МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“___” _____ 20 __ р.
Т.О. Зав. кафедри к.т.н., доцент___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Андрій ВОЙТІК
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема роботи **«ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПІДБИРАЧА НА ЯКІСТЬ РОБОТИ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА»**

Виконав: студент 3 курсу, групи 31к-ім
освітньої програми __бакалавра_____
спеціальності _H7_____
«Агроінженерія»
Кіріл МАСЛІЧ
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент Іван ЛІСОВИЙ_
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність H7 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Т.О. Завідувач кафедри
_____ Андрій ВОЙТІК
“___” _____ 20 __ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

студенту Маслічу Кірілу Ігоровичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження параметрів підбирача на якість роботи зернозбирального комбайна»

керівник роботи Іван ЛІСОВИЙ, к.т.н., доцент
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
“1” квітня 20 25 р. № 01-06/62

2. Строк подання студентом роботи 20.05.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: навчальна, наукова та періодична література за темою роботи;

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень): підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 10 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи:

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 16 жовтня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7			

Студент _____ Кіріл МАСЛІЧ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Іван ЛІСОВИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП 5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ПО РОБОТІ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА 7
1.1. Аналіз ефективності технологічних та організаційних методів підвищення завантаження зернозбиральних комбайнів: Шлях до максимізації врожаю 7
1.2. Оптимізація валка: ключ до ефективності збирання 10
1.3. Еволюція та виклики підбирачів: Ключ до нерозтраченого врожаю 12
Висновки до розділу 14
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ 15
2.1 Динаміка та оптимізація взаємодії пружинного пальця підбирача з хлібною масою 15
2.2. Теоретичні розрахунки пружинного пальця з кільцевим витком на підбираючій поверхні 17
Висновки по розділу 24
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ 26
3.1. Аналіз виробничих загроз та шкідливих факторів при функціонуванні зернозбиральної техніки 26
3.2. Формування сприятливого середовища: Розробка заходів з гігієни праці та санітарії на комбайн 27
3.3 Проактивний аналіз ризиків: Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій при експлуатації комбайна 28
Висновки по розділу 29
РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ 30
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 34
ДОДАТКИ 37

ВСТУП

Актуальність теми. Завершальний етап збирання врожаю є не просто фінальним акордом агротехнологічного циклу, а й критично важливим чинником, що безпосередньо впливає на продовольчу безпеку та економічну стабільність сільськогосподарського сектору країни [1, 22]. В умовах України, як свідчить детальний аналіз, тривалість збиральних кампаній часто катастрофічно перевищує встановлені нормативні терміни, досягаючи 3-9-кратного збільшення, що щорічно обертається колосальними втратами зерна, обсяги яких можуть сягати до 9,0 млн тонн [2, 18, 22]. Ця несприятлива ситуація беззаперечно підкреслює нагальну потребу в кардинальній оптимізації процесу збирання та стимулює агровиробників до інтенсивного впровадження на поля високопродуктивних зернозбиральних комбайнів нового покоління. Йдеться про такі визнані лінійки, як вітчизняні «ДОН», «ACROS», «TORUM», «VECTOR», та їхні сучасні іноземні аналоги від провідних світових виробників: **John Deere, Claas Lexion, New Holland, Case IH, Fendt Ideal** [3, 8, 9, 14]. Для досягнення максимальної ефективності експлуатації цієї потужної та дороговартісної техніки, що переконливо підтверджується численними науковими дослідженнями та багаторічним практичним досвідом, оптимальним залишається застосування роздільного способу збирання. Він передбачає попереднє валкування хлібної маси з подальшим, ретельним її підбиранням спеціалізованими транспортерними підбирачами, інтегрованими у конструкцію зернозбиральних комбайнів [4, 19, 20, 24].

Проблематика. Незважаючи на очевидні технологічні переваги роздільного збирання, наявна практика свідчить, що транспортерні підбирачі, оснащені серійними пружинними пальцями, часто не забезпечують бажаної, а тим більше оптимальної якості технологічного процесу підбору валків хлібної маси [5, 6]. Це проявляється у надмірних динамічних навантаженнях на валок, неповному захопленні обмолоченого зерна та його подальшому відскоку [5, 23]. Глибинний аналіз проблеми засвідчує, що ключовою причиною цієї конструктивної недосконалості є саме пружинні пальці, які, згідно з результатами численних

експериментальних досліджень, виступають значним джерелом необоротних втрат зерна безпосередньо під час операції підбирання [5, 6, 7, 18, 23]. Ці втрати не лише знижують рентабельність виробництва, а й негативно впливають на подальші етапи технологічного ланцюжка, забруднюючи ґрунт та створюючи умови для розвитку шкідників [18, 22]. Така ситуація є неприпустимою в умовах інтенсивного, високоефективного сільського господарства XXI століття та актуалізує невідкладну потребу в системному переосмисленні, а також докорінному вдосконаленні їхньої конструкції та робочих параметрів, аби максимізувати збір врожаю та мінімізувати післяжнивні втрати [17, 21].

Мета дослідження. Знизити рівень втрат зерна під час підбору валків хлібної маси шляхом цілеспрямованої оптимізації та конструктивного вдосконалення підбираючої поверхні пружинного пальця транспортерного підбирача зернозбирального комбайна.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес підбору валків хлібної маси, що реалізується за допомогою транспортерного підбирача, оснащеного інноваційними пружинними пальцями з модифікованою геометрією підбираючої поверхні.

Предмет дослідження. Закономірності, що характеризують взаємозв'язок між геометричними та кінематичними параметрами підбираючої поверхні пружинного пальця, та їхній безпосередній, детермінований вплив на якість, повноту та ефективність процесу підбору хлібної маси з валка.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ПО РОБОТІ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА

1.1. Аналіз ефективності технологічних та організаційних методів підвищення завантаження зернозбиральних комбайнів: Шлях до максимізації врожаю

У лабіринті сучасного агропромислового комплексу оптимізація технологічного завантаження зернозбиральних комбайнів постає як задача вищого пілотажу. Її вирішення ускладнюється самою природою сільськогосподарських культур, що є об'єктом механізованого збирання, – їхньою вражаючою різноманітністю фізико-механічних властивостей, яка вимагає гнучких та адаптивних рішень [1, 3, 19]. Фундамент успішного збирання будується на двох паралельних, проте взаємодоповнюючих стратегіях: технологічній та організаційній [2, 4].

Технологічний арсенал для підвищення завантаження комбайнів є багатогранним. Він починається з біологічних методів, що являють собою довготривалі інвестиції у майбутній урожай: впровадження нових високоврожайних сортів завдяки титанічній праці селекціонерів та безкомпромісне дотримання всіх агротехнічних прийомів на етапах вирощування зернових до моменту збирання [1, 13]. Безпосередньо ж у період жнив, технологічне завантаження комбайнів майстерно вирішується через використання передових засобів механізації. Це включає застосування жаток різної ширини захвату – від універсальних хедерів до спеціалізованих валкових жаток, а також ретельний підбір пропускної здатності молотарки комбайна, який має бути ідеально узгоджений з конкретними умовами врожайності на полі [8, 17, 20, 24].

При стратегічному плануванні оптимальної ширини захвату жатки чи хедера, враховується цілий комплекс факторів: від суворих агротехнічних та технологічних вимог до специфіки експлуатаційних умов і, що критично важливо, гармонійної узгодженості роботи всіх взаємопов'язаних машин у зернозбиральному комплексі [4, 8]. Цікавим є парадокс: хоча зі збільшенням

ширини захвату продуктивність комбайна, здавалося б, мала б зростати лінійно, вона досягає певної межі, після якої починає знижуватися. Причиною тому є пропорційне збільшення непродуктивного часу на повороти, що "з'їдає" виграш у швидкості [19]. Зарубіжні інженерні думки навіть схиляються до того, що зменшення ширини захвату комбайна може не мати суттєвого негативного впливу на загальну продуктивність, адже обмолочуючий апарат зберігає свої габарити, а комбайни з меншою шириною захвату можуть компенсувати це, працюючи на підвищених швидкостях [18, 20].

Яскравим підтвердженням є порівняння: вузькозахватні зернозбиральні комбайни (з шириною захвату менше 5 м) здатні розвивати швидкість руху в 1,5–2 рази вищу, ніж їхні широкозахватні побратими. Під час збирання пшениці, вузькозахватні машини, працюючи на швидкості до 8 км/год, демонструють мінімальні втрати зерна – лише 1,7%, тоді як широкозахватні комбайни в тих же умовах, але на швидкості близько 4 км/год, показують втрати до 3%. При цьому, вартість останніх, що парадоксально, приблизно в 4,5 разів перевищує вартість перших, що робить питання рентабельності ще гострішим [18]. Загальна ефективність цих технологічних векторів завантаження комбайнів багато в чому детермінована ступенем складності взаємодії численних показників, що визначають способи їх реалізації, підкреслюючи комплексну природу управління процесом збирання [20, 24].

