

Форма № Н-9.02

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет _____ конструювання та дизайну _____
УДК 621.43.038:621.793:620.178.16

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
надійності техніки
(назва кафедри)

доц. _____ Новицький А.В.
(підпис) (ПІБ)
“ ” _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**На тему «Підвищення надійності висіваючи апаратів пневматичних
просапних сівалок резервуванням»**

Спеціальність _____ 133 - «Галузеве машинобудування» _____
(код і назва)

Спеціалізація _____ - _____
Магістерська програма «Машини та обладнання сільськогосподарського
виробництва» _____
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

_____ д.т.н., проф. _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

_____ Ловейкін В.С. _____
(ПІБ)

Керівники магістерської роботи

_____ К.Т.Н. _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

_____ Харьковський І. С. _____
(ПІБ керівника)

Виконав

_____ _____
(підпис) (ПІБ студента)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет _____ конструювання та дизайну _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри надійності техніки

К.Т.Н., доцент Новицький А.В.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)

“ ” _____ 2025__ року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТА**

Лозі Артему Євгенійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність _____ 133 «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Спеціалізація _____

(назва)

Магістерська програма «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи **«Підвищення надійності висіваючи апаратів пневматичних просапних сівалок резервуванням»**

затверджена наказом ректора НУБіПУ від «16»12.2024 р. №2268 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 23.05.2026 р.

(рік, місяць, число)

Вихідні дані магістерської роботи: аналітичний огляд конструкцій та умов експлуатації пневматичних сівалок; технічна характеристика пневматичних сівалок; каталоги ремонтно-технологічного обладнання.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Конструкція агрегатів паливних систем мобільних енергетичних засобів.

2. Дослідження технічного стану пар тертя «диск-прокладка» висівних апаратів та підвищення їх довговічності.

3. Технології забезпечення працездатності деталей висівних апаратів пневматичних сівалок.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) 1. Актуальність, предмет, об'єкт і методи дослідження. 2. Мета і задачі дослідження. 3. Аналіз характерних відмов висіваючих апаратів пневматичних сівалок. 4. Аналіз

висіваючого апарата як складної системи. 5. Технологічний процес ремонту
висівних дисків пневматичних сівалок. Висновки. Додатки

Дата видачі завдання «17» грудня 2024 р.

Керівники магістерської роботи

(підпис)

Харьковський І. С.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ	11
1.1. Аналітичний огляд конструктивно-технологічних схем висіваючих систем просапних посівних комплексів	11
1.2. Аналіз умов експлуатації та фізико-механічних чинників дестабілізації працездатності спряжень пневматичних висіваючих апаратів	15
1.3. Аналіз існуючих технологічних методів підтримання працездатності посівних комплексів та резервів підвищення ресурсу їхніх елементів	20
1.4 Сучасний стан теоретичних досліджень у галузі моделювання робочих процесів дискових висіваючих систем	23
1.5. Аналіз ремонтпридатності висівних апаратів сівалок	27
2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕСУРСУ ПАРИ ТЕРТЯ «ДИСК-ПРОКЛАДКА» ВИСІВНИХ АПАРАТІВ ПНЕВМАТИЧНОЇ ПРОСАПНОЇ СІВАЛКИ	30
2.1 Системний аналіз триботехнічного спряження висівного комплекту як лімітуючого вузла посівної системи	30
2.2 Теоретичний аналіз процесу роботи висівного апарату	32
2.2.1 Математичне моделювання та аналіз дисипації тиску в аеродинамічній системі висіваючого апарату	32
2.2.2 Аналіз взаємодії дозуючого диска і насіння	35
2.3 Теоретична модель підвищення ресурсу висівного комплекту	41
3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	45
3.1 Методика досліджень мікрометражу дозуючих дисків и ущільнюючих прокладок	45
3.2. Комплекс обладнання для досліджень мікрометражу дозуючих дисків и ущільнюючих прокладок	45
4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ АНАЛІЗ	47
4.1 Результати дослідження фізико - механічних властивостей матеріалів	

	6
пари тертя «диск - прокладка»	47
4.1.1 Результати мікрометражу дозуючих дисків просапної пневматичної сівалки	47
4.1.2 Результати мікрометражу ущільнювальних прокладок просапної пневматичної сівалки	49
4.2.1 Результати проведення польового експерименту по визначенню залежності зміни норми висіву від сумарного зносу серійного висівного комплекту	50
4.3. Технологічний процес відновлення дозуючого диска	51
5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	
5.1 Розрахунок витрат на підвищення ресурсу висівного комплекту «диск - прокладка»	55
ВИСНОВКИ	61
ПЕРЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	63
ДОДАТКИ	69

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку агропромислового комплексу України вимагає впровадження високоефективних технологій вирощування просапних культур (соняшнику, кукурудзи, цукрових буряків тощо), успіх реалізації яких суттєво залежить від якості та строків проведення посівної кампанії. Провідне місце у структурі парку посівної техніки посідають високопродуктивні пневматичні вакуумні просапні сівалки вітчизняного та іноземного виробництва, зокрема такі як «Лідагропроммаш» СТВ-12, «Техніка-сервіс» TC-M8000, «John Deere» 1710, «Maschio Gaspardo» ST-8R, «MaterMass» 3 XL 800, «Monosem» NG Plus, «Kuhn» Planter II та інші. Спільним конструктивним рішенням для більшості зазначених агрегатів є використання дискових висіваючих апаратів, де змінні дозуючі диски забезпечують високу точність дозування насіннєвого матеріалу.

Конструктивна тенденція до нижнього розташування висіваючих апаратів дозволяє мінімізувати або повністю виключити використання насіннепроводів, що позитивно впливає на рівномірність розподілу насіння у рядку. Проте таке компонування зумовлює функціонування вузлів у зоні надмірної запиленості повітря. Висока концентрація пилоподібного абразиву, потрапляючи в зону спряження пари тертя «дозуючий диск – ущільнювальна прокладка», спричиняє інтенсивне абразивне зношування їхніх робочих поверхонь.

Оскільки посівні роботи обмежені жорсткими агротехнічними строками, до надійності висіваючих систем висувуються підвищені вимоги. Експлуатація техніки із гранично зношеними елементами призводить до дестабілізації процесу висіву, виникнення пропусків («розрідження») або двійників («загушення»), що безпосередньо знижує потенційну врожайність та спричиняє перевитрату дорогого посівного матеріалу. З іншого боку, передчасна (попереджувальна) заміна компонентів призводить до недовикористання їхнього фактичного ресурсу та суттєвого зростання експлуатаційних витрат, що є критичним для деталей імпортного виробництва в умовах обмеженого постачання.

Аналіз інструкцій з експлуатації сучасної посівної техніки свідчить про відсутність чітко регламентованих критеріїв оцінки технічного стану та вибракування дозуючих дисків. Наявні рекомендації мають усереднений характер і не враховують варіативність виробничо-кліматичних умов та динаміку річного навантаження. У зв'язку з цим виникає потреба в обґрунтуванні нових підходів до забезпечення безвідмовності цих вузлів, зокрема шляхом застосування методів структурного або функціонального резервування, розробки ефективних технологій відновлення їхньої працездатності та оптимізації стратегій технічного обслуговування. Зазначене окреслює науковий і практичний інтерес дослідження та зумовлює актуальність теми магістерської кваліфікаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Дослідження виконувалось відповідно до наукових напрямів кафедри надійності техніки щодо підвищення надійності сільськогосподарської техніки, а також у межах роботи наукового студентського гуртка «Надійність технологічних систем».

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є підвищення надійності та безвідмовності функціонування пневматичних висіваючих апаратів просапних сівалок шляхом обґрунтування параметрів резервування та розробки технологічних рішень із відновлення працездатності елементів висівного комплекту.

Для досягнення поставленої мети визначено такі *завдання*:

1. Проаналізувати стан питання щодо надійності висіваючих систем пневматичних сівалок та існуючих методів її підвищення.
2. Дослідити характер і закономірності процесу зношування робочих поверхонь пари тертя «дозуючий диск – ущільнювальна прокладка».
3. Обґрунтувати математичну модель надійності висівного комплекту з урахуванням механізмів резервування вузлів.
4. Розробити та удосконалити технологічний процес відновлення працездатності зношених дозуючих дисків.
5. Оцінити техніко-економічну ефективність запропонованих рішень.

Об’єкт дослідження – робочі поверхні деталей пари тертя «дозуючий диск – ущільнювальна прокладка» пневматичної просапної сівалки, які визначають її міжремонтний ресурс та рівень безвідмовності.

Предмет дослідження – закономірності процесу абразивного зношування робочих поверхонь деталей дозуючого диска і ущільнювальної прокладки, а також показники надійності висіваючого апарату за умов застосування технологічного та структурного резервування.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань застосовано комплексний системний підхід, положення теорії ймовірностей та математичної статистики, основні положення теорії надійності технічних систем, а також стандартні методики мікрометрування поверхонь тертя.

Апробація результатів дослідження. Основні теоретичні положення, методичні підходи та практичні результати магістерської кваліфікаційної роботи були представлені, обговорені та отримали позитивну оцінку на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних заходах, зокрема: XII Міжнародній науково-технічній конференції «Крамаровські читання» (м. Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України, 20–21 лютого 2025 року); XXI-му Міжнародному форумі молоді «МОЛОДЬ І ІНДУСТРІЯ 4.0 В XXI СТОЛІТТІ» (м. Харків, Державний біотехнологічний університет, 2025 рік); Наукових семінарах випускової кафедри та засіданнях студентського наукового гуртка «Надійність технологічних систем».

Публікації. За матеріалами виконаних досліджень опубліковано 2 наукові праці у збірниках матеріалів міжнародних конференцій:

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БУФО – без абразивна ультразвукова фінішна обробка;

ЕІО – електроіскрова обробка;

СВК – серійний висівний комплект;

СТОП – система технічного обслуговування і ремонту;

ТО – технічне обслуговування;

ТП – технологічний процес;

ФПЗ – фінішне плазмове зміцнення;

ЩТО – щоденне технічне обслуговування;

ТС – технічний стан.

РОЗДІЛ 1 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ

1.1. Аналітичний огляд конструктивно-технологічних схем висівальних систем просапних посівних комплексів

Сучасні тенденції розвитку агроінженерних технологій для вирощування просапних культур характеризуються активним впровадженням високоефективних посівних комплексів точного висіву [1-3, 5], які класифікуються за широким спектром конструктивних та функціональних ознак (рис. 1.1) [1, 6, 10].

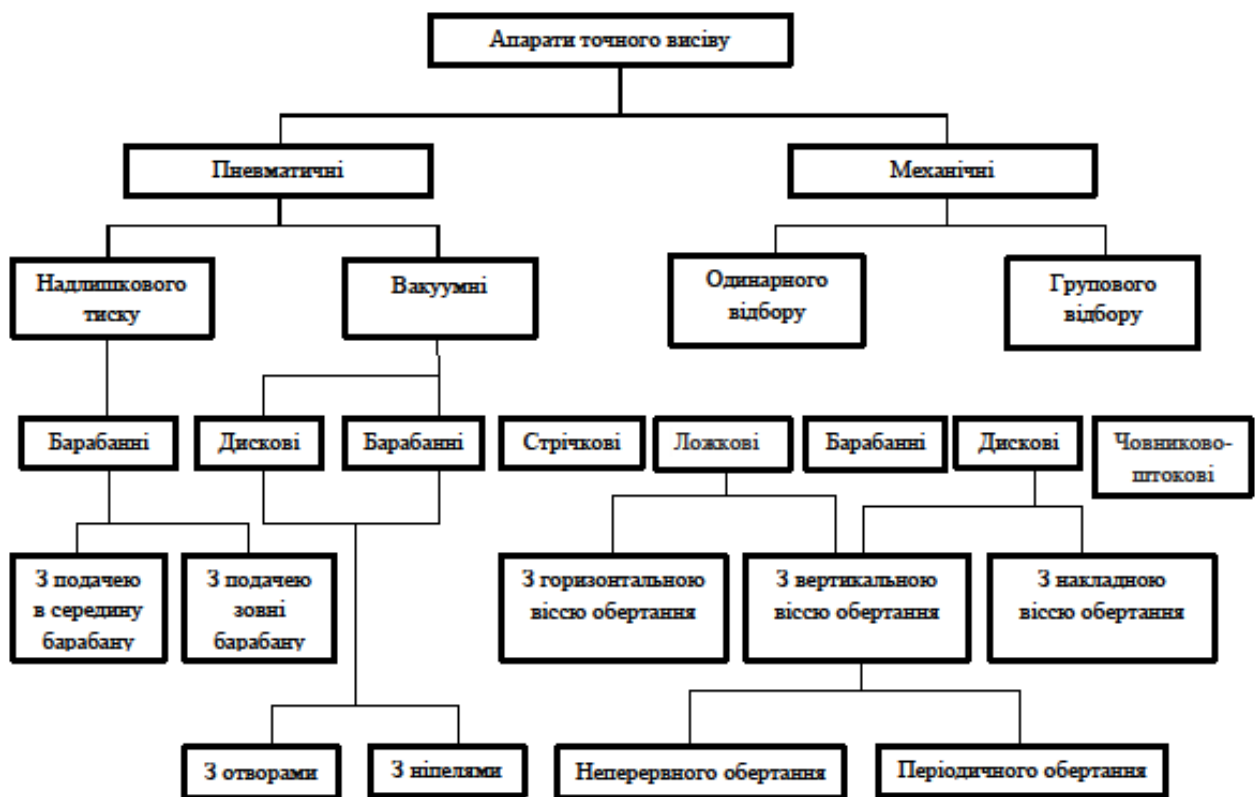


Рис. 1.1. Огляд конструкцій та класифікація висівальних апаратів пневматичних просапних сіялок

Систематизація наявних науково-технічних рішень у галузі створення дозуючих систем дозволяє розподілити їх на дві основні групи залежно від фізичного принципу сепарації посівного матеріалу із загальної маси бункера [2, 3, 8]: механічні системи, де поштучне відокремлення та транспортування насінин реалізується за рахунок геометричної форми та кінематичних параметрів робочих органів; пневматичні системи, у яких процес

однозернового дозування базується на використанні аеродинамічних сил, що генеруються за допомогою вакуумного розрідження або надлишкового тиску повітряного потоку одиночного чи групового відбору [12-14].

Історично першим етапом розвитку технологій точного висіву було застосування механічних апаратів, серед яких найважливіше прикладне значення мали комірчасто-дискові та комірчасто-стрічкові робочі органи [1, 4, 10, 11]. Проте системний аналіз експлуатаційних показників таких систем виявив низку суттєвих деструктивних недоліків. Забезпечення нормативної якості однозернового розподілу в механічних апаратах вимагає прецизійного калібрування посівного матеріалу та постійної заміни комплексів змінних дисків під конкретну геометричну фракцію насіння. Крім того, активна динамічна взаємодія насінин із механічними відбивачами надлишку та виштовхувачами в зоні заповнення комірок призводить до високого рівня травмування насіннєвого матеріалу. Саме через низьку універсальність та негативний механічний вплив на насіння зазначені конструкції не набули широкого розповсюдження в сучасних високошвидкісних агрегатах.

Альтернативним напрямом розвитку стали пневматичні робочі органи, що функціонують на принципі надлишкового тиску, які за конструктивним виконанням поділяються на барабанні (із зовнішнім або внутрішнім подаванням матеріалу) та дискові [6, 10, 11]. Характерною рисою барабанних апаратів є застосування трубчастих скидачів. Незважаючи на відносну конструктивну простоту, вони мають суттєвий технологічний недолік – значну висоту вільного падіння насінини до дна борозни, що дестабілізує рівномірність поздовжнього розподілу в рядку під дією вібраційних навантажень. Крім того, такі системи критично чутливі до парусності насіння та характеризуються підвищеними енерговитратами через значні витоки повітря через ущільнення.

На основі узагальнення світового досвіду сільськогосподарського машинобудування встановлено, що найбільш універсальними та технологічно досконалими є дискові вакуумні (пневмовакуумні) висіваючі апарати з коловим розташуванням присмоктувальних отворів. Системи такого типу широко

представлені як у вітчизняному секторі, так і в лінійках провідних світових виробників [5, 6, 18]: «Monosem» NG Plus, «Kuhn» Planter II (Франція), «John Deere» 1710 (США), «Amazone» EDX 9000-T (Німеччина), «Техніка-сервіс» ТС-М8000, «Лідагропроммаш» СТВ-12, «Maschio Gaspardo» ST-8R, «MaterMass» 3 XL 800 (Італія) тощо (Додаток А). Найбільшу прикладну затребуваність на ринку мають 8- та 12-рядні модифікації, які оптимально адаптовані за тягово-зчіпними показниками до енергетичних засобів класу 1,4–2,0. Конструктивна архітектура вакуумних дискових апаратів гарантує стабільне заповнення дозуючих елементів навіть за високих лінійних швидкостей руху диска, ефективне видалення двійників та плавну евакуацію насінини в робочу зону сошника [17, 19].

