

Тема: «Підвищення ресурсу рухомих з'єднань посівних машин»

Виконав: Рудь Д.О.

Керівник: Тарельник Н.В.

АНОТАЦІЯ

Рудь Денис Олександрович здобувача на тему «Підвищення ресурсу рухомих з'єднань посівних машин».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістр за освітньою програмою «Система точного землеробства» зі спеціальності 208 Агроінженерія. Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025. У кваліфікаційній роботі досліджено теоретичні основи обраної теми, а також практичні аспекти її реалізації в сучасних економічних, правових та соціальних умовах. Проаналізовано актуальний стан проблематики, виявлено основні тенденції та закономірності розвитку відповідної сфери діяльності. Довговічності паралелограмного механізму копіювання посівних комплексів шляхом розробки і обґрунтування параметрів рухомих з'єднань виготовлених з полімерно-композитних матеріалів. Обсяг роботи, що складається з вступу, 5 розділів, висновків, бібліографії, та додатків, становить 68 сторінок. П'ять розділів містять 23 формули, 9 таблиць та 27 рисунки.

Метою роботи є забезпечення високого рівня довговічності пристрою копіювання поверхні агроценозу посівного комплексу.

Для реалізації поставленої мети в роботі розв'язувались наступні завдання:

- теоретично визначити залежності взаємодії між з'єднальними динамічними елементами при дії на них статичного навантаження;
- сформулювати методику для дослідження ресурсу роботи деталей рухомих з'єднань механізму копіювання, виготовлених із запропонованих матеріалів;

- провести експериментальне випробування розроблених компонентів рухомих з'єднань механізму копіювання та визначити їхні характеристики;

Для досягнення поставленої мети було здійснено огляд наявних способів підвищення ресурсу роботи рухомих з'єднань, а також проаналізовано доцільність комбінованого підходу, що поєднує конструкторські та технологічні рішення. Проведено аналіз досліджень щодо застосування композиційних і полімерно-композитних матеріалів у конструкціях сільськогосподарської техніки, із зазначенням їхніх переваг та можливих обмежень.

Ключові слова: посівний комплекс, копіювальний механізм, агрегат, модернізація, полімерні компоненти.

ABSTRACT

Rud Denys Oleksandrovysh applicant on the topic "Increasing the resource of movable joints of sowing machines".

Qualification work for the degree of "master" with the educational program "precision farming system" in the specialty 208 Agricultural Engineering. Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025. The qualification work explores the theoretical foundations of the chosen topic, as well as practical aspects of its implementation in modern economic, legal and social conditions. The current state of the problem is analyzed, the main trends and patterns of development of the relevant field of activity are identified. Durability of the parallelogram copying mechanism of sowing complexes by developing and substantiating the parameters of movable joints made of polymer composite materials. The volume of the work, consisting of an introduction, 5 sections, conclusions, bibliography, and appendices, is 68 pages. The five sections contain 23 formulas, 9 tables, and 27 figures.

The aim of the work is to increase the durability of the parallelogram mechanism for copying the relief of sowing complexes.

To realize this goal, the following tasks were solved in the work:

- to theoretically substantiate the laws of interaction of elements of movable joints under static loads;
- to develop a methodology for studying the durability of parts of movable joints of the copying mechanism from the proposed materials;
- to experimentally investigate the characteristics of the developed parts of the movable joints of the copying mechanism;
- determine the design and technological characteristics of the movable joints of the copying mechanism.

To achieve this goal, a review of existing methods for increasing the durability of movable joints was conducted, and the prospects for combining several methods: design and technological were considered. An analysis of studies of the introduction of composite and polymer-composite materials in the construction of agricultural machinery is carried out, their advantages and disadvantages are presented.

The force picture arising in the movable joints of the parallelogram mechanism for copying the soil surface of the disk coulter of the sowing complex "Agro-Soyuz Turbosem II 19-60" is determined.

Keywords: sowing complex, copying mechanism, unit, modernization, polymer components.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. СПЕЦИФІКА КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ТА УМОВ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОПІЮВАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ У СКЛАДІ ПОСІВНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	1
1.1 Огляд конструктивних особливостей посівних комплексів і аналіз умов їхньої роботи в польових умовах	11
1.2 Конструктивні та технологічні аспекти паралелограмного механізму в складі посівних комплексів	21
1.3 Підхід до забезпечення довговічності компонентів копіювальних механізмів	35
2. ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КОПІЮВАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ПОСІВНОГО КОМПЛЕКСУ	39
2.1 Дослідження силових взаємодій у рухомих з'єднаннях копіювального механізму при впливі навантажень статичного характеру	39
2.2 Підвищення ресурсу елементів копіювального механізму шляхом застосування полімерних матеріалів	44
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ З'ЄДНУВАЛЬНИХ ВУЗЛІВ КОПІЮВАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ПОСІВНОГО АГРЕГАТУ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	48
4. АНАЛІЗ ТРИВАЛОСТІ СЛУЖБИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОНЕНТІВ КОПІЮВАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ	55
4.1 Вивчення рівня зносу полімерних деталей	55
4.2 Оцінювання ймовірності безвідмовної роботи елементів удосконаленої конструкції	57
4.3 Розрахунок експлуатаційного ресурсу модернізованих елементів копіювального механізму посівного агрегату	59
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62
ДОДАТКИ.....	65

ВСТУП

1. Актуальність теми

Посів сільськогосподарських культур є ключовою технологічною операцією у процесі вирощування рослинницької продукції. Виробництво сільськогосподарських культур має чітко визначені технологічні вимоги, які обмежені в часі, зокрема щодо строків проведення посівних робіт. Це зумовлює високі вимоги до сільськогосподарської техніки, яка повинна забезпечувати стабільне виконання всіх технологічних процесів, відзначатися високою надійністю, бути придатною до ремонту без використання громіздкого спеціального обладнання, а також мати тривалий інтервал між технічними обслуговуваннями.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Проблема підвищення зносостійкості та надійності рухомих з'єднань сільськогосподарських машин висвітлена у працях багатьох вітчизняних і зарубіжних дослідників. Науковці детально розглядають питання трибології, удосконалення конструкцій вузлів тертя, вибору матеріалів, аналізу навантажувальних режимів та методів поверхневого зміцнення. Проте, незважаючи на значний масив теоретичних і практичних доробок, існують невирішені проблеми, пов'язані з недостатньою адаптацією загальних інженерних рішень саме до умов роботи посівної техніки. Залишається актуальним пошук конструктивних та технологічних заходів, які забезпечують збільшення ресурсу вузлів при одночасному збереженні технологічних і економічних параметрів машин.

3. Мета дослідження

Є забезпечення високого рівня довговічності пристрою копіювання поверхні агроценозу посівного комплексу.

4. Об'єкт дослідження

Процес функціонування рухомих з'єднань у вузлах і механізмах посівних машин.

5. Предмет дослідження

Конструктивні, фізико-механічні та експлуатаційні характеристики рухомих з'єднань, що визначають їхню зносостійкість і довговічність у процесі роботи посівних машин.

6. Завдання дослідження

- теоретично визначити залежності взаємодії між з'єднальними динамічними елементами при дії на них статичного навантаження;
- сформулювати методику для дослідження ресурсу роботи деталей рухомих з'єднань механізму копіювання, виготовлених із запропонованих матеріалів;
- провести експериментальне випробування розроблених компонентів рухомих з'єднань механізму копіювання;
- визначити конструктивно-технологічні характеристики рухомих з'єднань механізму копіювання.

7. Методи дослідження

- аналіз і узагальнення наукових джерел, порівняльний аналіз конструкцій;
- методи інженерних розрахунків, елементи;
- експертна оцінка технічних рішень.

8. Структура та обсяг роботи

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

РОЗДІЛ 1

СПЕЦИФІКА КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ТА УМОВ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОПЮВАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ У СКЛАДІ ПОСІВНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1. Огляд конструктивних особливостей посівних комплексів і аналіз умов їхньої роботи в польових умовах

Сівба сільськогосподарських культур є ключовою та невід'ємною технологічною операцією у процесі вирощування рослинницької продукції. В аграрному виробництві вирощування культур відбувається за чітко визначеними технологічними вимогами, які мають жорсткі часові обмеження, зокрема щодо строків посіву.

Ці фактори висувають підвищені вимоги до сільськогосподарської техніки, яка повинна гарантувати стабільне виконання технологічних процесів, високу надійність у роботі, а також відповідати умовам ремонтпридатності без використання громіздкого спеціального обладнання. Крім того, важливими є тривалий період між технічними обслуговуваннями та здатність функціонувати безперебійно у складних польових умовах.

Якість і кількість врожаю сільськогосподарських культур значною мірою залежать від рівномірного розподілу насінневого матеріалу по всій площі поля та стабільного дотримання оптимальної глибини загортання в ґрунт, що забезпечує необхідні умови для розвитку рослин.

Тому сільськогосподарські машини, які використовуються для виконання посівних робіт, повинні відповідати таким технологічним вимогам:

1. Фактична норма висіву насінневого матеріалу не повинна мати відхилення від заданої норми в діапазоні $\pm 3\%$, для мінеральних добрив відхилення складає $\pm 10\%$. У деяких випадках ці показники можуть

бути збільшені до 6% для зернових культур, до 10% для зернобобових і до 2% для трав.

2. Верхня межа рівня пошкоджуваності насіннєвого матеріалу робочими органами машин для висіву становить 0,2% для зернових культур і 0,7% для зернобобових.
3. Забезпечення дотримання оптимальної для культури глибини загортання в ґрунт не повинно мати відхилення більше за 15%, що відповідно забезпечує діапазон в $\pm 0,5$ см при заданій глибині в сівби 3...4 см, $\pm 0,7$ см при 4...5 см та ± 1 см при 6...8 см.
4. Відхилення в розмірі більшим за ± 5 см є неприпустимим для ширини стикового міжряддя від основної.
5. Наявність огріхів є недопустимим.

Таблиця 1.1 наглядно демонструє кількісні характеристики посівних площ в Україні станом на 2020 рік [1]

Таблиця 1.1

Підприємства сільськогосподарського напрямку з урахуванням розподілу посівних площ

Площа, га	Кількість підприємств, одиниць	У % до загальної кількості	Посівна площа, тис. га	У % до загальної площі
Всього	45613	100	19811,2	100
з них:				
до 50,0	24596	53,9	548,3	2,8
50,1...100,0	4606	10,1	338,2	1,7
100,1...250,0	4713	10,3	774,1	3,9
250,1...500,0	3232	7,1	1171,5	5,9
500,1...1000,0	2925	6,4	2103,6	10,6
1000,1...2000,0	2822	6,2	4045,7	20,4
2000,1...3000,0	1277	2,8	3096,9	15,6
більше 3000,0	1442	3,2	7732,9	39,1

Кількісний аналіз підприємств, що займаються виробництвом продукції рослинництва, свідчить, що ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки України відіграють 3,2% господарств, які обробляють понад 3 тис. га посівних площ. Ці підприємства контролюють понад 39% загальної посівної площі країни. Для ефективної роботи на таких масштабних територіях необхідна високопродуктивна та надійна техніка, переважно широкозахватного типу, що дозволяє виконувати агротехнологічні вимоги у визначені терміни.

