обґрунтованих конструктивно-режимних параметрів роботи ріжучого апарату з нескінченно-несучими різальними елементами та їх ув'язування з робочою швидкістю руху комбайну. У зв'язки з чим далі розглянемо закономірності взаємозв'язку між швидкістю ріжучих елементів ріжучого апарату та робочою швидкістю руху зернозбирального комбайна

1. Виходячи з методологічних положень системного аналізу, обґрунтовано методичні підходи до розробки математичної моделі процесу прямого комбайнування зернових культур із подвійним зрізом стебел. Розроблено інформаційну модель технологічного процесу зернозбирального комбайна як перетворюючої технічної системи, в якій передбачається технічна підсистема у вигляді ріжучого апарату з подвійним зрізом стебел.

2. У ході аналізу математичної моделі процесу прямого комбайнування зернових культур отримано закономірності та залежності, що розкривають зміну результуючого критерію – годинної продуктивності зернозбирального комбайна

від таких технологічних властивостей зернових, як соломистість хлібної маси (тобто співвідношення зерна та соломи за масою) та засміченості. Встановлено взаємозв'язок між робочою швидкістю руху, годинною продуктивністю та коефіцієнтом соломистості хлібної маси, що взаємопов'язана з довжиною стеблостою. При цьому взаємозв'язок між коефіцієнтом соломистості хлібної маси та зменшенням довжини стеблостою описується рівнянням 2-го порядку.

3. Виявлено, що зменшення довжини стеблостою зернових при їх скошуванні за рахунок утворення проміжного продукту соломини (довжиною 0,10 м) стебла сприяє збільшення робочої швидкості руху комбайну.

Так, розрахунки показують, що за рахунок цього можна збільшити робочу швидкість комбайна на 23,0%, що пов'язано з більш ефективним використанням пропускнув спроможності молотарки, а це підвищення годинної продуктивності, а отже, і скорочення термінів збирання та втрат урожаю. Збільшення довжини проміжного продукту до 0,15–0,20 м призводить до підвищення робочої швидкості руху комбайна відповідно на 2,4 та 5,0 % щодо довжини проміжного продукту. 0,10 м.

4. Встановлено, що для здійснення процесу подвійного зрізу стебел зернових доцільна перетворююча підсистема зернозбирального комбайна у вигляді ріжучого апарату жниварки з нескінченно тягово-ріжучим елементом. Виходячи з цього було обгрунтовано математичну модель, в якій взаємопов'язані між собою основні параметри ріжучого апарату та фізико-механічні властивості стебел зернових культур. З моделі випливає, що для реалізації цього процесу необхідно звести до мінімуму відгин і вигин стебел під час їх зрізу, чого можна досягти за рахунок обгрунтованих конструктивно-кінематичних режимів роботи ріжучого апарату з нескінченно тягово-ріжучим елементом та їх ув'язування з робочою швидкістю руху комбайна.

В результаті розгляду взаємозв'язку між поступальним швидкістю різального елемента та робочою швидкістю руху комбайна отримані закономірності та залежності, з яких випливає, що крок між ріжучими кромками елементів залежить як від робочої швидкості комбайна, так і їх поступальної

швидкості. Визначено, що зі збільшенням робочої швидкості руху комбайна з 1,4 до 2,8 м/с необхідно крок між ріжучими кромками елементів зменшити з 29,4 до 16,3 мм при частоті обертання валу приводу зірочки ріжучого апарату  $67 \text{ s}^{-1}$  (640 об/хв) і з 36,0 до 19,5 мм при частоті обертання валу  $83,7 \text{ s}^{-1}$  (800 об/хв). При цьому крок між ріжучими кромками елементів практично не залежить від конструктивних параметрів ріжучого апарату, як радіус приводної зірочки та висоти ріжучої кромки елемента. Крок між ріжучими кромками елементів може бути збільшений з підвищенням поступальної швидкості, особливо після значення 8,0 м/с.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

### 3. МЕТОДИКА І ПРОГРАМА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для підтвердження теоретичних положень у роботі планувалося проведення експериментальних досліджень, у ході яких визначалися значення фактів, що характеризують параметри процесу прямого комбайнування зернових культур з подвійним зрізом стебел та їх кількісним описом зв'язком. У загальному вигляді схема досліджень базується на активному та пасивному експериментах.

Метод дослідження визначають спостереження і досвід, а дослідження спрямовані на вивчення експлуатаційно-технічних та кількісних параметрів процесу прямого комбайнування зернових культур із подвійним зрізом стебел та елементів технічного пристрою подвійного зрізу стебел.

Основою проведення експериментальних досліджень є програма робіт, а також методика вимірювань параметрів досліджуваних закономірностей і їхня оцінка. У ході проведення експериментальних досліджень використовувалися методичні положення та рекомендації.

#### Програма експериментальних досліджень

У ході експериментальних робіт необхідно вирішувати наступні завдання:

1. Визначити умови проведення експериментальних досліджень.
2. Встановити закономірності висоти стебла зернових культур, а також співвідношення ваги зерна та соломи, діаметра стебел від їх довжини (висоти), вологості зерна та соломи при обмолоті хлібної маси прямим комбайнуванням.
3. Дослідити техніко-експлуатаційні параметри технічного пристрою подвійного зрізу стебел зернових культур.
4. Встановити залежність робочої швидкості комбайнів КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ", "Джон-Дір" серії 9500 від зміни висоти зрізу стебел прямим комбайнуванням зернових культур.
5. Визначити втрати зерна за комбайнами під час прямого комбайнування зернових культур із високим зрізом стебел.

6. Перевірити ефективність елементів прямого комбайнування зернових культур із високим зрізом стебел у виробничих умовах.

Рішення висунутих програмою завдань здійснювалося на основі відомих методик досліджень, які визначають спосіб та необхідні засоби для вирішення поставленого завдання.

### 3.1. Встановлення закономірностей зміни експлуатаційно-технологічних показників елементів процесу прямого комбайнування зернових культур з високим зрізом стебел

#### 3.1.1. Планування експерименту при визначенні експлуатаційно-технологічних показників зернозбиральних комбайнів

При оцінці елементів процесу прямого комбайнування зернових колосових культур з подвійним зрізом стебел (пшениця) на базі комбайнів КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" (рис. 3.1 а) та «Джон-Дір» серії 9500 (рис. 3.1 б) проводилася експериментально-дослідна робота в наступній послідовності: знімалася агробіологічна характеристика (біометричні параметри) зернових культур;

знімалася агробіологічна характеристика зернових культур (пшениця) перед прямим комбайнуванням вибраних ділянок поля:



а) КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ"

б) "Джон-Дір" серії 9500

Рис. 3.1. Зернозбиральний комбайн КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" і «Джон-

Дір» серії 9500 з жниварками на прямому комбайнуванні зернових культур

– визначалися показники роботи комбайнів «Вектор-410» та «Джон-Дір» серії 9500 на прямому комбайнуванні зернових культур з нормальним та високим зрізом стебел;

– фіксувалася зміна якісних показників бункерного зерна за комбайнами «Вектор-410» та «Джон-Дір» серії 9500 на комбайнуванні зернових культур нормальному та високому зрізі стебел;

– визначалися показники роботи подрібнювача-розкидача соломи (НРС) незернової частини врожаю (НЧВ) комбайнів на прямому комбайнуванні зернових культур при нормальному та високому зрізі стебел.

На підставі виконаної роботи з пасивного експерименту отримуємо експлуатаційно-технологічні показники зернозбиральних комбайнів «Вектор-410» та «Джон-Дір» серії 9500 на прямому комбайнуванні зернових культур з високим зрізом стебел.

### **3.1.2. Встановлення агробіологічної характеристики зернових культур перед прямим комбайнуванням**

Перед прямим комбайнуванням зернових культур (пшениця) кожному ділянці визначалися біометричні параметри, такі, як середня висота рослин, густина, вологість зерна і соломи, засміченість. Характеристика на кожній ділянці поля знімається за методикою – Програма та методи випробувань зернозбиральних машин. Основними показниками є:

- культура, сорт;
- похилість рослин;
- розподіл колосся по висоті, %;
- довжина колоса, м;

- ставлення ваги зерна до вагою соломи;
- вологість зерна і соломи, %;
- врожайність зерна, ц/га.

Біометричні параметри зернових культур (пшениця) визначаємо з урахуванням відомих методик.

При визначенні вологості зерна та соломи відбір проб здійснюємо з різних місць вихідного матеріалу з таким розрахунком, щоб відібрані проби характеризували весь матеріал, що обробляє. Вологість зерна та соломи визначаємо вологомірами з похибкою не більше 1,5% при вологості до 25,0% та у разі потреби через сушильну шафу.

### 3.1.3. Визначення експлуатаційно-технологічних показників роботи зернозбирачів комбайнів

На контрольних ділянках - ділянках (рис. 3.2) визначається висота стеблостої, вологість зерна та соломи на основі ГОСТ 70.8.1-81 (Програма та методи випробувань). на одному полі з однаковою врожайністю виділяють ділянки - ділянки довжиною гону 30 метрів. При цьому до кожного ділянки додатково приєднується ділянка довжиною 25-30 метрів для розгону та виходу комбайна на відповідний швидкісний режим.



Рис. 3.2. Контрольні ділянки

Ступінь впливу зміни умов у процесі експерименту, тобто стаціонарність досліджуваного процесу прямого комбайнування зернових культур з подвійним або високим зрізом стебел, визначаємо за рахунок роботи одного

комбайна на різних швидкісних режимах у 3-кратній повторності, що відповідає умові повторюваності експерименту.

При дослідженні визначаємо експлуатаційно-технологічні показники роботи комбайна контрольними дослідками, тривалість яких дорівнює витратам часу на обробку контрольного гону ділянки - ділянки з певною робочою швидкістю. Кількість контрольних дослідів щонайменше 3 штук.

Зміна умов експерименту в цілому, тобто процесу прямого комбайнування зернових культур з високим зрізом, визначаємо фотохронометраж швидкісних режимів роботи 2-3 комбайнів на контрольних ділянках-ділянках, це відповідає умові повторюваності експерименту. Цим фіксуємо вплив урожайності зернових культур на швидкісний режим роботи комбайна.

Полеві дослідження роботи комбайнів під час прямого комбайнування зернових культур здійснюємо за такою схемою:

1. На контрольній ділянці - ділянці довжиною 30 м проводимо пряме комбайнування зернових (пшениця) на швидкісному режимі 1,4 м/с та висоті зрізу стебел від основи - 0,10 м. Потім комбайн зупиняється, і з бункера береться проба зерна вагою 3,0 кг для аналізу за якісними показниками ГОСТ 13586,2-83. Після цього на ділянці - ділянці проходу комбайна визначаються втрати зерна колосом за комбайном відповідно до приватних методик. Одночасно з цим на площі рамки 0,5 м<sup>2</sup> збирається подрібнена солома врожаю (рис. 3.3 б), яка після збирання зважується на електронних терезах. При цьому продукт подрібнення соломи фракціонується за даними подрібнення: 0,01 м; 0,01-0,05 м; більше 0,05 м. Отримані фракції зважуються на електронних терезах, і далі визначається їх відсоткове співвідношення. Усі виміри проводяться у 3-кратній повторності.

2. Далі на контрольній ділянці-ділянці з довжиною гону 30 м, а також із додатковою резгінною смугою довжиною 25-30 метрів здійснюємо пряме комбайнування зернових культур на висоті зрізу стебел 0,15 м від основи при швидкісному режимі роботи комбайна 1,4-2,5 м/с. Після обмолоту хлібної



маси контрольної ділянки зупиняється комбайн та береться проба зерна з бункера вагою 3,0 кг для аналізу за якісними показниками ГОСТ 13586.2-83. Крім того, визначаються втрати зерна за комбайном та показники якості подрібнення соломи так само, як у пункті 1.