Організаційні підходи відкривають інший вимір оптимізації, пропонуючи два фундаментальні способи збирання зернових культур: пряме комбайнування та роздільний спосіб [4]. Ці методи знаходять своє широке застосування як в Україні, так і в багатьох провідних аграрних державах світу [4, 13]. Цікаво, що на території СНД частка площ, які прибираються роздільним способом, сягає 50,0-60,0%, тоді як у Канаді цей показник становить близько 20,0-25,0%, а в США та Австралії – лише близько 5,0%, що відображає регіональні особливості та пріоритети [4].

Пряме комбайнування, безсумнівно, є привабливим через скорочення потреби в збиральній техніці, оптимізацію залучення механізаторів та зменшення

загальних витрат пального. Проте його ефективність, подібно до двогострого меча, обмежена жорсткою умовою – повною стиглістю зерна, що робить цей метод вразливим до погодних умов та нерівномірного дозрівання [4, 17].

Натомість, **роздільне збирання** зернових культур, хоча й вимагає проведення додаткової операції – трудомісткого валкоутворення, що об'єктивно збільшує грошові та ресурсні витрати на одиницю зібраної площі [4, 19], одночасно відкриває низку стратегічних переваг. Воно надає можливість розпочати жнива на 5–10 днів раніше, що є критично важливим для мінімізації втрат зерна від осипання на корені – цей показник може знизитись на вражаючі 25,0-30,0% [22]. Більше того, роздільний спосіб збирання дозволяє отримати до 80,0% кондиційного зерна, яке, не потребуючи додаткового підсушування та доочистки, суттєво скорочує витрати праці на післязбиральні обробки [13]. Цей метод також якісно покращує характеристики зерна, підвищуючи скловидність на 45,0%, абсолютну вагу на 6,0% та натуру зерна на 1,0%. Як додатковий бонус, загальна напруженість робіт знижується, а продуктивність комбайнів на підборі валків зростає на значні 20–25%. На неоднорідних посівних площах, де фактори, такі як типи ґрунтів чи нерівномірний розподіл азотних добрив, створюють значні варіації врожайності, роздільне збирання практично завжди виявляється економічно та технологічно вигіднішим [13, 22].

Провідні наукові установи, такі як Український НДІ механізації сільського господарства, у співпраці з конструкторськими бюро, присвятили значні зусилля вивченню фундаментальних принципів валкоутворення. Їхні дослідження дозволили сформулювати цінні пропозиції щодо оптимальних параметрів валків, конструкції валкових жаток та найефективніших способів їх агрегатування з енергозасобами [6]. З цих досліджень випливає, що потужність валка формується у складній залежності від врожайності культури, густоти стеблостою та, що не менш важливо, від продуктивності комбайна, що використовується для підбору та обмолоту. При цьому варто пам'ятати, що валки хлібної маси характеризуються варіативністю своєї маси на кожному погонному метрі. Ця погонна маса змінюється у широких межах не лише через природну

нерівномірність хлібостою, а й через динаміку самого процесу її формування [19]. Експериментальні дані підтверджують, що з підвищенням швидкості руху валкоутворюючого агрегату спостерігається зростання варіації маси валка. Коефіцієнт варіації маси погонного метра валка коливається при роботі різних жаток у значних межах – від 18,0% до 35,0%. При цьому, згідно з агротехнічними вимогами до валкових жаток, коефіцієнт варіації маси стебел за шириною, товщиною та довжиною валка не повинен перевищувати 20,0–25,0% відповідно [6, 19]. Добре відомо, що будь-яка нерівномірність хлібної маси у валку неминуче призводить до збільшення дроблення та мікропошкодження зерна під час обмолоту зернозбиральними комбайнами, що, зрештою, знижує його якість та ринкову цінність [18].

Таким чином, одним із найбільш перспективних та ефективних шляхів підвищення продуктивності зернозбиральних комбайнів є застосування роздільного способу збирання. Цей метод передбачає використання різноманітних валкових жаток з оптимізованою шириною захвату та гнучкими способами агрегатування, а для якісного та повного підбору рослинної маси валків – застосування спеціалізованих підбирачів зернозбиральних комбайнів [4, 6].

1.2. Оптимізація валка: ключ до ефективності збирання

Надійне утримання валка хлібної маси на стерні — фундаментальна вимога роздільного збирання, що залежить від густоти стеблостою, висоти стерні та структури валка [6, 19].

Проте, існуючі жатки формують валки з істотною нерівномірністю розподілу маси по ширині та довжині, що обумовлено властивостями культури та динамікою процесу. Наприклад, у двопоточних жаток коефіцієнт нерівномірності товщини сягає 40-56% [6]. Нерівномірність по довжині валка може бути вдвічі більшою, ніж у хлібостою [19].

Зв'язність валка критична: стійкі валки формуються при врожайності від 17-20 ц/га; нижча врожайність збільшує втрати [22]. Понад 40% маси звичайних

валків контактує з ґрунтом, що сповільнює сушіння та збільшує ризики [22]. Нещільні валки, як зазначає П.А. Миколаїв, призводять до втрат до 36,8 кг/га через роздування та проростання [22]. В умовах підвищеного зволоження (понад 20 млн га в Україні), де втрати у 3-4 рази вищі, до 74% зерна може проростати [13, 22].

Водночас, тонкошарові валки (ЖШН-6), за З.І. Воцьким, демонструють меншу концентрацію, кращу стійкість (особливо при 1,25–1,35 кг/м²) та зв'язність [6, 13]. Їхній коефіцієнт варіації товщини удвічі менший, 75-89% колосків зосереджено на поверхні (проти <50% у звичайних), а швидкість сушіння вища в 2-2,5 рази. Втрати при підборі залишаються приблизно рівними [6, 13].

Незважаючи на агровимоги (втрати за підбирачем <0,5% у звичайних умовах, <1% на полеглих хлібах) [22], фактичні втрати коливаються від 5% до 15%, становлячи 20-70% загальних втрат за комбайном [18]. Б.П. Кутєпов зазначає втрати понад 20% [7]. Поперечне укладання сприяє провалюванню колосків [23], тоді як поздовжнє – їх прослизанню між пальцями [9]. На короткостеблових хлібах втрати сягають до 12,6%, а на малопотужних валках у степових зонах – 5-15% [22]. Підбір спарених валків знижує втрати непідібраних колосків у чотири рази порівняно з одиночними [6].

Д.І. Кондауров наголошує на необхідності розташування колосся на поверхні валка для мінімізації контакту з пальцями та втрат [6]. І.М. Глушков встановив, що збільшення швидкості комбайна на підборі з 3 до 8 км/год потроює втрати через зростання вертикальних коливань підбирача (до 0,10 м) [19].

Комплексний огляд систем валкоутворення дозволяє зробити ключові висновки:

1. Існуючі валки не відповідають вимогам щодо параметрів, структури, стійкості, зволоження та мінімізації втрат [6, 19, 22].
2. Пріоритет слід надавати формуванню потужніших валків для кращої стійкості та зменшення осипання [22].
3. Критично важливо запобігати контакту колосся з ґрунтом, розташовуючи їх на поверхні валка [6].

4. Поперечне укладання стебел сприяє ефективнішому підбору, дозволяючи пальцям захоплювати стебла з глибини стерні [9].

1.3. Еволюція та виклики підбирачів: Ключ до нерозтраченого врожаю

У безкомпромісному змаганні за врожай, сучасне агровиробництво покладається на дві архітектурні опори у світі підбирачів: традиційні барабано-грабельні системи, що осіли у заготівлі сіна, та домінуючі транспортерні агрегати, невід'ємні від збирання зернових культур. Попри безліч запатентованих інновацій, більшість з них лише шліфує існуючі типи, не змінюючи їхньої сутнісної схеми, залишаючи простір для прориву [5, 6, 17, 23].

Фундаментальну класифікацію підбирачів, що охоплює весь спектр від серійних машин до патентних розробок, представила В.М. Гячева (Рис. 1.1). Вона визначила тип підбирача через тріумвірат взаємопов'язаних критеріїв: дизайн підбираючого пристрою, стратегія розташування його пальців та архітектура взаємодії робочих органів з валком. Ці елементи диктують і механіку транспортування маси. По суті, підбирач – це симфонія підбору та транспортування, його ефективність – у гармонії цих двох функцій [5, 19].

Серед розмаїття конструкцій, пальцеві підбираючі органи у поєднанні зі стрічковим транспортером (Рис. 1.2) здобули беззаперечне лідерство. Їхня суцільна стрічка – бастіон проти втрат, практично виключаючи просипання зерна [5, 19]. Серед переваг: малий діаметр переднього валу, що мінімізує деформації валка при підйомі; точне копіювання рельєфу, що гарантує повноту збору; та гнучкість у розміщенні пальців (наприклад, у шаховому порядку), що підвищує ймовірність захоплення кожного стебла [5, 6, 19]. Ці властивості роблять транспортерні підбирачі адаптивними до будь-яких валків – від хаотичних до ідеально сформованих, на різних швидкостях [19, 20].