Зважаючи на аграрний профіль України, значного поширення набули посівні агрегати як вітчизняного, так і закордонного виробництва, які належать до категорії широкозахватної техніки.

За даними Міністерства аграрної політики і продовольства України, вітчизняне виробництво сівалок демонструє стабільне зростання, з середнім річним приростом на рівні 13%.

Посівні машини мають різні конструктивно-технічні характеристики. На рис. 1.1 представлена відома класифікація цих сільськогосподарських агрегатів.

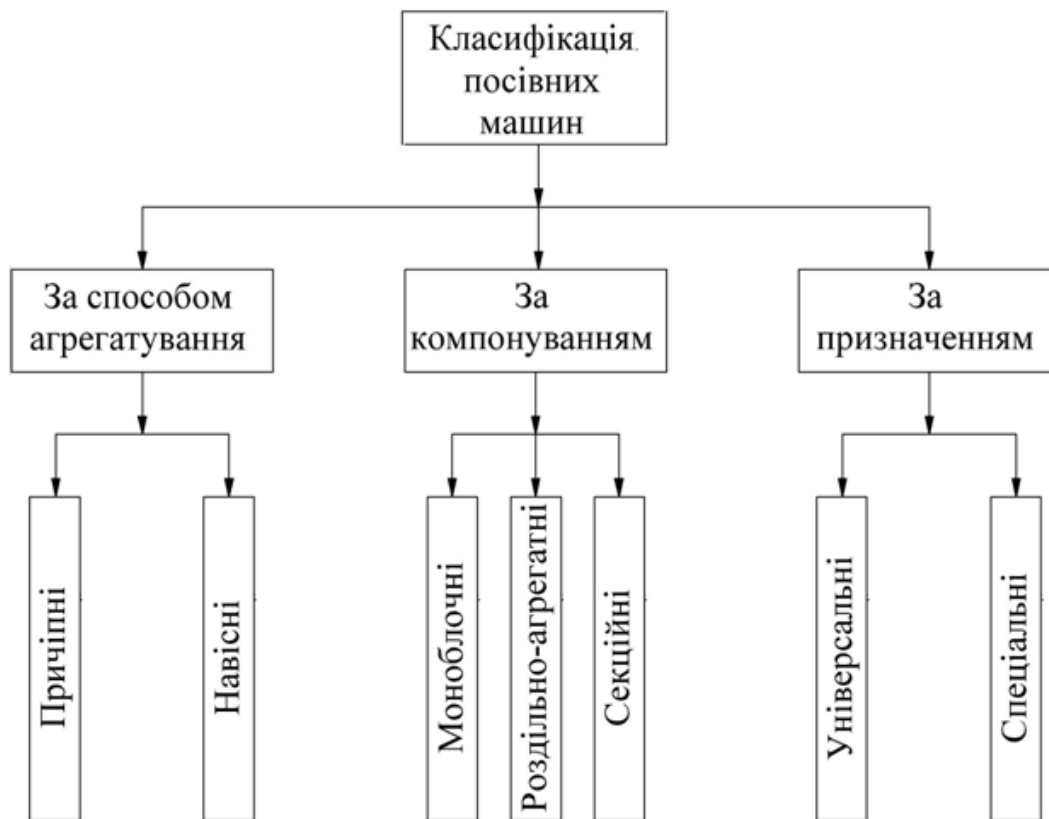


Рис. 1.1. Ранжування посівних машин

Посівні машини можуть агрегуватися двома способами, відповідно поділяючись на навісні та причіпні. Навісні моделі зазвичай мають невелику ширину захвату, яка не перевищує 3 м, і здебільшого використовуються в малих фермерських господарствах.

За способом компонування посівні машини поділяються на моноблочні, секційні та роздільно-агрегатні. Моноблочні сівалки (Рис. 1.2) відрізняються тим, що всі робочі органи закріплені на єдиній рамі. Серед відомих представників цього класу можна виділити [2-6]:

- Агро-Союз MD 19-40;
- ASTRA-5,4;
- Great Plains 2000;
- Amazone D9-40 (60) ;
- Gaspardo MOD M.



а



б



в



г

Рис. 1.2. Моноблочные посівні машини:

- а) Агро-Союз MD 19-40; б) ASTRA 5,4;
в) Great Plains 2000; г) Amazone D9-40

Висока матеріалоемність таких машин, яка може коливатися в межах 550–1300 кг на 1 м ширини захвату, призводить до значного збільшення тягового опору, що є їхнім основним недоліком.

Роздільно-агрегатні сівалки відрізняються тим, що складаються з окремих конструктивних блоків, які разом утворюють єдиний посівний комплекс. Серед найбільш відомих моделей цього типу можна відзначити [2, 4-6]:

- Gaspardo PE ;
- Amazone Cirrus;
- Newholland FlexiCoil;
- Great Plains CTA-400;
- Агро-Союз АТД, Агро-Союз Turbosem II 19-60 (32; 48).



а



б



в



г

Рис. 1.3. Роздільно-агрегатні посівних машин:

- а) Gaspardo PE 300; б) Amazone Cirrus;
в) Great Plains CTA-400; г) Агро-Союз Turbosem II 19-32.

Секційні сівалки (Рис. 1.4) відрізняються можливістю регулювання ширини міжряддя завдяки модульному компонуванню окремих посівних секцій. Кожна секція має власні опорні колеса, які можуть змінювати розташування на рамі. У своїй конструкції вони містять індивідуальний бункер, висівний апарат, привідний механізм, а також оснащені власним сошником, котком і загортачем. До найвідоміших представників цього типу можна віднести [5-8]:

- John Deere DB;
- John Deere 1780;
- Kinze 3700;
- Gaspardo Maestra (Metro, SP);
- Amazone ED.



а

б



в



г

Рис. 1.4. Секційні посівні машин:

а) John Deere 1780; б) Kinze 3700; в) Gaspardo Maestra; г) Amazone ED

Посівні машини поділяються за своїм призначенням на універсальні та спеціальні. Універсальні моделі мають конструктивні можливості для висіву різних культур, таких як пшениця, жито, ячмінь, люцерна та інші подібні культури. Натомість спеціальні (просапні) машини розраховані на сівбу одного виду насінневого матеріалу або культур із подібними характеристиками та не передбачають широких конструктивних налаштувань.

Розвиток технологій у сфері посівної техніки відбувається у кількох напрямках. Перший – збільшення продуктивності за рахунок розширення

ширини захвату агрегатів. Другий напрямок орієнтований на інтеграцію посівних функцій у комбіновані ґрунтообробні машини. Третій підхід спрямований на універсалізацію посівних агрегатів, що дає змогу здійснювати висів за різними технологіями обробітку ґрунту, включаючи нульовий обробіток [9-11].

Сучасний ринок пропонує споживачам індивідуальні рішення, адаптовані під конкретні потреби господарств, що забезпечують високу якість сходів при мінімальних ресурсних витратах.

Норми висіву (шт./га, кг/га) залежать від обраного способу сівби [12, 13] та безпосередньо впливають на характеристики сходів, зокрема на площу живлення, густоту рослин та рівномірність розподілу насіння. Формування норм сівби визначається багатьма факторами: станом ґрунту, його родючістю, видом культури, глибиною загортання, кліматичними особливостями регіону тощо. Важливо відзначити, що більшість із цих факторів не піддаються безпосередньому регулюванню в процесі сівби.

Для успішного вирощування сільськогосподарських культур одним із ключових факторів є глибина загортання насіння. Наприклад, для озимої пшениці оптимальна глибина висіву становить 4–5 см, тоді як її збільшення до 7–8 см може спричинити зниження врожайності на 10–15% [14, 15] через погіршення схожості. Таким чином, стабільне дотримання агротехнологічних вимог при посіві є критично важливим. Посівні машини, здатні забезпечити точне загортання насіння, сприяють зменшенню витрат на насіннєвий матеріал, який має значну вартість.

З механічної точки зору процес сівби можна умовно розділити на два основні етапи. Перший – подача насіннєвого матеріалу з бункера до сошників, а другий – точне розміщення насіння на заданій глибині в ґрунті.

Провідні виробники аграрної техніки оснащують посівні машини сучасними датчиками, які контролюють дозування насіння та його загортання на потрібну глибину. Однак більшість обладнання, що використовується на вітчизняних полях, не має подібних функцій. У таких

випадках рівномірність розподілу насіння та глибину його загортання можна оцінити лише вручну шляхом розкриття рядків.

Безпосередня взаємодія робочих органів посівних комплексів із ґрунтом і пилом, які утворюють абразивне середовище, значно підсилює процес тертя, що, у свою чергу, призводить до швидкого зношування деталей і їх рухомих з'єднань.

На роботу механізмів також впливають зовнішні фактори, такі як висока вологість, яка іноді досягає 100%, підвищений рівень запиленості (1,5–2,0 г/м³), а також динамічні навантаження в умовах значних температурних коливань від –10 до +40 °С. Усі ці чинники суттєво впливають на зносостійкість трибоспряжень, що є критично важливими для роботи техніки. Їхня надійність визначає загальну довговічність сільськогосподарських машин, зокрема посівних агрегатів.

Для забезпечення працездатності рухомих з'єднань вирішальне значення мають раціональний вибір матеріалу деталей, фізико-хімічні і механічні властивості їх поверхневих шарів, реологічні і фізико-хімічні характеристики і властивості робочого (технологічного) середовища та ін.

Недотримання агротехнічних вимог під час сівби, зокрема значні відхилення у глибині загортання насіння, порушує рівномірність сходів та призводить до різних фаз розвитку рослин. Унаслідок цього на одному полі в період жнив можуть одночасно бути стиглі, недостиглі та перестиглі рослини. Така неоднорідність хлібостою може спричинити зниження якості зерна на 12–27%. Однією з причин таких негативних явищ є некоректна робота окремих елементів посівних комплексів.

Тому особливе значення має точна та стабільна робота механізмів посівного агрегату, які відповідають за копіювання рельєфу поля і забезпечують загортання насіння на необхідну глибину відповідно до агротехнологічних вимог. Це є ключовим фактором для рівномірного

проростання та високої якості врожаю. Як правило, такі механізми мають конструкцію у вигляді «паралелограма» або «пантографа».

Однак однією з основних проблем цих механізмів є інтенсивний знос рухомих з'єднань, який безпосередньо впливає на якість виконання посівних операцій. Зношування прискорюється через роботу в агресивному абразивному середовищі, а також через неналежне або несвоєчасне технічне обслуговування.