а) взяття проб на втрати зерна колосом за жнивркою комбайна



б) взяття проб на подрібнення соломи ПРС комбайна

Рис. 3.3. Взяття проб на контрольних ділянках роботи комбайнів

3. Далі на контрольній ділянці-ділянці з довжиною гсн 30 м, а також із додатковою розгінною смугою довжиною 25-30 метрів здійснюємо пряме комбайнування зернових культур на висоті зрізу стебел 0,15 м від основи при швидкісному режимі роботи комбайна 1,4-2,5 м/с. Після обмолоту хлібної маси контрольної ділянки зупиняється комбайн та береться проба зерна з бункера вагою 3,0 кг для аналізу за якісними показниками ГОСТ 13586.2-83. Крім того, визначаються втрати зерна за комбайном та показники якості подрібнення соломи так само, як у пункті 1.

4. Після даних вимірів здійснюємо наступний польовий досвід, у якому на контрольній ділянці-ділянці з урахуванням розгінної смуги проводимо пряме комбайнування зернових культур (пшениця) на висоті зрізу стебел 0,20-0,25 м та швидкісному режимі роботи комбайна 1,4-2,5 м/с. Далі виконуються виміри відповідно до першого пункту.

5. Потім проводимо серію дослідів, у яких на окремих контрольних ділянках-ділянках довжиною 30 метрів, а також з наявністю додаткової смуги

розгінної довжиною 25 метрів здійснюємо пряме комбайнування пшениці на висоті зрізу стебел 0,20 м від основи при швидкісних режимах роботи комбайна відповідно: 1, 4 м/с; 1,9 м/с; 2,5 м/с. У кожному досвіді з бункера береться проба зерна вагою 3,0 кг для аналізу за якісними показниками ГОСТ 13586.2-83, а також визначаються втрати зерна колосом за комбайном. Якісні показники подрібнення соломи оцінюються відповідно з методичними положеннями першого пункту даного підрозділу. Усі виміри проводяться у 3-кратній повторності.

Отримані експериментальні дані заносяться до журналу обліку та реєстрації та надалі обробляються методами статистичної теорії.

### **3.2. Встановлення закономірностей зміни параметрів технічного пристрою подвійного зрізу стебел зернових культур**

#### **3.2.1. Планування активного експерименту при визначення параметрів технічного пристрою подвійного зрізу стебел**

Для дослідження впливу основних факторів на процес подвійного зрізу стебел (культура – пшениця), а також обґрунтування його режимів була розроблена наступна програма експериментальних досліджень:

1. Проектування та виготовлення експериментальної установки подвійного зрізу стебел зернових культур.
2. Дослідження впливу основних конструктивних та режимних параметрів технічного пристрою на процес подвійного зрізу стебел.
3. Визначення якісних показників процесу подвійного зрізу стебел зернових культур.

Для реалізації програми активного експерименту було обрано фактори та обґрунтовано опрацювання результатів досліджень. З безлічі факторів, що впливають на процес подвійного зрізу стебел, було обрано два основні:  $t(X_1)$  - крок розміщення ріжучих елементів, м;  $V_p(X_2)$  - робоча швидкість руху комбайна, м/с. Межі зміни факторів наведено в таблиці 3.1.

Інтервали варіювання факторів виявлялися на основі теоретичних

досліджень другого розділу роботи та вивчення робіт вчених, виконаних по зрізу стебел зернових колосових культур, а також виходячи з конструктивних особливостей лабораторної установки та технологічних умов процесу подвійного зрізу стебел зернових культур.

Таблиця 3.1

Умови планування	Фактори і межі їх зміни		
	Кодоване значення	Значення факторів в точках плану	
		$X_1$	$X_2$
		$t, \text{ м}$	$V_p, \text{ м/с}$
Основний інтервал	0	0,025	5,0
Інтервал варіювання		0,025	2,5
Верхній рівень	+1	0,05	7,5
Нижній рівень	-1	0	2,5

Досліди проводились у триразовій повторності. Постановка паралельних дослідів, як правило, не дає результатів, що повністю збігаються, тому оцінюємо помилку відтворюваності по паралельним дослідом. Для чого визначаємо дисперсію відтворюваності за даними паралельних спостережень. Потім проводимо перевірку однорідності дисперсії за допомогою критерію по зерну, розрахункове значення якого порівнюємо з табличними даними. Перевірку окремих коефіцієнтів у регресії на значущість проводили за допомогою критерію  $t$ -Студента при рівні значущості – 0,05. Адекватність перевіряємо за критерієм Фішера за рівня значущості – 0,05.

Як критерій оптимізації було обрано показник – довжина проміжного продукту зрізу стебла зернових культур (пшениця).

### 3.2.2. Опис експериментальної установки подвійного зрізу стебел зернових культур

Для реалізації запропонованого процесу зрізу стебел зернових культур було розроблено та запатентовано технічне рішення (патент № UA2547434).

Даний технічний пристрій реалізується таким чином: на зернозбиральний комбайн навішується жниварка з різальним апаратом на нескінченному тяговому

елементі, причому кромки ріжучих елементів розташовані в площині паралельній осі обертання провідних зірочок, тим самим забезпечується подвійний зріз стебел зернових культур. Для його реалізації пристрій містить раму, на якій встановлені два приводи зі зірочками з натягнутим нескінченним тяговим елементом з ріжучими елементами.

Для підтвердження запропонованого способу зрізу стебел зернових культур розроблено лабораторну установку, на якій проводились експерименти в лабораторних умовах з метою можливості варіювання параметрами дослідів та розміщення вимірювальних приладів для контролю технологічного процесу. Схема лабораторної установки представлена рис. 3.4.

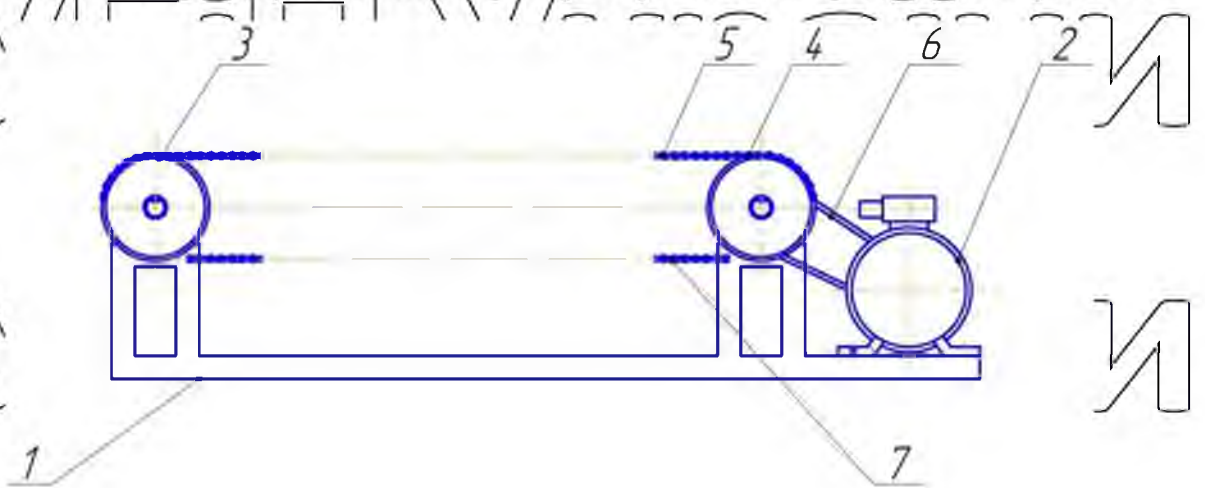


Рис. 3.4. Схема лабораторної установки по вивченню процесу подвійного зрізу стебел зернових культур

Розроблена лабораторна установка (рис. 3.6) включає: 1 – несуча рама, 2 – тяговий елемент, 3,4 – приводні зірочки, 5 – ріжучі елементи, 6 – кронштейни кріплення ріжучих елементів, 7 – електродвигун.

Основний робочий орган – це тяговий ланцюг (крок ланцюга – 19 мм), на якому змонтовані кронштейни, а на них кріпляться ріжучі елементи у вигляді сегментів. Привід тягового ланцюга здійснюється через шків передачею від електродвигуна марки АОМ 22.2, частоту обертів якого змінюємо за допомогою частотного перетворювача марки Веспер Е2-8300-003Н. Загальний вигляд лабораторної установки наведено рис. 3.5.



Рис. 3.5. Лабораторна встановлення для вивчення процесу подвійного зрізу

стебел зернових культур

У ході проведення експериментальних досліджень були використані відповідні вимірювальні засоби.

### 3.3.3. Методика дослідження параметрів процесу подвійного зрізу стебел на лабораторній установці

Для визначення основних закономірностей процесу подвійного зрізу стебел необхідно вивчити вплив швидкісних режимів різальних елементів, а також їх розміщення (крок) на тяговому ланцюгу та подачу стебел у зону різання на якісні показники довжини проміжного продукту.

Вивчення впливу вищезазначених факторів на процес подвійного зрізу стебел дозволить встановити зміни якісних показників зрізу стебел зернових культур та оцінити технологічну надійність процесу, що розробляється.

Мета активного експерименту: встановити вплив конструктивно-режимних параметрів технічного пристрою на якісні показники зрізу стебел зернових культур і оцінити технологічну надійність процесу, що розробляється.

Згідно з розробленою схемою досліджень у дослідах використовуються стебла пшениці з вологістю від 18,0% до 25,0%. Цей діапазон вологості соломини стебла було обрано з метою наближення лабораторних досліджень до виробничих умов, оскільки під час прямого комбайнування зернових культур в

умовах Хмельницької області вологість соломи змінюється від 16,0 до 27,0%.

Для визначення впливу лінійної швидкості ріжучих елементів на якісні показники зрізу стебел і на технологічну надійність процесу подвійного зрізу стебел було змінено її в діапазоні від 2,5 до 9 м/с, що відповідало результатам теоретичних досліджень. При цьому подання стебел (шт./на 20 мм) була постійною і становила 3–5 шт./20 мм, що відповідало густоті стеблостою – 250 шт./м<sup>2</sup>. Вплив кроку розміщення ріжучих елементів на тяговому ланцюгу на якісні показники зрізу стебел було виявлено при лінійній швидкості ріжучого елемента, що дорівнює 5,0–9,0 м/с та подачі стебел (3–5 шт./на 20мм), що відповідало густоті стебла 250 шт./м<sup>2</sup> і при вологості соломи стебел - 20,0%.

Результати експериментів заносяться до журналу обліку та реєстрації, які у подальшому обробляються методами статистичної теорії.

### **3.4. Методика обробки експериментальних даних і оцінки похибки**

#### **вимірюваних величин**

Методичною основою обробки експериментальних даних служить теорія математичної статистики та випадкових величин.

Обробка результатів дослідів, а також обчислення розрахункових значень результуючих критеріїв проводимо з використанням пакетів наказових програм Mathcad14 та Microsoft Excel 2007.

Теоретичні дослідження свідчать, що для їх підтвердження необхідно застосувати як пасивний, так і активні експерименти, для проведення яких були розроблені програми їх реалізації і приватні методики по визначенню основних параметрів.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

##### 4.1. Визначення експлуатаційно-технологічних показників роботи зернозбиральних комбайнів під час збирання зернових культур прямим комбайнуванням з високим зрізом стебел

Експлуатаційно-технологічні показники роботи зернозбиральних комбайнів при збиранні зернових культур прямим комбайнуванням з високим зрізом стебел визначалися у виробничих умовах лісостепової зони Хмельницької області в господарствах.