Типовий фізико-механічний алгоритм функціонування пневмовакуумних систем доцільно розглянути на прикладі базового робочого органу сівалки «Kuhn» Planter II (рис. 1.2). Насіннєвий матеріал із завантажувального бункера 1 самопливом надходить до насіннєвої камери 2.

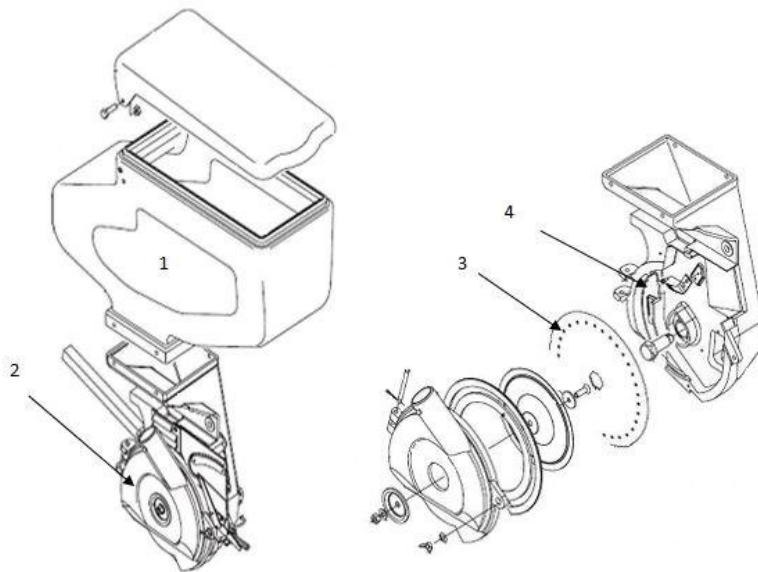


Рис. 1.2. Посівна секція пневматичної сівалки «Kunh» Planter II: 1 – бункер для насіння; 2 – висівний апарат; 3 – присмоктуються отвори дозуючого диска; 4 – скидач зайвого насіння

Внаслідок дії відцентрового вентилятора у суміжній вакуумній камері створюється стабільне розрідження. Через різницю тисків насінини

присмоктуються до дозуючих отворів 3 обертового диска, який виконує роль рухомої перегородки між камерами [7, 17, 19].

При обертанні дозуючого диска захоплене насіння, виносяться з насінневої камери і надходять в зону видалення «зайвих» насінин, де під впливом скидача 4 у присмоктувальних отворах залишаються тільки основне насіння (рис. 1.3).

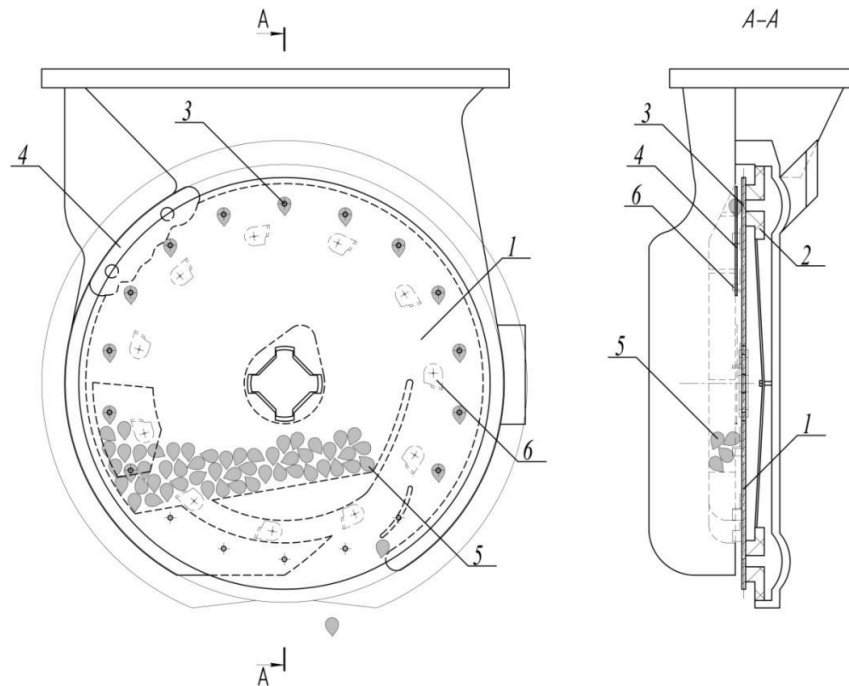


Рис. 1.3. Схема пневматичного висівного апарату сівалки «Kunh» Planter II: 1 – дозуючий диск; 2 – прокладка ущільнювача; 3 – присмоктуючі отвори дозуючого диска; 4 – скидач зайвих насінин; 5 – насіннєвий матеріал; 6 – воружильні прапорці

Під час кутового переміщення диска захоплений посівний матеріал транспортується з насінневої камери до зони позиціонування скидача «зайвого» насіння 4. Модифікований скидач здійснює спрямований механічний або аеродинамічний вплив на конгломерат, залишаючи на кожному отворі виключно одну насінину (рис. 1.3). На фінальній стадії транспортування поштучно дозоване насіння потрапляє в зону скидання. Процес розвантаження отворів реалізується шляхом екранування (перекриття) зони вакууму спеціальною прокладкою, внаслідок чого насінина під дією гравітаційних сил

та залишкового імпульсу спрямовується безпосередньо в сошник і вкладається на дно сформованої борозни.

Порівняльний аналіз сучасних серійних пневмовакуумних апаратів свідчить, що більшість модифікацій мають аналогічний принцип дії, проте суттєво відрізняються геометричними об'ємами робочих камер, конфігурацією та матеріалом дозуючих дисків, конструктивним виконанням ворушилок, а також кінематикою роботи вузлів видалення надлишку насіння та їх евакуації в насіннеспровід.

Таким чином, інтеграція пневматичних висіваючих систем у конструкції сівалок точного висіву дозволяє суттєво підвищити робочу швидкість агрегату без ризику травмування насіннєвого матеріалу [16, 17]. Застосування аеродинамічного утримання мінімізує потребу в суворому попередньому калібруванні насіння за фракціями, оскільки універсальний дозуючий диск із фіксованим діаметром отворів здатний ефективно оперувати різними розмірними групами в межах однієї культури, забезпечуючи високу адаптивність та експлуатаційну гнучкість посівного комплексу.

1.2 Аналіз умов експлуатації та фізико-механічних чинників дестабілізації працездатності спряжень пневматичних висіваючих апаратів

Емпіричний аналіз функціонування сучасних посівних комплексів у реальних виробничих умовах, виконаний за результатами моніторингу роботи техніки в Навчально-дослідному господарстві НУБіП України, свідчить про наявність прогресуючого зношування елементів триботехнічного спряження «дозуючий диск – ущільнювальна прокладка» [17, 20, 21, 23]. Під час виконання технологічного процесу сівби просапних культур сівалками з нижнім конструктивним розташуванням висіваючих модулів відстань від корпусу апарату до поверхні ґрунту у робочому положенні становить лише 50–100 мм (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Технологічна операція посіву просапних культур в умовах навчально-дослідного господарства

Така компоновальна схема зумовлює роботу функціональних елементів дозуючого блоку в умовах екстремальної запиленості приземного шару повітря, де концентрація пилоподібного субстрату варіюється в межах від 0,05 до 1 мг на 1 м³, характеризуючись високим вмістом дрібнодисперсного абразиву. Внаслідок цього в зону фрикційного контакту деталей пари «диск – прокладка», що покликані забезпечувати стабільну величину вакуумного розрідження, проникають мінеральні частинки середніх та великих фракцій пилу, які шаржуються у мікронерівності (шорсткість) еластичного матеріалу прокладки.

Присутність твердих включень у зоні контакту інтенсифікує деструктивні процеси, викликаючи декомпенсацію вакууму, що порушує стабільність присмоктування насінин, провокує нерівномірність їхнього поздовжнього розподілу і, як наслідок, дестабілізує процес загортання насіння в ґрунт. Виробничий досвід експлуатації доводить, що характер пошкодження ущільнювальної прокладки повністю підпорядковується закономірностям абразивного зношування і є ідентичним руйнуванню дзеркала дозуючого диска. Проте руйнування прокладки протікає з вищою кінетичною інтенсивністю, що пояснюється нижчими показниками твердості її матеріалу порівняно з металевою чи полімерною основою диска.

Комплексна оцінка дефектації вузлів висіваючих систем показала, що стан поверхонь інших суміжних деталей також корелює із загальною

працездатністю сівалки, проте їхній сумарний внесок у відмову системи є неістотним порівняно зі спряженням «диск – прокладка». Дрібнодисперсний пил, проникаючи в зазори між рухомими елементами висівного механізму, акумулюється на робочих поверхнях, викликаючи прискорене зношування або раптові механічні пошкодження.

Аналіз топографії зношених поверхонь свідчить, що однакові за конструктивним виконанням трибосистеми «диск – прокладка» під час експлуатації на різних типах ґрунтів демонструють варіативність не лише за темпами зношування, а й за характером просторового розподілу лінійного зносу по лицьовій площині дозуючого диска [17, 30, 31]. Ключовим фактором, що визначає інтенсивність трибодеструкції елементів апарату, є фізико-хімічний потенціал та гранулометричний склад ґрунтів. Величина коефіцієнта зношування коливається у широкому діапазоні, перебуваючи у безпосередній залежності від дисперсності абразивних частинок та їхньої поточної вологості. Гранулометрія ґрунтового середовища визначає його питомий опір під час механічного обробітку та сівби. Найбільшою зношувальною здатністю володіють піщані ґрунти, у структурі яких міститься до 70–85% високо твердих мінеральних зерен кварцу. Натомість мінеральні комплекси, що формують глинисті ґрунти, мають значно меншу мікротвердість.

Для дескрипції механічних параметрів ґрунтового масиву в науковій практиці оперують розгалуженою системою показників, які за методологією їх експериментального визначення класифікують на три основні групи: отримані за результатами штампових випробувань (компресійні характеристики); визначені за параметрами зсуву (зчіпні властивості та внутрішнє тертя); зафіксовані під час дослідження елементарних видів деформацій (осіве стиснення, прямий розтяг тощо).

Для функціональної пари «диск – прокладка» механізм абразивного руйнування є домінуючим над іншими видами трибодеструкції. Під абразивним зношуванням розуміють процес прогресуючого руйнування та відшарування матеріалу поверхневих шарів під дією твердих абразивних елементів. Дослідженню цієї наукової проблеми присвячено значний масив праць [27, 28],

проте й донині у трибології відсутній єдиний погляд на мікромеханіку відділення дисперсних частинок металу в умовах абразивного контакту.

Довгий час у науковій періодиці панувала теорія, яка пов'язувала абразивне руйнування виключно з мікрорізальною дією зерен. Зокрема, у праці [22, 24, 25] зазначається, що макроскопічний знос є результатом суперпозиції великої кількості елементарних актів мікродряпання. Професор В. І. Костецький [24, 25] також інтерпретував абразивний знос як суто механічний процес зрізання мікрооб'ємів металу твердими профілями, який супроводжується інтенсивною термодинамічною активацією ювенільних поверхонь.

Водночас існує альтернативна концепція, згідно з якою руйнування робочої поверхні диска реалізується як бінарний процес. Автори дослідження [24, 25] вказують, що попри вагому роль мікрорізання (тобто відділення мікростружки при дряпанні), далеко не кожне абразивне зерно, що знаходиться під дією нормального навантаження, здатне зрізати метал. Значна частина часток лише пластично деформує поверхневий шар, формуючи витіснені текстуровані канавки (напливи). Розвиваючи цей підхід, І. В. Крагельський сформулював кінетичну гіпотезу [24, 27], згідно з якою базовою причиною фрикційного руйнування металів при взаємодії з закріпленим абразивом є не одноактне зняття мікростружки, а багаторазове знакозмінне пластичне деформування одних і тих самих мікрооб'ємів матеріалу (явище передеформації), що веде до низькоциклового втомного руйнування поверхні. Частка безпосереднього механічного зрізання металу, за цією гіпотезою, вважається супутньою та не є переважаючою.

У географічних межах Київської області, де проводилися базові дослідження, домінують чорноземи легкоглинистого та важкосуглинкового гранулометричного типу, в яких частка фізичної глини (фракції розміром менше 0,01 мм) коливається в межах 50–60%. Оптимальні фізико-механічні властивості таких ґрунтів проявляються лише за умови збереження їхньої високої зернисто-грудкуватої структури.

Окремим вагомим фактором, що суттєво інтенсифікує процеси зношування у висіваючих системах, є повсюдне використання в сучасних агротехнологіях хімічно протруєного насіннєвого матеріалу [27-29]. Робочі поверхні дозуючого диска та ущільнювальної прокладки під час роботи перебувають у постійному динамічному контакті з насінням, вкритим захисними препаратами. Кінетика та морфологія їхнього зношування суттєво коригуються фізико-хімічною специфікою протруювача. Під впливом вологи повітря та активних хімічних агентів на контактних поверхнях металу утворюються тонкі трибохімічні оксидні та сольові плівки. Ці новоутворення мають низьку адгезійну міцність і легко видаляються в процесі тертя, оголюючи свіжий метал для наступного циклу окиснення.

Для зниження інтенсивності фрикційного руйнування та переведення системи в режим рідинного або напіврідинного тертя традиційно застосовують мастильні матеріали. Проте аналіз специфіки роботи пневмовакуумних апаратів довів повну непридатність рідких нафтових та синтетичних олив для використання у даному вузлі. Абразивні ґрунтові частинки, що піднімаються сошником або надходять із бункера разом із насінням, миттєво адсорбуються на покритих оливою поверхнях, утворюючи високоабразивну пасту, яка багаторазово прискорює деструкцію спряження. Застосування пластичних консистентних мастил аналогічно призводить до перенасичення контактної зони твердими мінеральними домішками і різко підвищує момент тертя. Як наслідок, на сучасному етапі розвитку конструкцій у вузлах «диск – прокладка» реалізується виключно режим сухого фрикційного контакту.

Класифікація основних факторів зносу деталей висівного апарату пневматичних сівалок представлено на (рис 1.5).

Резюмуючи вищевикладене, можна стверджувати, що рівень надійності та безвідмовності посівного агрегату безпосередньо лімітується зносостійкістю деталей висівного спряження. Цей показник є функцією не лише геометричної форми й початкової якості поверхневого шару матеріалів, а й складного комплексу механохімічних та триботехнічних взаємодій елементів між собою, з агрофондовим середовищем та хімізованим насіннєвим матеріалом.

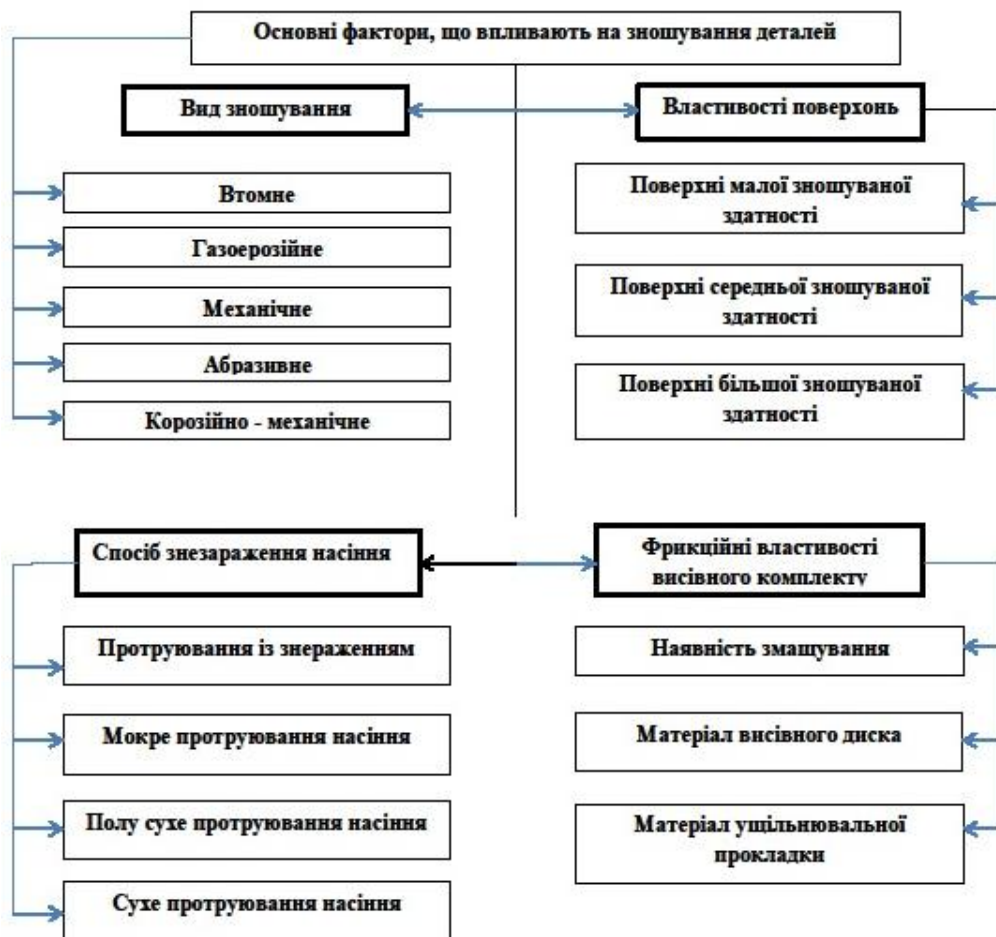


Рис. 1.5. Класифікація основних факторів зносу висівного комплекту

1.3. Аналіз існуючих технологічних методів підтримання працездатності посівних комплексів та резервів підвищення ресурсу їхніх елементів

На сучасному етапі розвитку аграрного сектору України базовим підходом до забезпечення дієздатності парку просапних сівалок у більшості господарств залишається стратегія проведення періодичних ремонтно-відновлювальних робіт та поточного ТО [21, 22, 23]. Системний моніторинг експлуатації висівних секцій свідчить, що одним із поширених дестабілізуючих чинників є блокування присмоктувальних отворів дисперсними залишками насіннєвого матеріалу або випадковими сторонніми домішками, які присутні в загальній масі насіння. Це провокує виникнення нерівномірних контактних навантажень та прискорює зношування основних робочих елементів

пневматичного апарату – дозуючого диска та ущільнювальної прокладки. Згідно з експлуатаційними даними, саме на дозуючу пару припадає близько 70% усіх випадків втрати працездатності висівної системи [17, 20, 26].