Практичний досвід показує, що в сільськогосподарських підприємствах обслуговування посівної техніки зазвичай виконується наприкінці зміни або під час технічного огляду. Часто планові регламентні роботи ігноруються, що призводить до відсутності належного змащення рухомих вузлів механізму копіювання. Як наслідок, рівень зносу значно перевищує розрахований виробником експлуатаційний режим, а ймовірність виникнення сухого тертя різко зростає.

Робота в такому режимі супроводжується підвищеним навантаженням на рухомі елементи, зростанням температури та прискореним руйнуванням поверхонь, що контактують між собою (рис. 1.5, 1.6).



Рис. 1.5. Надмірний знос металевих деталей рухомих з'єднань паралелограмного механізму копіювання рельєфу посівного комплексу Агро-Союз Turbosem II 19-60 (48) після 1492 га наробітку



Рис. 1.6. Корозійна маса та надмірний знос важеля паралелограмного механізму копіювання рельєфу посівного комплексу John Deere 1710 (наробіток 1500 га)

Відсутність мастильного шару, який виконує також захисну функцію для спряжених деталей, призводить до накопичення абразивних частинок між елементами механізму під час сівби. Це змінює режим роботи механізму, сприяючи прискореному зношуванню його складових. У результаті система копіювання поступово втрачає здатність точно виконувати свої функції, що призводить до порушення агротехнологічних вимог, необхідних для якісного посіву.

1.2. Конструктивні та технологічні аспекти паралелограмного механізму в складі посівних комплексів

Стабільність таких важливих параметрів посівного процесу, як рівномірність загортання насіння на задану глибину, можна розглядати як недостатньо вивчений резерв для підвищення ефективності вирощування сільськогосподарських культур.

Використання механізмів типу паралелограма або пантографа дозволяє контролювати глибину загортання насіннєвого матеріалу шляхом копіювання рельєфу поля. При цьому механізм повинен враховувати як поздовжні, так і

поперечні нерівності ґрунту, забезпечуючи їх точне відтворення протягом усього періоду роботи.

Чутливість механізму копіювання визначається його здатністю реагувати на нерівності поверхні, що досягається завдяки рухомих з'єднанням. Такі з'єднання реалізуються за схемою «металевий вал – металева втулка» і потребують постійного контролю технічного стану, а також дотримання жорстких регламентів технічного обслуговування. Це включає обов'язкове використання мастильних матеріалів, які через інтенсивну експлуатацію витрачаються за короткий проміжок часу.

Невиконання агротехнологічних строків сівби може призвести до втрати врожаю до 20% ще на початковому етапі вирощування культури. Подібні порушення часто виникають унаслідок простою техніки через необхідність усунення несправностей.

Більшість сучасних посівних агрегатів містять у своїй конструкції ряд рухомих елементів, які вимагають обслуговування безпосередньо під час виконання польових робіт:

- шарніри механізмів копіювання поверхні поля;
- підшипники: секцій механізму копіювання, коліс, дисків сошників; різноманітних валів та шнеків;
- копіюючих коліс, систем безпеки сошників, напрямних маркерів;
- шарніри систем складання-розкладання машин з робочого положення в транспортне і навпаки.
- муфти приводів, ведучих зірочок;

Аналіз сучасних конструкцій вітчизняних виробників сільськогосподарської техніки, таких як ТОВ «Велес-Агро ЛТД» та ПАТ «Ельворті», а також провідних світових брендів у сфері виробництва посівних комплексів, серед яких італійська компанія *Maschio Gaspardo* та американські *John Deere* і *Kinze*, показує, що їхні копіювальні механізми для адаптації до рельєфу оранки потребують регулярного технічного

обслуговування. На сьогодні не існує конструктивних рішень, які б дозволяли уникнути цієї потреби (рис. 1.7–1.10).

Ця особливість ставить аграріїв у залежність від дилерських і сервісних центрів, які, особливо в сезон активних польових робіт, не завжди встигають обробити всі заявки на технічне обслуговування. Як наслідок, техніка простоє в критичні періоди посівної кампанії, що може призвести до значних втрат врожаю.

Дані, представлені в таблиці 1.2, підтверджують, що сучасні посівні комплекси мають короткі міжсервісні інтервали – від 40 до 50 годин роботи. При цьому технічне обслуговування займає значний час – до 5 годин, не враховуючи витрати на логістику. Основними компонентами, що потребують обслуговування, є шарнірні з'єднання типу «вал-втулка», які потребують постійного та інтенсивного змащення для забезпечення безперебійної роботи агрегату.

Таблиця 1.2

Кількість рухомих з'єднань в конструкціях посівних машин, що потребують ТО під час експлуатації та його періодичність

	Виробник посівної техніки	Марка машини	Робоча ширина захвату, м	Кількість точок змащування з періодичністю		
				8-12 год.	15-25 год.	40-50 год.
1	Great Plains	3S-4010 HD (HDF)	12	94 (115)	9	7
2	Great Plains	3S-4000 HD	12	22	6	14
3	Great Plains	Yield-Pro YP2425A-2470	16,8	82	48	68
4	Great Plains	Centurion CDA600	6	-	-	68
5	Horsch	Pronto 7/8/9 DC (8 DC PPF)	7,5/8/9(8)	24	-	29 (27)
6	Horsch	Maestro 12/24SW	8,4/16,8	-	-	79/127
7	Агро-Союз	Агро-Союз Turbosem II 19-60	11,4			270
8	John Deere	Deere Bauer 44/58/60	16,8/22,4/25,2	72/96/108	72/96/108	48/64/72
9	John Deere	JD 1710/1740	8,4	36	36	24
10	Amity Technology	Till Drill 4010	12,2	68	-	18
11	Amity Technology	Till Drill 6015	18,3	100	-	36
12	Vaderstad	Rapid RDA 600J(800J)	6(8)	-	-	85 (101)
13	Vaderstad	Spirit ST 600C(800C)	6(8)	-	-	66 (500га)
14	KINZE	KINZE 3600	11,2	106	-	223

Згідно з проведеним аналізом (табл. 1.2), встановлено, що виробники посівної техніки застосовують експлуатаційний підхід для збільшення терміну служби рухомих з'єднань.

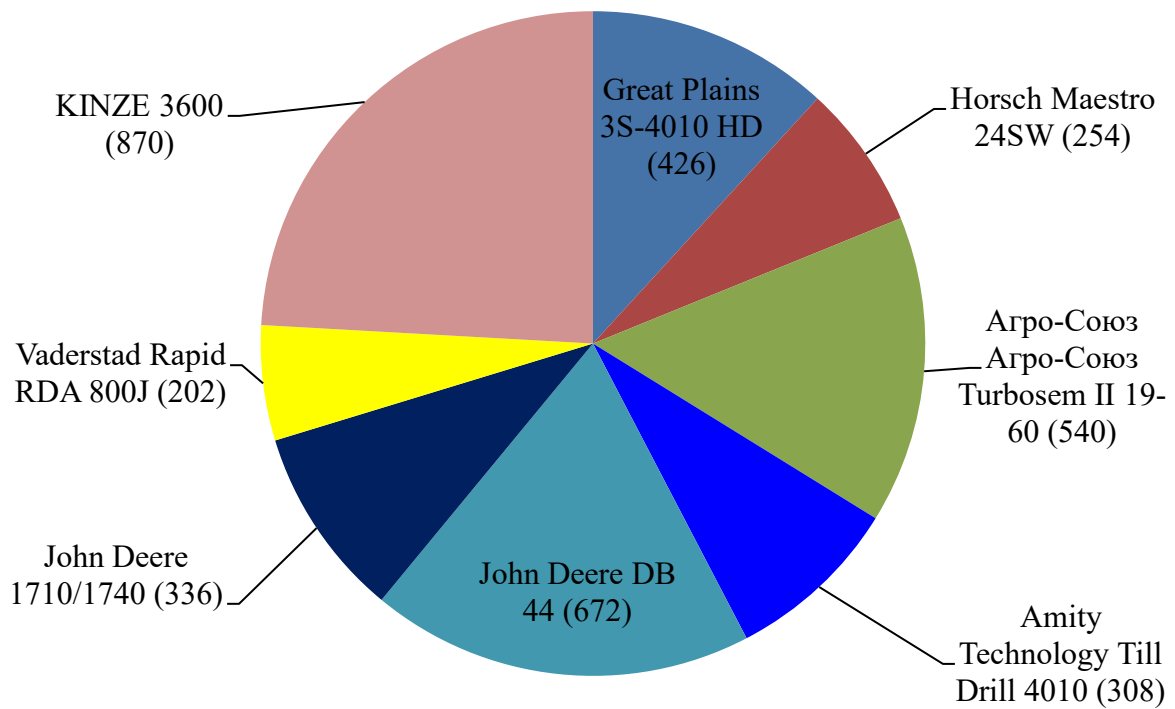


Рис. 1.7. Кількість точок обслуговування рухомих спряжень різних посівних машин при напрацюванні 100 год

Аналіз кількості точок обслуговування (табл. 1.2, рис. 1.8-1.11) при напрацюванні 100 год посівними машинами різних виробників (рис. 1.7) вказує на малу періодичність (кожні 4 доби роботи) та високу трудомісткість технічного обслуговування (від 1,4 люд.-год для Vaderstad Rapid RDA 800J до 4,6 люд.-год для KINZE 3600).



Рис. 1.8. Посівні секції сівалок виробництва John Deere з позначеними точками обслуговування



Рис. 1.9. Посівна секція сівалки KINZE 3600 з позначеними точками обслуговування



Рис. 1.10. Посівна секція сівалки VEGA PROFI (ПАТ «Ельворті») з позначеними точками обслуговування



Рис. 1.11. Секції посівного комплексу Агро-Союз Turbosem II 19-60 з позначеними точками обслуговування

Одним із ключових елементів, що впливають на якість та кількість урожаю сільськогосподарських культур, є механізми копіювання рельєфу в посівних комплексах. За конструктивними особливостями їх умовно поділяють на два типи: паралелограмні та радіальні.

Радіальні механізми, у свою чергу, мають дві основні конструкції. Перший тип оснащений повідками і потребує високоякісного передпосівного обробітку ґрунту для ефективної роботи. Другий тип, що використовує натискні штанги, є більш універсальним і здатний функціонувати на складних рельєфах.

Основними перевагами радіальної конструкції є її простота, що забезпечує високу надійність, а також менша металоємність порівняно з іншими варіантами. Однак цей тип механізму має і певні недоліки: він спричиняє нерівномірність загортання насіння на задану глибину, а також нестабільний кут входження сошника в ґрунт, що може негативно впливати на врожайність.

Просапні сівалки, як правило, оснащуються паралелограмними копіювальними механізмами (рис. 1.12), які позбавлені вищезазначених недоліків і забезпечують стабільну роботу робочого органу та рівномірний кут входження сошника в ґрунт.

Аналіз конструкцій посівних агрегатів останніх років, розроблених провідними виробниками сільськогосподарської техніки, свідчить про те, що переважна більшість високоякісних моделей оснащена саме паралелограмними копіювальними механізмами.