Так, виробнича перевірка процесу прямого комбайнування зернових культур з високим зрізом стебел комбайном КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" із жнивваркою РСМ 081.27 (6,0 м) показала можливість підвищення робочої швидкості руху машин. Комбайнування зернових культур з більш високим зрізом стебел на підвищених робочих швидкостях руху практично можливо, оскільки втрати зерна зрізаним колосом за жнивваркою, незважаючи на їх зростання, залишаються в межах агротехнічних вимог (1,0 % – при збиранні прямостоячих та 1,5 % для полеглих), про що свідчать графічні залежності рис. 4.1 та 4.2.

З залежностей рис. 4.1 та 4.2 видно, що при підвищенні висоти скошування пшениці та утворенням стерні заввишки від 0,15 до 0,30 м за постійної робочої швидкості руху комбайна КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ", що дорівнює 1,4 м/с, спостерігається зростання втрат зерна колосом за жнивваркою (рис. 4.1) у 1,88 рази (до 0,45%). Проте дані втрати зерна колосом знаходяться в агротехнічних допустимих межах (1,0% за жнивваркою). Зі збільшенням робочої швидкості руху комбайна «Вектор-410» з 1,4 м/с (5,0 км/год) до 2,5 м/с (9,0 км/год), як видно з рисунка 4.1, проглядається тенденція зростання втрат зерна колосом за жнивваркою до 0,44% чи 1,1 разу.

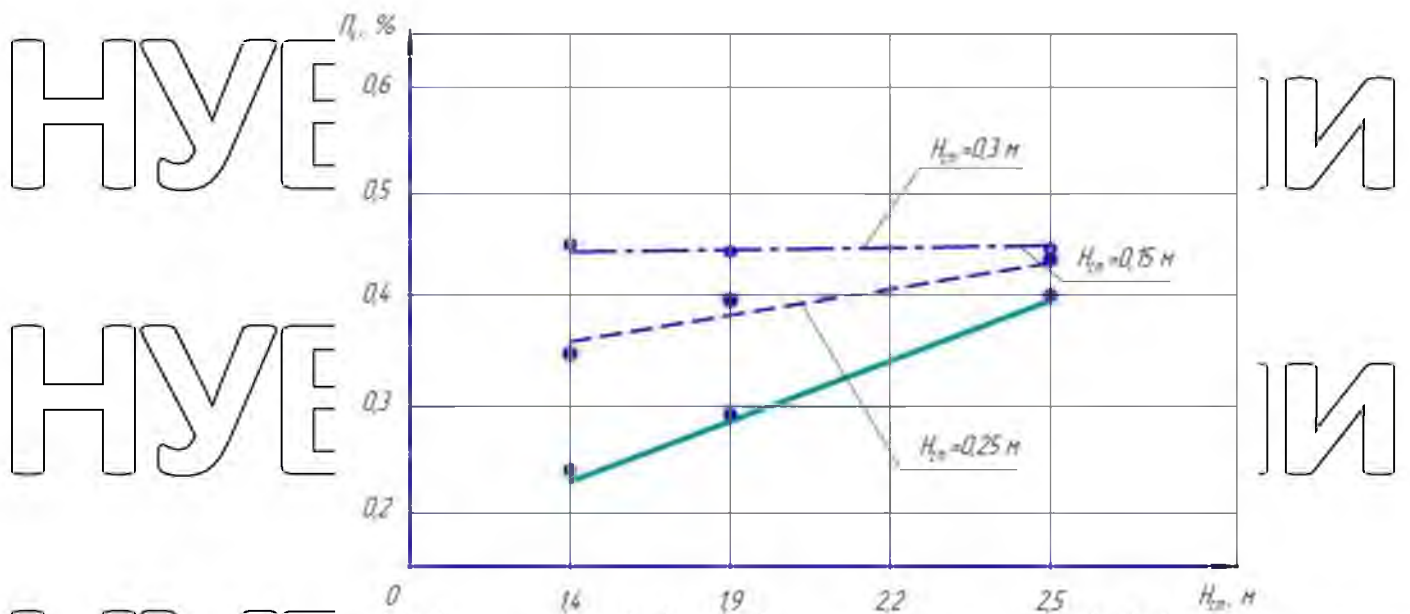


Рис. 4.1. Втрати зерна колосом за жнивваркою комбайна КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" в залежності від робочої швидкості руху ( $V_m$ ) при різній висоті стерні ( $H_{cm}$ )

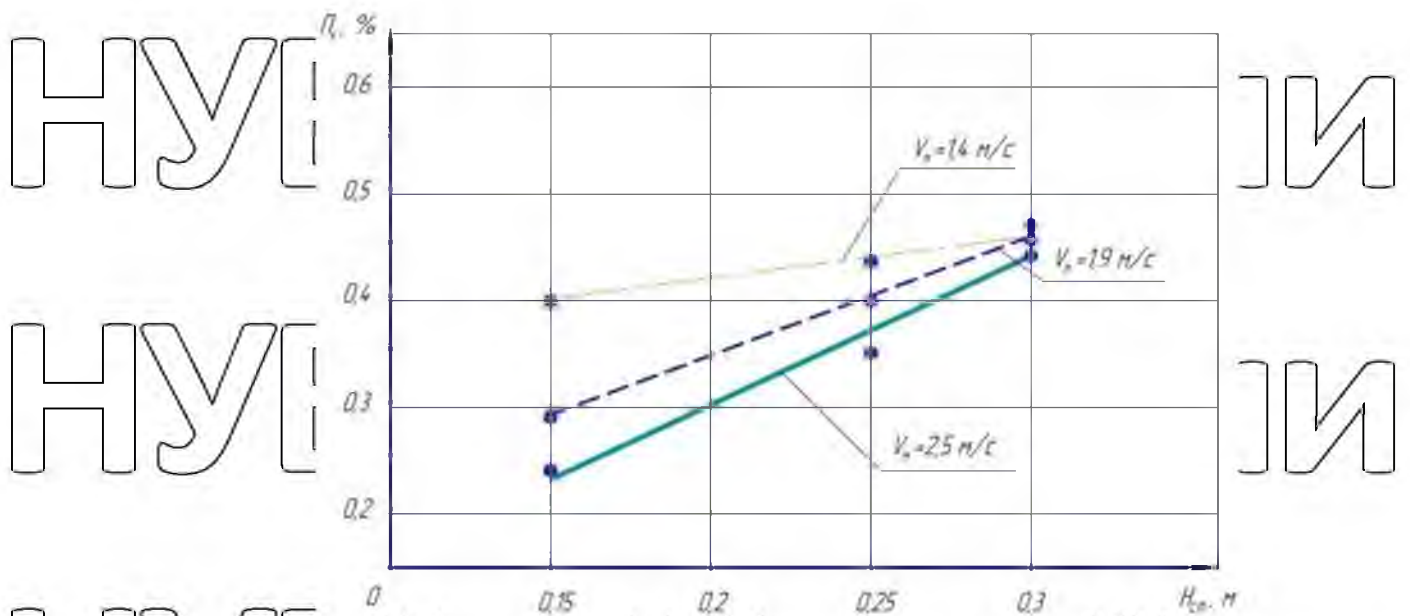


Рис. 4.2. Втрати зерна колосом за жнивваркою комбайна КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" в залежності від висоти стерні ( $H_{cm}$ ) при різних робочих швидкостях ( $V_m$ )

Графічні залежності рис. 4.2 відбивають аналогічну тенденцію зростання втрат зерна колосом за жнивваркою комбайна КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" при підвищенні робочої швидкості руху машини з 1,4 м/с (5,0 км/год) до 2,5 м/с (9,0



км/год). Графічна залежність рис. 4.3 свідчить, що інтенсивність приросту втрат зерна колосом за жнивваркою зростає в 1,1-1,66 рази. З рисунків 4.1 і 4.2 можна/можливо зроби́ти висновок, що з збільшенням робочої швидкості руху комбайна КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" і висоти скошування зернових культур розкид кількісних втрат зерна зменшується при зростає їх абсолютних значень.

Пряме комбайнування пшениці Омська 36 з коефіцієнтом пониклості 0,96 у виробничих умовах ТОВ «Піщане» Хмельницької області комбайном «Джон-Дір» серії 9500 с жнивваркою шириною захвату 7,2 метра свідчить про те, що зі збільшенням висоти скошування, а отже, і висоти стерні з 0,15 м до 0,30 м, і робочої швидкості руху машини з 1,4 м/с (5,0 км/год) до 2,5 м/с (9,0 км/год) спостерігається зростання втрат зерна колосом за жнивваркою комбайна (таблиця П.Б8-П.Б10). Однак їх кількісні значення знаходяться в агротехнічно допустимих межах (1,0 %), що відображено на графічних залежностях рис. 4.3 та

4.4.

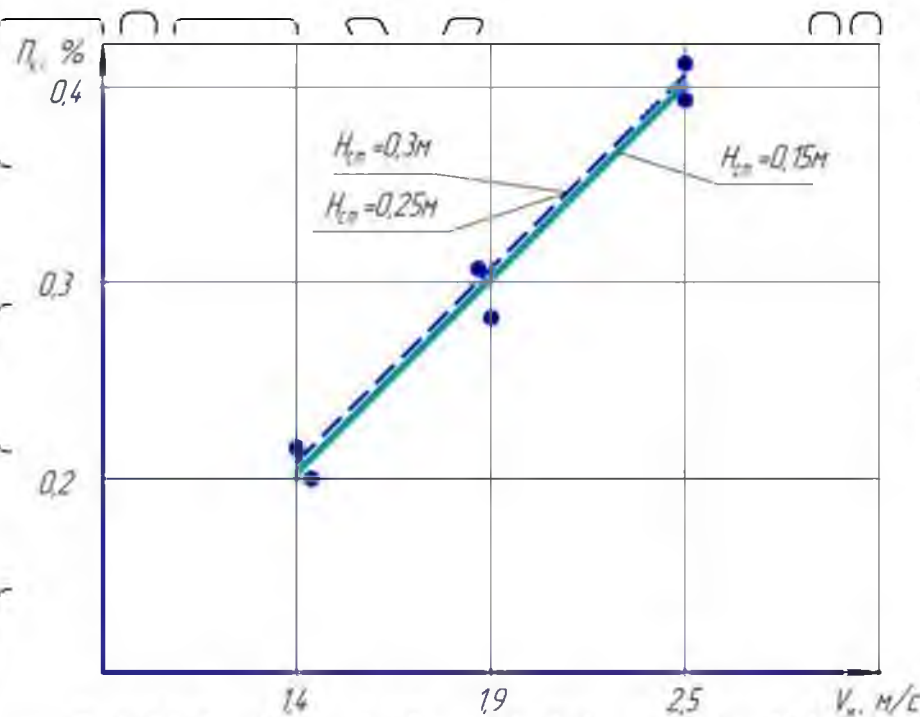


Рис. 4.3. Втрати зерна колосом за жнивваркою комбайна «Джон-Дір» серії 9500 залежності від робочої швидкості руху ( $V_m$ ) при різній висоті стерні ( $H_{cm}$ )