Емпіричними дослідженнями доведено, що високу схильність до деструкції та зношування мають також допоміжні елементи (гнучкі трубопроводи, полімерні циліндричні й конічні шестерні, штифти тощо). Передчасне вибракування та заміна деталей, виготовлених із конструкційних пластмас і композитів, часто зумовлені порушенням регламентних умов їхнього міжсезонного зберігання на відкритих майданчиках, де вони зазнають тривалого деструктивного впливу атмосферних опадів, температурних коливань та ультрафіолетового випромінювання.

Сучасна класифікація та архітектура методів відновлення працездатності функціональних спряжень «дозуючий диск – ущільнювальна прокладка» пневматичних просапних сівалок систематизована й наведена на рис. 1.6 [21, 25].



Рис. 1.6. Методи відновлення працездатності з'єднань «диск – прокладка» пневматичних сівалок

Паралельно з деградацією висівного вузла, внаслідок циклічного забивання порожнин сошників ґрунтом, спостерігається інтенсивне абразивне

зношування дисків сошника по зовнішньому діаметру, що супроводжується появою надмірних зазорів у підшипникових опорах. Як наслідок, у точці сходження дисків утворюється технологічний зазор. За умов нормативної експлуатації цей показник не повинен перевищувати 2,0 мм під час прикладання стискаючого зусилля з протилежного боку. Перевищення зазначеного ліміту призводить до суттєвого погіршення геометрії посівної борозни та спричиняє поверхневе закладання насіннєвого матеріалу. Виробничий досвід доводить, що дискові сошники з регламентним зазором забезпечують стабільне закладання до 92% насіння на задану агротехнічну глибину (30–50 мм), тоді як зношені робочі органи у аналогічних умовах здатні забезпечити нормативну глибину лише для 43% посівного матеріалу.

Під час проведення ремонтних та складальних робіт стосовно висіваючих апаратів особлива увага приділяється кінематичній точності: привідний валик повинен вільно, без заїдань обертатися у підшипникових вузлах. Оптимізація та мінімізація осьового люфту досягається встановленням регулювальних шайб під припливи корпусу, що є обов'язковою умовою для збереження коректного міжзубного зачеплення в кінцевих шестеренних передачах.

Після завершення стадії загального складання висіваючі блоки підлягають обов'язковим стендовим випробуванням (обкатці) з метою контролю якості спряжень. Перевірка здійснюється впродовж 5 хвилин за сталої частоти обертання дозуючого диска на рівні 30 об./хв. Якщо під час дефектації корпусного елемента виявлено тріщини у зварних швах, їх усувають за допомогою дугового зварювання після попереднього повного видалення та зачищення дефектного старого шва. Елементи пневмосистем (насіннепроводи та вакуумні магістралі), виготовлені з гнучких еластомерів, гуми чи шаруватих полімерів, за наявності локальних розривів, мікротріщин, здуття або розшарування внутрішнього герметизуючого шару, підлягають безумовній заміні на нові компоненти.

Фінальна оцінка ТС посівного агрегату та перевірка точності налаштувань здійснюється на спеціально підготовленому контрольному майданчику або ділянці поля. Рівномірність розстановки сошників перевіряють

за допомогою спеціалізованої розмічальної дошки з мітками. Відхилення фактичного кроку розстановки від прийнятої ширини міжряддя не повинно перевищувати критерію ± 5 мм. Поводки сошників повинні мати бездоганну лінійну геометрію без ознак пластичного вигину чи скручування.

Всі елементи кінематичних передач, механізми переведення у транспортне/робоче положення, регулятори норми висіву та вал із висівними котушками повинні переміщатися плавно, без ривків, а за нульового положення керуючого важеля – повністю виходити з робочої зони коробки висівного апарату. Конструкція насінневого бункера має забезпечувати повну герметичність (відсутність щілин) і щільно закриватися кришкою з ущільнювачем для запобігання декомпенсації тиску або потрапляння вологи.

Передпольова обкатка сівалки проводиться із задіяним механізмом приводу впродовж 15 хв. за частоти обертання ходових коліс у діапазоні 15...25 об./хв. У процесі обкатки плавність функціонування трансмісійної групи та надійність вузлів автоматики контролюють шляхом триразового примусового підйому та опускання секцій. Дозуючий апарат кожної робочої секції повинен демонструвати низький момент опору обертанню при прокручуванні привідного валика, граничний поздовжній люфт якого жорстко обмежений допуском не більше 2,0 мм.

1.4 Сучасний стан теоретичних досліджень у галузі моделювання робочих процесів дискових висіваючих систем

Системний аналіз фундаментальних засад функціонування посівної техніки свідчить, що на якісні показники та рівномірність поздовжнього розподілу насіння впливає поліфакторний комплекс, детермінований насамперед специфікою роботи дозуючих органів [17, 33, 34]. Ключовими серед них є кінематичні та динамічні режими функціонування висіваючих пристроїв, а також просторово-часова прецизійність під час безпосередньої евакуації (скидання) насінин у сошник.

Теоретичний базис робочих процесів висіву насіння апаратами різного типу закладений фундаментальними дослідженнями таких відомих вчених, як В. С. Басін, В. А. Белодєдов, Л. В. Погорілий, Г. М. Бузенков та інші [1, 4, 18, 19]. Вагомий внесок у модернізацію, оптимізацію та розвиток конструктивно-технологічних схем посівної техніки зробили Л. В. Аніскевич, А. І. Бойко, П. М. Заїка, В. Є. Комаристов, В. М. Сало, П. В. Сисолін, В.В. Аулін, С. І. Шмат тощо [6, 7, 10, 11, 17, 30,]. Глибокий та ретельний ретроспективний аналіз еволюції теоретичних розробок у галузі створення висіваючих систем виконано професором А.І. Бойком та М. О. Свіренем [17, 31, 49].

Велику увагу вакуумним апаратам барабанного типу приділено в роботах [46, 47], в яких сформульовано умову захоплення одиничного насіння присмоктується отвором:

$$P_{np} \geq a \cdot P \cdot \sin \alpha + P_u, \quad (1.1)$$

де P_{np} - сила, що присмоктує;

P - сила тяжіння насіння;

α - кут нахилу присоски до горизонту в момент присмоктування;

P_u - відцентрова сила;

a - коефіцієнт, що враховує дію верхніх насіння.

В інших роботах запропонована інша залежність для визначення швидкості потоку, представленого у вигляді сфери [31]:

$$V = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (1.2)$$

де q - витрата повітря через присмоктувальний отвір;

r - відстань від присмоктувального отвору до місця розташування насіння.

Необхідно зазначити, що захоплення насіння присмоктувальним отвором визначається присмоктувальною силою. Її величину Зенін Л.С. розглядає як суму складових: статичної та динамічної [30, 31]:

$$F = F_{cm} + F_{\partial}. \quad (1.3)$$

Запропоновано величину статичної складової визначати за формулою:

$$F_{cm} = \Delta P \cdot A_{отв}, \quad (1.4)$$

де ΔP - розрідження у вакуумній камері;

$A_{отв}$ - площа перерізу присмоктувального отвору.

Разом з тим, загальна сила присмоктування визначається змінами складових в залежності від відстані насіння до отвору. Встановлено, що при повному перекритті отворів, коли відстань між ними дорівнюватиме нулю, динамічна складова також дорівнює нулю і спочатку різко зростає при збільшенні відстані, а потім поступово знижується.

Прийнято вважати, що при відстанях, що перевищують діаметр отвору, динамічної складової можна знехтувати. Сумарну силу присмоктування відповідно до висунутої теорії запропоновано визначати з емпіричного відносини:

$$\frac{F_{np.x}}{F_{np.0}} = \frac{f}{\left(\frac{x}{d}\right)^2 + f}, \quad (1.5)$$

де $F_{np.0}$ - присмоктувальна сила, що діє на насіння, що перекриває отвір, коли $x = 0$;

$F_{np.x}$ - присмоктувальна сила, що діє на насіння на відстані;

$f = 0,019$ - постійний коефіцієнт.

Значний науковий та методологічний інтерес становлять аналітичні рішення, висвітлені у праці [4, 10], де С. І. Шмат детально розглянув систему сил, які діють на поодинокі насінину в процесі її утримання робочими

органами дискового пневмомеханічного апарату. Проте отримане авторами математичне рівняння сили присмоктування, представлене у диференціальній формі, через свою багатокomпонентність є надто складним для інженерних розрахунків під час безпосереднього проектування нових технічних засобів.

Окремі наукові аспекти дослідження стохастичної природи та імовірнісного характеру розподілу насіннєвого матеріалу висіваючими вузлами відображені в праці [17]. Разом з тим, доводиться констатувати, що уніфікованої імовірнісної моделі функціонування дозуючих систем пневмомеханічного типу, яка б інтегрувала випадкові експлуатаційні фактори, на сьогодні не розроблено.

Як правило, наявні експериментальні дані описують ідеалізовані початкові параметри абсолютно нових висіваючих органів, а більшість пошукових робіт зорієнтована виключно на первинне обґрунтування геометрії елементів або їх оптимізацію за фіксованими критеріями якості.

При цьому поза увагою дослідників залишилися закономірності втрати точності дозування, падіння загальної продуктивності посівних комплексів, зниження стійкості їхнього функціонування та динаміка зміни енергоємності процесів, що виникають внаслідок прогресуючого відхилення поточних геометричних і триботехнічних параметрів спряжень від номінальних (заводських) значень, а також через їхнє неминуче експлуатаційне розрегулювання.

У більшості сучасних конструкцій вакуумних дискових апаратів звільнення присмоктувальних отворів реалізується шляхом екранування зони вакууму за допомогою механічного перекриття каналів з боку вакуумної камери [17, 27, 38]. Такий технологічний підхід дозволяє суттєво спростити кінематику й конструкцію всього вузла в цілому. Проте зворотним боком цього рішення є виникнення серйозної технічної проблеми, пов'язаної з відсутністю ефективного самоочищення присмоктувальних елементів від застряглих уламків насіння, часток протруювача та зовнішніх мінеральних домішок [11, 12, 13], що вимагає розробки нових методів забезпечення надійності роботи цих елементів, зокрема із застосуванням принципу резервування.

1.5. Аналіз ремонтпридатності висівних апаратів сівалок

Аналіз кон'юнктури сучасного ринку сільськогосподарської техніки свідчить, що провідні світові та вітчизняні машинобудівні компанії у структурі модельного ряду просапних посівних комплексів пропонують близько 77% агрегатів точного висіву з пневмовакуумною системою дозування насіння. Частка сівалок, що функціонують на принципі надлишкового тиску повітряного потоку, становить близько 6%, тоді як на механічні системи припадає не більше 17%.

Наукове визнання та високий попит на вакуумні дискові апарати зумовлені їхньою експлуатаційною зручністю, універсальністю та простотою налаштувань [20-22]. Разом з тим, стабільна й прецизійна поштучна сепарація насіннєвого матеріалу такими системами можлива лише за умови тривалого збереження номінальних параметрів вакуумного розрідження та високої надійності фіксації насінин на робочих отворах дозуючих дисків.

Незважаючи на очевидні технологічні переваги, вакуумні висіваючі органи характеризуються суттєвим деструктивним недоліком – відносно низьким міжремонтним ресурсом ключового триботехнічного спряження «дозуючий диск – ущільнювальна прокладка». Передчасне зношування елементів цього комплексу призводить до падіння тиску у вакуумній камері, провокуючи порушення жорстких агротехнічних вимог під час висіву високорентабельних просапних культур. Саме тому наукові пошуки, спрямовані на пролонгацію експлуатаційного ресурсу та ТС дозуючих комплектів та стабілізацію якісних показників посіву, мають важливе прикладне значення.

На сучасному етапі основним методом відновлення працездатності висіваючих секцій у більшості агрофірм залишається тотальна заміна зношених деталей та вузлів на нові фірмові компоненти. Така тенденція зумовлена відсутністю на базах підприємств ТС спеціалізованого високотехнологічного обладнання та кваліфікованого персоналу для відновлення прецизійних

поверхонь [22, 25]. Проте слід наголосити, що ні заміна дефектних елементів на нові, ні існуючі класичні методи ремонту не вирішують проблему низького міжремонтного ресурсу, оскільки вони спрямовані на ліквідацію наслідків відмови, а не на усунення першопричин інтенсивного фрикційного руйнування. Як наслідок, залежно від суворості умов експлуатації, ресурсу навіть нового серійного спряження часто недостатньо для безвідмовної роботи впродовж одного повного посівного сезону, що призводить до вимушених простоїв техніки та появи недосівів.

З наукової точки зору значний інтерес становлять методологічні підходи професора А. Т. Лебедєва [31-33], реалізовані під час модернізації сильнозношуваних пар тертя ротаційних пластинчастих компресорів («лопатка – корпус» та «лопатка – бічна кришка»). Для зниження інтенсивності фрикційного руйнування автором було оптимізовано кінематику вузла з метою зменшення швидкості відносного переміщення поверхонь, а також інтегровано антифрикційний полімерний матеріал (фторопласт-4) у зону контакту.

Ефективність підвищення антифрикційних та зносостійких характеристик ущільнювальних матеріалів безпосередньо корелює з питомими тисками, лінійними швидкостями ковзання та режимом тертя. Зважаючи на специфіку сухого фрикційного контакту у висіваючих системах, вибір компонентів композиційного покриття та методу його нанесення має базуватися на принципах забезпечення високої припрацьовуваності, мінімального коефіцієнта тертя у парі з контратілом, низької схильності до адгезійного схоплювання (заїдання) та здатності до формування стійких роздільних шарів. У трибології під антифрикційністю розуміють інтегральну здатність спряження забезпечувати режим самозмащування шляхом безперервної генерації й регенерації на робочих поверхнях ультратонких, легкорухомих плівок екранного типу. Для досягнення такого ефекту в матрицю базового матеріалу доцільно вводити протизадирні модифікатори та тверді мастильні речовини, зокрема високодисперсний графіт, дисульфід молібдену, сульфід металів, фторопласти або легкоплавкі сплави.

Узагальнення результатів аналізу теоретичних і практичних досліджень у даній галузі дозволяє констатувати, що переважна більшість наявних наукових праць присвячена виключно кінематиці висіву та виявленню загальних причин технологічних відмов. Натомість обґрунтуванню конкретних інженерних рекомендацій щодо підвищення ресурсу деталей приділено недостатньо уваги.

Робоча гіпотеза дослідження: передбачається, що експлуатаційний ресурс та безвідмовність пари тертя «дозуючий диск – ущільнювальна прокладка» пневматичного висіваючого апарату можна суттєво підвищити за рахунок реалізації методів структурно-функціонального резервування, а також шляхом модифікації (насичення) робочої зони ущільнювальної прокладки мікрооб'ємами твердого антифрикційного мастила. Це забезпечить формування стійкої роздільної плівки на контактних поверхнях, нівелювання негативного впливу мікронерівностей та мінімізацію темпів абразивного зношування.