1



2



3



4



5



6

Рис. 1.12. Секції посівних комплексів з паралелограмними механізмами копіювання

1 – Gaspardo Sp Dorada ; 2 – Агро-Союз Turbosem II 19-60; 3 – Great Plains;
4 – John Deere (MaxEmerge XP); 5 – KINZE-3700; 6 – Amazone ED

Серед провідних виробників вітчизняної аграрної техніки виділяється компанія «Агро-Союз», що підтверджується її міжнародним визнанням. Зокрема, посівний комплекс широкого захвату *Turbosem II 19-60* отримав

Гран-Прі за високі якісні показники виконання сівби на міжнародній виставці в Ганновері у 2010 році.

Експлуатаційні дослідження роботи агрегату *Turbosem II 19-60* на великих площах агрохолдингів виявили значну різницю між заявленими виробником теоретичними показниками продуктивності та фактичними результатами. Основною причиною цього є висока трудомісткість технічного обслуговування, яка впливає на ефективність роботи машини.

Аналіз системи ТО цього посівного комплексу показав, що такі рухомі з'єднання посівної секції, як втулки важелів прикочуючих коліс 1 (60 точок змащування), втулки нижнього паралелограма 2-5 (60 точок змащування, рис. 1.13), напрямного маркера (3 точки змащування, на схемі не вказано), системи безпеки сошника 6 (60 точок змащування), повинні обслуговуватися кожні 48 годин [16]. Тобто, обслуговування такої конструкції сошника, потребує значних матеріальних і людський ресурсів.

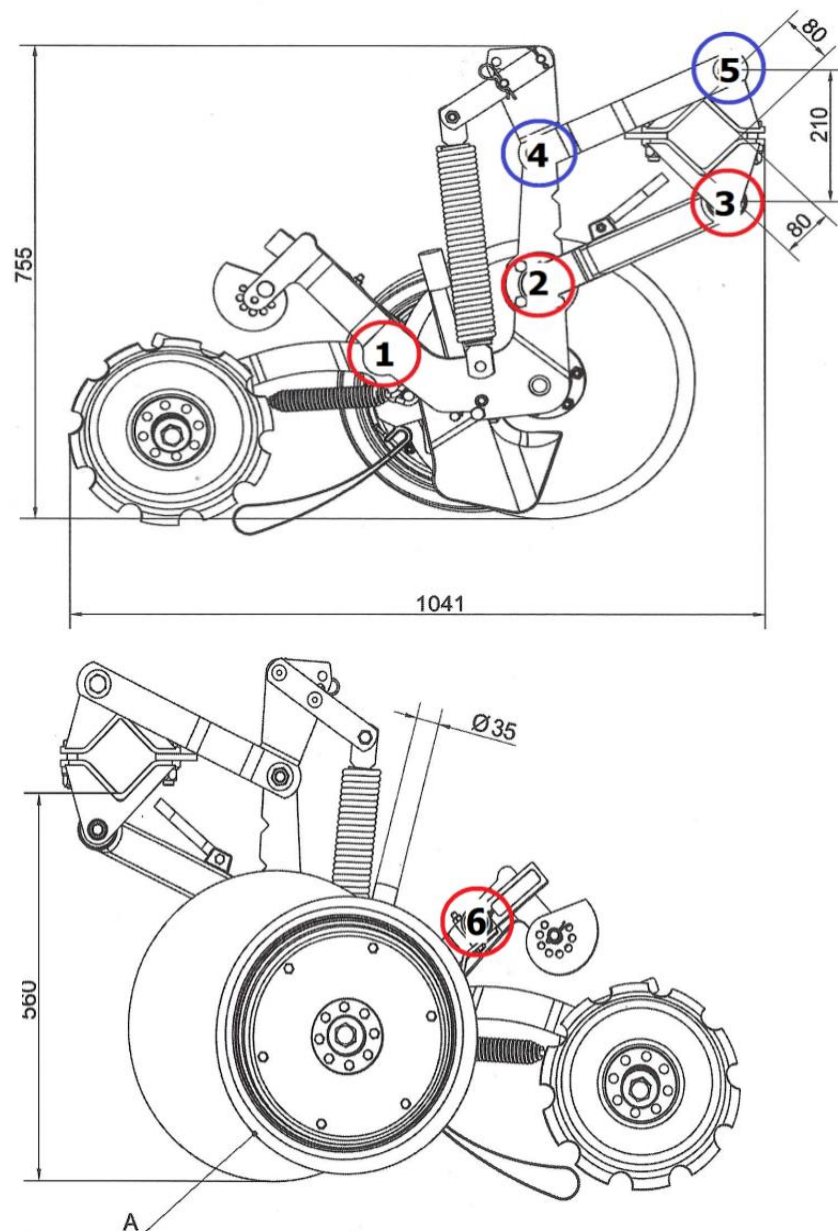


Рис.1.13. Посівна секція комплексу Агро-Союз TurbosemII 19-60 із точками обслуговування

На прикладі згаданого посівного агрегату чітко видно, що під час активного посівного періоду, коли часові рамки виконання технологічної операції обмежені, одна година технічного обслуговування призводить до втрати близько 8 га незасіяної площі. Відомо [16], що згідно з регламентом, агрегат вимушено зупиняється на технічне обслуговування кожні 48 годин роботи, що займає приблизно 3,5 години.

Таким чином, при напрацюванні понад 500 годин, втрата посівної площі може сягати близько 220 га, не враховуючи додаткових економічних

витрат на оплату праці персоналу, що виконує регламентні роботи з технічного обслуговування.

Конструктивні особливості посівного комплексу *Агро-Союз Turbosem II 19-60* та регламент його обслуговування [16] передбачають змащування 240 вузлів кожні 48 годин роботи, а ще 120 вузлів – кожні 72 години.

До факторів, що знижують продуктивність посівних робіт, також належить відсутність синхронізації між графіками технічного обслуговування самого агрегату та трактора, який забезпечує його роботу (рис. 1.14).

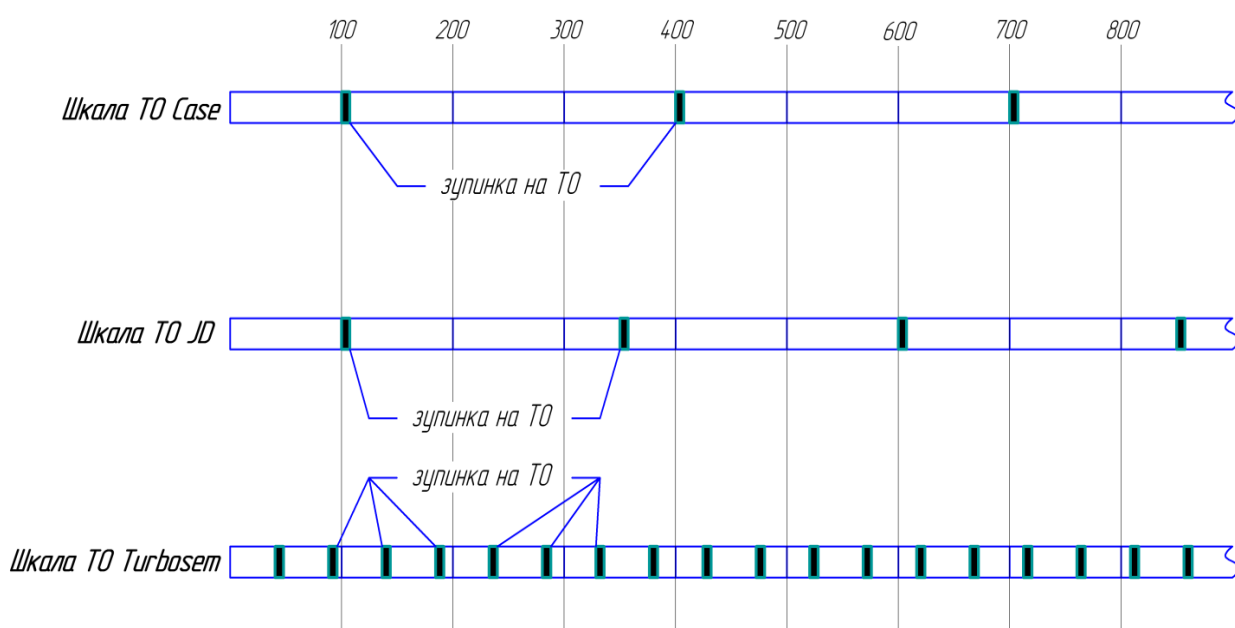


Рис.1.14. Порівняльний графік проведення технічного обслуговування тракторів Case, John Deere та посівного комплексу Агро-Союз Turbosem II 19-60.

Найзручніше виконувати технічне обслуговування рухомих з'єднань агрегату, коли він перебуває в транспортному положенні. Однак, згідно з регламентом, змащування необхідно проводити у робочому положенні, де доступ до вузлів значно ускладнений. Це підвищує трудомісткість обслуговування та ускладнює виконання операцій (рис. 1.15).



Рис. 1.15. Розміщення посівних секцій на рамі комплексу Агро-Союз Turbosem II 19-60 (стрілкою вказано простір для проведення технічного обслуговування рухомих з'єднань переднього ряду сошників).

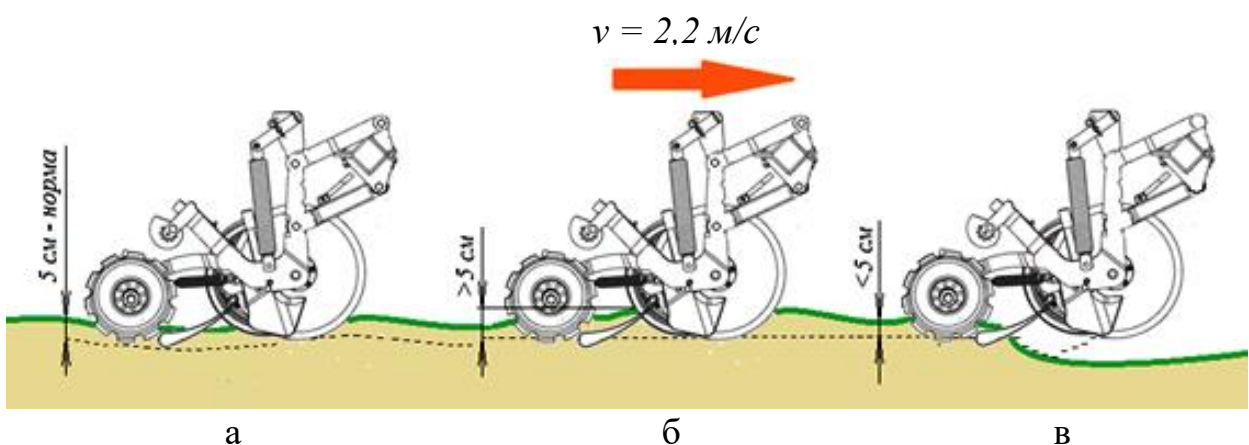


Рис. 1.16. Приклад коректної роботи системи копіювання (а) посівного комплексу Turbosem II 19-60 і некоректної (б і в), у випадку втрати працездатності шарнірних з'єднань.