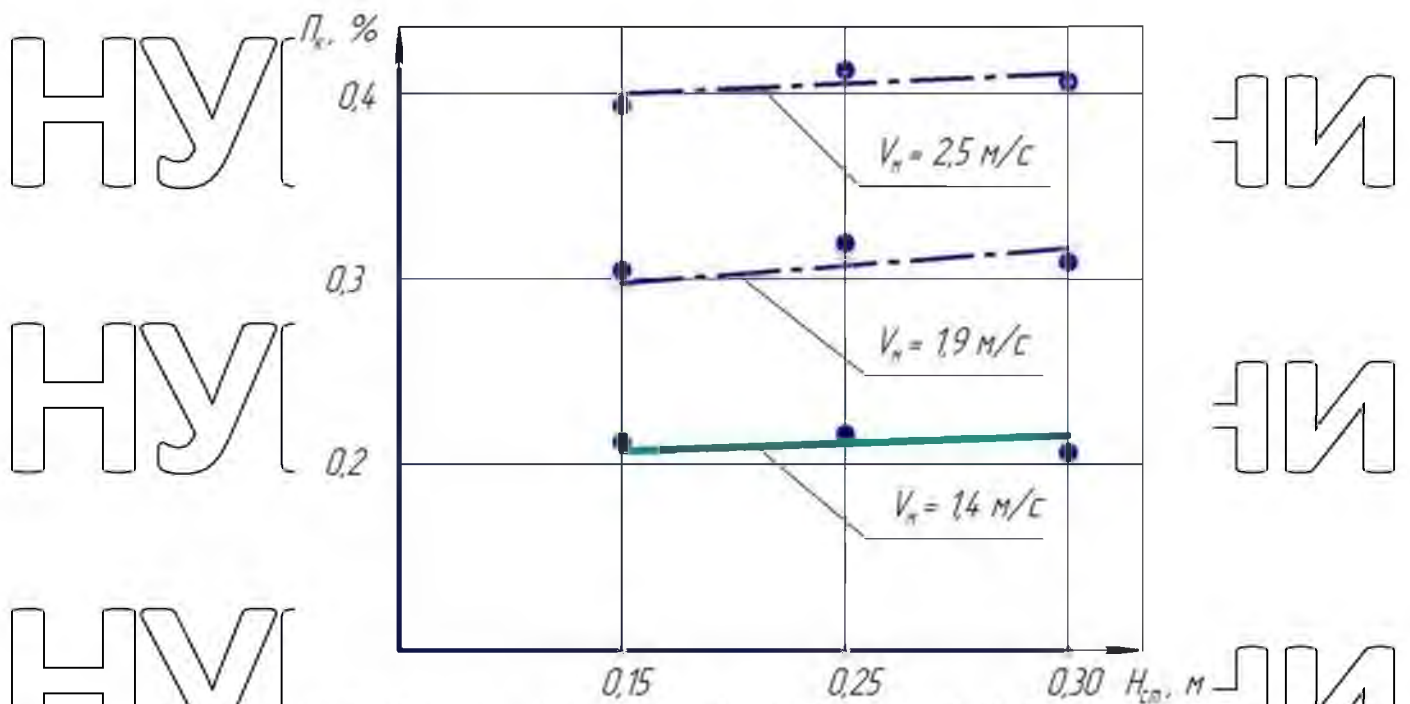


Рис. 4.4. Втрати зерна колосом за жнивваркою комбайна «Джон-Дір» серії 9500 в залежності від висоти стерні ( $H_{ст}$ ) при різних робочій швидкості ( $V_n$ )

Графічні залежності рисунка 4.9 показують, що у разі збільшення висоти стерні з 0,15 м до 0,30 м, тобто висоти скошування зернових культур при постійній швидкості комбайнування (1,4 м/с; 1,9 м/с; 2,5 м/с) інтенсивність приросту втрат зерна колосом за жнивваркою комбайна становить 4,3–10,0 %. З підвищенням робочої швидкості руху комбайна з 1,4 м/с до 2,5 м/с та при постійній висоті стерні (0,15 м; 0,25 м; 0,30 м) інтенсивність приросту втрат зерна колосом за жнивваркою становить 73,9–75, 0% (рис. 4.10). Зіставлення

залежностей рисунка 4.9 та 4.10 свідчить про те, що фактор – робоча швидкість

руху машини за прямого комбайнування зернових культур є більш істотно

впливає освіту втрат зерна колосом за жнивваркою, ніж висота скошування зернових культур. Причиною зростання абсолютних значень втрат зерна

колосом за жнивваркою комбайна КЗС-9-1 «СЛАВУТИЧ» на відміну від

комбайнування зернових культур "Джон-Дір" серії 9500 пояснюється тим, що в

цьому випадку здійснювалося скошування хлібної маси з високою нехлїстие стеблостою (коефіцієнт помилості - 0,82). При збиранні зернових культур

прямим комбайнуванням «Джон-Дір» похилість стеблостою становила 0,96).

Таким чином, результати польових досліджень процесу прямого комбайнування зернових культур з високим зрізом стебел показали, що на практиці даний спосіб збирання врожаю можливо здійснювати на підвищених робочих швидкостях, оскільки втрати зерна колосом за жнивваркою комбайнів не перевищують допустимі агротехнічні значення.

Виявлено, що окремі агробіологічні характеристики зернових культур суттєво впливають на втрати зерна колосом за жнивваркою комбайна, це, перш за все, похилість стеблостою хлібної маси.

Для повної ясності у цьому питанні далі розглянемо, як змінюються якісні показники бункерного зерна та подрібнення соломи під час збирання зернових культур прямим комбайнуванням з високим зрізом стебел.

#### **4.2. Якісні показники бункерного зерна пшениці прямим комбайнуванням з високим зрізом стебел**

Агротехнічна оцінка якісних показників бункерного зерна за комбайнами КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" та «Джон-Дір» серії 9500 у виробничих умовах господарств Хмельницької області проводилася за загальноприйнятою методикою, яка викладена в III розділі. Результати обробки первинних даних представлені у таблиці 4.1 та таблиці 4.2. З таблиць 4.1 та 4.2 випливає, що зі збільшенням висоти скошування пшениці та утворенням стерні заввишки від 0,15 м до 0,25 м, незалежно від марки зернозбирального комбайна, якісні показники бункерного зерна практично відповідають агротехнічно допустимим значенням (чистота зерна в бункері не нижче 95,0%, дроблення не повинно перевищувати 1,0% для насінневого та 2,0% для продовольчого зерна).

Таблиця 4.1

Забур'яненість та подрібнення бункерного зерна комбайна  
КЗС-9-Г "СЛАВУТИЧ"

Дослід	Робоча швидкість	Чисте зерно		Статистичні дані		Втрати зерна		Маса 1000 зерен
	км/год (м/с)	г	%	г	%	г	%	г
1	Висота стерні, $H_{ст} = 0,15$ м							
	5 (1,4)	46,5	93,0	3,4	6,8	0,1	0,2	33,3
	5 (1,4)	48,5	97,0	1,0	2,0	0,1	0,2	31,3
	5 (1,4)	49,1	98,2	0,8	1,6	0,1	0,2	30,6
	5 (1,4)	48,0	96,0	1,5	3,0	0,5	1,0	34,6
	5 (1,4)	48,5	97,0	1,2	2,4	0,3	0,6	39,2
2	Висота стерні, $H_{ст} = 0,25$ м							
	9 (2,5)	47,6	95,2	1,9	3,8	0,5	0,1	33,9
	9 (2,5)	48,7	97,4	1,3	2,6	0	0	32,9
	9 (2,5)	48,0	96	2,0	4	0	0	31,7
	9 (2,5)	48,4	96,8	1,1	2,2	0,3	0,6	33,8
	9 (2,5)	48,4	96,8	1,4	2,8	0,2	0,4	32,4
-	48,26	96,5	1,54	3,1	0,2	0,4	32,9	

Таблиця 4.2

Забур'яненість і подрібнення бункерного зерна Джон-Дір 9500

Дослід	Робоча швидкість	Чисте зерно		Статистичні дані		Втрати зерна		Маса 1000 зерен
	км/год (м/с)	г	%	г	%	г	%	г
1	Висота стерні, $H_{ст} = 0,15$ м							
	5 (1,4)	46,75	93,4	3,1	6,2	0,15	0,3	28,4
	5 (1,4)	47,9	95,8	1,8	3,6	0,30	0,6	32,3
	5 (1,4)	48,15	96,3	1,7	3,4	0,15	0,3	31,3
	5 (1,4)	47,9	95,8	2,0	4	0,10	0,2	31,4
	5 (1,4)	49,3	98,6	0,5	1	0,20	0,4	33,1
2	Висота стерні, $H_{ст} = 0,25$ м							
	-	48,0	96	1,82	3,6	0,20	0,4	31,3
	9 (2,5)	48,0	96	1,8	3,6	0,2	0,4	31,6
	9 (2,5)	48,4	96,8	1,2	2,4	0,4	0,8	30,7
	9 (2,5)	47,9	95,8	2,0	4	0,1	0,2	32,8
	9 (2,5)	48,25	96,5	1,6	3,2	0,15	0,3	31,9
-	48,3	96,6	1,4	2,8	0,3	0,6	31,1	
	48,0	96,0	1,77	2,9	0,23	0,46	31,62	

Низький рівень дроблення зерна за комбайнами КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" і «Джон-Дір» серії 9500 при прямому комбайнуванні пшениці з високим зрізом стебел пояснюється високою вологістю зерна, оскільки в цьому випадку відбувається більшою мірою зминання, ніж дроблення.

Таким чином, результати польових досліджень свідчать, що при збиранні зернових культур прямим комбайнуванням з високим зрізом стебел навіть у важких умовах забезпечуються якісні показники зерна, які відповідають агротехнічним вимогам.

#### 4.2.1. Оцінка подрібнення соломи пшениці при прямому комбайнуванні з високим зрізом стебел

У процесі прямого комбайнування пшениці з високим зрізом стебел у виробничих умовах господарств Хмельницької області визначалися не лише втрати зерна колосом за жниваркою та показники бункерного зерна, а й якісні показники подрібнення соломи подрібнювачами комбайнів «Вектор-410» та «Джон-Дір» серії 9500. Результати даної оцінки представлені в таблицях 4.3 і 4.4.