Для реалізації поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

1. Виконати комплексний аналіз існуючих конструктивно-технологічних схем висіваючих апаратів пневматичних просапних сівалок.
2. Проаналізувати специфіку умов експлуатації та систематизувати характерні причини втрати працездатності елементів дозуючого комплексу.
3. Встановити ключові закономірності та триботехнічні фактори зниження точності роботи дозуючих дисків та еластичних ущільнювальних прокладок.
4. На основі теоретичних та імовірнісних підходів встановити кореляційний взаємозв'язок між параметрами лінійного зносу деталей пари тертя, показниками їхнього безвідмовного ресурсу та сумарними витратами на реалізацію процесу точного висіву.
5. Науково й експериментально обґрунтувати методи підвищення надійності спряження «диск – прокладка» за рахунок цілеспрямованого формування необхідних фізико-механічних та антифрикційних властивостей контактних поверхонь та впровадження елементів резервування.
6. Оцінити техніко-економічну ефективність та терміни окупності запропонованих конструктивно-технологічних і технологічних рішень.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕСУРСУ ПАРИ ТЕРТЯ «ДИСК-ПРОКЛАДКА» ВИСІВНИХ АПАРАТІВ ПНЕВМАТИЧНОЇ ПРОСАПНОЇ СІВАЛКИ

2.1. Системний аналіз триботехнічного спряження висівного комплексу як лімітуючого вузла посівної системи

Ефективність функціонування посівних комплексів і потенційна врожайність просапних культур критично залежать від точності дотримання норми висіву та рівномірності просторового розподілу рослин на площі поля. Порушення синхронності у формуванні густоти сходів призводить до гетерогенності дозрівання культури, що ускладнює механізоване збирання та спричиняє значний недобір врожаю. Оптимальний крок посіву мінімізує взаємне затінення рослин, оптимізує споживання поживних речовин і вологи з ґрунтового масиву та знижує забур'яненість посівів за рахунок природного пригнічення сегетальної рослинності.

Процес формування прецизійного однозернового висіву пневмовакуумними апаратами підпорядковується впливу комплексу факторів, основними з яких є фізико-механічні властивості насіння, робоча швидкість посівного агрегату, параметри вакуумного розрідження та поточний технічний стан елементів дозувальної системи. Для деталізації процесів втрати працездатності посівну техніку доцільно розглядати як складну ієрархічну технічну систему (рис. 2.1), де нижчим рівнем, який безпосередньо лімітує рівень безвідмовності всього комплексу, є робочі поверхні деталей [32, 33].

Дослідженнями встановлено, що багатокомпонентність конструкції сівалки (рама, туковисівна система, вентилятор, елементи приводу, сошники), її загальний міжремонтний ресурс безпосередньо лімітується надійністю фрикційної пари «дозуючий диск – ущільнювальна прокладка». Відповідно до засад системного підходу, це спряження належить до класу безпосередньо контактуючих робочих поверхонь. Стабільність функціонування цієї пари протягом експлуатаційного циклу визначається триботехнічними властивостями та зносостійкістю їхніх поверхневих шарів [33].

Технічна Система

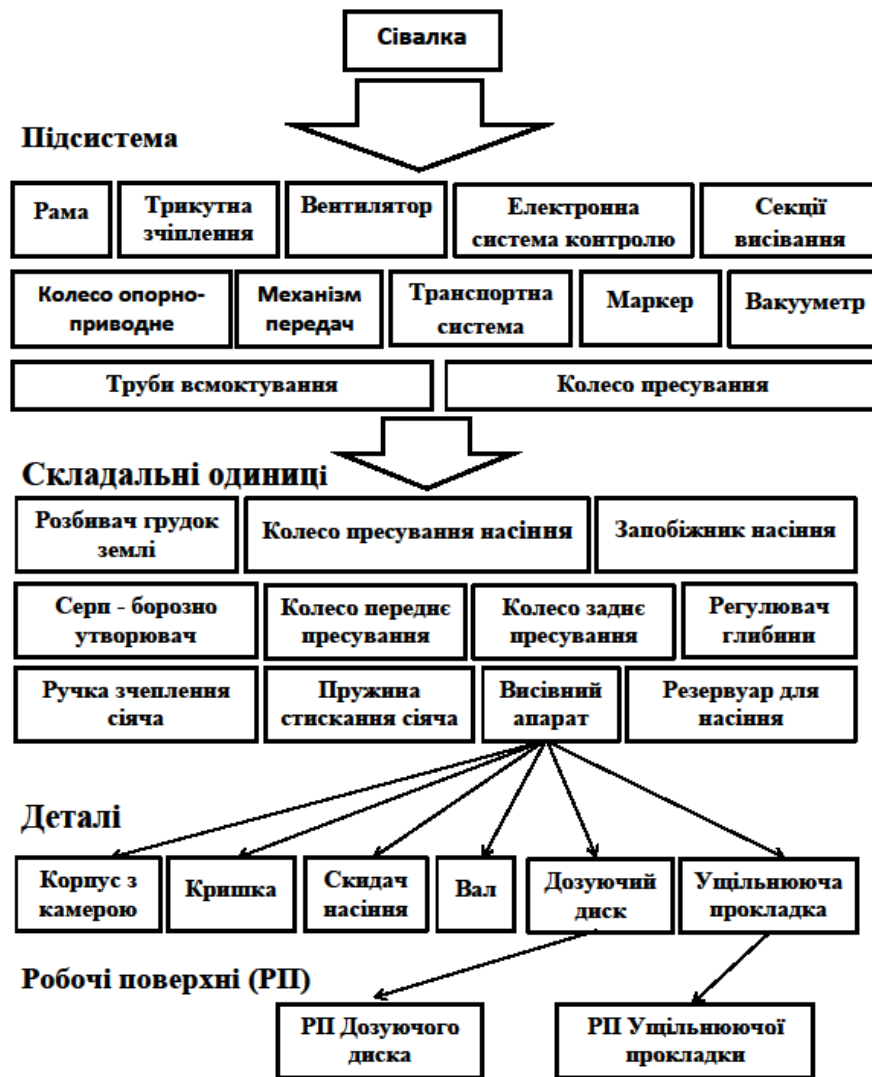


Рис. 2.1. Аналіз пневматичної просапної сівалки як складної технічної системи

Головним цільовим призначенням контактуючих поверхонь висівного комплексу є забезпечення максимальної герметичності вакуумної камери. Це необхідно для підтримання стабільної присмоктувальної сили аеродинамічного утримання насінин та запобігання проникненню ґрунтового абразиву в зону тертя. Проте в процесі експлуатації через суттєву відмінність у твердості матеріалів диска і прокладки, специфіку їхнього відносного зміщення та шорсткість дзеркала диска відбувається безперервна топографічна деградація поверхонь.

Взаємне впровадження мікрогеометричних виступів під дією робочих тисків викликає локальні пластичні зсуви, зминання та втомне мікроруйнування фрикційного контакту. Ситуація ускладнюється нижнім розташуванням висівного апарату, за якого дрібнодисперсні часточки ґрунтового пилу інтенсивно шаржуються в еластичне тіло прокладки, трансформуючи класичне сухе тертя в абразивне зношування.

Для стабілізації триботехнічних параметрів спряження та зниження темпів зносу виникає потреба в управлінні процесами фрикційної взаємодії. Це може бути досягнуто або за рахунок штучного формування на зонах контакту стійких захисних шарів (термічна модифікація, нанесення твердих покриттів), або шляхом ініціювання процесів безперервного самовідновлення тонких екранних плівок із низьким опором зрізу. Таким чином, для підвищення загальної ефективності пневматичної системи сівалки необхідно детально дослідити мікромеханіку деструкції робочих поверхонь та встановити ступінь впливу їхнього лінійного зносу на зміну аеродинамічних параметрів вакуумного контуру.

2.2 Теоретичний аналіз процесу роботи висівного апарату

2.2.1 Математичне моделювання та аналіз дисипації тиску в аеродинамічній системі висіваючого апарату

За результатами проведеного теоретичного аналізу встановлено, що ключовими критеріями ефективності функціонування пневматичного висіваючого апарату є своєчасність та координатна точність транспортування посівного матеріалу просапних культур у робочу зону сошника. Експлуатаційна стабільність цього процесу безпосередньо лімітується величиною внутрішнього розрідження, яке генерує необхідну аеродинамічну силу присмоктування для надійної фіксації насінин на ділянці розподільного інтерфейсу між дозуючим диском та ущільнювальною прокладкою. Проте по мірі зростання інтегрального напруження висівного комплексу фактичне значення робочого тиску монотонно знижується. З урахуванням закономірностей, викладених у першому

розділі, поточний дискретний тиск у системі можна описати математичною залежністю:

$$P_{\partial} = P (\Sigma P_{ичн} + \Sigma P_{ек}), \quad (2.1)$$

де P – тиск, що створюється нагнітачем, Па;

$P_{ичн}$ – існуючі витрати тиску (через довжину і перегин трубопроводів, підсмоктування повітря в місцях їх стикування та інших), Па;

$P_{ек}$ – витрати тиску в процесі експлуатації, Па.

Представивши витрати тиску $P_{ичн}$ і $P_{ек}$ через тиск створюваний нагнітачем P , через коефіцієнти отримаємо:

$$\Sigma P_{ичн} = P \cdot K_{ичн}, \quad (2.2)$$

$$\Sigma P_{ек} = P \cdot K_{ек}. \quad (2.3)$$

де $K_{ичн}$ – безрозмірний коефіцієнт, що враховує існуючі втрати тиску (0,5 ... 0,6) [5];

$K_{ек}$ – безрозмірний коефіцієнт, що враховує втрати тиску в процесі експлуатації.

Підставивши вирази 2.2 і 2.3 в вираз 2.1, отримаємо:

$$P_{\partial} = P [1 - (K_{ичн} + K_{ек})], \quad (2.4)$$

Слід відмітити, що для забезпечення необхідної якості висіву необхідно дотримувалися наступної умови:

$$P_{\partial} \geq m \cdot N \cdot F_{np} S_o, \quad (2.5)$$

де m - кількість висівних апаратів (для сівалки «Kunh» Planter II приймаємо $m = 8$), шт.;

N - кількість комірок, до яких в даний момент часу здійснюється присмоктування посівного матеріалу (для сівалки «Kunh» Planter II $N = 14$), шт.;

F_{np} - сила присмоктування, необхідна для утримання одного зерна, Н;

S_o - площа присмоктувального отвору, м².

Зважаючи на те, що конструктивні втрати тиску залишаються умовно константними впродовж усього життєвого циклу машини і релевантно компенсуються ще на стадії проектування при виборі потужності вентилятора, головним дестабілізуючим фактором є експлуатаційні втрати. Вони ініціюються прогресуючим топографічним зношуванням робочих поверхонь елементів висівної пари. Механізм цього зношування полягає у безперервному дисперсному руйнуванні поверхневих шарів матеріалу, що супроводжується мікроотруєнням, незворотною зміною лінійних розмірів, макрогеометрії та фізико-механічних властивостей контактних зон.

Аналітично доведено, що трибодеструкція компонентів викликає розширення зазорів між деталями та зниження зусилля попереднього затиску еластичної прокладки до дзеркала диска. Це призводить до інтенсифікації паразитного перетікання та витоків повітряних потоків через мікросщілини між шорсткими виступами прокладки і диска, а також уздовж зовнішнього радіуса трибосполучення.

Зношування деталей у фрикційному контакті є закономірним кінетичним процесом, який трансформує текстуру робочих поверхонь. У теоретичній трибології принципово важливим є розділення фрикційного руйнування на нормальне (фізично неминуче і практично допустиме) та катастрофічне. До класу допустимого зношування належить комплекс явищ механохімічного типу, що супроводжується пластичним деформуванням, текстуруванням тонких поверхневих шарів металу та їхньою циклічною взаємодією з хімічно активними агентами навколишнього і технологічного середовищ з утворенням та наступним зняттям вторинних структур. Модернізація та відновлення таких деталей, особливо тих, що відрізняються високою капіталомісткістю виготовлення, є економічно обґрунтованим інженерним заходом.

У пневматичних посівних системах надійне захоплення та кутове переміщення насіння реалізується за рахунок кінетичної енергії

всмоктувального повітряного потоку, що діє на кожну дискретну одиницю посівного матеріалу у формі результуючої аеродинамічної сили [25]. Проведені дослідження підтверджують, що найбільш стрімке падіння якісних показників дозування відбувається саме через зниження сили присмоктування, яка корелює зі зростанням масштабів внутрішніх вихрових перетікань повітря безпосередньо всередині вакуумної камери.

Резюмуючи викладене вище, можна стверджувати, що експлуатаційні втрати вакуумного потенціалу є інтегральною функцією перетікань повітряного середовища у фрикційній зоні контакту «диск – прокладка» та локальних витоків у безпосередніх зонах аеродинамічної фіксації насіння на отворах диска:

$$\Sigma P_{ек} = m \cdot (P_{уП} + \Sigma P_{ом}) N_l. \quad (2.6)$$

де $P_{уП}$ - витрати тиску в зоні контакту дозуючого диска і ущільнювальної прокладки, Па;

$P_{ом}$ - витрати тиску в зоні присмоктування зерна до отвору дозуючого диска, Па.

Виходячи з вище викладеного, розглянемо втрати вакууму в цих зонах більш докладно.

2.2.2. Аналіз взаємодії дозуючого диска і насіння

Фізико-механічний алгоритм функціонування пневматичного висівача базується на гравітаційному надходженні насіннєвого матеріалу з бункера до насіннєвої камери. Під дією стабільного розрідження, що генерується відцентровим вентилятором у суміжній вакуумній порожнині, поодинокі насінини фіксуються аеродинамічними силами на присмоктувальних отворах дозуючого диска, який слугує динамічним розділювачем камер. Кутове переміщення диска забезпечує транспортування матеріалу в зону скидання, де внаслідок екранування вакуумного потоку припиняється тримальна дія повітря. Як наслідок, насінини під впливом гравітаційного поля та початкового

імпульсу спрямовуються в робочий канал сошника з наступним укладанням на дно борозни [20].

Еластична ущільнювальна прокладка забезпечує статичну та динамічну герметизацію інтерфейсу між корпусом вакуумної порожнини та насінневою камерою. Конструктивна сукупність прокладки та дзеркала дозуючого диска формує локальний замкнений простір із демпфуючими властивостями — робочий об'єм ресиверної камери (рис. 2.2). Специфіка архітектури ущільнювального елемента полягає в наявності двох концентричних продовговуватих пазів висотою h_{np} та шириною b_n та b_B , які виконані рівномірно по коловій траєкторії контакту і безпосередньо обмежують геометрію ресивера.

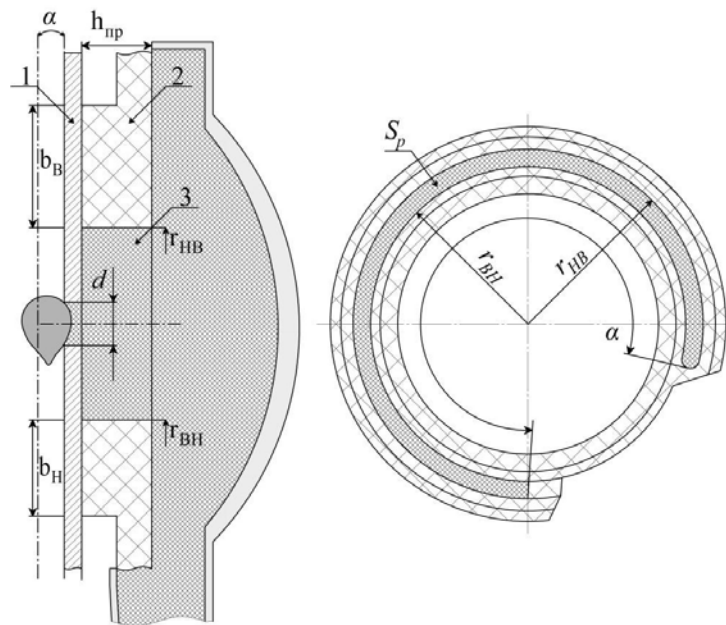


Рис. 2.2. Схема станів роботи ресиверної камери створеної з'єднанням дозуючого диска і ущільнювальної прокладки: 1 - дозуючий диск; 2 - прокладка ущільнювача; 3 - вакуумна камера

Вихідний обсяг ресиверної камери можна визначити за наступною формулою:

$$V_k = S_p \cdot h_{np} + M_{om} \cdot V_{om} + V_{kk}, \quad (2.7)$$

де h_{np} - висота ущільнювальної прокладки, м;

S_p - площа ресивера, m^2 ;

M_{om} - коефіцієнт, що враховує кількість присмоктувальних отворів, шт.;

$V_{от}$ - обсяг повітря в присмоктувальному отворі, м³;

$V_{кк}$ - обсяг повітря в корпусі кришки висівного апарату, м³.