Заклинювання механізму копіювання рельєфу агрегату спричиняє технологічну відмову, оскільки порушуються агротехнологічні вимоги. У таких випадках насіння може або заглиблюватися надмірно, або залишатися на поверхні ґрунту (рис. 1.16). Проведення відновлювальних робіт у польових умовах неможливе, оскільки вони вимагають використання спеціального обладнання.

Експлуатаційні спостереження показують, що несправності у копіювальних механізмах можуть спричиняти підвищене споживання пального під час виконання сівби. Це відбувається через заклинювання або зниження рухливості окремих елементів, а також надмірний знос, який призводить до виникнення люфтів у зонах кріплення (рис. 1.17). В окремих випадках зазори можуть досягати 4 см у різні боки, що збільшує опір руху та, відповідно, витрати пального.

На (рис. 1.17 а) зображена траєкторія справного механізму копіювання, яка відповідає нормальному робочому стану. Водночас траєкторія механізму із зношеними або несправними секціями демонструє значні відхилення (рис. 1.17 б), що негативно впливає на якість сівби.

Відхилення від регламентованого стану та відсутність належного змащування, що спричиняє часткове підклинювання рухомих ланок механізму копіювання, знижують його оперативність у реагуванні на зміни рельєфу (табл. 1.3). Дослідження показують, що при запізненні реакції механізму на 0,1 с якість сівби погіршується на відрізьку довжиною понад 0,2 м, а при затримці 0,5 с цей показник збільшується до 1,1 м.

Аналіз конструкцій механізмів копіювання рельєфу в сільськогосподарських технічних системах свідчить, що моделі з дисковими сошниками займають провідні позиції. Вони забезпечують стабільне та якісне дотримання агротехнологічних вимог щодо глибини загортання насіння. Однак їх основними недоліками є складна конструкція та короткий інтервал між регламентними технічними обслуговуваннями.

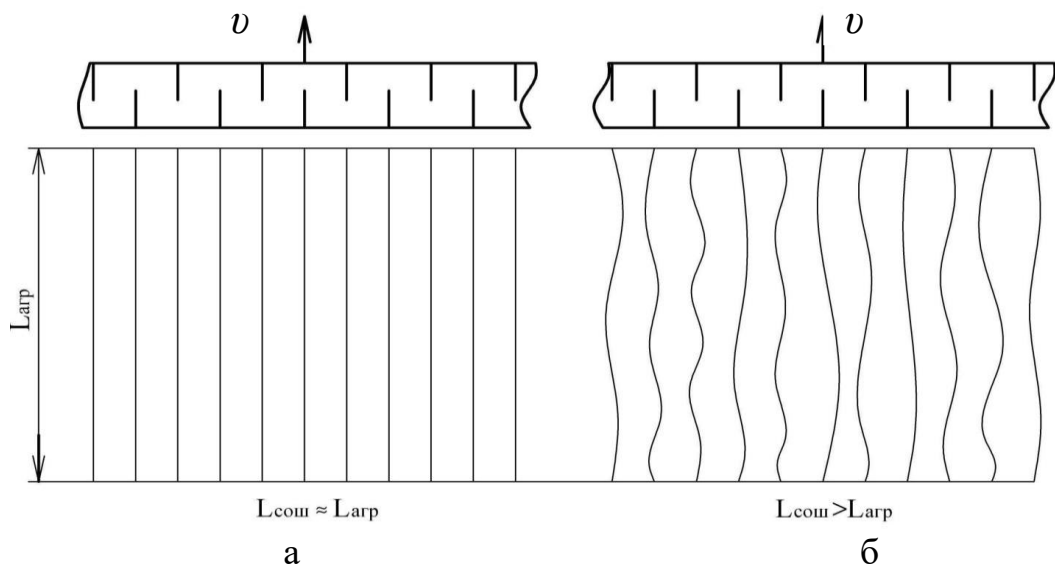


Рис. 1.17. Схема траєкторії руху сошників посівного комплексу під час роботи: а) при справних механізмах копіювання; б) при несправних механізмах копіювання (люфти в рухомих з'єднаннях).

Таблиця 1.3

Тривалість спрацьовування (реагування) паралелограма на зміну рельєфу, с	Шлях повернення сошника у "нормальне положення", м
0,1	0,22
0,15	0,33
0,2	0,44
0,25	0,55
0,3	0,66
0,35	0,77
0,4	0,88
0,45	0,99
0,5	1,1

Встановлено, що трибоспряження механізму копіювання мають найменше напрацювання на відмову серед всіх елементів посівної секції:

- диск сошника – 9...10 тис. га (на 1 сошник – 150...165 га);
- трибоспряження механізму копіювання – 2...2,5 тис. га (на 1 сошник – 35...45 га);
- рухомі спряження прикочуючих коліс – 2,5...3 тис. га (на 1 сошник 45...50 га).

Зносостійкість залежить від режиму експлуатації, хімічного складу і структури, фізико-механічних і триботехнічних характеристик поверхневого шару деталей, спряжених між собою. Таким чином, основними шляхами підвищення довговічності деталей є зменшення тиску на поверхні їх тертя та підбір раціональної структури матеріалу..

1.3. Підхід до забезпечення довговічності компонентів копіювальних механізмів

Забезпечення високої довговічності елементів машин, зокрема рухомих частин посівних агрегатів, можна досягти трьома основними способами: зміною конструктивних параметрів, удосконаленням технологічних рішень та оптимізацією експлуатаційних режимів.

До конструкторських методів підвищення довговічності технічних систем належать оптимізація конструктивних параметрів, застосування передових матеріалів і їх комбінацій, а також ефективне використання змащувальних матеріалів та герметизації вузлів з'єднання. Ці заходи можна реалізувати ще на етапі проектування, що дозволяє забезпечити високу надійність вузлів ще до початку експлуатації.

Другий підхід до підвищення довговічності – технологічні методи, які включають високу точність виготовлення деталей, стабільність фізико-механічних властивостей, поверхневу обробку або нанесення захисних

покриттів для зміцнення або надання необхідних характеристик. Такі технології широко використовуються і в посівних комплексах, особливо для забезпечення зносостійкості їх рухомих з'єднань, що підтверджують численні дослідження [17].

Третій підхід – експлуатаційний метод, який передбачає попередню обкатку або контрольоване навантаження нових або відновлених елементів, дотримання регламентів технічного обслуговування і правил зберігання, а також правильну експлуатацію технічних систем.

Особливо важливим фактором у збереженні довговічності елементів копіювального механізму є суворе дотримання регламентів технічного обслуговування. Комплексний підхід до керування ресурсом динамічних з'єднань копіювального механізму посівного агрегату передбачає одночасне вдосконалення конструктивних рішень та технологічних методів, спрямованих на зменшення зносу. Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив негативних експлуатаційних факторів.

Умови роботи сільськогосподарської техніки є досить складними: всі рухомі елементи та робочі органи функціонують в середовищі підвищеного абразивного впливу, нерідко в умовах недостатнього змащування або його повної відсутності. Особливо це відчутно у трибоспряженнях, де часто спостерігається сухе тертя, що значно прискорює зношування вузлів і деталей.

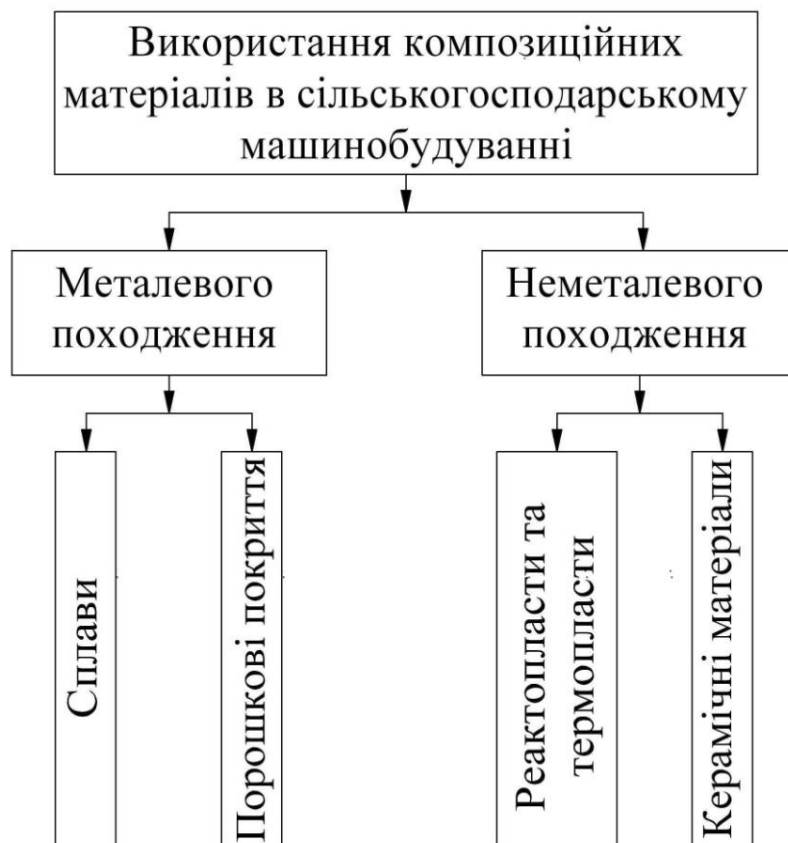


Рис. 1.18. Використання композиційних матеріалів в сільськогосподарському машинобудуванні

Переваги використання у трибоспряженнях сільськогосподарських машин полімерно-композитних матеріалів (термо- та реактопластів) у порівнянні з традиційними матеріалами (сталями, сплавами та матеріалами на їх основі) є:

- відсутність обслуговування;
- виключення ефекту «клин», завдяки особливим трибологічним і міцнісним властивостями матеріалу;
- ефект перенесення;
- мінімальний знос металевих суміжних деталей трибоспряження.

Згідно з літературними джерелами [18], одним із перспективних напрямів підвищення довговічності елементів сільськогосподарської техніки, зокрема в зонах динамічних спряжень, є застосування полімерно-композитних матеріалів (ПКМ). Дослідження цих матеріалів, спрямовані на вивчення їхнього зношування, процесів старіння полімерів та впливу

термообробки, дозволили оптимізувати їх фізико-механічні та хімічні властивості. Одним із способів підвищення надійності рухомих з'єднань у конструкціях паралелограмних копіювальних механізмів посівних агрегатів є використання ПКМ у спряженнях.

Сучасні тенденції в машинобудуванні орієнтовані на досягнення оптимального балансу між продуктивністю, надійністю та економічною ефективністю сільськогосподарської техніки. Використання передових композитних матеріалів дозволяє одночасно підвищити зносостійкість вузлів та забезпечити економічні переваги. Проте слід враховувати, що виробники аграрної техніки залежать від постачальників полімерних матеріалів, що впливає на стабільність їх виробництва. Ці фактори формують комплексний підхід до підвищення якості продукції, технічного рівня обладнання та економічної стійкості виробництва.