Таблиця 4.3

Розподіл по фракціях подрібненої соломи КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ"

Діапазон фракцій, мм	Висота стерні $H_{ст}$ , м			
	0,15		0,25	
	Маса, г	%	Маса, г	%
Робоча швидкість $V_m = 5,0$ км/год (1,4 м/с)				
Більше 120	254,15	67,1	81,95	62,7
100-120	-	-	-	-
80-100	-	-	-	-
60-80	-	-	-	-
50-60	22,45	5,9	18,25	14,0
50-20	24,90	6,6	9,5	7,3
10-40	31,25	8,2	10,45	8,0
Менш 10	45,25	12,2	10,40	8,0
Усього	378,5	100	130,55	100
Робоча швидкість $V_m = 9,0$ км/год (2,5 м/с)				
Більше 120	55,5	52,5	63,8	52,1
100-120	-	-	-	-

80-100	-	-	-	-
60-80	-	-	-	-
50-60	8,6	8,1	16,60	15,7
50-20	8,6	8,1	8,40	7,1
10-40	6,5	6,1	6,95	5,9
Менш 10	26,8	25,2	22,75	19,2
Усього	106	100,0	118,5	100,0

\* - рамка 0,5x0,5 м, S = 0,25 м<sup>2</sup>

Таблиця 4.4

Розподіл по фракціях подрібненої соломи комбайном Джон-Дір 9500

Діапазон фракцій, мм	Висота стерні Н <sub>ст</sub> , м			
	0,15		0,25	
	Маса, г	%	Маса, г	%
	Робоча швидкість V <sub>м</sub> = 5,0 км/год (1,4 м/с)			
Більше 120	-	-	-	-
100-120	-	-	-	-
80-100	-	-	-	-
60-80	-	-	-	-
50-60	38,5	72,2	138,85	56,1
50-20	3,6	6,8	9,50	3,9
10-40	5,95	11,2	16,85	7,0
Менш 10	5,2	9,8	79,95	33,0
Усього	53,25	100,0	242,15	100,0
	Робоча швидкість V <sub>м</sub> = 9,0 км/год (2,5 м/с)			
Більше 120	-	-	-	-
100-120	-	-	-	-
80-100	-	-	-	-
60-80	-	-	-	-
50-60	41,7	73,5	44,8	69,3
50-20	3,6	6,4	6,6	10,2
10-40	7,0	12,3	5,7	8,8
Менш 10	4,4	7,8	7,6	11,7
Усього	56,7	100,	100,	100,0

\* - рамка 0,5x0,5 м, S = 0,25 м<sup>2</sup>

З даних таблиці 4.3 видно, що у структурі фракцій подрібненої соломи за комбайном КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" переважає діапазон понад 120 мм, який становить 67,1–52,5%, а дрібно подрібнена фракція соломи змінюється у межах 8,0–25,2%. У цьому дані таблиці ПБ13 свідчать, що збільшення висоти скошування хлібної маси при її обмолоті комбайном позитивно позначається на

структурі фракцій подрібненої соломи. У цьому випадку частка великої фракції знижується і збільшується частка середньої та дрібно подрібнених фракцій соломи, що в подальшому позитивно позначиться на роботі ґрунтообробних машин та на родючості ґрунту.

На відміну від комбайна КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ", скошування та обмолот хлібної маси з подальшим подрібненням соломи комбайном «Джон-Дір» серії 9500 істотно відрізняється балансом фракцій подрібненої соломи, що підтверджують дані.

З таблиці 4.4 видно, що при скошуванні та обмолоті хлібної маси (пшениця) комбайном "Джон-Дір" серії 9500 з підвищенням робочої швидкості руху машини з 1,4 м/с до 2,5 м/с баланс подрібнених фракцій соломи практично не змінюється. При цьому дані показують, що в балансі подрібнених фракцій соломи переважає діапазон 50-60 мм (72,5-73,5%), а дрібно подрібнених фракцій (менше 10 мм) - тільки 7,8-9,8%. Зі збільшенням висоти скошування пшениці, отже, і висоти стерні з 0,15 м до 0,25 м спостерігається видозміна балансу фракцій подрібненої соломи. Так, дані таблиці 4.4 свідчать, частка фракцій подрібненої соломи довжиною 50-60 мм знижується до 56,1-69,3%, тобто зменшується на 6,1-28,7%. Частка фракцій дрібно подрібненої соломи (не менше 10 мм) збільшується до 11,7-33,0%, тобто спостерігається зростання в 1,5-3,37 рази.

Таким чином, агротехнічна оцінка якісних показників роботи подрібнювача соломи комбайнів КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" та "Джон-Дір" серії 9500 свідчить про те, що зі збільшенням висоти скошування зернових культур (пшениця) при прямому комбайнуванні від 0,15 м до 0,25 м спостерігається покращення структури фракцій подрібненої соломи. Практично баланс подрібнених фракцій зміщується у бік збільшення часток середньо- та дрібноподрібненої фракцій соломи незалежно від робочої швидкості руху комбайнів.

### 4.3. Лабораторні дослідження процесу подвійного зрізу стебел зернових культур

#### 4.3.1. Визначення мінімальної критичної швидкості різання стебел зернових культур при подвійному зрізі

Для дослідження процесу подвійного зрізу стебел зернових культур було сконструйовано лабораторна встановлення по визначенню конструктивно-кінематичних параметрів ріжучого апарату з нескінченно несучим різальним елементом (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Лабораторна встановлення ріжучого апарату з подвійним зрізом стебел

За методикою, наведеною в розділі III «Методика та програма експериментальних досліджень», було досліджено процес подвійного зрізу стебел пшениці у лабораторних умовах. За підсумками експериментів були отримані дані щодо якості зрізу стебел верхньої та нижньої гілок ріжучого апарату, що представлено в таблиці 4.5. У ній представлені основні результати зрізу стебел (пшениця Челябінська 2) при різних швидкостях різання ріжучих елементів (4,4 м/с; 5,5 м/с; 7,5 м/с; 9 м/с).



Таблиця 4.5

Результати по зрізу стебел пшениці в лабораторних умовах

Швидкість ножа, м/с		Кількість зрізаних стебел з загальної сукупності, частка		
		з підпором верхній гілки	безпідпирний	з підпором двох гілок
4,4	верхній	1,0	0	1,0
	нижній	1,0	0	1,0
5,5	верхній	1,0	0	1,0
	нижній	1,0	0,4	1,0
7,5	верхній	1,0	0	0,8
	нижній	0,8	0,8	1,0
9	верхній	1,0	0,4	1,0
	нижній	0,8	0,8	1,0

Аналіз даних таблиці 4.7 показує, що безпідпирний зріз стебел зернових культур не є можливим у приколосової частини при швидкості нижче 9 м/с через малу жорсткість стебла, тобто не створюється необхідного пружного опору ножовому елементу. При цьому нижня (приземна) частина стебла зрізається в 8 із 10 (80%) випадків безпідпирним способом при швидкості ножа 4,4 м/с. Однак зріз за допомогою підпирних ребер, тобто підпирний зріз двох тягово-ріжучих гілок забезпечується на 100% на двох рівнях при різних швидкостях різання, але технологічний процес скошування при даному способі не реалізується через забивання простору між верхнім і нижнім тягово-ріжучими гілками ріжучого апарату проміжним продуктом зрізу (середньою частиною стебла).

Результат аналізу подвійного зрізу стебел зернових культур за допомогою установки підпору тільки для верхньої гілки різального апарату показав, що даний спосіб реалізації процесу зрізу є найбільш оптимальним, тому що 8 із 10 випадків (80%) зрізу відбувається стабільно, що підтверджує перша колонка таблиці 4.7. При цьому встановлено, що мінімальна критична швидкість ножів, коли відбувається технологічний процес зрізу стебел, дорівнює 4,4 м/с.

На рис. 4.6 представлений контурний графік за результатами серії дослідів із зрізу стебел різальним апаратом подвійного зрізу. На графіці показано залежність зрізу стебел від робочої швидкості комбайна та довжини кроку

ріжучих елементів. Видно, що зі зменшенням робочої швидкості комбайна і довжини кроку різальних елементів зріз стебел дорівнює 1, тобто зріз стебел на верхній та нижній гілках ріжучих елементів близький до 100%. При швидкості комбайна  $V_m = 2,5$  м/с (9 км/год) та довжині кроку ножів  $t = 0,03-0,05$  м показник дорівнює 0,9, тобто якість зрізу стебел знижується на 10% через малу жорсткість приколосової частини стебла зернових культур, що веде до втрат незрізаним колосом. Тому при подальших дослідженнях нам необхідно дотримуватись робочої швидкості комбайна не більше 2,5 м/с.

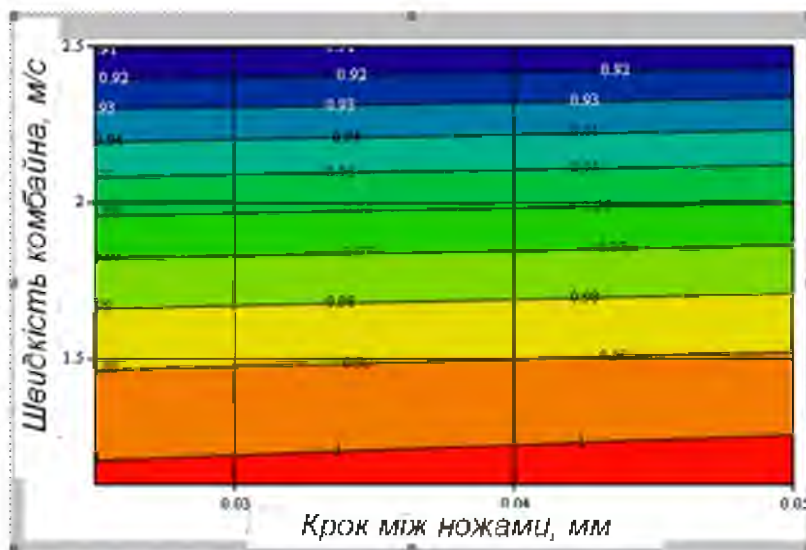


Рис. 4.6 Контурний графік залежності якості зрізу стебел різальним апаратом подвійного зрізу

Таким чином, в результаті проведених лабораторних досліджень щодо подвійного зрізу стебел зернових культур дійшли до того, що процес подвійного зрізу включає одночасно наявність підпiрного зрізу (верхня частина стеблостою) і беззаперечного зрізу (нижня частина стеблостою, а саме стерні). Також визначено мінімальну критична швидкість зрізу стебла рівною 4,4 м/с, яка представлена вищенаведеними дослідями. Отримані результати враховуватимемо під час проведення наступних польових досліджень дослідного зразка.

#### 4.4. Полеві експерименти по дослідженню досвідченого зразка ріжучого апарату подвійного зрізу стебел

Для визначення математичної моделі щодо впливу конструктивних параметрів на довжину проміжного продукту зрізу методом планування експериментів був поставлений досвід у виробничих умовах. Досліджувався дослідний зразок різального апарату подвійного зрізу стебел шириною захвату 1,35 м (рис. 4.7).



Рис. 4.7. Дослідний зразок ріжучого апарату з подвійним зрізом стебел

Визначалася залежність довжини проміжного продукту від факторів:

- поступальною швидкістю машини;
- відстані між ножами.

Інтервали зміни чинників було прийнято відповідним можливим крайнім показником виробничих умов роботи. Значення умов наведено у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6  
Найменування факторів і рівні їх варіювання

Найменування факторів	Нижній рівень	Нульовий рівень	Верхній рівень	Інтервал варіювання	Позначення
Поступальна швидкість, $V_M$ , м/с	1,1	1,8	2,5	0,7	$X_1$
Відстань між ножами, $t$ , м	0,025	0,0375	0,05	0,0125	$X_2$

Залежні фактори:  $Y$  - довжина проміжного продукту соломини подвійного зрізу стебел, мм на дослідченому зразку був реалізований експеримент двофакторного плану Бокс-Бенкена. Експеримент виконаний в трикратній повторності.

План експерименту, а також результати експерименту після усереднення та перевірки на сумісність за статистикою Кохрена наведено у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

План двофакторного експерименту

№ досвіду	Кодове позначення		Натуральні значення		Параметри оцінки
	$X_1$	$X_2$	$V_M$ , м/с	$t$ , м	
1	-1	-1	1,1	0,025	0,145
2	-1	-1	1,1	0,05	0,235
3	-1	+1	2,5	0,025	0,31
4	+1	+1	2,5	0,05	0,355
5	0	0	1,8	0,0375	0,191
6	0	0	1,8	0,05	0,215
7	-1	0	1,8	0,025	0,176
8	0	+1	2,5	0,0375	0,288
9	0	-1	1,1	0,0375	0,26

Обробка даних експерименту виконана у програмі MathCAD 14 з відсіюванням незначних факторів. В результаті обробки, розрахунки якої представлені в додатку, отримана наступна математична модель:

$$Y = 0,146 \cdot V_M^2 - 44,8 \cdot t^2 - 0,4 \cdot V_M + 7,99 \cdot t - 1,285 \cdot V_M \cdot t + 0,3, \quad (4.4)$$

де  $V_M$  - швидкість комбайна во час збирання зернових культур, м/с;

$t$  - крок розміщення ріжучих елементів на несучою поверхні, м.