Площа ресивера, визначається за наступною формулою:

$$S_p = \frac{\alpha \cdot \pi}{360} (r_{HB}^2 - r_{BH}^2), \quad (2.8)$$

де r_{HB} - радіус нижньої точки контакту верхнього виступу, м;

r_{BH} - радіус верхньої точки контакту нижнього виступу ущільнювальної прокладки, м;

α - кут сектора, в градусах.

Через дії різних сил на насіння, а також коливань величини розрядження, насіння постійно вібрує і повертається з різною кутовою швидкістю ω . Це обумовлено тим, що при захопленні насіння воно намагається перекрити присмоктувальний отвір щодо максимальної площі. В результаті цього, відбувається короткочасна зміна тиску в насінній камері, при якому виникає пульсуючий ефект руху насіння навколо присмоктувального отвору, що призводить до зносу крайки отвору (рис. 2.3).

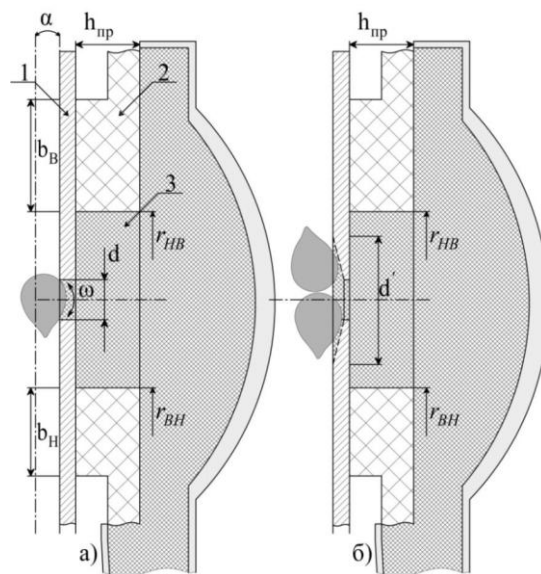


Рис. 2.3 Схема зносу присмоктувального отвору дозуючого диска: а) новий висівний комплект; б) знос дозуючого диска в зоні контакту насіння з присмоктується отвором.

До того ж обсяг циліндра присмоктувального отвору є частиною ресиверної камери, яка служить для стабілізації сили присмоктування і згладжування пульсацій вакууму в системі.

Знос присмоктувального отвору відбувається в основному через поступове поверхневе руйнування матеріалу деталей, що супроводжується відділенням частинок, зміною розмірів, геометричної форми і властивостей поверхневих шарів матеріалу (рис. 2.4 - 2.5).

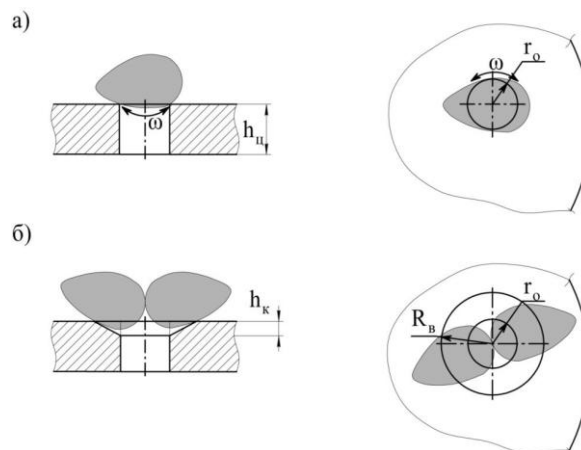


Рис. 2.4. Схема контактів і змін присмоктувальних отворів: а – схема присмоктування насіння до незношеного отвору дозуючого диска; б – схема присмоктування насіння до зношеного отвору дозуючого диска



Рис. 2.5. Зношені присмоктувальні отвори дозуючого диска

Аналіз показує, що цей процес ускладнюється корозійним руйнуванням елементів деталей ущільнення «диск-прокладка». Це викликано окисними

процесами і застосуванням хімічно активних речовин, які входять до складу різних протруювачів насіння.

Поверхні дозуючого диска і ущільнювальної прокладки знаходяться у взаємодії з насінням, обробленими протруювачами. Характер і швидкість їх зносу залежить від фізико-хімічних властивостей протруювачів насіння. Утворені на поверхні оксиди і мультимолекулярні адсорбовані шари товщиною 0,01 ... 0,10 мкм взаємодіють з робочими поверхнями дозуючого диска і ущільнювальної прокладки і підсилюють процес окислення і корозійного зношування, що сприяє швидкому поверхневому руйнуванню матеріалу деталей, опору відділенню частинок, зміною розмірів, геометричної форми і властивостей поверхневих шарів матеріалу.

Попередніми дослідженнями встановлено, що в результаті цього контурна площа контакту отвори з насінням збільшується і може перевищувати первісну площа до 2 і більше разів. В результаті цього до отвору може присмоктуватися більш однієї насінини (до 4) (рис. 2.4 б). У зв'язку з цим, відбувається пересівання матеріалу за умови, що ущільнення «диск - прокладка» забезпечує високу ступінь герметизації.

Таким чином, з часом до присмоктувального отвору, діаметр контактування якого з насіннєвим матеріалом змінюється, можуть присмоктуватися кілька насінин, при цьому якість дозування посівного апарату погіршується, з'являються двухштучні і трьохштучні подачі.

Необхідно відзначити, що при посіві просапних культур пневматичною просапною сівалкою «Kunh» Planter II, яка оснащена дозуючим диском, який має 18 отворів діаметром 2,5 мм, в процесі захоплення насіння бере участь 14 отворів, а в розвантаженні знаходиться лише 3, і ще одне перекривається прокладкою ущільнювача.

При цьому об'єм циліндра присмоктувального отвору можна розрахувати за наступною формулою:

$$V_{\text{ц}} = \pi \cdot r_0^2 \cdot h_{\text{ц}}, \quad (2.9)$$

де r_0 - радіус присмоктувального отвору дозуючого диска, м;

h_u - висота циліндра, м.

Обсяг усіченого конуса в разі зносу в зоні контакту присмоктувального отвору і насіннєвого матеріалу можна обчислити за наступною формулою:

$$V_k = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_k (R_B^2 + R_B \cdot r_o + r_o^2), \quad (2.10)$$

де R_B - радіус верхньої основи конуса, м;

h_k - висота конуса, м.

Обсяг ресивера з урахуванням зносу присмоктувального отвору можна обчислити за формулою:

$$V_u = V_{ресив} - V_k. \quad (2.11)$$

Аналіз отриманих математичних моделей дозволяє зробити висновок, що за умови збільшення лінійного зносу в зоні контакту отвору з насінням спостерігається дегресивне зменшення корисного об'єму ресиверної камери. Це дестабілізує аеродинамічний баланс вакуумної системи та веде до суттєвого перевитрачання посівного матеріалу через появу кратної подачі насіння.

Для нівелювання зазначених негативних факторів та забезпечення нормативної якості дозування виникає необхідність штучного зниження швидкості зношування робочих крайок отворів диска.

Узагальнена швидкість трибодеструкції є складною багатофакторною функцією, яку в загальному вигляді можна представити як залежність від таких ключових параметрів системи: вихідної шорсткості робочих поверхонь спряження; концентрації та дисперсності навколишнього ґрунтового абразиву; величини присмоктувального зусилля в зоні контакту; амплітудно-частотних характеристик вібраційного фону агрегату; фізико-механічних та триботехнічних властивостей матеріалу дозуючого диска; ступеня хімічної агресивності й компонентного складу захисного протруювача насіння.

2.3 Теоретична модель підвищення ресурсу висівного комплекту

Актуальною науково-технічною задачею в підвищенні ефективності використання сільськогосподарської техніки є розробка заходів і способів зі збільшення ресурсу і скорочення витрат часу на відновлення працездатності відповідальних вузлів і деталей [24, 45].

Найбільш гостро ця проблема проявляється під час посіву просапних культур, які проводяться в стислі агротехнічні терміни і пов'язані з біологічними особливостями проростання насіння рослин. Для розробки способів підвищення ресурсу пари тертя «диск - прокладка» пневматичної сівалки, розглянемо життєвий цикл існуючих серійних дозувальних дисків і ущільнюючих прокладок. Зміна товщини дозувального диска і ущільнювальної прокладки до досягнення їх граничних значень представимо графічно у вигляді кривої 1 (рис. 2.6).

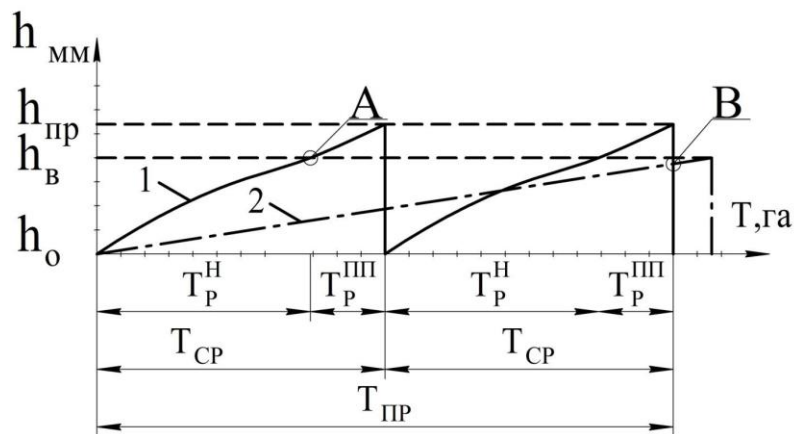


Рис. 2.6. Схема для серійного і пропонованого життєвого циклу пари тертя «диск - прокладка»

У початковий період часу T_R^H робота відбувається з постійною інтенсивністю зношування $U_{зн}$ протягом цього часу. Потім при досягненні зносу $h_в$ (точка А) процес зношування інтенсифікується через посилення вібрацій і триває до того часу, поки товщина дозуючого диска і ущільнювальної прокладки не досягне гранично допустимого значення $h_{пр}$.

Період $T_p^{пп}$ характеризує роботу висівного апарату з порушенням агротехнічних вимог. Термін служби серійного висівного комплекту можна визначити за формулою:

$$T_{cp} = T_p^H + T_p^{пп}. \quad (2.25)$$

Досягнення даної граничної величини можна розглядати як відмову пари тертя «диск - прокладка», тому що в цей період значно збільшується перевитрата і спостерігаються пропуски насіннєвого матеріалу.

При цьому подальша експлуатація недоцільна з економічних міркуючим. Таким чином, період часу T_p^H можна розглядати як основний етап життєвого циклу пари тертя «диск - прокладка», після завершення якого необхідно їх замінити. А для контролю і наукового обґрунтування доцільно цей період експлуатації $T_{пр}$ слід встановити сумарну величину зносу h_e пари тертя висівного комплекту. Термін служби пропонованого висівного комплекту підвищеного ресурсу можна визначити за наступною формулою:

$$T_{пр} = K_{ур} (T_{cp} - T_p^{пп}), \quad (2.26)$$

$K_{ур}$ - коефіцієнт кратності збільшення ресурсу.

Ідеальним варіантом підвищення ефективності роботи представленої пари тертя можна вважати збільшення одного нормального періоду експлуатації до періоду експлуатації, відповідного сезонному обсягів робіт або більше, але кратного йому, з метою виключення простоїв під час посіву.

Такий розвиток процесу стану робочих поверхонь пари тертя «диск - прокладка» описується кривою 2 на рис. 2.6. Але через різне сезонне навантаження в реальних виробничих умовах ця величина не може бути прийнята в якості об'єктивної характеристики при заміні комплекту.

Аналіз вище викладеного дозволяє зробити висновок про те, що для збільшення працездатності даного з'єднання потрібно шукати альтернативні способи вирішення цієї проблеми. При цьому слід враховувати сезонний обсяг роботи висівного апарату, а також той факт, що запропоновані технічні рішення повинні реалізовуватися як на етапі виробництва, так і на етапі ремонту,

оскільки в господарствах на даний момент вже знаходиться досить велика кількість просапних сівалок вітчизняного і імпортного виробництва.

Для реалізації пропонованого підходу в підвищенні ефективності роботи пропонованої пари тертя «диск - прокладка» необхідно забезпечити зносостійкість робочих поверхонь пар тертя «диск - прокладка» в 1,5 - 2 рази більшу, ніж у серійної пари тертя. З цієї точки зору нами запропоновано ряд технічних рішень, які задовольняють поставленим завданням (рис. 2.7).

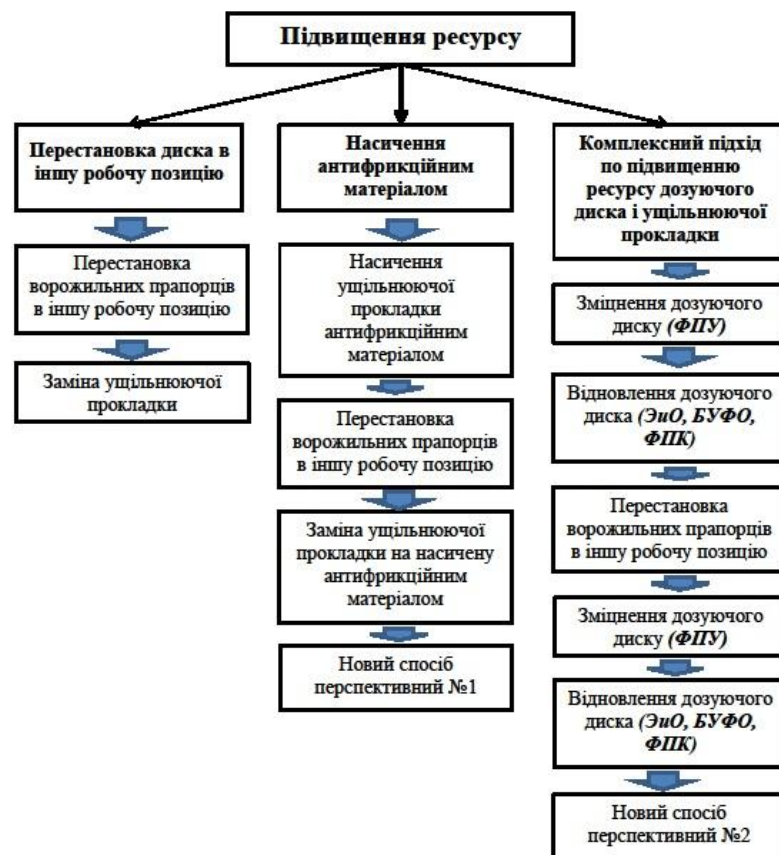


Рис. 2.7 Напрями підвищення ресурсу пари тертя «диск - прокладка» висівних комплектів просапних сівалок.

Одним з перспективних напрямків у збільшенні довговічності пари тертя «диск - прокладка» є насичення виступів ущільнювальної прокладки антифрикційним мастильним матеріалом в зоні їх контакту. Тверде мастило створює найтоншу захисну плівку, проникаючу в наявні на поверхні ковзання деталей мікропори, зменшує пластичну деформацію матеріалу, сприяє перерозподілу тиску і, таким чином, забезпечує сприятливі умови припрацювання поверхонь.

Застосування антифрикційного матеріалу в умовах твердого тертя призводить до нездатності або малої здатності до «схоплювання» (адгезії) з матеріалом робочих поверхонь сполучених деталей при збереженні необхідної еластичності, що дозволяє збільшити термін служби виробів, зменшення витрат робочого часу на усунення несправності і підвищенню продуктивності.

Найбільш відомим з короткого переліку твердих мастильних матеріалів є графіт - темний мінерал з жирним блиском, маслянистий на дотик. Антифрикційний матеріал графіт, завдяки таким перевагам, як низький коефіцієнт тертя, має добре зчеплення змащувати поверхню, мале зусилля руйнування при застосуванні його в твердому стані, низька вартість, доступність та інше. Він набув найбільшого поширення, зустрічається в природі, а також виробляється в електропечах. Синтезований продукт не менше ніж на 99% складається з чистого вуглецю. Основна перевага графіту, мабуть, в тому, що він утворює міцні плівки на поверхнях тертя.

З метою збільшення терміну служби пари тертя «диск - прокладка» за рахунок використання антифрикційний матеріал в умовах твердого тертя пропонується досягати за допомогою ефекту самомащення. Він полягає в тому, що при контакті з прокладкою ущільнювача, доповненої точками твердого антифрикційного мастила, ущільнюються поверхні покриваються тонким шаром графіту, в результаті чого відбувається заповнення мікронерівностей і поверхні стають більш гладкими (рис. 2.9).