На сьогодні застосування полімерних матеріалів у сільськогосподарській техніці лише набирає обертів. Не всі їхні фізичні та хімічні властивості вивчені на достатньому рівні. Аналіз характеристик полімерно-композитних матеріалів дозволяє припустити, що найбільш перспективними для використання в трибоспряженнях сільськогосподарських машин, зокрема в посівних агрегатах, є полімери поліамідної групи.

Оскільки основними показниками, за якими оцінюють працездатність ПКМ, за умови забезпечення міцності, є тиск p і швидкість ковзання v , то фактор pv – добуток цих показників – характеризує нормальну роботу матеріалу без змашування в динамічних умовах експлуатації. Обґрунтування міцнісних характеристик та параметрів фактору pv для полімерно-композитних матеріалів у рухомих з'єднаннях паралелограмного механізму копіювання потребує розгляду його силової картини при статичному і динамічному навантаженнях.

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КОПІЮВАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ПОСІВНОГО КОМПЛЕКСУ

2.1. Дослідження силових взаємодій у рухомих з'єднаннях копіювального механізму при впливі навантажень статичного характеру

Паралелограмний копіювальний механізм посівного агрегату, схема розподілу силових навантажень якого зображена на рис. 2.1, складається з шести основних елементів.

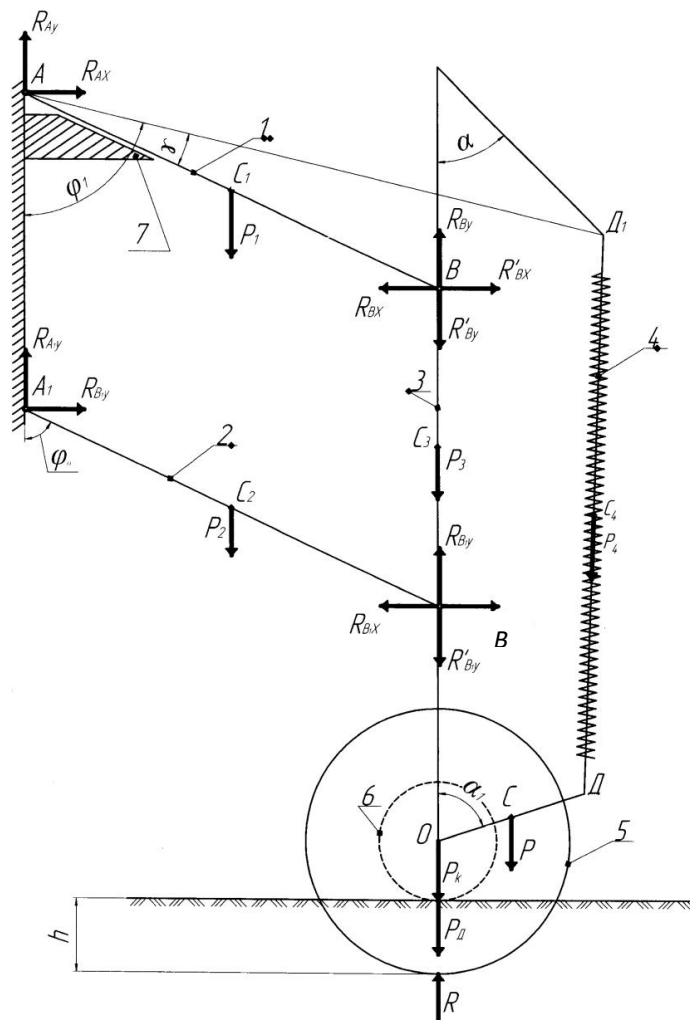


Рис. 2.1. Система сил паралелограмного механізму дискового сошника
1 – верхній важіль, 2 – нижній важіль, 3 – стійка, 4 – пружина, 5 – диск,
6 – опорне колесо, 7 – корпусний упор.

До рами (поперечної балки) посівного комплексу шарнірно приєднуються верхній 1 і нижній 2 важілі, у яких ділянки АВ і А₁В₁, при роботі механізму залишаються паралельними між собою. Вони з'єднані шарнірною стійкою 3, яка крім того пружиною 4 з'єднується з правим краєм важеля 1. В транспортному положенні паралелограмний механізм підтримується корпусним упором 7, який забезпечує початкову конфігурацію механізму. Відхилення від вертикалі важеля 2, кут φ₀, складає 65°. В робочому положенні диск 5 заглиблюється в ґрунт, а його максимальне переміщення обмежується опорним колесом 6. Зазначимо, що пружина 4 в транспортному положенні не розтягнута.

Під впливом сили R , яка роз'єднує стрижень важеля та упор (рис. 2.1, позиції 1 і 7 відповідно) та виникає на початку робочого циклу механізму копіювання, основне навантаження припадатиме на рухоме шарнірне з'єднання з мінімальною інтенсивністю.

Сили $R_{AX}, R_{AY}, R_{A_1X_1}, R_{A_1Y_1}, R_{B_1X_1}, R_{B_1Y_1}, R_{BX}, R_{BY}$, наведені у точках з'єднання елементів механізму (відповідно до рис. 2.1), слід розглядати як реакції опор, що виникають у циліндричних шарнірах. Вага окремих елементів механізму копіювання позначена відповідними символами $P_1, P_2, P_3, P_4, P_k, P_D$.

Ділянка OD , яка жорстко зв'язана зі стійкою і має відхилення від вертикальної осі (відповідно до рис. 2.1), піддається дії сили P , що відповідає її власній вазі.

Рівняння рівноваги, складені для кожного окремого елемента, дозволяють визначити значення реакцій у механізмі. Для важеля (позиція 1 на рис. 2.1) система рівноваги описується наступною сукупністю сил:

$$\left\{ R_{AX}, R_{AY}, R_{BX}, R_{BY}, \frac{P_4}{2}, P_1 \right\}$$

У такому випадку рівняння рівноваги набуде наступного вигляду:

$$R_{AX} + R_{BX} = 0; \quad (2.1)$$

$$R_{AY} + R_{BY} - \frac{1}{2}P_4 - P_1 = 0; \quad (2.2)$$

$$R_{BY} \cdot AB \sin \varphi_0 - R_{BX} \cdot AB \cos \varphi_0 - P_1 \cdot AC_1 \sin \varphi_0 - \frac{1}{2}P_4 \cdot AD_1 \sin \varphi_1 = 0 \quad (2.3)$$

Аналогічно, під впливом системи сил $\{ R_{A_1X_1}, R_{A_1Y_1}, R_{B_1X}, R_{B_1Y}, P_2 \}$ для стрижня рівняння рівноваги набуває наступного вигляду:

:

$$-R_{A_1X_1} - R_{B_1X} = 0; \quad (2.4)$$

$$R_{A_1Y} + R_{B_1Y} - P_2 = 0; \quad (2.5)$$

$$R_{B_1Y} \cdot A_1B_1 \sin \varphi_0 - R_{B_1X} \cdot A_1B_1 \cos \varphi_0 - P_2 \cdot A_1C_1 \sin \varphi_0 = 0. \quad (2.6)$$

Система сил $\{ R'_{BX}; R'_{AY}; R'_{B_1X}; R'_{B_1Y}; P_3; P_k; P_\sigma; P; \frac{P_4}{2} \}$, що діє на диск і опорне колесо, дозволяє визначити значення відповідних реакцій.

:

$$R'_{BX} + R'_{B_1X} = 0; \quad (2.7)$$

$$-R'_{BY} - R'_{B_1Y} - P - P_k - P_\sigma - P - \frac{P_4}{2} + R = 0; \quad (2.8)$$

$$-R'_{BX} \cdot BB_1 - \frac{1}{2}P_4 \cdot OD \cdot \sin \alpha_1 - P \frac{OD}{2} \cdot \sin \alpha_1 = 0. \quad (2.9)$$

Відповідно до третього закону Ньютона, сили R_{BX} і R'_{BX} ; R_{BY} і R'_{BY} ; R_{B_1X} і R'_{B_1X} ; R_{B_1Y} і R'_{B_1Y} , що діють у вузлах B та B_1 , мають попарно однакові значення, але спрямовані в протилежні боки. Це ж стосується і сил у вузлах A та A_1 . Таке припущення дає змогу визначити силу опору ґрунту, а також усі вісім невідомих складових, що впливають на точки A , B , A_1 , B_1 , за умови, що відомі лінійні параметри системи, а також її кутові та вагові характеристики.

Однак необхідно враховувати, що розрахункові значення, отримані за допомогою виразів (2.1)–(2.9), є номінальними, тоді як реальні експлуатаційні навантаження на елементи копіювального механізму можуть значно перевищувати їх.

Максимальне навантаження на диск виникає у разі його зіткнення з перешкодою, що сприяє його зміщенню вгору на поверхню поля. Такі екстремальні впливи можуть спричинити деформацію паралелограмного механізму, що виражається у збільшенні кута γ та надмірному розтягуванні пружини (поз. 4 на рис. 2.1).

Максимальне значення кута φ_{\max} , спричинене дією екстремальних навантажень, можна визначити за формулою:

$$A_1B_1 \cos \varphi_0 - A_1B_1 \cos \varphi_{\max} = h. \quad (2.10)$$

Зважаючи на те, що значення кута γ , який характеризує нахил відповідної ділянки, залишається незмінним, його визначення можна подати у такій формі::

$$\varphi_{\max} = \varphi_0 + \gamma.$$

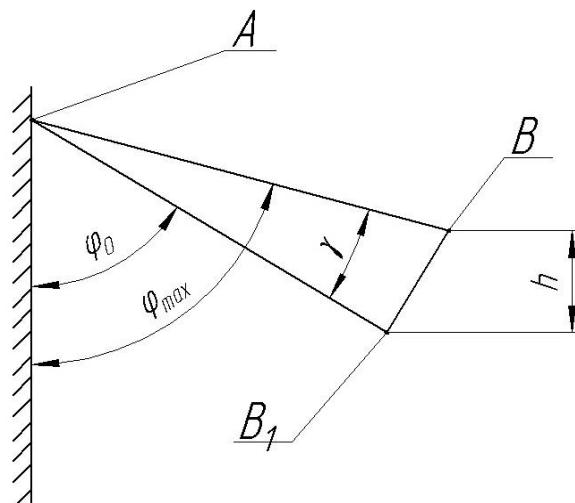


Рис. 2.2. Геометрична інтерпретація кута максимального відхилення φ_{\max} деформованого паралелограму

Трансформуємо рівняння (2.2) і представимо його у такій формі:

$$R_{AY} + R_{BY} - \frac{1}{2}P_4 - P_1 - C \cdot \Delta = 0 \quad (2.11)$$

За такою ж аналогією (2.3) набуває вигляду:

$$R_{BY} \cdot AB \sin \varphi_{\max} - R_{BX} \cdot AB \cos \varphi_{\max} - P_1 \cdot AC_1 \sin \varphi_{\max} - \frac{1}{2} P_4 \cdot AD_1 \sin \alpha_1 - C \cdot \Delta \cdot AD_1 \sin \varphi_{\max} = 0 \quad (2.12)$$

Тоді рівняння (2.8) прийме вигляд:

$$-R'_{BY} - R'_{BY} - P_3 - P_k - P_\delta - P - \frac{P_4}{2} + R + C \cdot \Delta = 0, \quad (2.13)$$

де C – коефіцієнт жорсткості пружини;

Δ – видовження пружини в зв'язку з деформацією паралелограма ABV_1A_1 , м.