Усі коефіцієнти рівнянь перевірені на значущість по  $t$ -критерію Стьюдента лише на рівні ймовірності 0,95.

Дисперсійний аналіз впливу чинників на залежну змінну показує, що у довжину проміжного продукту зрізу стебла впливає переважно поступальна швидкість комбайна, ніж довжина кроку ріжучих елементів, у своїй спільній вплив чинників незначно.

Таким чином, проведення повнофакторного експерименту дозволило зробити аналіз впливу таких факторів, як поступальна швидкість комбайна та крок розміщення ножів на довжину проміжного продукту зрізу (рис. 4.8).

Отримана регресійна модель за двома факторами з трьома рівнями показує, що якість процесу зрізу різальним апаратом з подвійним зрізом стебел впливає такий непрямої показник, як довжина проміжного продукту зрізу.

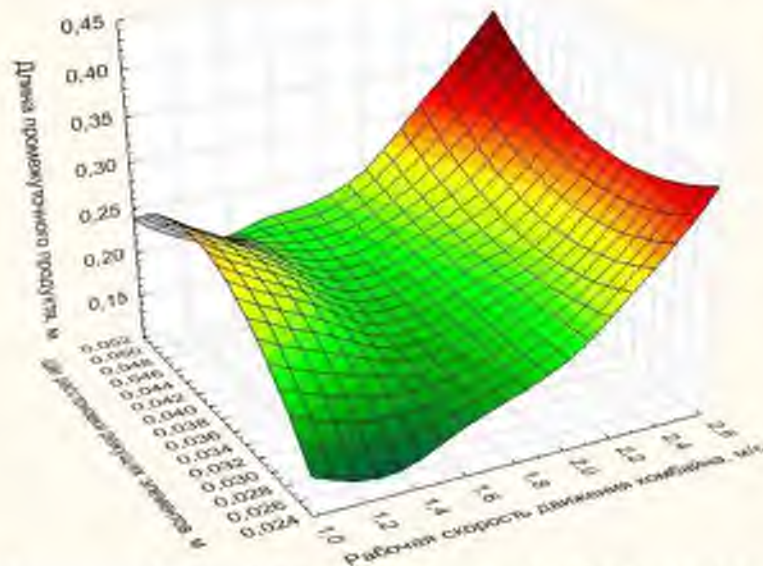


Рис. 4.8 Поверхня відгуку регресійної моделі по двом факторів

Таким чином, на конструктивно-кінематичні параметри ріжучого апарату з подвійним зрізом стебел впливає фактор робочої швидкості комбайна.

#### 4.5. Оцінка достовірності теоретичної гіпотези роботи

У період зернозбиральних робіт у виробничих умовах проводилися експериментальні дослідження, спостереження за роботою окремих зернозбиральних комбайнів; при необхідності вносилися коригування в швидкісні режими їхнього руху при скошуванні та обмолоті хлібної маси.

У досліджуваних господарствах Хмельницької області було впроваджено елементи процесу прямого комбайнування зернових культур із високим чи подвійним зрізом стебел, що підтверджувалося освітою стерні заввишки 0,25 м та 0,30 м. Проміжний продукт соломини пшениці завдовжки 0,10–0,15 м утворився за рахунок другого проходу комбайна. Результати впровадження дозволили підвищити робочу швидкість руху комбайнів при скошуванні та обмолоті хлібної маси. При цьому спостерігалося зростання кількісних втрат зерна колосом за жнивваркою в межах агротехнічно допустимих значень. Тим самим підтвердили правильність основних теоретичних положень роботи та дозволили дати порівняльну оцінку по втрат зерна колосом за жнивваркою, бункерного зерна та ступеня подрібнення соломи залежно від швидкісних режимів роботи як вітчизняних, так і зарубіжних комбайнів, а також оцінити достовірність теоретичних розрахунків.

#### 4.5.1. Адекватність теоретичних і експериментальних даних

Похибка обґрунтування виникає внаслідок неточності вихідної інформації, а також внаслідок невідповідності теоретичних передумов реальним взаємозв'язкам, які мають місце у практиці використання комбайнів.

Правильність методичного підходу у роботі перевірялася шляхом зіставлення теоретичних та фактичних даних.

Як видно з даних результатів дослідження, основна вихідна інформація про об'єкті впливу (пшениця) була отримана з похибкою до 2,0-5,0%, а помилка функції ( $\delta_3$  - коефіцієнта соломистості хлібної маси) знаходилася на рівні 5,0-8,0%. Розбіжності (14,0–21,7 %), отримані за швидкісними режимами використання зернозбиральних комбайнів, пояснюється головним чином відхиленням реальної пропускної спроможності молотарки комбайнів від розрахункової (у розрахунках  $q = 8,5$  кг/с, але в практиці КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ"  $q = 7,5$  кг/с, «Джон-Дір» серії 9500  $q = 8,0$  кг/с), тобто розбіжність склала відповідно 11,8% та 5,9%. Крім того є розбіжність між теоретичними даними та фактичними за врожайністю, вологістю зерна та соломи хлібної маси.

За швидкісними режимами використання комбайнів розбіжність між теоретичним максимальним значенням швидкості на практиці склало 9,2%, а по середнім значенням швидкості руху машин розбіжність між теоретичним та фактичним значенням становило 15,2–18,2%. Розбіжність між теоретичними та фактичними значеннями по кроці та швидкості переміщення ріжучої кромки сегмента склала відповідно 23,5% та 12,8%, що пояснюється головним чином конструктивними особливостями несучої гілки технічного улаштування подвійного зрізу стебел зернових культур. Невелика величина розбіжностей свідчить про задовільному відповідно прийнятих методичних положень реальним взаємозв'язкам факторів процесу прямого комбайнування зернових культур з високим або подвійним зрізом стебел.

1. Визначено, що при середній висоті стеблостої пшениці 0,50 м відсоток низькорослого (діапазон стеблостою 0,2–0,3 м) становить 5,8%, тобто менше 10,0% у загальній сукупності стебел, що може вплинути на втрати зерна зрізаним колосом за комбайнковою жниваркою. За сприятливих природно-кліматичних умов основний масив стеблостою пшениці знаходиться по ярусності в межах 0,7–0,8 м та 0,8–0,9 м (відповідно ймовірність події 0,38 та 0,54), що практично не позначиться на втрати зерна зрізаним колосом за жниваркою у разі збирання зернових культур прямим комбайнуванням з високим (подвійним) зрізом стебел.

2. Отримано аналітичну залежність 2-го порядку, що розкриває зв'язок між коефіцієнтом соломистості хлібної маси і довжиною проміжного продукту соломини, що видаляється від стебла з колосом перед подачею його в молотильний апарат зернозбираючого комбайна.

3. Результати польових досліджень процесу прямого комбайнування зернових культур (пшениця) з високим (подвійним) зрізом стебел показали, що на практиці цей спосіб збирання врожаю можливий. При цьому комбайнування пшениці можна здійснювати на робочих швидкостях від 1,4 м/с (5,0 км/год) до 2,5 м/с (9,0 км/год), оскільки втрати зерна колосом за комбайнковою жниваркою не перевищує агротехнічно допустимі значення незалежно від марки комбайна. Виявлено, що зі збільшенням висоти скошування пшениці та утворення стерні

заввишки від 0,15 м до 0,30 м за постійної робочої швидкості машини в 1,4 м/с спостерігається зростання втрат зерна колосом за жнивваркою як комбайна «Джон-Дір» серії 9500, і КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" відповідно на 4,3 – 10,0 % й у 1,88 разу, проте втрати зерна відповідають агротехнічним вимогам. Ця закономірність характерна і для робочої швидкості руху комбайнів. 2,5 м/с (9,0 км/год).

4. Агротехнічна оцінка бункерного зерна комбайнів КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" та «Джон-Дір» серії 9500 показала, що при збиранні пшениці прямим комбайнуванням з високим або подвійним зрізом стебел навіть у важких умовах (вологість зерна 20,0-24,0% і вище) забезпечуються показники зерна відповідно до агротехнічних значень. Так, чистота зерна становить 96,0%, а дроблення зерна становить 0,4%. Мале значення дроблення зерна пояснюється високою вологістю, оскільки в цьому випадку переважає зминання зерна.

5. Визначено, що з підвищенням висоти скошування пшениці при прямому комбайнуванні комбайном КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" та утворенням стерні заввишки від 0,15 м до 0,25 м При цьому частка подрібненої фракції соломи за комбайном «Вектор-410» знижується на 10,6 %, тобто з 62,7% до 52,1%.

6. Встановлено, що за поступальної швидкості комбайна у 2,5 м/с та кроці ножів 0,3–0,5 м ймовірність зрізу становить – 0,9. Зниження якості зрізу на 10% пояснюється малою жорсткістю приколосової частини стебла пшениці, що веде до втрат незрізаним колосом. Тому поступальна швидкість має бути у разі трохи більше 2,5 м/с. При цьому мінімальна критична швидкість зрізу стебел дорівнює 45 м/с. Крім того, виявлено, що для ріжучих елементів верхньої гільки ріжучого апарату з нескінченно-несучим приводом доцільною є додаткова опора.



## 5. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 5.1. Економічна ефективність застосування комбайнової жниварки з подвійним зрізом стебел

Розрахунок показників економічної ефективності впровадження нової або модернізованої техніки в рослинництві проводять у наступних основних показниках:

- продуктивність машини за годину робочого часу, зміну, сезон;
- енергоємність процесу;
- матеріаломісткість;
- питома витрата палива.

Зміна продуктивності машин найбільше впливає на економічні показники порівняно з іншими вихідними даними.

При скошування хлібний маси при прямому комбайнуванні будемо порівнювати пропоновану нами жниварку з подвійним зрізом стебел з жниваркою КЗС 081.27 на базі комбайна КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ" (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1.

Технічні характеристики порівнюваних валкових жниварок

Показники	Жатка	
	КЗС 081.27	Пропонована
Ширина захвату жниварки, м	6,0	6,0
Маса, кг	1565	2320
Робоча швидкість руху, м/с (км/год)	1,5 (5,5)	1,8 (6,7)

### 5.2. Розрахунок економічної ефективності

Продуктивність за година змінного часу визначимо по формулі (5.1):

$$W_{год} = 0,1 \cdot B_{жс} \cdot V_p \cdot \tau_T \quad (5.1)$$

де  $W_{год}$  - годинна продуктивність машини, га/год;

$B_{жс}$  - робоча ширина жниварки, м;

$V_p$  - робоча швидкість руху машини, м/с;

$\tau$  - коефіцієнт використання часу зміни, год.

Річна (сезонна) завантаження жнивarki, що виражається в гектарах, визначається за формулою:

$$Z_{CEZ} = Z_P \cdot W_{год}, \quad (5.2)$$

де  $Z_{CEZ}$  - річний об'єм роботи, га;

$Z_P$  - річне (сезонна) нормативне завантаження жнивarki в годинах,  $Z_P = 150$  год.

Енергоємність процесу визначимо за формулою:

$$E = H_E / W_{год}, \quad (5.3)$$

де  $E$  - енергоємність процесу, кВт-год/га;

$H_E$  - ефективна потужність КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ",  $H_E = 150$  кВт [36].