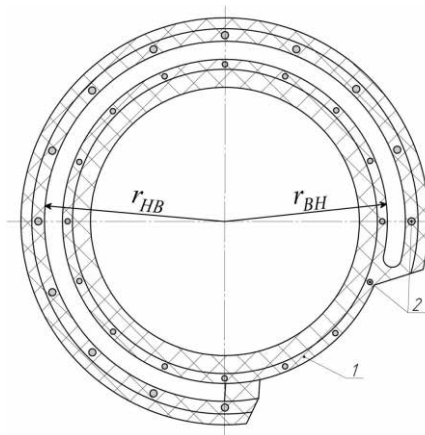


Рис. 2.9. Ущільнювальна прокладка з точками твердого мастила: 1 - ущільнювальна прокладка; 2 - точки твердого мастила.

3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У відповідності з поставленими завдання і для досягнення мети цієї роботи було прийнята наступна програма: дослідження фізико - механічних властивостей матеріалу деталей пар тертя; дослідження зносостійкості деталей пар тертя; проведення польового експерименту.

3.1 Методика досліджень мікрометражу дозуючих дисків і ущільнюючих прокладок

Експериментальний аналіз кінетики та топографії зношування деталей трибосполучення здійснювали на базі науково-дослідних лабораторій кафедри надійності техніки. Об'єктом експериментального дослідження слугувала репрезентативна вибірка з 50 одиниць висівних комплектів пневматичної просапної сівалки «Kuhn» Planter II, сумарне експлуатаційне напрацювання яких становило 2 повні робочі сезони (що еквівалентно обробітку площі 56 га).

Для забезпечення високої точності координатного вимірювання геометрії зносу робочу площину дозуючих дисків було дискретизовано шляхом поділу на чотири вимірювальні сектори з кутовим кроком. Лінійні параметри деструкції фіксували у двох характерних, найбільш навантажених зонах зношування (зона 1 та зона 2). Вимірювальний комплекс містив спеціалізований жорсткий штатив, що відповідає вимогам ДСТУ 10197:2008, та прецизійний електронний індикатор цифрового типу серії ІЧЦ-12.7, параметри якого узгоджені з положеннями ДСТУ 577:2009 (рис. 3.1).

3.2 Комплекс обладнання для досліджень мікрометражу дозуючих дисків і ущільнюючих прокладок

З метою встановлення закономірностей зміни фізико-механічних властивостей поверхневих шарів було проведено порівняльні дослідження мікротвердості як нових (еталонних), так і експлуатаційно зношених дозуючих дисків. Зважаючи на малу товщину листового конструкційного матеріалу досліджуваних дисків, вимірювання локальної твердості здійснювали методом

мікроіндентування на автоматизованому мікротвердомірі моделі HV-1000 (рис. 3.2).

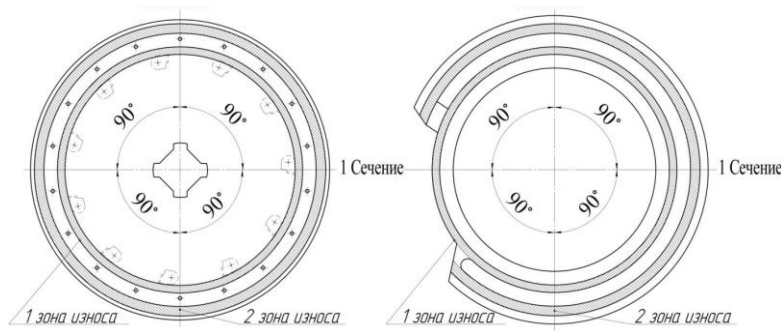


Рис. 3.1. Вимірювання знос дозуючого диска и Рис. 3.2. Твердомір моделі ущільнювальної прокладки Сівалки «Kuhn» HV -1000 Planter II.

Технологічний процес випробувань передбачав попереднє позиціонування дослідного зразка на плоскій опорній пластині, яка жорстко фіксується на поворотному предметному столику приладу. Часовий інтервал експозиції встановлювали індивідуально, виходячи зі структурно-фазових і механічних характеристик досліджуваного матеріалу. Серію експериментів реалізовували у чіткій відповідності до регламентованих вимог методологічного стандарту ДСТУ 24026-94.

На відновлені частини дисків з допомогою твердоміра моделі HV -1000 проводити не менше 5 дослідів, потім визначати середнє значення твердості. При визначенні мікротвердості при випробовуванні в зразок під дією навантаження P вдавлювався алмазний наконечник, який має форму піраміди.

Після зняття навантаження на поверхні залишається відбиток у вигляді піраміди з квадратній основі. Для визначення величини твердості H (кгс/мм²) навантаження P ділять на умовну площу бічної по-поверхні відбитка:

$$H = 1.8544 \cdot P/d^2, \quad (3.1)$$

де P - навантаження на піраміду, Н;

α - кут між бічними гранями піраміди, рівний 136°;

d - діагональ відбитка, м.

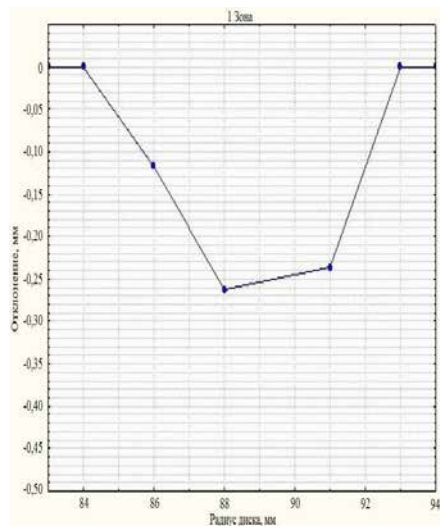
4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ АНАЛІЗ

4.1 Результати дослідження фізико - механічних властивостей матеріалів пари тертя «диск - прокладка»

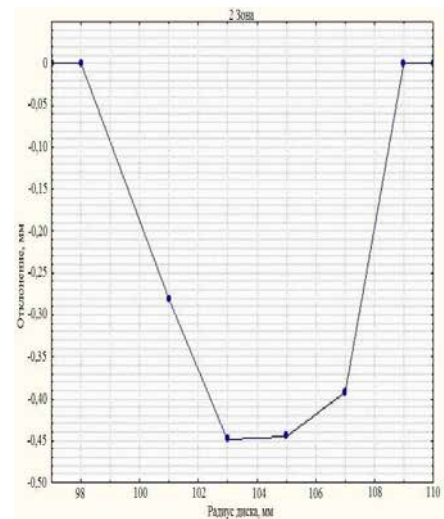
4.1.1 Результати мікрометражу дозуючих дисків просапної пневматичної сівалки

В результаті проведення досліджень були виявлені дві основні зони зносу диска (рис. 4.1):

- 1 – зона починається на радіусі 84 мм и закінчується на радіусі 93 мм;
- 2 – зона починається на радіусі 98 мм и закінчується на радіусі 109 мм.



а



б

- Рис. 4.1. Схема розподілу зносу диска в місцях контакту: - а - нижнього виступу; б - верхнього виступу.

Це визначається межами фактичного контакту диска и прокладки. У зоні 1 максимальна величина знос склалось 0,26 мм на радіусі 88 мм. У 2 зоні на радіусі 103 мм максимальна величина зносу 0,45 мм, яка в 1,7 рази більше, ніж в 1 зоні.

Обробка отриманої інформації для кожної зони була проведена з допомогою комп'ютерної програми Microsoft Excel, розроблена на кафедрі надійності кафедри. Дана програма дозволяє проводити статистичну обробку отриманих даних з метою встановлення ТЗР. Обробка статистичних даних

дозволила встановити коефіцієнти варіації для 1 і 2 зони, які відповідно становлять: $V_1 = 0,7$ и $V_2 = 0,65$. Отже, процес зношування дозуючих дисків буде описуватись законом розподілу Вейбулла-Гнєденко. Диференціальну функцію при цьому законі визначаємо за формулою [24].

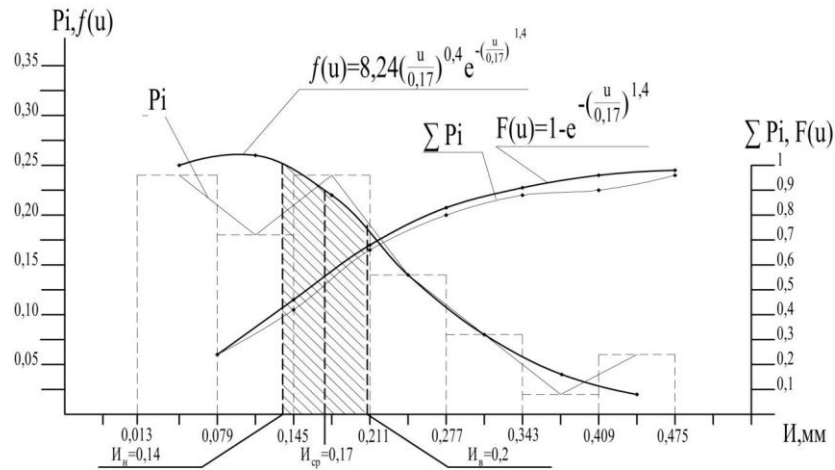


Рис. 4.2. Експериментальний і теоретичний розподіл зносу диска в місці контакту нижнього виступу.

Згідно досліджень встановлено (рис. 4.2), що дозуючі диски в зоні 1 мають середнє значення зносу деталей 0,17 мм, при довірчому інтервалі 0,14 ... 0,20 мм і при середньому квадратичному відхиленні $\sigma = 0,11$ мм.

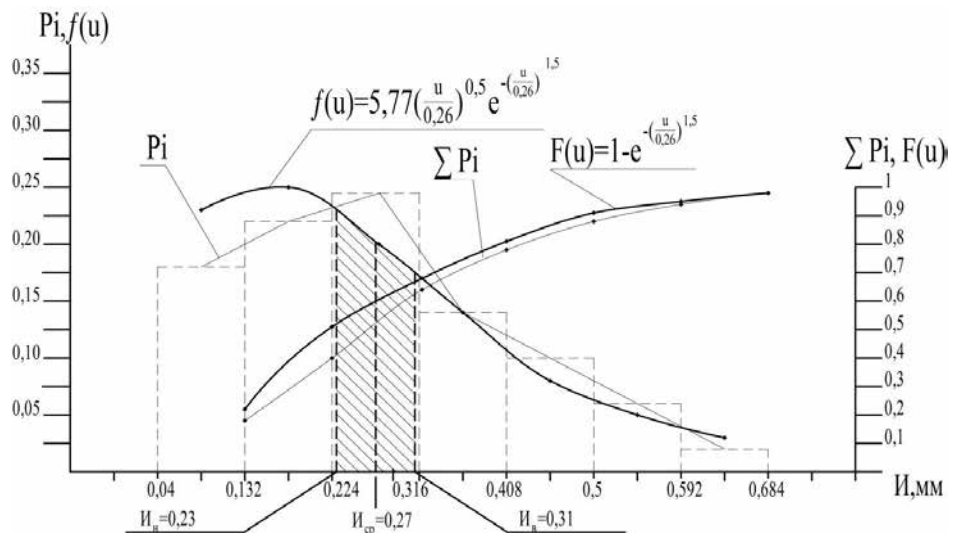


Рис. 4.3. Експериментальний і теоретичний розподіл зносу диска в місці контакту верхнього виступу.

Емпіричний розподіл параметрів лінійного зносу дозуючого диска в зоні його фрикційного контакту з нижнім ущільнювальним виступом прокладки

відображено на графіку (рис. 4.2). Перевірка статистичних гіпотез за критерієм згоди Колмогорова підтвердила, що отримані експериментальні дані з високим рівнем значущості адекватно описуються теоретичним законом розподілу Вейбулла-Гнеденка.

Аналіз результатів, наведених на рис. 4.3, дозволяє стверджувати, що для досліджуваної вибірки дозуючих дисків у зоні 2 середнє значення лінійного зносу становить 0,27 мм із довірчим інтервалом 0,23 мм при середньому квадратичному відхиленні 0,15 мм. Характер розсіювання величини зносу диска на ділянці взаємодії з верхнім ущільнювальним виступом (рис. 4.3) також демонструє високу збіжність із теоретичною функцією розподілу Вейбулла-Гнеденка.

Таким чином, комплексне дослідження топографічної нерівномірності руйнування робочих поверхонь дозуючих дисків пневматичних просапних сівалок дозволило встановити, що математичне сподівання величини зносу становить 0,17 для зони 1 та 0,27 для зони 2.

Отримані кількісні показники трибодеструкції обґрунтовують доцільність застосування технологічного методу просторового регулювання, який полягає в перестановці лопатевих ворошильників (прапорців) у альтернативну робочу позицію на незношені ділянки площини диска. Крім того, зафіксовані рівні зносу підтверджують техніко-економічну можливість і доцільність регенерації геометрії та зміцнення робочих поверхонь дозуючих дисків із використанням методу електроіскрового легування (обробки).

4.1.2 Результати мікрометражу ущільнювальних прокладок просапної пневматичної сівалки

У результаті комплексних експериментальних досліджень триботехнічного стану еластичних елементів посівних модулів зафіксовано локальну деструкцію двох основних робочих виступів ущільнювальної прокладки, які обмежують вакуумну камеру [24, 26]. Геометрично зони фрикційного контакту розподілені таким чином. В результаті проведення

досліджень було виявлено знос двох основних виступів ущільнювальної прокладки: 1 виступ починається на радіусі 85 мм і закінчується на радіусі 89 мм, 2 виступ починається на радіусі 100 мм і закінчується на радіусі 107 мм.

Крім того, при вимірюванні зносу першого виступу ущільнювальної прокладки була виявлена величина максимального зносу, що склала 2,2 мм. При цьому на 2 виступі максимальна величина зносу 2,0 мм, яка в 0,1 рази менше, ніж на першому виступі. Така нерівномірність руйнування свідчить про вищі питомі контактні навантаження або інтенсивнішу дію дрібнодисперсного абразиву в зоні меншого радіуса обертання дозуючого диска.

4.2.1 Результати проведення польового експерименту по визначенню залежності зміни норми висіву від сумарного зносу серійного висівного комплекту

В ході проведення даного експерименту контролювалася кількість висіяних насінин на один погонний метр, а також знос висівного комплекту в міру напрацювання сівалки, обладнаної досліджуваним СВК, через кожні 5 га.

Результати випробування СВК показали, що при досягненні напрацювання в 56-58 га відбувається значне збільшення кількості ділянок з нульовим і подвійними подачею насіннєвого матеріалу.

На підставі даних, отриманих в ході експерименту з визначення зносу досліджуваного висівного комплекту зі збільшенням напрацювання, була побудована експериментальна залежність (рис. 4.4).

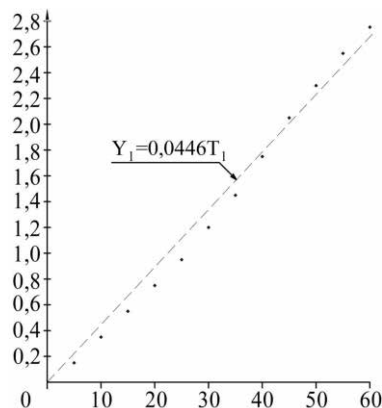


Рис. 4.4. Залежність зносу, досліджуваного висівного комплекту від напрацювання, га.

Апроксимація даних експерименту по визначенню зносостійкості матеріалу дозуючого диска і ущільнювальної прокладки дозволила отримати залежність величини зносу висівного комплекту від напрацювання:

$$Y_1 = 0,0446T_1, \quad (4.1)$$

де T_1 - заданий обсяг роботи СВК, га.

Аналіз зносу СВК показав, що сумарний знос перебував приблизно в одному і тому ж діапазоні і склав 2,4 ... 2,8 мм, з перевищенням якого різко збільшується частка висіву з порушенням агротехнічних норм, через значне падіння вакууму та, як наслідок, зниження сили присмоктування насіння. Заміна комплекту під час посівного сезону призводить до простою сівалок, що пов'язане з порушенням термінів висіву насіння.

4.3. Технологічний процес відновлення дозуючого диска

Для стабілізації електричних параметрів процесу ЕІЛ на робочу поверхню дозуючого диска попередньо наносять спеціальні композиційні сполуки, що містять хімічні елементи з низьким потенціалом іонізації [21]. Це забезпечує надійне формування, високу адгезійну міцність та зносостійкість нанесеного шару, а також надає йому виражених антифрикційних властивостей. До таких речовин належать ультрадисперсні порошки металів, графіт (вуглець), дисульфід молібдену, аморфний бор, нітрид бору, карбонати, а також шаруваті силікати (слюда, тальк, каолін).

Оскільки під час експлуатації інтенсивній трибодеструкції піддається лише одна з двох площин диска, а протилежна (на якій змонтовані лопатеві ворошильники-прапорці) залишається недеформованою, було проведено топографічні дослідження геометрії зносу. Емпірично встановлено дві дискретні зони фрикційного руйнування, які чітко корелюють із межами фактичного контакту диска та еластичного ущільнення: зона 1 – розташована у

радіальному інтервалі 84 – 93 мм; зона 2 – локалізована в межах радіусів 98 – 109 мм.