А залежність (2.9) в такому разі трансформується у наступний вигляд:

$$-R'_{BX} \cdot BV_1 - \frac{1}{2} P_4 \cdot OD \sin \alpha_1 - P \frac{OD}{2} \sin \alpha_1 + C \cdot \Delta \cdot OD \sin \alpha_1 = 0. \quad (2.14)$$

Різниця координат положення елементів, позначених як D_1 і D , що виникає в процесі експлуатації, визначатиме видовження $\Delta = h_1 - h_0$, яке можна подати у такій формі:

$$h_1 = AD_1 \cos(\varphi_0 + \gamma) - AD_1 \cos(\varphi_{\max} + \gamma). \quad (2.15)$$

Розрахунок експлуатаційних навантажень у зонах динамічних з'єднань елементів копіювального механізму базувався на геометричних та масових характеристиках посівного агрегату *Агро-Союз Turbosem II 19-60*.

Схематичне моделювання паралелограмного механізму ґрунтувалося на таких вихідних даних:

AB = 310 мм;	BB ₁ = 215 мм;	ВД ₂ = 150 мм;
Д ₂ Д ₁ = 160 мм;	В ₁ О = 160 мм;	ОД = 100 мм;
АС ₁ = 300 мм;	h = 100 мм.	$\varphi_0 = 65^\circ$;
$\alpha = 45^\circ$;	$\alpha_1 = 72^\circ$;	$\gamma = 20^\circ$.

В розрахунок беруть участь значення мас, що відповідають деталям:

m ₁ = 15 кг;	m ₂ = 7 кг;	m ₃ = 9 кг;	m ₄ = 5 кг;
m = 3 кг;	m _к = 9 кг;	m _д = 5 кг.	

Коефіцієнт жорсткості пружини: $C = 162$ Н/см.

Розрахунок, проведений за наведеними вище рівняннями (2.1–2.9) та (2.11–2.14), з використанням поданих вихідних даних, дозволив отримати такі результати:

$$R = 1209,48H; R_A = 876H; R_B = 2377,3H; R_{A1} = 678,89H; R_{B1} = 688,98H.$$

Отримані розрахункові значення дають змогу оцінити реакції, що виникають у зонах динамічних з'єднань елементів паралелограмного копіювального механізму посівного агрегату *Turbosem II 19-60* під впливом екстремальних навантажень, зумовлених потраплянням дискового сошника на перешкоду.

2.2 Підвищення ресурсу елементів копіювального механізму шляхом застосування полімерних матеріалів

Обґрунтоване застосування передових матеріалів, зокрема полімерів різного складу, таких як поліарілат, фенол, фторопласт тощо, є одним із найефективніших способів підвищення довговічності машинних вузлів, особливо у місцях їх рухомих з'єднань.

Наукове підґрунтя використання полімерних композитів у виробництві сільськогосподарської техніки та обладнання широко висвітлене у відкритих джерелах [19, 20]. Дослідження підтверджують ефективність застосування таких матеріалів та їхній позитивний вплив на підвищення надійності й довговічності машин. Яскравим прикладом є роботи, спрямовані на покращення ресурсу робочих органів комбайнів як вітчизняного, так і закордонного виробництва.

Для збільшення терміну служби копіювальних механізмів посівних агрегатів необхідно наділити трибосполучення в рухомих з'єднаннях такими властивостями, які значно продовжать періоди між технічними обслуговуваннями або, в ідеалі, зроблять їх непотрібними. Цей ефект може бути досягнутий шляхом використання композитних полімерів.

Оцінка здатності виробів із полімерних композитних матеріалів виконувати покладені на них функції проводилася на основі наступної залежності:

$$p = \frac{R_{max}}{l \cdot d}, \quad (2.16)$$

де p – питома навантаження, Н/м²;

R_{max} – навантаження на шарнірне з'єднання, Н

d – діаметр деталі, м;

l – довжина (висота) деталі, м.

Оцінимо питома навантаження полімерного з'єднання елемента B_1 , використовуючи залежність (2.16). Для цього в розрахунках застосуємо вихідні дані, що відповідають зазначеному шарніру $d = 0,03\text{ м}$, $l = 0,03\text{ м}$, $R_{B_1}^{max} = 2700\text{ Н}$. У результаті обчислень отримуємо наступні значення:

$$p = 3\text{ МПа}.$$

Зважаючи на конструктивні параметри досліджуваного елемента та враховуючи, що кутова швидкість не повинна перевищувати 7,15 рад/с, визначимо лінійну швидкість ковзання:

$$v = \omega \cdot r = 0,107 \text{ м / с}$$

У ході розрахунків визначено, що значення рv-фактора для шарніра B_1 становить 0,3 МПа·м/с. Відомо, що поліамід марки УПА-6-30 здатний ефективно працювати при навантаженнях, що відповідають рv-фактору до 2 МПа·м/с. Таким чином, використане рухоме з'єднання у паралелограмному копіювальному механізмі має шестикратний запас міцності, що значно перевищує необхідні експлуатаційні вимоги.

Дані, представлені в таблиці 2.1, наочно демонструють перевагу полімерних матеріалів у порівнянні зі сталевими. Завдяки оптимальному поєднанню властивостей, полімери забезпечують ефективніший баланс між зносостійкістю та коефіцієнтом тертя. Натомість сталеві компоненти, попри

високий запас міцності, поступаються через збільшений рівень тертя, що негативно позначається на їх довговічності.

Термін служби копіювального механізму посівного агрегату значною мірою визначається ресурсом його елементів у зонах динамічних з'єднань. У разі несвоєчасного технічного обслуговування або недотримання регламенту, зокрема через зменшення або повну відсутність мастильного матеріалу в підшипниках ковзання, коефіцієнт тертя може зрости у 4 рази. Це значно прискорює процес зношування і зрештою призводить до відмови механізму.

Окрім нестачі мастила, на швидкість зносу впливає і складність експлуатаційних умов – велика кількість абразивних частинок у робочому середовищі додатково прискорює деградацію з'єднань. У таких випадках технологічна відмова може настати навіть раніше, ніж механічна, оскільки втрата рухливості копіювального механізму робить неможливим дотримання агротехнологічних вимог і призводить до збоїв у посівному процесі.

Таблиця 2.1

Основні властивості деяких композитів та сталі 20

Параметр	Назва матеріалу і значення		
	СКММ-40Н	СКММ-30М	Сталь 20
Щільність, г / см ³	1,2	1,14	7,8
Ударна в'язкість, кДж/м ²	35	39	140
Межа міцності при стисканні, МПа	166	128-148	410
Коефіцієнт тертя:			
- тертя без змащування	0,16...0,24	0,18-0,26	0,75-0,8
- при змащуванні водою	0,02...0,03	0,06...0,08	-
- при змащуванні оливою	0,01	0,018...0,03	0,03-0,05
Здатність до рециклінгу (повторної переробки)	Здатні		Не здатна

Виходячи з наведеного, теоретичні дослідження підтверджують, що збільшення довговічності рухомих з'єднань можливо шляхом створення системи з високою точністю копіювання рельєфу ґрунту. Реалізація такої системи передбачає розробку нових конструкційних матеріалів, які знижують сили тертя та підвищують стійкість до абразивного зношування у вузлах паралелограмного механізму копіювання.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що продовження терміну служби копіювального механізму посівного агрегату можна досягти за рахунок покращення точності процесу копіювання поверхні поля. Це можливо завдяки застосуванню полімерних композитних матеріалів, які зменшують тертя в трибосполученнях паралелограмного механізму, тим самим сприяючи підвищенню його ефективності та надійності.

РОЗДІЛ 3.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ З'ЄДНУВАЛЬНИХ ВУЗЛІВ КОПІЮВАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ПОСІВНОГО АГРЕГАТУ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Результати експлуатаційних випробувань паралелограмного копіювального механізму посівного агрегату *Turbosem II 19-60* серійної моделі були отримані в умовах реального польового використання. Після напрацювання 1050 гектарів було здійснено контрольні вимірювання елементів вузлів рухомих з'єднань, які, згідно з технічним регламентом заводу-виробника, виготовляються зі сталі.

Під час візуального огляду були виявлені характерні дефекти, що виникли в процесі експлуатації, зокрема значне зношування через вплив абразивного середовища, наявність задирів і ознаки корозії (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Загальний вигляд серійних сталевих деталей рухомих з'єднань посівного комплексу Агро-Союз *Turbosem II 19-60*.

Значення шорсткості робочих поверхонь варіювалися в межах від 0,22 мкм до 0,92 мкм. Такі показники свідчать про роботу механізму в умовах недостатнього змащування або повної його відсутності, тобто в умовах мастильного голоду чи навіть «сухого» тертя.

Результати дослідження показали, що знос деталей у зоні рухомих з'єднань досягав майже 1,5 мм, а поперечний люфт секції висіву становив від 60 до 90 мм. Такі показники, згідно з технічними вимогами заводу-виробника, потребують обов'язкової заміни компонентів.

У процесі відновлювальних робіт перед початком посівного сезону на посівний агрегат *Turbosem II 19-60* виробництва ПрАТ «Агро-Союз» були встановлені оновлені вузли з'єднання рухомих елементів копіювального механізму, виготовлені з полімерно-композитних матеріалів.

Посівний комплекс з модернізованими зразками агрегувався з трактором *Case MX310-Magnum* (рис. 3.2). Натурні випробування проходили в реальних умовах експлуатації з квітня по жовтень за прямою технологією сівби у необроблений ґрунт.



Рис. 3.2. Прямий посів пшениці озимої модернізованим посівним комплексом. Попередник – соняшник

Під час тестування було висіяно широкий спектр культур, зокрема ячмінь, кілька видів сидератів — конюшину, гірчицю, люцерну, а також соняшник. Крім того, виконувалась сівба озимих культур: пшениці, ячменю та ріпаку.

Розташування елементів копіювального механізму, що брали участь у випробуваннях, представлено на рис. 3.3.