Матеріаломісткість операцій визначимо по формулі:

$$M_{уд} = (M_{KB} + M_{Ж}) / Z_{CEZ}, \quad (5.4)$$

де  $M_{уд}$  - матеріаломісткість операцій, кг/га;

$M_{KB}$  - маса комбайна,  $M_{KB} = 11075$  кг (комбайн КЗС-9-1 "СЛАВУТИЧ");

$M_{Ж}^B$  - маса жнивarki,  $M_{Ж}^B = 1565$  кг (маса жнивarki КЗС 081.27);

$M_{Ж}^H$  - маса жнивarki з різальним апаратом подвійного зрізу).

Витрата палива на 1 гектар визначимо по формулі:

$$Г_{ГА} = Q_{год} / W_{год}, \quad (5.5)$$

де  $Г_{ГА}$  - витрата палива на 1 гектар, кг/га;

$Q_{год}$  - годинна витрата палива,  $Q_{год} = 14,1$  кг/год.

Питому трудомісткість визначимо по формулі:

$$П_{уд} = Л / W_{год}, \quad (5.6)$$

де  $П_{уд}$  - питома трудомісткість операцій, люд.-год/га.;

$Л$  - кількість обслуговуючого персоналу,  $Л = 1$  люд.

Економію питомих витрат визначимо по формулі:

$$E_{ПІ} = П_{уд} - П_{уд}^H, \quad (5.7)$$

де  $E_{ПІ}$  - економія питомих витрат, люд.-год./га;

Річний економію витрат праці визначимо по наступною формулі:

$$E_{ПІТ} = (П_{уд} - П_{уд}^H) \cdot Z_{CEZ}^H, \quad (5.8)$$

де  $E_{ПІТ}$  - річна економія питомих витрат, люд.-год.

Для визначення заробітної плати трактористів-машиністів слід використати таку формулу:

$$I_3 = TC_{CM} \cdot 2,1 / (7 \cdot W_{год}), \quad (5.9)$$

де  $I_3$  - заробітна плата обслуговуючого персоналу, грн./га.;

2,1 - коефіцієнт, враховує усі доплати, надбавки і нарахування на заробітну плату;

7 - кількість робочих годин в день;

$TC_{CM}$  - денна тарифна ставка тракториста-машиніста, визначається за такою формулою:

$$TC_{CM} = MPOП \cdot K_{CЛ} \cdot K_3 \cdot K_T / 25,2, \quad (5.10)$$

де  $MPOП$  - мінімальний розмір оплати праці (встановлюється і індексується постановами Уряду),  $MPOП = 6965$  грн.;

$K_{CЛ}$  - коефіцієнт професійної складності,  $K_{CЛ} = 1,8$ ;

$K_3$  - зональний коефіцієнт,  $K_3 = 1,2$ ;

$K_T$  - тарифний коефіцієнт, для трактористів-машиністів V категорії  $K_T = 1,54$ ;

25,2 - нормативне число робочих днів в місяці.

Амортизаційні відрахування на одиницю роботи визначають по формулі:

$$I_{AM} = (BC_{KB} \cdot A_{KB} + BC_{Ж} \cdot A_{Ж}) / (100 \cdot 3_{CE3}), \quad (5.11)$$

де  $I_{AM}$  - амортизаційні відрахування на одиницю роботи, грн./га;

$A$  - норма амортизаційних відрахувань для сільськогосподарської техніки складає 15%.

$BC_{KB}$ ,  $BC_{Ж}$  - Балансова вартість комбайна і жниварки відповідно,  $BC_{KB} = 6230000$  грн. Балансову вартість жниварок визначимо методом порівняння мас за формулою:

$$BB_{Ж} = BB_{КЖ} \cdot M_{Ж} / M_{КЖ}, \quad (5.12)$$

де  $BB_{ПН}$  - балансова вартість жниварки КЗС,  $BB_{КЖ} = 520000$  грн.

$M_{Ж}$  - маса жниварок,  $M_{Ж} = 1565$  кг,  $M_{Ж}^{П} = 1780$  кг;

Витрати на ГО і поточні ремонти машин розраховуються за формулою, при цьому норма відрахувань для комбайна становить 10%, а для жниварок становить 12%

Витрати на пально-мастильні матеріали визначають по формулі:

$$I_{ПММ} = P_{ГА} \cdot Ц_K, \quad (5.13)$$

де  $I_{ПММ}$  - витрати на пально-мастильні матеріали, грн./га;

$Ц_K$  - комплексна ціна 1 кг палива, що включає вартість основного палива, всіх мастильних матеріалів і витрати на їх перевезення,  $Ц_K = 34,50$  грн./кг.

Встановлюються прямі експлуатаційні витрати на одиницю роботи за формулою:

$$I_{П} = I_3 + I_{AM} + I_{TP} + I_{ПММ} \quad (5.14)$$

де  $I_{П}$  - питомі експлуатаційні витрати, грн./га;

Економію питомих експлуатаційних витрат за одиницю роботи визначають за формулою:

$$E_{IV} = I_{П} - I_{П}^{II} \cdot I_{ПММ} \quad (5.15)$$

де  $E_{IV}$  - економія питомих експлуатаційних витрат на одиницю роботи, грн./га.

Річну економію експлуатаційних витрат визначають по формулі:

$$E_{IP} = E_{IV} \cdot Z_{СЕЗ}^{II} \quad (5.16)$$

де  $E_{IP}$  - річна економія експлуатаційних витрат, грн.

Ступінь зниження експлуатаційних витрат визначають по формулі:

$$C_I = 100 \cdot (I_V - I_V^B) / I_V \quad (5.17)$$

де  $C_I$  - ступінь зниження експлуатаційних витрат, грн.

## 5.2. Розрахунок річного економічного ефекту

Розрахунок річного ефекту зробимо по наведеним витрат.

Сума наведених витрат включає поряд з експлуатаційними витратами та частину капіталовкладень, наведених через нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень до порівняльного періоду (Рік).

Наведені витрати визначаються по формулі:

$$ПЗ = I_V + E_M \cdot K_{ПИТ}, \quad (5.18)$$

де  $ПЗ$  - приведені затрати, грн./га;

$E_M$  - галузевий нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, що застосовується для с.-г. машинобудування у вигляді 0,15...0,20, приймаємо

0,175;

$K_{\text{ПІТ}}$  - питомі капіталовкладення в машину, грн./га.

Питомі капіталовкладення в машину визначаються по формулі:

$$K_{\text{ПІТ}} = K / 3_{\text{СЕЗ}}, \quad (5.19)$$

де  $K$  - капітальні вкладення в машину,  $K = 560000$  грн.,  $K^{\text{П}} = 648135,6$  грн.

Річний економічний ефект від застосування однієї машини визначають за формулою:

$$E_P = (\text{ПЗ}^B - \text{ПЗ}^{\text{П}}) \cdot 3_{\text{СЕЗ}}^{\text{П}}, \quad (5.20)$$

де  $E_P$  - річний економічний ефект, грн.

### 5.3. Визначення ефективності капіталовкладень

Термін окупності початкових капіталовкладень розраховується в тому випадку, якщо передбачається повна заміна базової машини або технології нової, або впровадження машини, агрегату або технології, що раніше не застосовувалася, і визначається за формулою:

$$O_K = K^B / E_P \quad (5.21)$$

де  $O_K$  - термін окупності початкових капіталовкладень, років;

Таблиця 5.1

Економічні показники ефективності використання проектової та базової машини

Показники	Комбайнова жниварка	
	КЗС 081.27	пропонована
Техніко-експлуатаційні:		
- продуктивність, га/год	2,6	3,11
- сезонна вироблення, га	390	466,5
- енергоємність, кВт·год/га	59,2	49,5
- витрата палива, кг/га	10,2	8,5
- матеріаломісткість, кг/га	32,6	27,8
Затрати праці:		
- трудомісткість, люд. / год / га:	0,38	0,32

- річна економія витрат праці, люд. год	-	28
Експлуатаційні витрати, грн./ га	3572,1	3035,8
Річна економія експлуатаційних витрат, грн.	-	250184
Ступінь зниження експлуатаційних витрат, %	-	15
Ефективність капіталовкладень:		
- балансова вартість машини, тис. грн.;	560	648,1
- річний економічний ефект, тис. грн.	-	253,8
- термін окупності капіталовкладень, років	-	2,55

Розрахунок економічної ефективності показав, що запропоноване рішення комбайнової живарки з подвійним зрізом стебел. дозволяє досягти економічного ефекту від впровадження в 253776 грн. Очікуваний термін окупності додаткових капіталовкладень становитиме 2,55 року.

## ВИСНОВКИ

1. Результати аналізу технічного переозброєння комбайнового парку в умовах на прикладі Хмельницької області показують, що заміна фізично та морально застарілих комбайнів здійснюється високотехнологічними машинами класу «4», «5» та вище як вітчизняного виробництва, так і зарубіжного. В даний час збирання зернових культур проводиться як прямим комбайнуванням, так і роздільним способом з величезним переважанням першого. При цьому практика показала, що техніко-економічний потенціал даного класу комбайнів за прямого комбайнування зернових культур через низьку врожайність повністю не реалізується. У зв'язку з чим потрібен пошук нових технологічних та технічних рішень у галузі прямого комбайнування зернових культур. Тому подальші дослідження закономірностей функціонування процесу прямого комбайнування та встановлення залежностей параметрів машин та режимів їх використання з урахуванням технологічних властивостей зернових культур є актуальною науково-виробничою проблемою.

2. Огляд та аналіз науково-технічної літератури показав, що подальше вдосконалення прямого комбайнування зернових культур доцільно здійснити у вигляді розробки методу подвійного зрізу стебел. Виходячи з цього була розроблена інформаційна модель прямого комбайнування зернових культур, в якій зернозбиральний комбайн розглядається як перетворююча технічна система, що включає перетворюючу технічну підсистему у вигляді ріжучого апарату комбайнової жнивarki. При цьому технічна система та підсистема характеризуються вхідними та вихідними параметрами. Наявність технічної системи та підсистеми, їх співвідношення дозволяють застосувати у дослідженнях методологію системного аналізу.

3. На основі інформаційної моделі було розроблено математичну модель прямого комбайнування зернових культур з подвійним зрізом стебел. Внаслідок чого виявлено закономірності та залежності, які показують, що пряме комбайнування з подвійним зрізом стебел характеризується утворенням проміжного продукту у вигляді соломини стебла довжиною від 0,10 до 0,20 м. А

це змінює показник технологічної властивості зернових – співвідношення зерна та соломи за масою, що відбивається на солемистості хлібної маси. В результаті чого отримано аналітичну залежність, що характеризує зміни коефіцієнта солемистості хлібної маси від довжини проміжного продукту у вигляді соломини стебла, яка досить точно описується аналітичною залежністю 2-го порядку.

4. В ході теоретичних пошуків встановлена взаємозв'язок між робочою швидкістю руху комбайна, його годинною продуктивністю та коефіцієнтом солемистості хлібної маси, що змінюється залежно від довжини проміжного продукту у вигляді соломини стебла. Виявлено, що зі зменшенням довжини стеблостою зернових культур при прямому комбайнуванні за рахунок утворення проміжного продукту довжиною 0,10 м можливе підвищення робочої швидкості комбайна на 23,0%, що призведе до більш ефективного використання пропускної здібності молотарки. Подальше збільшення довжини проміжного продукту до 0,15-0,20 м спричинить збільшення робочої швидкості комбайна лише на 2,4-5,0%.