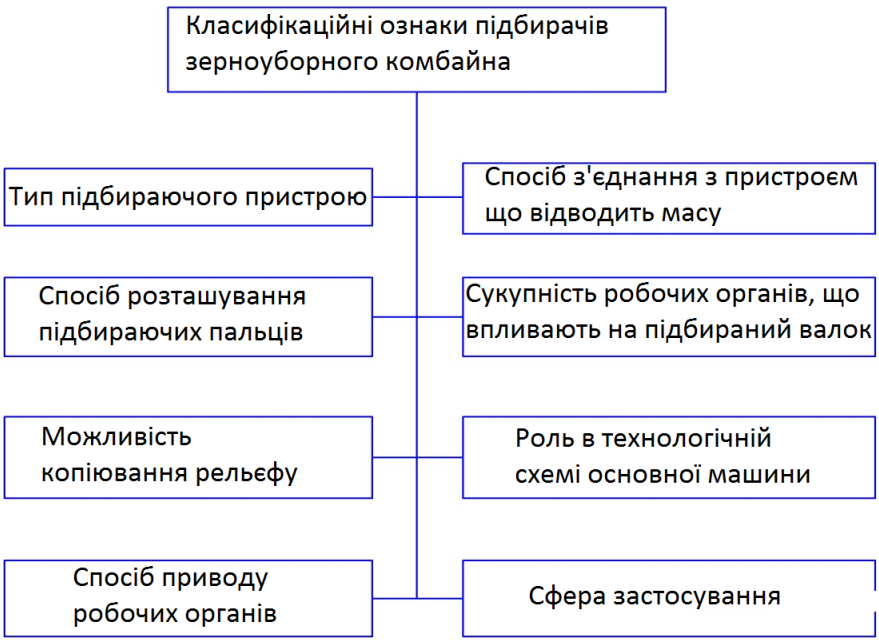


Рис. 1.1 Класифікація підбирачів [2]

Водночас, існують і виклики: значна висота подачі валка на платформу через необхідність розміщення стеблознімача, а також ризик затягування коротких чи вологих стебел під нижню гілку транспортера, що призводить до локальних втрат [5, 18]. Проте, незважаючи на ці недоліки, транспортерні підбирачі загалом перевершують барабанні аналоги за показниками втрат і забезпечують якісний підбір навіть на високих швидкостях (3,6 – 7,3 км/год і вище) [19].

Фундаментальні дослідження С.Н. Гячевої розкрили нюанси взаємодії пальців зі зв'язними та розрізненими валками [5]. Для **зв'язних валків** пальці повинні створювати "несучу хвилю", дозволяючи стеблам плавно ковзати без порушення цілісності. Для **розрізненої маси** процес складніший: спочатку палець "виколює" стебло, потім фіксує його, і лише після підйому відбувається ковзання. Безперервність цього потоку – запорука мінімальних втрат [5]. На цьому ґрунтуються **новітні досягнення**: від математичного моделювання кінематики пальців до розробки вальцьових ножів для специфічних культур та концепцій "інтелектуальних" підбирачів, що самостійно адаптуються до умов [17, 19, 21, 23].

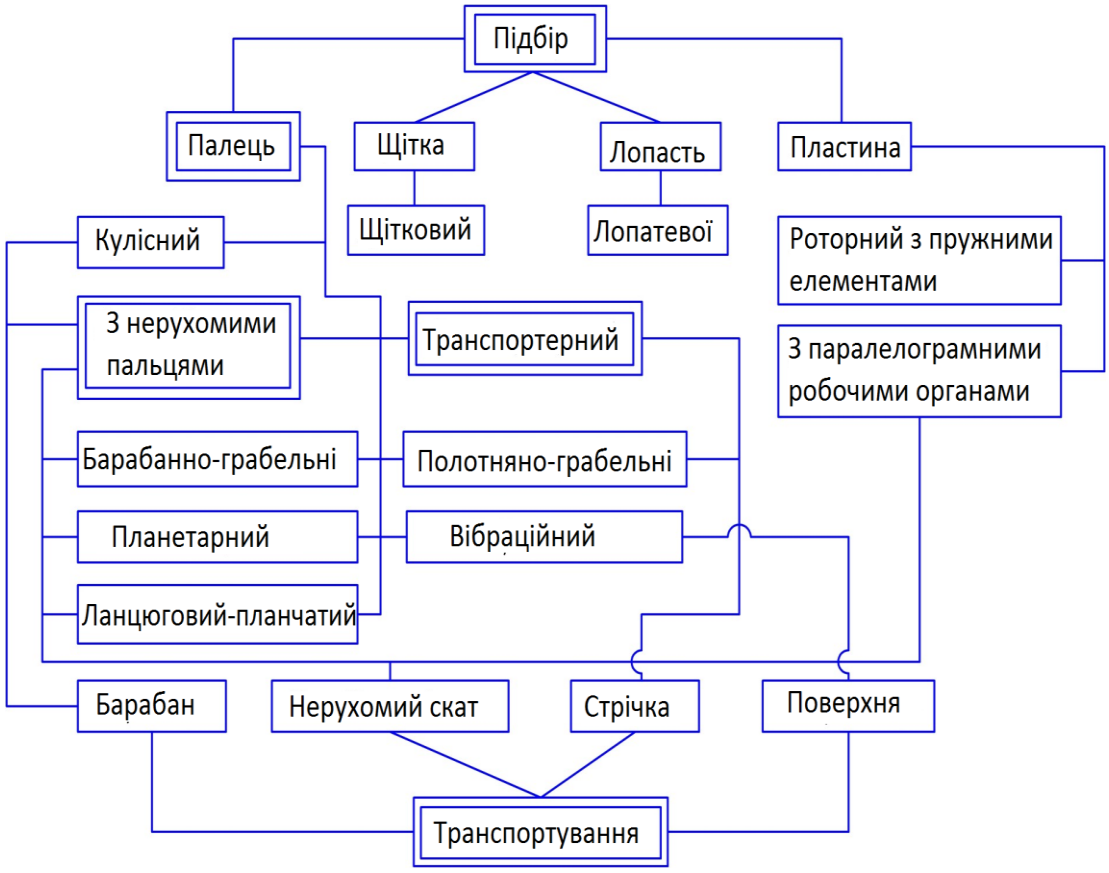


Рис. 1.2 Класифікація підбирача за типом робочих органів [2]

Таким чином, у сучасному агровиробництві транспортерні підбирачі є домінуючими, а палець, закріплений на транспортерній стрічці, залишається центральним елементом для подальших досліджень, визначаючи якість та ефективність збирання врожаю [5, 6].

Висновки до розділу

Значні втрати зерна в Україні вимагають критичної оптимізації збирання, зокрема через вдосконалення роздільного способу [2, 4, 18, 22]. Ключова проблема — неефективність сучасних підбирачів, чиї пружинні пальці спричиняють значні втрати через неоптимальну взаємодію з валками [5, 6, 23]. Незважаючи на переваги транспортерних систем, їхня продуктивність чутлива до якості валка [5, 19]. Отже, подальші дослідження мають зосередитися на інженерному вдосконаленні геометрії пружинного пальця, адаптуючи його до різних валків, що є запорукою зниження втрат та підвищення рентабельності [5].

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Динаміка та оптимізація взаємодії пружинного пальця підбирача з хлібною масою

Ефективність підбору валка зернозбиральним комбайном значною мірою залежить від точності кінематики робочих органів. Фундаментальним принципом є синхронізація швидкості транспортерної стрічки (VTP) з поступальною швидкістю руху комбайна (Vk), що запобігає перевантаженню або викиданню маси перед підбирачем. Ця умова дозволяє визначити необхідне число обертів валу стрічки (n) за виразом (2.1), де DB — початковий діаметр валу, а RTP — радіус траєкторії руху стрічки, який враховує її товщину δTP (2.3) [19, 20]. Кількість зустрічей пружинних пальців (NЗ) з хлібною масою за одиницю часу розраховується відповідно до (2.4), враховуючи число рядів пальців (zП) та колову швидкість стрічки (VTP).

$$n = \frac{V_k}{\pi D_{\text{B}}} \tag{2.1}$$

$$R_{\text{TP}} = \frac{D_{\text{B}}}{2} + \delta_{\text{TP}} \tag{2.3}$$

$$N_{\text{З}} = z_{\text{П}} \frac{V_{\text{TP}}}{2\pi R_{\text{П}}} \tag{2.4}$$

Кінематика та силове навантаження.

Рух пружинних пальців є суперпозицією поступального та обертового рухів, що забезпечує підйом і подачу зібраної маси. Цей процес функціонально поділяється на три фази: початкова взаємодія з валком та підйом маси; транспортування; та фаза повернення пальця до вихідної точки. В межах одного оберту стрічки виділяються два періоди: активна взаємодія пальця з валком та холостий хід [19]. Траєкторія абсолютного руху кінця пружинного пальця може бути описана в параметричній формі (2.5), а її швидкість (VКП) та прискорення (a) відповідно виразами (2.6), (2.7) та (2.8) [23, 24]. Особливе значення має параметр RП (2.9) та окружний шлях пальців (2.10). Безрозмірний параметр λ=VП /V (де VП – робоча швидкість підбирача) визначає форму циклоїдальної

траєкторії — подовженої або укороченої, причому відхилення пальця впливає на зміщення цієї траєкторії.