Конструкцією серійних посівних модулів передбачено нероз'ємне фіксування ворошильників за допомогою контактної точкового зварювання. У межах реалізації розробленого інженерного рішення запропоновано спосіб реверсивного використання диска шляхом перенесення прапорців на зношену площину із застосуванням технології клепання. Для виключення декомпенсації вакуумного тиску зони встановлення заклепок піддають додатковому ущільненню рідкими полімерними герметиками. Експлуатаційні випробування відновлених у такий спосіб дисків під час висіву насіння соняшнику підтвердили їхню повну функціональну адекватність оригінальним заводським компонентам.

На висівний диск в 1 і 2 зонах зносу наносять шар 2 (рис. 4.5) електроіскровою установкою із застосуванням мідно-графітового електрода, при наступних значеннях: зарядний струм 3,8 А; амплітуда імпульсів напруги на накопичувальних конденсаторах 96 В; енергія розряду 1,66 Дж; ємність накопичувальних конденсатів 360 ± 120 мкФ; частота імпульсного струму 100 Гц. При цьому товщина шару, що наноситься компенсує величину зносу, а також має припуск на механічну обробку. Застосовуючи електроіскрову установку, отримують шар товщиною 10 ... 100 мкм з поверхнею, яка має шорсткість $R_a = 2,36 \dots 2,57$ мкм, твердість поверхні нового шару $HRV = 4 \dots 6$ ГПа (на глибині до 25 мкм), на глибині 25 ... 50 мкм яка має $HRV = 2 \dots 3$ ГПа. Шорсткість отриманої поверхні 3 (рис. 4.5) характеризується нестабільною геометрією: високими піками і западинами.

За рахунок цього поверхню 3 має невелику площу фактичного контакту і високий питомий тиск в зоні контакту. З метою отримання кращої шорсткості і мікрогеометрії проводимо механічну обробку поверхні 3, після якої отримують поверхню 4 (рис. 4.5) з шорсткістю в межах $R_a = 0,8 \dots 1,5$ мкм. Потім поверхню 4 (рис. 4.5) піддаємо безабразивній ультразвуковій обробці з частотою ультразвуку в діапазоні 20-24 кГц і подачею 0,16 мм/об., отримуючи поверхню 5 (рис. 4.5) з шорсткістю $R_a = 0,025 \dots 0,036$ мкм. Така шорсткість виходить за

рахунок деформації вершин мікронерівностей без зняття матеріалу і створює зміцнений поверхневий шар 6 ударним впливом робочої головки установки. Твердість шару 6 на глибині до 25 мкм складе $HRV = 8 \dots 9$ ГПа, на глибині 25 ... 50 мкм - $HRV = 5 \dots 7$ ГПа. За рахунок безабразивної ультразвукової обробки поверхневий шар 6 додатково зміцнюється на глибину до 25 мкм. Для надання особливих фізико-механічних властивостей поверхневого шару 6 і збереження тих, які були надані попередніми операціями, проводимо формування міцного плівкового покриття 7 (рис. 4.5) за допомогою фінішного плазмового зміцнення товщиною 0,5...3 мкм.

Після цього наносимо при фінішному зміцненні конденсацією з дугового або високочастотної плазмою покриття, які містять кремній базового складу $SiC-SiO_2$, утворюють плівкове покриття 7 (рис. 4.5), яке перешкоджає схоплюванню контактуємих поверхонь. Фінішне плазмове зміцнення проводимо при наступних параметрах: швидкість переміщення - 110 мм/с, відстань між плазмотроном і виробом - 10...15 мм, робочий струм 100 А, а номінальна робоча напруга 40 В, струм зварювальної дуги не більше 25 А.

Після даної операції отримуємо покриття 7 (рис. 4.5) з товщиною 0,5...3 мкм і мікротвердістю 50...52 ГПа, коефіцієнтом тертя 0,03...0,08, залишковою напругою на поверхні $\sigma = 45$ МПа і підвищеною зносостійкістю і не вимагає подальшої обробки.

Пропонований спосіб володіє простотою і економічністю, оскільки він не вимагає великих грошових і трудових витрат, а найголовніше спеціальних пристосувань і устаткування. Виконання представлених робіт може проводитися в ремонтній майстерні.

Таким чином, робота диска після зміцнення і відновлення за допомогою запропонованого способу: зміцнення диска - ФПУ; робота сівалки до зносу диска (0,1- 0,15 мм); відновлення диска ЕІО + механічна обробка + БУФО + ФПУ; робота сівалки до зносу диска (0,1-0,15 мм); перестановка прапорців на другу сторону диска; зміцнення диска - ФПЗ; робота сівалки до зносу диска (0,1-0,15 мм); відновлення диска ЕІО + механічна обробка + БУФО + ФПЗ; робота сівалки до зносу диска (0,1-0,15 мм); заміна диска на новий.

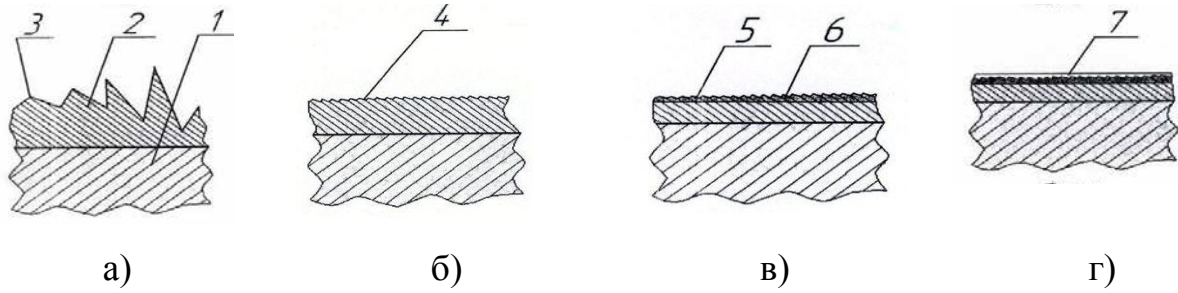


Рис. 4.5. Схема поверхонь висівного диска

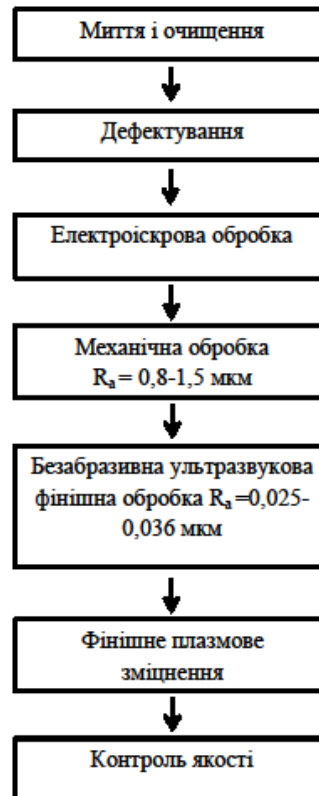


Рис. 4.6. Схема технологічного процесу відновлення висівного диска

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1 Розрахунок витрат на підвищення ресурсу висівного комплекту «диск - прокладка»

Проведення техніко-економічної оцінки підвищення ресурсу комплектів «диск - прокладка» висівного апарату пневмомеханічної сівалки розглянемо стосовно до всіх варіантів [49-51].

1 варіант – серійний висівний комплект.

Вартість буде складатися з вартості дозуючого висівного диска $C_{ВД}$ і ущільнювальної прокладки $C_{УП}$ і визначається за наступною формулою:

$$C_C = C_{ВД} + C_{УП}. \quad (5.1)$$

2 варіант – серійний висівний диск та ущільнювальна прокладка працююча до вибракувального зносу з подальшою перестановкою ворошильних прапорців в нове робоче положення диска із заміною ущільнювальної прокладки. Вартість витрат можна визначити за наступною формулою:

$$C_{ПЕР} = C_{ВД} + 2C_{УП} + 3_{ПЕР}. \quad (5.2)$$

3 варіант – серійний висівний диск і ущільнювальна прокладка, насичена точками твердого мастила, які працюють до вибракувального зносу з подальшою перестановкою ворошильних прапорців в нове робоче положення диска з заміною ущільнювальної прокладки на нову з точками мастила. Вартість визначається за формулою:

$$C_H = C_{ВД} + 2C_{УП} + 23_H + 3_{ПЕР} \quad (5.3)$$

4 варіант – комплексний підхід щодо підвищення ресурсу висівного диска і ущільнювальної прокладки передбачає 4 етапи:

- на першому етапі провести зміцнення серійного висівного диска;
- на другому і четвертому етапах проводиться відновлення робочих поверхонь висівного диска стикаються з виступами ущільнювальної прокладки з подальшим зміцненням;

- на третьому етапі проводиться перестановка ворошильних прапорців в інше робоче положення висівного диска;

На кожному етапі проводиться заміна зношеної прокладки ущільнювача на нову, в виступах якої вирізані довгасті пази, які наповнені точками твердого мастила. Оскільки при модернізації висівного комплексу необхідно провести 4 рази заміну насиченої ущільнювальної прокладки, 4 рази провести зміцнення висівного диска і при цьому зробити дворазове відновлення дозуючого диска з подальшим переустановленням ворошильних прапорців.

В такому разі вартість можна визначити за наступною формулою:

$$C_M = C_{ВД} + 4C_{УП} + 4Z_3 + 4Z_Y + 2Z_B + 3Z_{ПЕ}, \quad (5.4)$$

де $C_{ВД}$ - вартість нового висівного диска, грн.;

$C_{УП}$ - вартість прокладки ущільнювальної, грн.;

Z_H - витрати на насичення ущільнювальної прокладки антифрикційним матеріалом, грн.;

Z_3 - витрати на зміцнення двисівного диска, грн.;

Z_B - витрати на відновлення двисівного диска, грн.;

$Z_{ПЕ}$ - витрати на перестановку ворошильних прапорців в інше робоче положення, грн.

Вартість витрат на перестановку ворошильних прапорців в нове робоче положення диска з заміною ущільнювальної прокладки буде становити:

$$K_{П} = 300 + 50 = 350 \text{ грн.} \quad (5.5)$$

Визначимо економічний ефект від використання переустановки ворошильних прапорців в іншу робочу позицію із заміною ущільнювальної прокладки. Виходячи з цього, для забезпечення надійності процесу висіву в межах 85% при напрацюванні їх в 400 га буде складати:

$$E = Q_{УСТ} - Q_{УМД}, \quad (5.6)$$

де $Q_{уст}$, $Q_{уек}$ - питомі витрати на 400 га при використанні стандартних і модернізованого висівного комплексу «диск - прокладка», грн.

$$E_{85} = 14850 - 10717,75 = 4132,25 \text{ грн.} \quad (5.7)$$

Виходячи з представлених вище розрахунків, термін окупності додаткових капіталовкладень при напрацюванні в 400 га розраховується за наступною формулою:

$$T_{85} = K_{\Pi} \cdot 4,985E = 350 \cdot 4,9854132,25 = 0,4 \text{ року.} \quad (5.8)$$

На основі попередніх розрахунків, вартість витрат на насичення ущільнювальної прокладки і переустановку ворошильних прапорців в нову робочу позицію диска із заміною ущільнювальної прокладки на нову з точками мастила буде становити:

$$K_{\Pi} = 300 + 50 + 300 = 650 \text{ грн.} \quad (5.9)$$

Економічний ефект від використання насичення ущільнювальної прокладки і переустановки ворошильних прапорців в інше робоче положення із заміною ущільнювальної прокладки на нову з точками мастила при напрацюванні їх в 400 га складе:

$$E = Q_{уст} - Q_{умд}, \quad (5.10)$$

де $Q_{уст}$, $Q_{умд}$ – питомі витрати на 400 га при використанні стандартних і модернізованого висівного комплексу «диск - прокладка», грн.

$$E_{85} = 14850 - 7105 = 7745 \text{ грн.} \quad (5.11)$$

Термін окупності додаткових капіталовкладень розраховується за слідкуючою формулою:

$$T_{85} = K_{\Pi} \cdot 2,9E = 650 \cdot 2,9,7745 = 0,2 \text{ року.} \quad (5.12)$$

Вартість витрат при застосуванні комплексного підходу щодо підвищення ресурсу дозуючого диска і ущільнювальної прокладки, що передбачає чотири етапи, буде становити:

$$K_{\Pi} = 3 \cdot 300 + 50 + 4 \cdot 150 + 4 \cdot 250 + 2 \cdot 400 = 3350 \text{ грн.} \quad (5.13)$$

Економічний ефект від використання насичення ущільнювальної прокладки і перестановки ворошильних прапорців в інше робоче положення з заміною ущільнювальної прокладки на нову з точками мастила при напрацюванні їх в 400 га буде становити:

$$E = Q_{уст} - Q_{умд}, \quad (5.14)$$

де $Q_{уст}$, $Q_{умд}$ – питомі витрати на 400 га при використанні стандартного і модернізованого висівного комплексу «диск - прокладка», грн.

$$E_{85} = 14850 - 6540,5 = 8309,5 \text{ грн.} \quad (5.15)$$

Тоді термін окупності додаткових капіталовкладень розраховується за наступною формулою:

$$T = K_{п} \cdot 1,27E = 3350 \cdot 1,278309,5 = 0,5 \text{ року.} \quad (5.16)$$

Таблиця 5.1.

Розрахунок собівартості витрат на експлуатацію висівних комплектів при напрацюванні 400 га

	Показники затрат	Серійний висівний комплект	Серійний комплект + перестановка ворошильних прапорців	Серійний комплект + насичення + перестановка ворошильних прапорців
Вартість висівного диска	1500	1500	1500	1500
Затрати на перестановку ворошильних прапорців	300	600	600	1200
Затрати на насичення ущільнювальної прокладки	-	50	50	50
Затрати на зміцнення висівного диска	-	-	300	600
Затрати на відновлення висівного диска	-	-	-	1000
Затрати на зміцнення висівного диска	-	-	-	800
Підсумок	1800	2150	2450	5150
Середній ресурс комплектів при надійності забезпечення процесу висіву 90%	47,5	78,7	135,6	305,8
Кратність замін протягом 400 га	8,4	5,1	2,9	1,3
Затрати при опрацюванні 400 га	15120	10922	7227,5	6736,5
Питомі затрати Q_y , грн/га	37,8	27,3	18,1	16,8
Термін окупності капітальних вкладень, років	-	0,4	0,2	0,5
Середній ресурс комплектів				

при надійності забезпечення процесу висіву 80%	49,2	81,7	139,8	321,4
Кратність замін протягом 400 га	8,1	4,9	2,8	1,2
Затрати при опрацюванні 400 га	14634	10513,5	7007	6409,5
Питомі затрати Q_y , грн/га	36,6	26,3	17,5	16
Термін окупності капітальних вкладень, років	-	0,4	0,2	0,5

Виходячи з даних таблиці і рис. 5.1 отримуємо, що при експлуатації висівного комплексу при напрацюванні 400 га витрати на серійний висівний комплект склали 15120 грн. На переустановку ворошильних прапорців в інше робоче положення з заміною ущільнювальної прокладки необхідно витратити 10922 грн., що на 28% менше. При виконанні тих же операцій по переустановленні ворошильних прапорців, але вже з насиченим антифрикційним матеріалом ущільнювальних прокладок, витрати будуть складати 7227,5 грн., що на 52% менше. При використанні комплексного підходу щодо підвищення ресурсу дозувального диска і ущільнювальної прокладки необхідно витратити 6736,4 грн., що на 55% нижче.

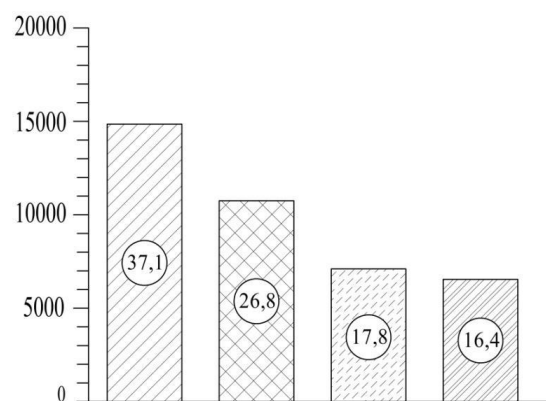


Рис. 5.1. Питомі витрати при посіві просапних культур

Виходячи з даних таблиці і рисунка 5.1 отримуємо, що при експлуатації висівного комплексу при напрацюванні 400 га витрати на серійний висівний комплект будуть становити 14634 грн.

На переустановку ворошильних прапорців в інше робоче положення з заміною ущільнювальної прокладки необхідно витратити 10513,5 грн., що на 28% менше. При виконанні тих же операцій з переустановки ворошильних

прапорців, але вже з насиченим антифрикційним матеріалом ущільнюючих прокладок, витрати складуть 7007 грн., що на 52% менше.