5. Встановлено, що для здійснення процесу подвійного зрізу стебел зернових культур доцільна перетворювальна технічна підсистема зернозбирального комбайна у вигляді ріжучого апарату жниварки з нескінченним тягово-ріжучим елементом. У ході математичного опису даного процесу виявлено, що для його реалізації необхідно звести до мінімуму відгин і вигин стебел під час їх зрізу, чого можна досягти за рахунок конструктивно-режимних параметрів ріжучого апарату.

6. В результаті розгляду взаємозв'язку між поступальною швидкістю різального елемента та робочою швидкістю руху комбайна отримані закономірності та залежності, з яких випливає, що крок між ріжучими кромками елементів залежить як від робочої швидкості руху комбайна, так і їх поступальної швидкості. Визначено, що із збільшенням робочої швидкості комбайна з 1,4 м/с до 2,8 м/с необхідно зменшити крок між ріжучими крайками елементів з 29,4 до 16,4 мм при частоті обертання вала приводу  $10,6 \text{ с}^{-1}$  і з



36,0 до 19,5 мм при частоті -  $13,3 \text{ с}^{-1}$ . При цьому крок між ріжучими кромками елементів практично не залежить від таких конструктивних параметрів, як радіус приводної зірочки та висота ріжучої кромки.

7. Результати експериментальних досліджень показують, що при середній висоті стеблостою пшениці ( $l_{ст} \approx 0,50 \text{ м}$ ) в умовах Хмельницької області відсоток низькорослого стеблостою (інтервал висоти 0,2-0,3 м) становить 5,8%, тобто менше 10% від загальної сукупності стебел, які можуть вплинути на втрати зерна зрізаним колосом за комбайновою жниваркою. За сприятливих природно-кліматичних умов основний масив стеблостою пшениці за ярусністю знаходиться в межах 0,7-0,8 та 0,8-0,9 м. (відповідно ймовірність 3,8 та 5,4), що практично не позначиться на втратах зерна зрізаним колосом за жниваркою при збиранні зернових культур прямим комбайнуванням з подвійним зрізом стебел.

8. У ході лабораторно-польових досліджень технічного пристрою з подвійним зрізом стебел встановлено, що для забезпечення технологічної надійності процесу зрізу необхідна конструкція комбінованого ріжучого апарату типу, то є верхня гілка тягово-ріжучих елементів повинна мати додаткові робітники органи в вигляді протиріжучих пальців, при цьому нижня гілка залишається без опори. У цьому випадку спостерігається стійкий чистий зріз стебел при поступальній швидкості несучого ріжучого елемента не менше ніж 4,5 м/с. Виявлено, що чистий зріз стебел забезпечується при відстані від 20 до 40 мм між пальцями, що протиріжуть, і несучим ріжучим елементом.

9. Розрахунками встановлено, що річний економічний ефект від застосування пропонованої конструкції ріжучого апарату на комбайновій жниварці складе 253,8 тис. грн. Очікуваний термін окупності - 2,55 роки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Anders G. J. Innovations in power systems reliability. Springer, 2011. 361 p.
2. Delphi Diesel Systems, Publication №: DDNX125(EN) Delphi Diesel Aftermarket Operations UK, 2012. 76 p.
3. Endrenyi J. Comparison of two methods for evaluating the effects of maintenance on component and system reliability. IEEE International Conference Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2014. P. 307–312.
4. Endrenyi J. The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability. A Report of the Probability Application Subcommittee. IEEE Transactions on Power Systems. 2011. Vol. 16. № 4. P. 638–646.
5. Ge H. Maintenance optimization for substations with aging equipment: a dissertation for the degree of Phd. Lincoln, Nebraska, 2010. 212 p.
6. Hampel R., Kurr D., Scbafenadcer H. Elektronisches Messsystem zur digitalen Erfassung und Auswertung von Indikatordiagrammen. 2015. № 2. P. 33–38.
7. Алфьоров С.А., Калашин А.І., Угаров А.Д. Як працює зернозбиральний комбайн. К.: Машинобудування, 2011. - 190с.
8. Артемов В.Є. Удосконалення технології збирання зернових колосових культур з використанням причіпного підбирача-подрібнювача селомни. Автореферат на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. К., 2005. - 20с.
9. Комплексна механізація виробництва зерна: Навчальний посібник / В.Д.Гречкосій, М.Я.Дмитришак, Р.В.Шатров та ін. За ред. В.Д.Гречкосія, М.Я.Дмитришака. –Київ: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2012. – 288с.
10. Аулін В. В., Гриньків А. В. Методика вибору діагностичних параметрів технічного стану 248 транспортних засобів на основі теорії сенситивів. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2016. №5. С. 109–116.
11. Аулін В. В., Гриньків А. В. Проблеми і задачі ефективності системи технічної експлуатації мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія технічні науки. 2016. №2 (77). С. 36–41.
12. Аулін В. В., Гриньків А. В. Проблеми і задачі ефективності системи технічної експлуатації мобільної сільськогосподарської та автотранспортної

техніки. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія технічні науки. 2016. №2 (77). С. 36–41.

13. Аулін В. В., Гриньків А. В. Теоретичне обґрунтування моментів контролю технічного стану систем і агрегатів засобів транспорту. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2017. №8. С. 9–

20.  
14. Аулін В. В., Гриньків А. В., Замота Г. М. Забезпечення та підвищення експлуатаційної надійності транспортних засобів на основі використання методів теорії чутливості. Вісник інженерної академії України. 2015. №3. С. 66–72.

15. Бєдих В.В., Косилов Н.І. та ін. Причіпні валкові жниварки для ресурсоенергозберігаючих технологій // Досягнення науки і техніки АПК, №10, 2008. - С. 9-14.

16. Бур'янов А.І., Пасічний Н.І. Обґрунтування класу комбайна для збирання зернових шляхом очесу // Механізація та електрифікація сільського господарства. № 4, 2004. - С.21-23.

17. Василенко П.М. Теорія руху частинки по шорстких поверхнях с.г машин. Київ, Вид-во УАСГН, 1960. - 283с.

18. Високий зріз – доступна альтернатива жниваркам очесу на корені [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.agroua.com> Загл.з екрана;

19. Гєльцяпін В.Я. Тенденції розвитку зернозбиральних комбайнів. // Техніка та устаткування для села. 2004 №1. - С.9-14.

20. Дранішніков А. Як збільшити продуктивність комбайна? / / Зерно [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.zerno-ua.com/-2012>. - Загл. з екрану.

21. Лихочвор В.В. Рослинництво. Технології вирощування сільськогосподарських культур /За ред. В.В.Лихочвора, В.Ф.Петриченка. 3-є вид., виправ., допов. – Львів: НВФ «Українські технології», 2010. – 1088с.

22. Зернозбиральні комбайни "CLAAS". Прайс лист фірми "CLAAS". 2012р. -76с.

23. Зернозбиральні комбайни «John Deere». Прайс лист фірми "John

Deere". 2013р. - 47с.

24. Косілов Н.І., Стоян С. та ін. Причіпна жниварка ЖВП - 9,1 // Сільський механізатор. К., 2004 №11. - С. 20-21

25. Кузьмін М.В. Граничні закони теорії продуктивності машинно-технологічних агрегатів // Механізація та електрифікація сільського господарства. № 10, 2005. - С. 6-8.

26. Кушнар'ов А.С., Леженкін А.М. Енергозберігаюча технологія збирання зернових для фермерських та селянських господарств // 30. доп. Міжнар. наук.-техніч. конф. «Перспективні технології збирання зернових культур, рису та насіння трав» / ТП АТА. - Мелітополь, 2003. - С. 17-21.

27. Леженкін О.М. Методологія формування енерго- та ресурсозберігаючої технології збирання зернових культур в умовах фермерських господарств (з прикладу України). / О.М.Леженкін: автореферат дис. докт. техн наук. Мелітополь, 2008 - 35с.

28. Леженкін О.М. Збирання зернових шляхом очисування // Сільський механізатор. - 2004. - №11. - С. 27.

29. Ловчиков В.П., Бутко В.М., Рум'янцев Н.М. Вплив агрометеорологічних факторів на режими та якість роботи збиральної техніки. / Праці НВО "ЦСГМ", Алма-Ата, 1986. - С 146-155.

30. Бойко А. І. Тенденції розвитку вітчизняного сільгоспмашинобудування і проблем забезпечення надійності машин. Науковий вісник Національного аграрного університету. Київ. НАУ, 2004. Вип. 73. Ч. 2. С. 181-183.

31. Адамчук В. В. Стан наукового забезпечення механізації сільського господарства в Україні. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. Додатки до: УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого, 2009. Вип. 13, кн. 1. С. 21-29.

32. Гуков Я. С. Наукове забезпечення формування державної політики стосовно відтворення та оновлення матеріально-технічної бази агропромислових підприємств. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2008. Вип. 92, С. 13-25.

33. Агєєва І. В. Розвиток системи інженерно-технічного обслуговування. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2007. Вип. 54. С. 160–168.

34. Демко О. А. Вплив кваліфікації операторів на ефективність використання машин. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України, 2009. Вип. 134, Ч.2. С. 159–169.

35. Васильєва Н. К. Економіко-математичне моделювання системного інноваційного оновлення аграрного виробництва : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра екон. наук : 08.00.11 Математичні методи, моделі та інформаційні технології в економіці. Київ, 2007. 36 с.

36. Войтюк В. Д. Техніко-технологічний розвиток системи сервісу енергонасиченої сільськогосподарської техніки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.05.11 Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. Мелітополь, 2012. 39 с.

37. Логінов Л.М., Сірий Г.Ф., Косилов Н.І. Зернозбиральні комбайни двофазного обмолоту. – [Текст]. – М., 1999. – 336с.

38. Ломакін С. Зернозбиральні комбайни потреби покупців, пропозиції виробників // Аграрний огляд №3, 2010р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.agroobzor.ua/sht/a-143.html> - Загл. з екрану.

39. Методи економічної оцінки технологій та машин у сільському господарстві. К., 2010. - 125с.

40. Намиста В.І. Сучасні зернозбиральні комбайни. 2009. - 128с.

41. Жниварки: - погляд інженера [Електронний ресурс]. Режим доступу <http://www.ukragroservice.narod.ua>. - Загл. з екрану.

42. Проект фірми «КЛААС». Зернозбиральні комбайни Мега 350 та Мега 360. Харків, 2004. - 23 с.

43. Системні дослідження. Методологічні проблеми. К: Наука, 1988. - 491с.

44. Смолінський С.В., Мироненко В.Г. Висота зрізання як чинник підвищення ефективності функціонування зернозбирального комбайна // Збірник статей міжнародної науково-практичної конференції «Техніка майбутнього: перспективи розвитку сільськогосподарської техніки». К., 2013. - С.38-39.

45. Проектування технологічних процесів у рослинництві: навчальний посібник / В.Д.Гречкосій, В.Д.Войтюк, Р.В.Шагров та ін. – Видавничий центр НУБІП України, 2011. – 364с.

46. Молодик М. В. Оцінка надійності електрообладнання зернозбиральних комбайнів. Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха, 2010. Вип. 94. С. 419–425.

47. Морозов В. І. Вивчення якості роботи кормозбиральних машин. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Економічні науки. Харків: ХНТУСГ, 2017. Вип. 65. С. 166–171.

48. Норкін В. І. Стохастичні методи розв'язання задач неопуклого стохастичного програмування та їх застосування. Дис... докт. фіз.-мат. наук 01.05.01 Теоретичні основи інформатики та кібернетики. Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова. Київ. 1998. 250 с.

49. Технічні та технологічні вимоги до перспективної с.г. техніки. К.: 2011. – 246с.

50. Ефективність складних систем. Динамічні моделі. М.: Наука, 2019. – 281с.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України