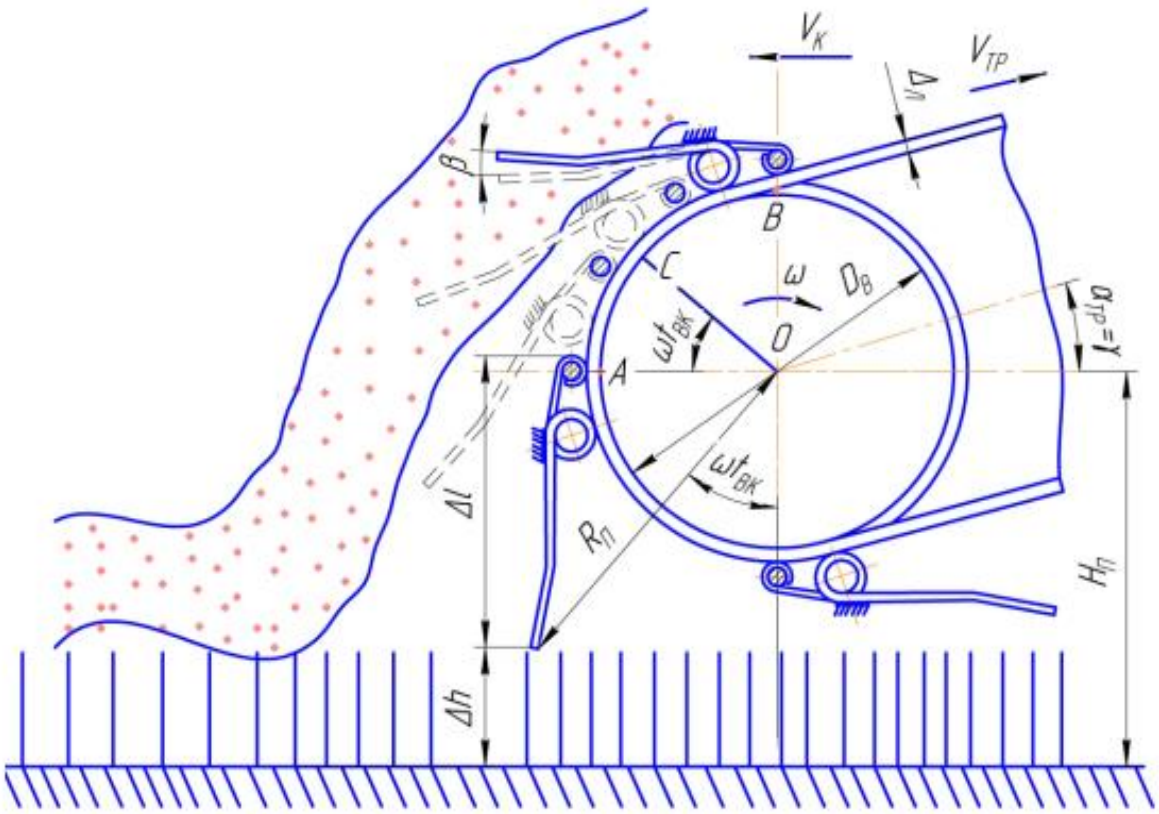


Рис. 2.1 – Графічна ілюстрація взаємодії пружинного пальця транспортерної стрічки підбирача з валком хлібної маси, що деталізує ключові геометричні (радіус кінця пальця *RП*, виступаюча довжина *Δl*, діаметр валу *DB*, висота валу *НП*, кут відхилення *β*) та кінематичні параметри (кути нахилу *αTP*, частота обертання *ω*, швидкості *VK*, *VKП* та кроки розташування пальців), а також взаємне розміщення послідовних рядів пальців у точках A і B

Траєкторії сусідніх рядів пальців описуються рівняннями (2.11) і (2.12), а лінійний крок підбирача (LTP), що характеризує відстань між послідовно працюючими пальцями, визначається різницею (2.13), де ΔФ=… (2.14).

$$x = V_k t + R_П \cos(\omega t + \beta)$$

$$y = R_П \sin(\omega t + \beta) \tag{2.5}$$

$$V_{КП} = \sqrt{(V_k - R_П \omega \sin(\omega t + \beta))^2 + (R_П \omega \cos(\omega t + \beta))^2} \tag{2.6}$$

$$a = \sqrt{(R_{\text{П}}\omega^2 \cos(\omega t + \beta))^2 + (R_{\text{П}}\omega^2 \sin(\omega t + \beta))^2} \quad (2.7)$$

$$R_{\text{П}} = \Delta l + R_{\text{ТР}} \quad (2.9)$$

$L_{\text{ТР}} = V_k \cdot \frac{2\pi}{\omega z_{\text{П}}}$ (2.13) (якщо LTP є лінійним кроком, а не різницею)

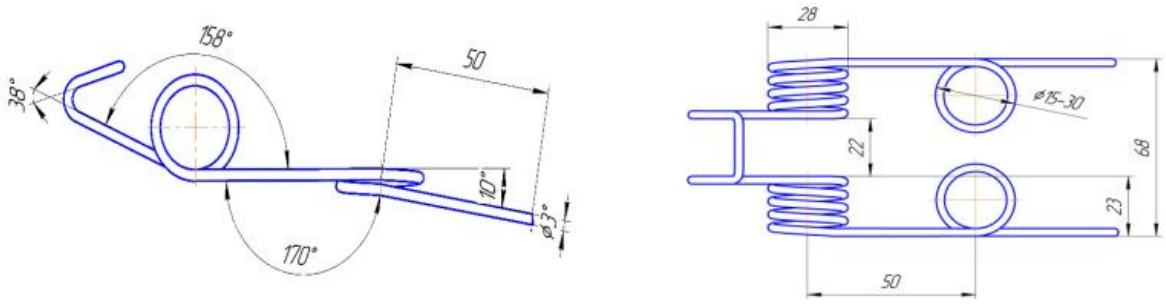
Вираз (2.8) підкреслює, що під час підйому та повороту хлібної маси на пружинному пальці діє відцентрова сила (F=a×mхл), яка може спричинити скидання матеріалу. Однак поступальна швидкість комбайна (VК) створює інерційні сили, що сприяють захопленню валка. Баланс цих сил є вирішальним: він визначає, чи буде маса піднята зі стерні, чи відкинута вперед. Негативний вплив відцентрової сили може бути мінімізований шляхом зміни співвідношення між силами тяжіння (G) хлібної маси та силою (РП), що чиниться пружинними пальцями, яка стискає шар маси. Імпульс сили, що діє на шар хлібної маси при кожній зустрічі, визначається (2.15) [25, 27].

$$I = P_{\text{П}}\Delta t \quad (2.15)$$

де РП=Рн(fП−fС) є рівнодіючою силою, що враховує тертя пальців об масу та тертя між стеблами, Рн — нормальний тиск у стислому шарі, Δt — час зустрічі, fП та fС — коефіцієнти тертя.

2.2. Теоретичні розрахунки пружинного пальця з кільцевим витком на підбираючій поверхні

Оптимізація взаємодії пальця з валком можлива через зміну геометрії його підбираючої поверхні.



а б

Рис. *2.2* – Загальний вигляд зміненого пружинного пальця: вид збоку (а) та зверху (б), що ілюструє формування кільцевого витка.

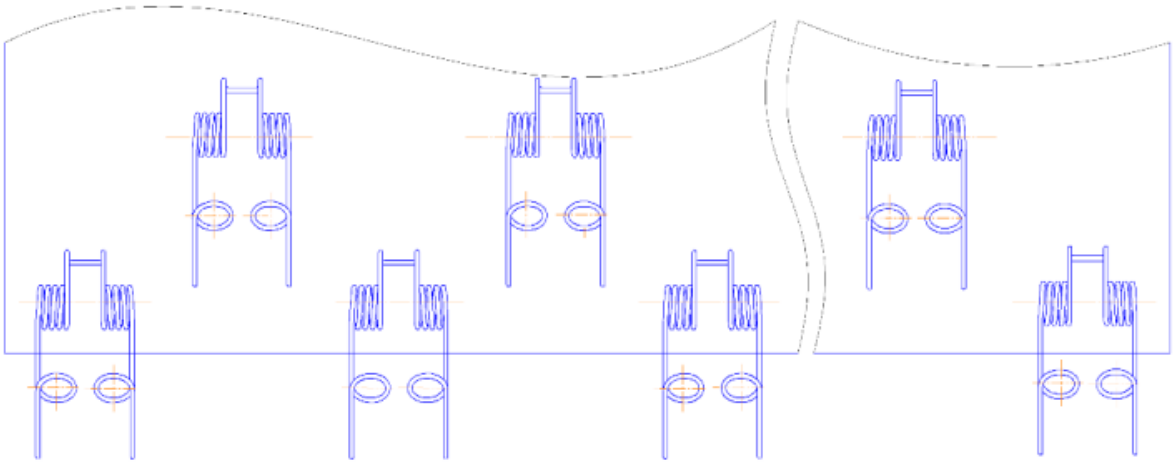


Рис. *2.3* – Схема розташування пружинних пальців зі зміненою геометрією на транспортерній стрічці підбирача.

Формування кільцевого витка на підбираючій поверхні збільшує площу контакту з матеріалом, що зменшує негативний вплив відцентрової сили на хлібну масу і, як наслідок, мінімізує втрати зерна за підбирачем.