При використанні комплексного підходу щодо підвищення ресурсу дозуючого диска і ущільнювальної прокладки необхідно витратити 6409,5 грн., що на 55% нижче. Аналіз графіка показав, що найбільш доцільним є використання комплексного підходу щодо підвищення дозуючого диска і ущільнювальної прокладки.

ВИСНОВКИ

1. Досліджено кінетику та встановлено характер зношування елементів висівного комплексу. Доведено, що внаслідок нерівномірності значень дотичних швидкостей по довжині контактної зони пари тертя «дозуючий диск – ущільнювальна прокладка» виникає нерівномірний знос, який призводить до прогресуючого збільшення зазору між ними. Цей процес суттєво інтенсифікується під дією продуктів зношування та підвищення концентрації абразивних частинок ґрунту, що потрапляють у висівну камеру разом із посівним матеріалом. Наслідком є деформація початкової геометрії деталей, порушення герметичності вакуумної системи та дестабілізація точності посіву.

2. Розроблено та науково обґрунтовано комплекс способів і технічних рішень, спрямованих на зниження інтенсивності зношування робочих поверхонь. Завдяки цілеспрямованому формуванню необхідних фізико-механічних властивостей поверхонь контакту забезпечено підвищення експлуатаційного ресурсу висівного комплексу пневматичної просапної сівалки більше ніж у 2 рази, що гарантує високу працездатність вузла впродовж усього агротехнічного періоду.

3. Експериментально визначено триботехнічні та надійнісні параметри досліджуваної пари тертя. Встановлено, що сумарна гранична величина зносу в зоні контакту становить 2,5...2,6 мм. В умовах рядової експлуатації цей показник досягається при напрацюванні 56...58 га, проте надійність процесу посіву при цьому критично падає до 10...23% за показника фактичної результативності лише 0,1...0,3. На основі отриманих закономірностей обґрунтовано й рекомендовано величину вибракувального зносу на рівні 2,1...2,2 мм. За такого значення забезпечується нормативна надійність процесу висіву не менше 80...90%, що для серійного комплексу відповідає напрацюванню 47...49 га.

4. Обґрунтовано параметри функціонального та структурного резервування елементів апарату. Доведено високу ефективність альтернативних варіантів підвищення безвідмовності висівної системи (зокрема,

перевстановлення ворушильних прапорців в іншу робочу позицію, насичення матеріалу ущільнювальної прокладки та реалізації комплексного підходу). Впровадження цих заходів дозволяє реалізувати резерв довговічності деталей без потреби в їхній екстреній заміні.

5. Проведено порівняльний техніко-економічний аналіз запропонованих рішень за базового напрацювання комплекту на рівні 400 га з гарантованою надійністю процесу висіву 80%:

- експлуатація стандартного серійного висівного комплекту потребує витрат у розмірі 15 120 грн.;
- варіант із переустановкою ворушильних прапорців в іншу позицію та заміною лише ущільнювальної прокладки знижує витрати до 10 922 грн (економія 28% порівняно з базовим);
- реалізація третього варіанта (модифікація прокладки у поєднанні з переустановкою прапорців) забезпечує зниження витрат до 7 227,5 грн (економія 52%).
- впровадження розробленого комплексного підходу щодо підвищення ресурсу як дозуючого диска, так і ущільнювальної прокладки потребує лише 6 736,4 грн, що на 55% менше за витрати на серійні аналоги.
- період окупності витрат на модернізацію становить від 0,2 до 0,5 року залежно від обраного технологічного варіанта.

6. Результати досліджень пройшли належну наукову апробацію та оприлюднення. Ключові теоретичні положення та практичні рекомендації роботи доведені до відома наукової спільноти через доповіді на міжнародних науково-технічних заходах (XII Міжнародна науково-технічна конференція «Крамаровські читання», м. Київ, та XXI-й Міжнародний форум молоді «МОЛОДЬ І ІНДУСТРІЯ 4.0 В XXI СТОЛІТТІ», м. Харків). Основний зміст магістерського дослідження повністю відображено у двох друкованих працях (тезах доповідей).

ПЕРЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Погорілий Л., Шустік Л., Погорілий В. Технічні і технологічні аспекти розвитку комбінованих зернових сівалок. *Техніка АПК*. №2. 2003. С.4 – 6.
2. Turan, J., Višacki, V., Sedlar, A., Pantelić, S., Findura, P., Máchal, P., & Mareček, J. (2015). Seeder with different seeding apparatus in maize sowing. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 63(1), 137-141. doi: 10.11118/actaun201563010137.
3. Tang, H., Xu, F., Guan, T., Xu, C., & Wang, J. (2023). Design and test of a pneumatic type of high-speed maize precision seed metering device. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211, article number 107997. doi: 10.1016/j.compag.2023.107997.
4. Сисолін П. В. Сільськогосподарські машини: Теоретичні основи, конструкція, проектування. – Кн. 1: Машини для рільництва. / [Сисолін П. В., Сало В. М., Кропивний В.М.]; за ред. Черновола М. І. – К. : Урожай, 2001. – 384 с.
5. Popov, S.I., Hlubokyi, O.M., & Avramenko, S.V. (2022). Sowing rate effect on the performance and seed quality of pea cultivars in the eastern Forest-steppe of Ukraine. *Selection and Seed Breeding*, 121, 94-104. doi: 10.30835/2413-7510.2022.261001.
6. Сало В., Лещенко С., Лузан П., Сало Л. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами: навчальний посібник. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2022. 220 с.
7. Сало В.М., Богатирьов Д.В., Лещенко С.М., Савицький М.І. Вітчизняне технічне забезпечення сучасних процесів у рослинництві. *Техніка і технології АПК*. Науково-виробничий журнал. №10(61), 2014. С 16-19.
8. Salo, V.M., Leshhenko, S.M., Luzan, P.G., & Salo, L.V. (2022). Machines for sowing, planting and caring for crops: Training manual. Кропивныtskyi: Lysenko V.F. <https://dspace.kntu.kr.ua/items/1fac47a7-80b6-4a6f-beb7-eb76e3f661fe>.

9. Salo, V.M., & Haidenko, O.M. (2016). Nuances of the direct method of sowing grain crops]. *Ahrobiznes sohodni*, 20. <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1240-niuansy-priamoho-sposobu-sivby-zernovykh-kultur.html>.
10. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. – Т. 1; Ч. 2.: Машини для сівби та садіння. Харків: Око, 2002. 452 с.
11. Сільськогосподарські машини: Підручник / Д.Г. Войтюк, Г.Р. Гаврилюк. К.: Каравела, 2015. 552 с.
12. Onyshchenko B.V. Onyshchenko V. B. Experimental research of influence of MF 9108 VE planter settings on sunflower yield. *Engineering for rural development*, Jelgava 2022., p. 772-775 (Scopus) DOI: 10.22616/ERDev.2022.21.TF236
13. Pylypaka S., Volina T., Nesvidomin A., Zakharova I., Rebrii A. Particle Movement in a Centrifugal Device with Vertical Blades, In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 156-165. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_16.
14. Bulgakov V., Pilipaka S., Adamchuk V., Olt J. (2014). Theory of motion of a material point along a plane curve with a constant pressure and velocity. *Agronomy Research*, Volume 12, Issue 3, pp. 937–948.
15. Nardón G.F., Botta G.F., Aikins K.A., Rivero D., Bienvenido F., Antille D.L. Seeding System Configuration Effects on Sunflower Seedling Emergence and Yield under No-Tillage. *Soil Syst.* 2021, 5, 72. DOI: 10.3390/soilsystems5040072
16. Sunflower Profile. Agricultural Marketing Resource Center. [online] [10.02.2022] Available at: <https://www.agmrc.org/commodities-products/grains-oilseeds/sunflower-profile>. World Sunflower Production 2021/2022. World agricultural production. [online] [24.04.2022] Available at: <http://www.worldagriculturalproduction.com/crops/sunflower.aspx>
17. Бойко А. І., Свірень М. О. Модель функціонування пневматичної висівної системи для технологій точного землеробства. *Конструювання,*

виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кіровоград : КНТУ, 2006. Вип. 36. С. 13–19.

18. Свірень М. О., Солових Є. К., Катеринич С. Є. Способи сівби та стан сучасного розвитку конструкцій висівних апаратів. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кіровоград : КДТУ, 2001. Вип. 31. С. 97–99.

19. Шустік Л., Погорілий В. Вітчизняні сівалки для посіву зернових: проблеми та перспективи. Техніка АПК. №1. 2003. С. 23.

20. Пінчук А. В., Новицький А. В. Стан проблеми відновлення працездатності висівних апаратів сівалок. Збірник тез доповідей III Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» (17-18 лютого 2016 р.) НУБіП України. К., 2016. 137 с.

21. Ремонт машин і обладнання : підручник / О. І. Сідашенко, О. А. Науменко, Т. С. Скобло та ін.; за ред. проф. О. І. Сідашенка, О. А. Науменка. – К.: Аграр Медіа Груп, 2014. – 632 с.

22. Карабиньош С. С., Новицький А. В., Басилкевич М. В. Відновлення працездатності ґрунтообробних машин. Пропозиція, 2012, № 2. – С.116 – 118.

23. Стоцький В. В., Новицький А. В. Характерні відмови дискових сошників сівалок. Збірник тез доповідей 69-ї всеукраїнської науково-практичної студентської конференції «Наукові здобутки студентів у дослідженнях технічних та біоенергетичних систем природокористування» (09–13 березня 2015 року) / НДІ техніки, енергетики та інформатизації АПК НУБіПУ. К., 2015. С. 305 – 306.

24. Гранкін С.Г. Надійність сільськогосподарської техніки / С.Г. Гранкін, В.С. Малахов, М.І. Черновол, В.Ю. Черкун К., Урожай. 1998. – 208 с.

25. Карабиньош С., Новицький А., Власой І. Відновлення деталей – друге життя с.-г. техніки. Журнал Пропозиція, 2013, №11. С. 132 – 136.

26. Бойко А.І., Новицький А.В., Ружило З.В., Карабиньош С.С., Сиволапов В.А., Банний О.О. Обґрунтування граничних і допустимих при ремонті зносів деталей. Методичні вказівки. К.: Видавничий центр НУБіПУ. 2013. – 30 с.

27. Aulin V. V., Chernovol M. I., Pankov A. O., Zamota T. M., Panayotov K. K. (2017). Sowing machines and systems based on the elements of fluidics. INMATEH. Agricultural engineering. Vol. 53, № 3. pp. 21– 28.
28. Aliiev, E.B. (2019). Physical and mathematical models of the processes of precision separation of sunflower seed material. Zaporizhzhia: STATUS. [2]
Aliiev, E.B. (2023). Numerical modeling of agro-industrial production processes. Kyiv: Agrarian Science. doi: 10.31073/978- 966-540-584-9.
29. Aliiev, E.B. (2023). Numerical modeling of agro-industrial production processes. Kyiv: Agrarian Science. doi: 10.31073/978- 966-540-584-9.
30. Aliiev, E., Aliieva, O., Bezverkhniy, P., & Luts, P. (2026). Simulation of an improved seed delivery system for a pneumatic grain seeder. Machinery & Energetics, 17(1), 9-19. doi: 10.31548/machinery/1.2026.09.
31. Boiko, A., Popyk, P., Gerasymchuk, I., Bannyi, O., & Gerasymchuk, N. (2018). Application of the new structural solutions in the seeders for precision sowing as a resource saving direction. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(1(95)), 46-53. doi: 10.15587/1729-4061.2018.142023.
32. Cao, H.Y., Wang, D.B., Shi, J.G., Zhu, K.L., Dong, S.T., Liu, P., Zhao, B., & Zhang, J.W. (2015). Effects of sowing depth on seedling traits and root characteristics of summer maize. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao, 26(8), 2397-2404.
33. Dhillon, G.S., Baarda, L., Gretzinger, M., & Coles, K. (2022). Effect of precision planting and seeding rates on canola plant density and seed yield in southern Alberta. Canadian Journal of Plant Science, 102(3), 698-709. doi: 10.1139/cjps-2020-0186.
34. Myers R.L., Ph.D. SUNFLOWER A Native Oilseed with Growing Markets. Published by the Jefferson Institute, Columbia, MO, a non-profit research and education center supporting crop diversification (ph: 573-449-3518). Available at: https://www.extension.iastate.edu/alternativeag/cropproduction/pdf/sunflower_crop_guide.pdf
35. Dozet, G., Đukić, V., Miladinov, Z., Cvijanović, G., & Randelović, P. (2020). Sowing depth – a significant factor for establishing the optimal number of

plants per unit area of soybean. *Journal of Agronomy, Technology and Engineering Management*, 3(6), 516-522.

36. Johnston, M. (2003). Seed boot for a seeding machine (U.S. Patent No. US7168376B2). Retrieved from <https://pat>

37. Turan, J., Višacki, V., Sedlar, A., Pantelić, S., Findura, P., Máchal, P., & Mareček, J. (2015). Seeder with different seeding apparatus in maize sowing. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 63(1), 137-141. doi: 10.11118/actaun201563010137.

38. Wei, M., Diao, P., & Wang, W. (2022). Design and experiment of the seed delivery device with a rotating brush wheel for precision seeder. *Engenharia Agrícola*, 42(6). doi: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v42n6e20220089/2022.

39. Посівна секція : пат. 156272 Україна: МПК А01 С7/00, А01 С7/20 / Вовнянко Б.Г., Лещенко С.М., Сало В.М., Сало Л.В. Власник: Центральноукраїнський національний технічний університет. № u2023 06147, заявл. 18.12.2023; опубл. 29.05.2024, бюл. № 22/2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1801165/> (дата звернення: 05.10.2024).

40. Пат. 108787 Україна, МПК А01С 7/04. Пневматична висівна система / В.В. Аулін, В. Я. Коваль, А. О. Панков, А. В. Щеглов, А. В. Гриньків, Т. М. Замота (Україна). - № u 2016 01983; заявл. дата 29.02.2016; опубл. 25.07.2016, Бюл. №14.

41. Пат. 115046 Україна, МПК А01С 7/12. Пневматична висівна система / В. В. Аулін, В. Я. Коваль, А. О. Панков, А. В. Щеглов, А. В. Гриньків, Т. М. Замота (Україна). - № u 2016 11776; заявл. дата 21.11.2016; опубл. 10.04.2017, Бюл. № 7.

42. Харьковський І. С., Лоза А. Є. Забезпечення ресурсу висівних апаратів просапних сівалок Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 118-ї річниці від дня народження проф. Крамарова В. С. 20-21 лютого 2025 р., К.: ВЦ НУБіП України, 2025. С. 636 – 638.

43. [Novytskyi A. V.](#), [Bannyi O. O.](#) Statistical analysis of functioning of repair service of Ukraine. *Machinery and Energetics*. 2021. № 12 (2), pp. 39–47.

44. Харьковський І. С., Лоза А. Є. Зношування деталей пари тертя «диск - прокладка» висівного апарату. XXI-й Міжнародний форум молоді "МОЛОДЬ І ІНДУСТРІЯ 4.0 В XXI СТОЛІТТІ". Збірка матеріалів форуму. – Харків: ДБТУ. 2025. С. 188.
45. Банний О. О., Попик П. С. (2014). Методика досліджень надійності виконання технологічного процесу висіву пневмомеханічним висівним апаратом з дублюючим дозатором. Науковий вісник НУБіП України. Серія: техніка та енергетика АПК. К. Вип. 196. Ч. 3. С. 74 – 82.
46. Аулін В. В. та ін. Оптимальний комплекс операцій технічного обслуговування і ремонту для підвищення надійності вузлів, систем та агрегатів мобільних машин. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39)_II. С. 175–189.
47. Аулін В. В., Панков А. О. (2016). Напрями розвитку висіваючих систем. Механізація та електрифікація сільського господарства: [загальнодержавний збірник]. Випуск № 3 (102) / [ННЦ «ІМЕСГ»]. Глеваха, 2016. С. 54–58.
48. Новицький А. В., Новицький Ю. А. Технічна оцінка споживчих якостей сільськогосподарської техніки. Науковий вісник НУБіП України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2017. Вип. 264. С. 293–303.
49. Бойко А. І., Свірень М. О., Банний О. О. (2012). Розрахунок економічної ефективності підвищення точності висіву просапних культур. Агроінженерні дослідження: Вісник Львівського національного аграрного університету. № 16. Львів. С. 109 – 118.
50. Обладнання для сівби. Методи випробування. Частина 1. Сівалки одно насіннєві (сівалки точного висіву) ДСТУ ISO 7256-1:2005. – К.: Держспоживстандарт України, 2008.
51. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування (сільськогосподарська техніка). ДСТУ 4397:2005. – Київ, Держспожив стандарт України, 2005.

ДОДАТКИ