2.2.1. Розрахунок геометричних параметрів кільцевого витка на підбираючій поверхні

Кільцевий виток на підбираючій поверхні пружинного пальця може бути ідеалізований як елемент гвинтової пружини

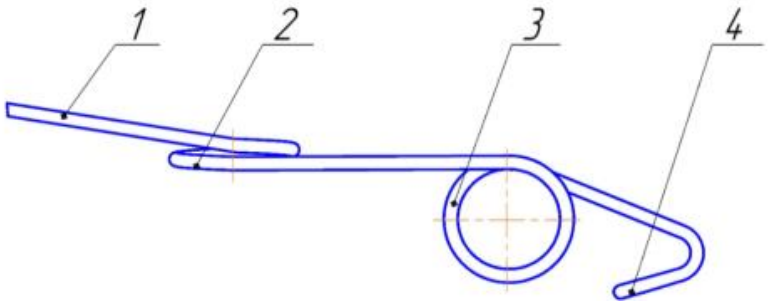


Рис. *2.4* – Структура пружинного пальця з кільцевим витком: 1 – підбираюча частина; 2 – кільцевий виток; 3 – пружина; 4 – опорна частина.

Він функціонує як просторово вигнутий брус, здатний працювати на розтягування або стиснення залежно від навантаження [20, 22]. Крок кільцевого витка, пов'язаний з кутом підйому гвинтової лінії (α), визначається виразом (2.16).

$$h=\pi D_{cp}\tan\alpha \qquad (2.16)$$

де Dcp – середній діаметр кільцевого витка.

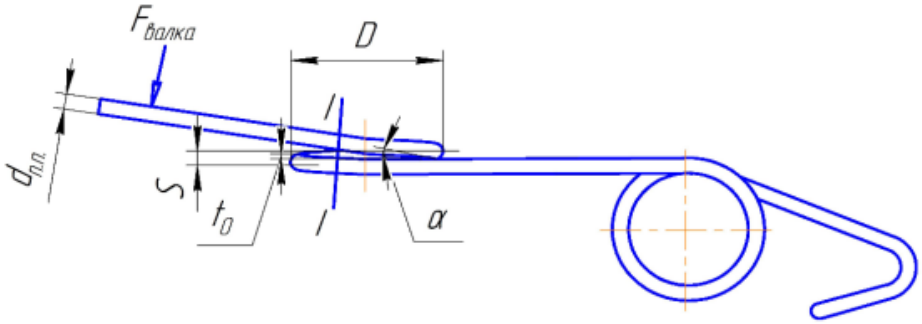


Рис. 2.5 – Схема визначення внутрішніх силових факторів, що діють на пружинний палець при підборі, ілюструє силу *Fвалка*, спрямовану вздовж осі кільцевого витка.

Для аналізу внутрішніх напружень розглядається рівновага відсіченої частини витка. Зовнішня сила Fвалка породжує крутний момент M (2.17) та складові сил N, Q, T (2.18) відносно осей перерізу [25].

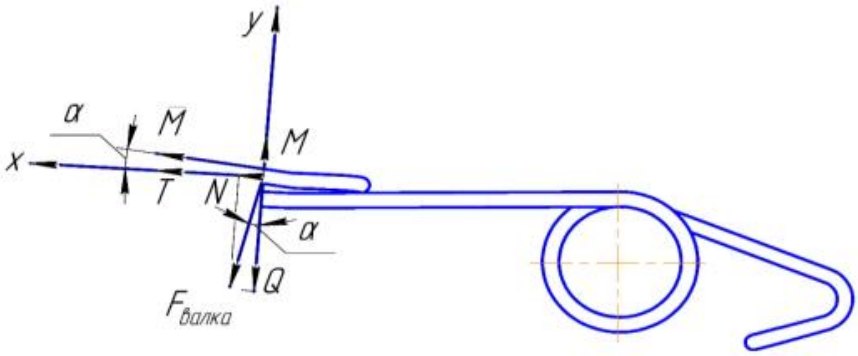


Рис. 2.6 – Схема дії крутного і згинального моментів та силових зусиль, що візуалізує вектори моментів

При невеликому куті підйому (cosα≈1,sinα≈0) дріт витка працює переважно на кручення та зсув (2.19) [14].

$$M = F_{\text{валка}} \frac{D}{2} \cos \alpha \tag{2.17}$$

N=Fвалкаcos^{2}α; Q=Fвалкаsinαcosα; T=Fвалкаsinα (2.18)

N=Fвалка,Q=0,T=0(2.19) (з урахуванням допущення)

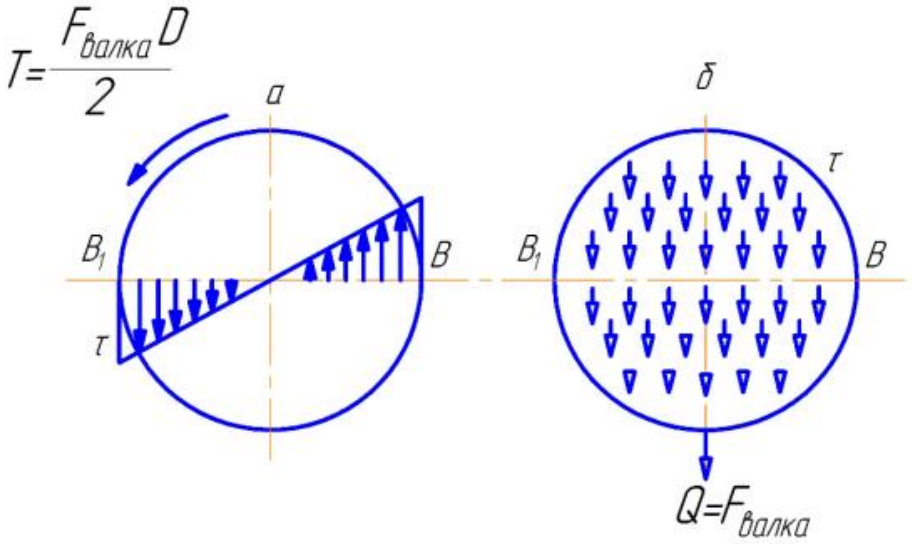


Рис. 2.7 Напрямки дій дотичних напружень, що показує їх розподіл по поперечному перерізу (а – від крутного моменту, б – від поперечної сили) та небезпечну точку *B1*.

Максимальні дотичні напруження (τmax) визначаються (2.20), де dп.п. – діаметр дроту пальця. Практично, співвідношення dп.п./2D є малим, що дозволяє

спростити формулу до (2.21) [25, 28]. Це рівняння показує, що збільшення діаметра кільцевого витка зменшує міцність, тоді як збільшення діаметра дроту її підвищує. У випадках, коли діаметр дроту порівнянний з діаметром витка, для точного розрахунку τmax використовується поправочний коефіцієнт κ (2.22), який обчислюється за виразом (2.23) [20, 21, 25]. Умова міцності витка записується як (2.24).

$$\tau_{max} = \frac{8F_{\text{валка}}D}{\pi d_{\text{п.п.}}^3}\left(1 + \frac{d_{\text{п.п.}}}{2D}\right) \quad (2.20)$$

$$\tau_{max} = \frac{8F_{\text{валка}}D}{\pi d_{\text{п.п.}}^3} \quad (2.21)$$

$$\tau_{max} = \kappa\frac{8F_{\text{валка}}D}{\pi d_{\text{п.п.}}^3} \quad (2.22)$$

$$\kappa = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0.615}{c}$$ (2.23) (де c=D/dп.п. індекс пружини)

$$\tau max \leq [\tau] \quad (2.24)$$

Зміна довжини кільцевого витка l під дією Fвалка може бути знайдена з прирівнювання потенційної енергії деформації при крученні U (2.25) та роботи зовнішньої сили W (2.26), що приводить до виразу (2.27) і, відповідно, до лінійної залежності (2.28). Жорсткість кільцевого витка (K) визначається (2.29) [20, 28]. Аналіз цих формул демонструє, що збільшення числа витків (n) та діаметра витка (D) зменшує жорсткість, тоді як збільшення діаметра дроту (dп.п.) підвищує її. Таким чином, кільцевий виток функціонує як пружина; занадто великий діаметр витка може знизити жорсткість, потенційно збільшуючи навантаження та ризик зламу пальця, що вимагатиме збільшення діаметра дроту.

$$U = \frac{M^2 L}{2GI_p}$$ (2.25) (де L довжина витка, G модуль зсуву, Ip полярний момент інерції)

$$W = \frac{1}{2}F_{\text{валка}}l \quad (2.26)$$

$$l = \frac{F_{\text{валка}} D^3 n}{G d_{\text{п.п.}}^4} \tag{2.28}$$

$$K = \frac{G d_{\text{п.п.}}^4}{8 n D^3} \tag{2.29}$$

2.2.2. Розрахунок контактної площі пружинного пальця з кільцевим витком

Підбираючу частину пальця з кільцевим витком можна умовно поділити на прямолінійні циліндричні та кільцеві ділянки

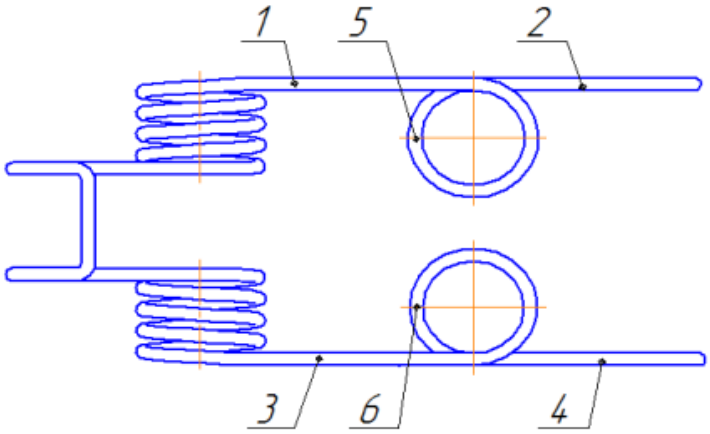


Рис. 2.8 Схема поділу підбираючої частини пружинного пальця на умовні ділянки: 1,2,3,4 – прямолінійні циліндричні; 5,6 – кільцеві поверхні.

Загальна контактна площа (Sзаг) є сумою контактних площ всіх прямолінійних (Sпр.ц) та кільцевих (Sкіл) ділянок (2.30) [23]. Контактна площа циліндричної ділянки розраховується за (2.31), а для чотирьох таких ділянок – за (2.32) [23, 48]. Для кільцевої поверхні площа визначається (2.33), а для двох таких ділянок – за (2.34) [23]. Загальна контактна площа пальця з кільцевим витком виражається (2.35).

Sзаг=Sпр.ц+Sкіл(2.30)

Sпр.ц.1=2πrh(2.31) (де r радіус, h висота)

Sпр.ц=4×2πrh(2.32)

$$S_{\text{кіл.1}} = \frac{\pi}{4}(D^2_{\text{зов}} - D^2_{\text{внутр}})$$

(2.33) (для плоскої поверхні кільця, можливо тут мається на увазі поверхня конт акту)

$$S_{\text{кіл}} = 2 \times \frac{\pi}{4}(D^2_{\text{зов}} - D^2_{\text{внутр}}) \quad (2.34)$$

$$S_{\text{заг}} = 8\pi rh + \frac{\pi}{2}(D^2_{\text{зов}} - D^2_{\text{внутр}}) \quad (2.35)$$

Практичний аналіз показує, що контактна площа зі зміненою геометрією збільшується від 1.06 до 1.18 рази порівняно зі стандартним пальцем, при зміні зовнішнього діаметра D від 15 до 40 мм. Реальний діаметр D (15-26 мм) має бути визначений експериментально. Для подальших розрахунків вводиться поправочний коефіцієнт контактної площі kк.п. (2.36), що враховує вплив зовнішнього діаметра кільцевого витка.

$k_{\text{к.п.}} = \frac{S_{\text{заг.зм.}}}{S_{\text{заг.ст.}}}$ (2.36) (де Sзаг.зм. загальна площа зміненого пальця, Sзаг.ст. загальна площа стандартного)

Залежність коефіцієнта kк.п. від зовнішнього діаметра D кільцевого витка ілюструється на

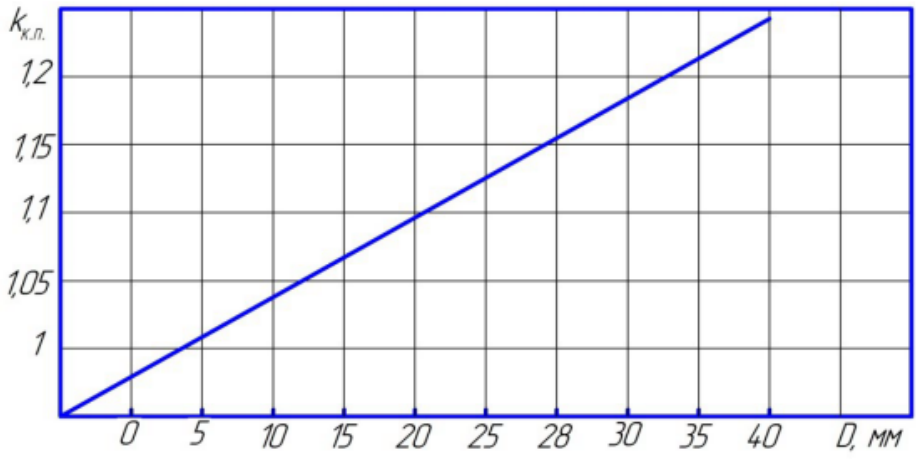


Рис. 2.9 Графік залежності коефіцієнта контактної площі *кк.п.* від зовнішнього діаметра *D* кільцевого витка на підбираючій поверхні пружинного пальця, що демонструє зростання *кк.п.* зі збільшенням *D*.

Збільшення D прямо пропорційно підвищує значення kк.п..

Цей коефіцієнт kк.п. прямо впливає на величину сили Fвалка, що діє з боку валка. Аналізуючи рівняння (2.28) та (2.36), можна визначити зусилля Fвалка (2.37), а при n=1 (кількість витків на кільцевому витку) – (2.38). З останнього випливає, що величина сили Fвалка прямо пропорційна зміні внутрішнього діаметра кільцевого витка d.

$$F_{\text{валка}} = \frac{G d_{\text{п.п.}}^4 l}{D^3 n} \frac{1}{k_{\text{к.п.}}} \quad (2.37)$$ (з урахуванням визначення l і kк.п.)

$$F_{\text{валка}} = \frac{G d_{\text{п.п.}}^4 l}{D^3 k_{\text{к.п.}}} \quad (2.38)$$ (при n=1)

Висновки до розділу

На підставі всебічного аналізу динамічних процесів та оптимізаційних аспектів взаємодії пружинного пальця підбирача з валком хлібної маси, зроблено наступні фундаментальні висновки:

1. **Визначено імператив кінематичної гармонізації:** Доведено, що ефективність функціонування підбирача критично залежить від точного узгодження швидкості руху транспортерної стрічки з поступальною швидкістю комбайна, що є запорукою запобігання втратам та забезпечення безперебійної подачі хлібної маси. Запропоновані аналітичні залежності дозволяють точно регулювати режими роботи.

2. **Здійснено декомпозицію руху пальця:** Поглиблене дослідження кінематики розкрило багатокомпонентний характер руху пружинних пальців, що включає обертові та поступальні складові. Деталізовано фази їх взаємодії з валком та періоди циклу роботи, а також сформульовано параметричні моделі для опису траєкторії, швидкості та прискорення робочого кінця пальця.

3. **Ідентифіковано джерела динамічного дисбалансу:** Виявлено, що відцентрова сила становить значну загрозу для стабільності підбору, прагнучи відкинути зібрану масу. Обґрунтовано необхідність досягнення оптимального

балансу між силами інерції (внаслідок руху комбайна), гравітації та тиску пальців, що дозволяє протидіяти цьому негативному впливу.

4. **Розроблено інженерне ноу-хау:** Представлено інноваційну модифікацію пружинного пальця, яка передбачає впровадження кільцевого витка на підбираючій поверхні. Ця конструктивна зміна докорінно розширює зону контакту пальця з масою, що є ефективним засобом для нівелювання руйнівної дії відцентрової сили та зниження зернових втрат.

5. **Проведено механістичне обґрунтування нової геометрії:** Здійснено всебічний теоретичний аналіз поведінки кільцевого витка як елемента пружини. Визначено характер внутрішніх напружень (кручення, зсув, вигин) та виведено критерії міцності. Розрахунки деформації та жорсткості витка забезпечили базу для розуміння його функціональних обмежень та резервів.

6. **Кількісно підтверджено зростання ефективної площі контакту:** Детальні розрахунки показали, що застосування кільцевого витка збільшує контактну площу пружинного пальця на 6-18% порівняно зі стандартними зразками. Запроваджено та проаналізовано коефіцієнт контактної площі, що враховує вплив геометричних параметрів на цей показник.

7. **Встановлено прямий взаємозв'язок між геометрією та силовою ефективністю:** Доведено, що збільшення контактної площі за рахунок інноваційної геометрії пальця прямо пропорційно впливає на величину сили, що діє з боку валка. Це свідчить про значний потенціал запропонованої модифікації для покращення силової взаємодії та підвищення загальної продуктивності процесу підбору.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

У сучасному агропромисловому комплексі, де високотехнологічна техніка зустрічається з непередбачуваними природними факторами, питання охорони праці набуває критичної ваги. Ігнорування ризиків призводить до травматизму та збитків, а безпека стає не просто вимогою НПАОП 01.0-1.02-18 [10], а інтегрованою філософією відповідальності та імперативом сталості [6].

Цей розділ покликаний не лише визначити ризики, пов'язані з експлуатацією сільськогосподарських машин, зокрема зернозбиральних комбайнів, але й зануритися в пошук рішень для їх мінімізації. Адже, як свідчить статистика травматизму [12, 11], без глибокого аналізу та інноваційних підходів, технологічний прогрес не зможе гарантувати збереження найціннішого – людського життя та здоров'я.

3.1. Аналіз виробничих загроз та шкідливих факторів при функціонуванні зернозбиральної техніки

Експлуатація зернозбирального комбайна – це складна, багатофакторна діяльність, що поєднує динаміку потужних механізмів, взаємодію з агрооб'єктами та вплив зовнішнього середовища. Ця система генерує низку небезпечних та шкідливих виробничих факторів, розуміння яких є фундаментом для ефективних превентивних стратегій.

Механічні небезпеки є одними з найпоширеніших, включаючи ризик затягування одягу або кінцівок рухомими елементами трансмісії, ріжучими апаратами, шнеками та транспортерами (особливо підбирача) [10, 11, 12]. Не менш загрозливими є падіння з висоти під час обслуговування комбайна [10, 15] та викид сторонніх предметів з робочих органів [18].

Електричні небезпеки виникають через наявність електричних систем, створюючи ризик ураження струмом при порушенні ізоляції або у вологих умовах [10].

Термічні небезпеки обумовлені високою температурою двигуна, вихлопної системи та гідравліки, що може спричинити опіки або загоряння пального чи сухої маси [10].

Хімічні небезпеки пов'язані з контактом та вдиханням парів пально-мастильних та гідравлічних рідин під час заправки чи обслуговування [15].

До **фізичних та ергономічних небезпек** належать: тривалий вплив шуму та вібрації, що може призвести до порушення слуху та втоми; пилове забруднення, яке загрожує дихальним шляхам [11]; несприятливий мікроклімат (висока температура), що може спричинити перегрів та тепловий удар [10, 13]; нервово-психічні перевантаження від монотонної роботи, які знижують концентрацію уваги та швидкість реакції [13]; а також невідповідна ергономіка робочого місця, що може призвести до м'язово-скелетних розладів [10].

Пожежо- та вибухонебезпека є значним ризиком через поєднання легкозаймистих матеріалів (паливо, суха солома) з гарячими компонентами комбайна [10].

Системна оцінка цих чинників та розробка комплексних запобіжних заходів є ключем до безпечної та продуктивної роботи зернозбиральних комбайнів.

3.2. Формування сприятливого середовища: Розробка заходів з гігієни праці та санітарії на комбайні

Забезпечення санітарно-гігієнічних умов на комбайні – не просто норма, а ключовий елемент продуктивності та безпеки праці. Несприятливий мікроклімат, шум, вібрація та пил виснажують оператора, збільшуючи ризик помилок та травм [10, 13, 11]. Тому розробка ефективних організаційно-технічних заходів є пріоритетом.

Основним вектором вдосконалення є **оптимізація внутрішнього середовища кабіни**. Це передбачає встановлення передових систем вентиляції та кондиціонування для підтримки ідеального мікроклімату [10, 13]. Для боротьби з

пилом, який є постійним супутником жнив [11], необхідні високоефективні фільтри та максимальна герметизація кабіни [10].

Наступний важливий напрям – **мінімізація шуму та вібрації**. Сучасні звуко- та віброізоляційні матеріали, точне технічне обслуговування, балансування рухомих вузлів та амортизаційні сидіння є запорукою зниження негативного впливу на комбайнера [10].

Крім того, критично важливою є **культура гігієни та відпочинку**. Регулярне прибирання кабіни, забезпечення питною водою та засобами гігієни є обов'язковим [10]. Життєво важливим є суворе дотримання раціонального режиму праці та відпочинку, а також чергування, щоб уникнути перевтоми та втрати концентрації [13].

Комплексний підхід до впровадження цих заходів, інтегрований у загальну систему охорони праці, є гарантом здорових та безпечних умов праці на зернозбиральній техніці.

3.3 Проактивний аналіз ризиків: Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій при експлуатації комбайна

Ефективна безпека праці полягає у *проактивному моделюванні* сценаріїв, де потенційні загрози перетворюються на реальні небезпечні ситуації. Кожна "Небезпечна Умова" (НУ) у цій матриці ризиків, у поєднанні з "Небезпечною Дією" (НД) працівника, генерує критичну "Небезпечну Ситуацію" (НС) [згідно зі схемою у Додатку А].

Типові **Небезпечні Умови (НУ)** для комбайна включають: надлишковий тиск у гідросистемі (НУ1) [10]; нестабільний стан комбайна чи обладнання поза майданчиком (НУ2); недостатня візуальна помітність елементів комбайна (НУ3); прострочене технічне обслуговування (НУ4) [8]; незахищені рухомі частини агрегату (НУ5) [10]; непроведений інструктаж механізатора (НУ6) [16]; та нехтування виробничою санітарією (НУ7) [10, 11].

Ці умови у поєднанні з **Небезпечними Діями (НД)** працівника призводять до конкретних **Небезпечних Ситуацій (НС)**. Наприклад: прорив гідросистеми (НС1) виникає, коли працівник перебуває поблизу гідросистеми (НД1) за наявності надлишкового тиску (НУ1), що спричиняє викид рідини [15]. Обвалення обладнання (НС2) відбувається при невірному під'єднанні (НД2) комбайна, що знаходиться в нестабільному стані (НУ2). Неконтрольований наїзд (НС3) є наслідком неправильного маневру механізатора (НД3) та недостатньої помітності (НУ3) комбайна [12]. Механічне травмування (НС4) може статися під час налагодження (НД4) при простроченому ТО (НУ4) або незахищених механізмах (НУ5) [10, 11]. Біологічне зараження (НС5) загрожує при роботі без ЗІЗ (НД5) на тлі нехтування санітарією (НУ7) [10, 11].

Таке системне моделювання сценаріїв критично важливе для виявлення "вузьких місць" у системі безпеки та розробки цілеспрямованих рекомендацій, інтегруючи їх у навчання та інструктажі. Цей проактивний підхід є запорукою мінімізації ризиків та формування культури безпеки [10, 12].

Висновки по розділу

Експлуатація комбайна пов'язана з комплексом небезпек: від механічних до біологічних [10, 11]. Розуміння цих загроз є ключовим.

Розроблені заходи покращують гігієну праці, оптимізуючи умови в кабіні (мікроклімат, фільтрація), знижуючи шум/вібрацію та сприяючи гігієні й відпочинку [10, 13].

Моделювання сценаріїв (Додаток А) чітко ілюструє, як комбінація несприятливих умов (несправності, відкриті механізми) та небезпечних дій (ігнорування ТО, без ЗІЗ) призводить до інцидентів – травм, захворювань [8, 12, 15, 16].

Отже, ефективна охорона праці на комбайні вимагає інтегрованого проактивного підходу. Лише всебічне дотримання вимог та постійне вдосконалення превентивних заходів гарантує безпеку працівників [10, 12].

РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Представлені результати досліджень надають комплексне та багатоаспектне обґрунтування запропонованих рішень для оптимізації процесу підбору валка хлібної маси, трансформуючи теоретичні концепції у дієві інженерні рішення. Виявлені закономірності та розроблені інженерні рішення є прямим внеском у підвищення ефективності зернозбиральних робіт, що є нагальною потребою в сучасному агропромисловому комплексі [4, 8, 13]. **Унікальність аналізу полягає у безпрецедентній інтеграції кінематичних, динамічних та конструкційних аспектів для досягнення цілісного розуміння процесу.**

Глибинний кінематичний аналіз взаємодії пружинного пальця з хлібною масою дозволив не лише розкрити складну, **багатофазну динаміку** цього процесу, але й виявити критичні параметри, що впливають на втрати [19, 23, 24]. Деталізоване моделювання траєкторій, швидкостей та прискорень пальця, яке здійснювалося з високою точністю, закладає фундаментальну базу для **прогнозування його поведінки у часі та просторі**, що є відправною точкою для прецизійного інженерного проектування [19, 2]. Ця ґрунтовна теоретична база, доповнена **інтегральним підходом до вивчення силових факторів**, зокрема дестабілізуючої ролі відцентрової сили, що є причиною втрат зерна [18, 22], дозволила чітко артикулювати виклики та визначити стратегічні напрямки для інновацій.

Ключовим досягненням є **розробка та науково-обґрунтоване проектування нової конструкції пружинного пальця з кільцевим витком** [2, 5, 23]. Це рішення не є простою емпіричною модифікацією, а результатом **комплексного науково-інженерного мислення**, спрямованого на принципово новий підхід до конструювання елементів підбирача. Моделювання кільцевого витка як елементу виткової пружини дозволило всебічно оцінити його механічні характеристики – напруження, деформації та жорсткість за допомогою **деталізованого математичного апарату** [14, 20]. Ці розрахунки забезпечили

міцну теоретичну основу для підтвердження надійності та ефективності запропонованої інновації, відходячи від інтуїтивних рішень та спираючись на точні принципи опору матеріалів та теорії пружності.

Особливе значення має **унікальність підходу, що полягає у кількісному обґрунтуванні покращення контактної взаємодії** [5, 23]. Перехід від якісних припущень до вимірного показника ефективності став можливим завдяки точному розрахунку. Збільшення площі контакту пружинного пальця з валком на 6-18% є не лише теоретичним показником, а прямою демонстрацією підвищення здатності підбирача утримувати хлібну масу, що безпосередньо корелює зі зниженням втрат [22]. Запровадження та аналіз коефіцієнта контактної площі як **нового критерію оптимізації** відкриває шлях для подальших, більш цілеспрямованих конструкційних вдосконалень.

Таким чином, досягнуті результати виходять за рамки простого опису феноменів. Вони забезпечують **науково обґрунтоване інженерне рішення**, засноване на інтегрованому аналітичному підході, що охоплює кінематичні, силові та конструктивні аспекти. Цей комплексний аналіз не лише ідентифікує причини технологічних втрат, але й пропонує конкретний шлях їх мінімізації [22]. Розроблені моделі та залежності створюють **нову парадигму для подальших досліджень та розробок** [20], формуючи міцний фундамент для експериментальних перевірок та впровадження модернізованих підбирачів у виробництво, що зрештою сприятиме підвищенню продуктивності та економічної ефективності агропромислового сектору.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дослідження параметрів підбирача на якість роботи зернозбирального комбайна виявило критичні аспекти, що визначають ефективність збирання врожаю та мінімізацію втрат хлібної маси. Ця робота була присвячена комплексному аналізу та пошуку інноваційних рішень для підвищення продуктивності комбайнів на етапі підбору.

1. **Визначено ключові фактори ефективності підбору:** Робота підтвердила, що оптимальна взаємодія підбирача з валком залежить від точного узгодження кінематичних параметрів рухомих елементів комбайна. Детальний аналіз динамічних режимів функціонування пружинних пальців розкрив основні механізми, що спричиняють втрати зерна, особливо під впливом відцентрових сил.

2. **Запропоновано та обґрунтовано інженерне вдосконалення:** Центральним досягненням є розробка та теоретичне обґрунтування нової конструкції пружинного пальця, яка інтегрує додаткові елементи для покращення захоплення та утримання хлібної маси. Це рішення, на відміну від традиційних підходів, базується на глибокому розумінні механічних властивостей матеріалів та їхньої взаємодії.

3. **Доведена кількісна перевага нової конструкції:** Шляхом ретельного моделювання та розрахунків було встановлено, що модифікований палець значно збільшує площу ефективної взаємодії з валком. Це кількісне підтвердження демонструє прямий потенціал для зниження відсоткових втрат зерна під час збирання.

4. **Сформовано аналітичну базу для подальших розробок:** Робота створила ґрунтовну теоретичну основу, що включає математичні моделі руху пальців, аналіз силових навантажень та розрахунок міцнісних характеристик нової конструкції. Цей методологічний апарат є цінним інструментом для майбутнього проектування, оптимізації та впровадження високопродуктивних збиральних систем.

5. **Підвищено наукове розуміння процесів:** Результати дослідження поглиблюють уявлення про складні фізичні процеси, що відбуваються під час підбору зерна, переходячи від описового до прогностичного рівня. Це дозволяє розробляти не просто покращені компоненти, а цілісно оптимізовані технології збирання.

Загалом, дана робота не лише ідентифікує існуючі проблеми у процесі збирання валкових культур, але й пропонує інноваційне, науково обґрунтоване рішення. Впровадження запропонованих вдосконалень має значний потенціал для підвищення ефективності зернозбиральних комбайнів, що призведе до скорочення втрат врожаю та покращення економічних показників сільськогосподарського виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гладинюк, Ю. М. (2024). *Дослідження процесу збирання зерна методом обчісування*. (Магістерська робота). Умань: Уманський національний університет садівництва.
2. Гуменюк, В. О. *Обґрунтування параметрів і режимів роботи підбирача валків зернових культур*.
3. Діденко, А. С. (2024). *«Обґрунтування параметрів та дослідження процесу обмолоту зерна»*. (Магістерська робота). Умань: Уманський національний університет садівництва.
4. Домущі, Д. П., & Супрунюк, В. П. (2022). Аналіз технологій і способів машинного збирання зернових колосових та зернобобових культур. У *ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ* (с. 48). URL: https://osau.edu.ua/wp-content/uploads/2022/12/Materialy-konferentsiyi-24-25.12.22.pdf#page=48 (дата звернення: 27.04.2025).
5. Є, С., Ван, Х., Чжан, К., Чжан, Дж., Ван, Дж., & Чжен, Д. (2024). Конструкція та експерименти з вальцьовим ножем підбирача для збирального комбайна гречки. *Агрономія*, *14*, 1944. https://doi.org/10.3390/agronomy14091944
6. Кайданюк, В. І., & Пришляк, В. М. *Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів підбирача-подрібнювача соломи*. URL: http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/25971.pdf (дата звернення: 27.04.2025).
7. Конотопенко, А. В. *Обґрунтування параметрів подрібнювача незернової частини врожаю комбайном*.
8. Макаренко, М. Г., & Мельник, О. М. (2023). *Комбайни зернозбиральні*: навч. посібн. для здобувач. проф. (проф.-тех.) освіти. Київ: Грамота. URL: https://repo.btu.kharkov.ua//handle/123456789/35121 (дата звернення: 27.04.2025).
9. Нагабась, В. В. (2022). *Удосконалення технології збору озимої пшениці з модернізацією комбайна Claas Lexion*. (Дипломний проект бакалавра). Хмельницький: Хмельницький національний університет. URI: https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/13510 (дата звернення: 27.04.2025).

10. НПАОП 01.0-1.02-18 «Правила охорони праці в сільськогосподарських підприємств». (2018). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1090-18#Text (дата звернення: 27.04.2025).

11. Охорона праці при збиранні ранніх зернових. URL: https://oppb.com.ua/news/ohorona-praci-pry-zbyranni-rannih-zernovyh (дата звернення: 27.04.2025).

12. Охорона праці при проведенні зернозбиральних робіт. URL: https://rda-m-p.gov.ua/novini/ohorona-praci-pri-provedenni-zernozbiralnih-robit/ (дата звернення: 27.04.2025).

13. Петрик, О. О. (2021). *Технологічні умови збирання зернових культур*. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/33541/1/Teoriia_i_praktyka_suchasnoi_nauky_ochyma_molodi_2021_14.pdf (дата звернення: 27.04.2025).

14. Ренкас, А. (2024). *Удосконалення комплексу машин для вирощування озимої пшениці з модернізацією процесу збирання зернозбирального комбайна Енісей-1200*. (Кваліфікаційна робота). Житомир: ЖАТФК. URL: http://repozitory.zhatk.zt.ua//handle/123456789/641 (дата звернення: 27.04.2025).

15. Роман, Б. З. (2024). *Удосконалення технології та пристрою для перекачування оливи в гідравлічних і системах мащення зернозбиральних комбайнів в польових умовах*. (Дипломний проєкт). Дубляни: Львівський національний університет природокористування. URL: https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/1773/1/Roman_bach.pdf (дата звернення: 27.04.2025).

16. Ярошович, І. Г., Чайковський, Б. П., Ярошович, В. І., & Шалько, А. В. (2024). *Навчальний посібник для контролю та перевірки знань здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 204 «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва» з навчальної дисципліни "Охорона праці (Охорона праці в галузі)"*. Львів.

17. Ahmed Khater, O., Fouda, O., El-Termezy, G., Abdel hamid, S., El-Tantawy, M., El-Beba, A., Sabry, H., & Okasha, M. (2023). Modification of the rice combine

harvester for cutting and binding wheat crop. *Journal of Agriculture and Food Research*, *14*, 100738. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100738

18. Chaab, R. K., Karparvarfard, S. H., Rahmanian-Koushkaki, H., Mortezaei, A., & Mohammadi, M. (2020). Predicting header wheat loss in a combine harvester, a new approach. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *19*(2), 179–184. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.09.002

19. Lesnyak, O., Kotov, V., Matrosov, A., & Vislousova, I. (2023). Mathematical Modeling of Interaction of the Harvester Conveyer Pick-Up with Windrow in the Pick-Up Area. У A. Beskopylny, M. Shamtsyan, & V. Artiukh (Ред.), *XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022"* (Vol. 574, с. 377–386). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5_39

20. Liang, Z., Qin, Y., & Su, Z. (2024). Establishment of a Feeding Rate Prediction Model for Combine Harvesters. *Agriculture*, *14*(4), 589. https://doi.org/10.3390/agriculture14040589

21. Madankar, C. S., Satputaley, S. S., Bhendarkar, G. B., & Hajare, G. S. (2024). Efficiency Increment on Assembly Line of Combine Harvester at CNHI, Pune. У A. De, P. P. Mukherjee, S. Pati, & A. Biswas (Ред.), *Recent Trends in Mechanical Engineering. ICRAME 2024*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7535-4_51

22. Tomchuk, V. (2020). LOSS MANAGEMENT WHEN HARVESTING GRAIN, LEGUME AND OILSEED CROPS. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, *50*-1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/loss-management-when-harvesting-grain-legume-and-oilseed-crops (дата звернення: 27.04.2025).

23. WANG Chun, ZHANG Weiguo, ZHANG You, et al. (2023). Design and Experiment of Scraper Buckwheat Pick-up Device. *Journal of Southwest University Natural Science Edition*, *45*(12), 157–166. https://doi.org/10.13718/j.cnki.xdzk.2023.12.016

24. Zhang, Y., Chen, D., Yin, Y., Wang, X., & Wang, S. (2018). Experimental Study of Feed Rate Related Factors of Combine Harvester Based on Grey Correlation. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(17), 402–407. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.188

ДОДАТКИ