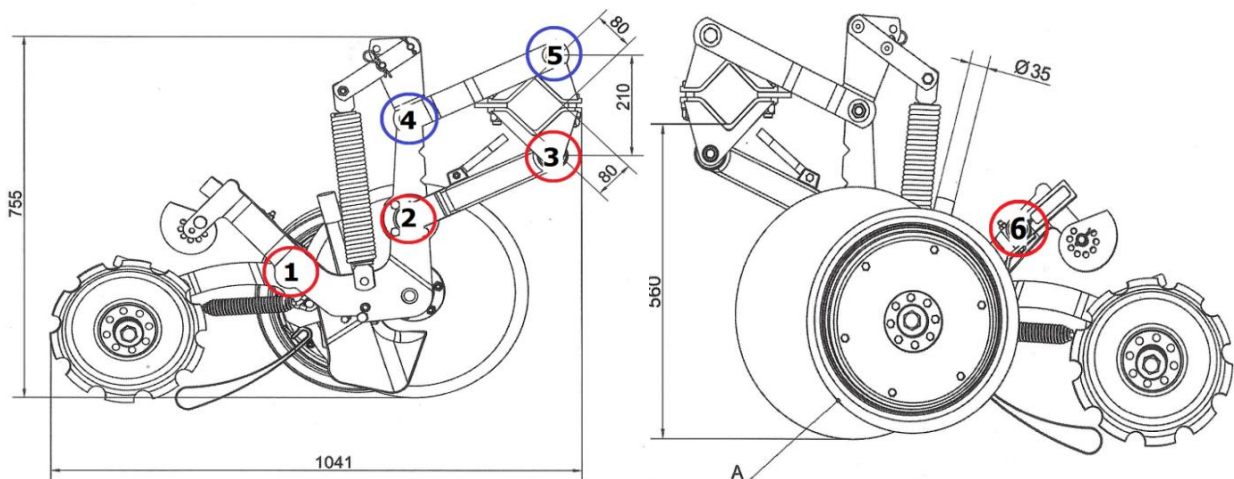


Рис. 3.3. Точки модернізації рухомих з'єднань секції посівного комплексу
1 – важіль прикочуючого колеса; 2-5 – шарніри паралелограмного механізму;
6 – важіль опорного колеса

За підсумками проведених випробувань, посівний агрегат, оснащений копіювальним механізмом із оновленими вузлами з'єднання, продемонстрував загальний наробіток близько 9200 га (рис. 3.4). З урахуванням конструктивних особливостей агрегату, на кожен сошник припало приблизно 153 га роботи.

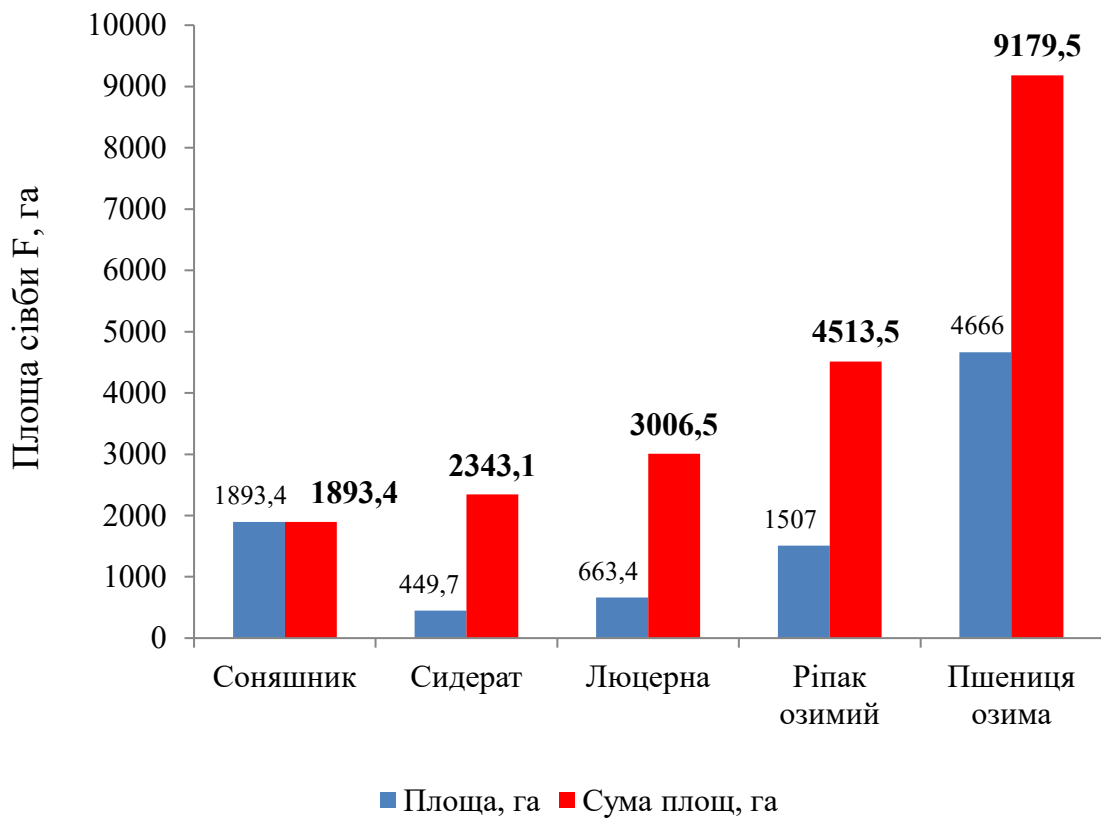


Рис. 3.4. Динаміка наробітку посівного комплексу з модернізованим механізмом копіювання за даними випробувань

У ході натурних випробувань було досліджено 12 зразків, виготовлених із полімерно-композитного матеріалу. Протягом усього періоду експлуатації ці елементи не потребували технічного обслуговування, що стало суттєвою перевагою (табл. 3.1) у порівнянні з серійними металевими деталями, які вимагають обслуговування кожні 48 годин роботи, зупиняючи посівний процес на термін до 3,5 годин.

Відчутна економія часу на виконання регламентних робіт має практичне вираження у площі обробки: протягом 1750 годин напрацювання посівного агрегату модернізовані з'єднання дозволили ефективно використати додаткові 380 годин, за які було засіяно ще 1740 гектарів.

З позиції ремонтпридатності були визначені часові затрати на заміну елементів копіювального механізму, що підлягали дослідженню. З'ясувалося, що заміна деталей із полімерно-композитного матеріалу займає 26 хвилин, тоді як на встановлення стандартних серійних зразків потрібно 59 хвилин.

Таблиця 3.1

Порівняння накопичених (статистичних) даних по наробітку і
трудомісткості ТО посівних комплексів

Напрацювання, год.	Напрацювання серійного агрегату, га	Реальний напрацювання модернізованого агрегату, га	Різниця, га	Економія трудозатрат, люд.-год.
Початок випробувань, квітень 2023 р.				
24	120	120	0	-
48	240	240	0	3
72	345	360	15	-
96	465	480	15	6
120	570	600	30	-
144	690	720	30	9
168	795	840	45	-
-//-	-//-	-//-	-//-	-//-
408	1920	2040	120	-
432	2040	2160	120	27
456	2145	2280	135	-
480	2265	2400	135	30
504	2370	2520	150	-
528	2490	2640	150	33
-//-	-//-	-//-	-//-	-//-
Остаточні дані, зафіксовані у жовтні 2023 р.				
1752,1	15785	17521	1736	381,9

Однак економія часу — не єдина перевага модернізованих вузлів. Завдяки тому, що для заміни композитних деталей не потрібно спеціалізованого обладнання, ці роботи можна виконувати безпосередньо в польових умовах. У випадку з серійними металевими елементами потрібні спеціальні інструменти, що тягне за собою додаткові витрати часу і ресурсів на повернення техніки до ремонтної майстерні.

Також варто відзначити, що використання полімерних деталей позитивно впливає на стан металевої частини трибосполучення: вона залишається практично неушкодженою, а рівень її зношування знаходиться в межах похибки вимірювального обладнання (рис. 3.5).



а

б

Рис. 3.5. Елементи рухомих з'єднань розробленої системи копіювання посівного комплексу Агро-Союз Turbosem II 19-60 (напрацювання 9179,5 га)
а – деталі нижнього паралелограма; б – деталі шарніра опорного колеса

Зовнішній візуальний огляд важеля копіювального механізму, який експлуатувався у поєднанні з деталями з полімерно-композитного матеріалу, не виявив жодних пошкоджень.

З метою компенсації можливих геометричних відхилень, що виникають у процесі виробництва, окремі кінчні елементи трибосполучення мають спеціальні технологічні прорізи (рис. 3.6).



а



б



В



Г

Рис. 3.6. Загальний вигляд деталей, наданих на випробування
а – деталі нижнього важіля; б – деталі верхнього важіля; в – конічні втулки
нижнього важіля; г – втулки розрізні

Дослідним шляхом підтверджено, що компоненти копіювального механізму, виготовлені з полімеру УПА-6-30, не спричиняють жодних негативних впливів під час виконання посівних технологічних операцій. Усі агротехнологічні вимоги були дотримані з високим рівнем якості.

Крім того, таке інженерне рішення дозволило зменшити час, витрачений на регламентне обслуговування, на 25% у порівнянні зі стандартним серійним виконанням.

4. АНАЛІЗ ТРИВАЛОСТІ СЛУЖБИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОНЕНТІВ КОШУВАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ

4.1 Вивчення рівня зносу полімерних деталей

Результати вимірювань ступеня зношування, представлені в таблиці 4.1, відповідають загальному обсягу роботи посівного агрегату на площі 17 200 гектарів.

Таблиця 4.1

Результати мікрометражу експериментальних деталей

№ деталі	Розмір, мм	№ деталі	Розмір, мм	№ деталі	Розмір, мм	№ деталі	Розмір, мм
1	32,63	17	32,78	33	32,46	49	32,65
2	32,65	18	32,71	34	32,34	50	32,49
3	32,85	19	32,78	35	32,63	51	32,80
4	32,67	20	32,48	36	32,49	52	32,64
5	32,38	21	32,48	37	32,77	53	32,36
6	32,67	22	32,45	38	32,85	54	32,49
7	32,93	23	32,61	39	32,78	55	32,63
8	32,27	24	32,87	40	32,54	56	32,56
9	32,84	25	32,64	41	33,02	57	32,54
10	32,37	26	32,92	42	32,85	58	32,37
11	32,33	27	32,47	43	32,43	59	32,33
12	32,97	28	32,39	44	32,46	60	32,38
13	32,33	29	32,52	45	32,93	61	32,41
14	32,37	30	32,46	46	32,76	62	32,69
15	32,38	31	32,33	47	32,53	63	32,32
16	32,53	32	32,41	48	32,55	64	32,51

На основі аналізу експериментальних даних, середнє значення зносу становить 1,77 мм, при тому що початковий розмір нової деталі в зоні зносу дорівнює 34,35 мм.

У такому разі значення середньоквадратичного відхилення становить:

$$\sigma = 0,194$$

А коефіцієнт варіації в такому випадку дорівнює:

$$v = \frac{0,194}{1,77} = 0,109 \leq 0,3$$

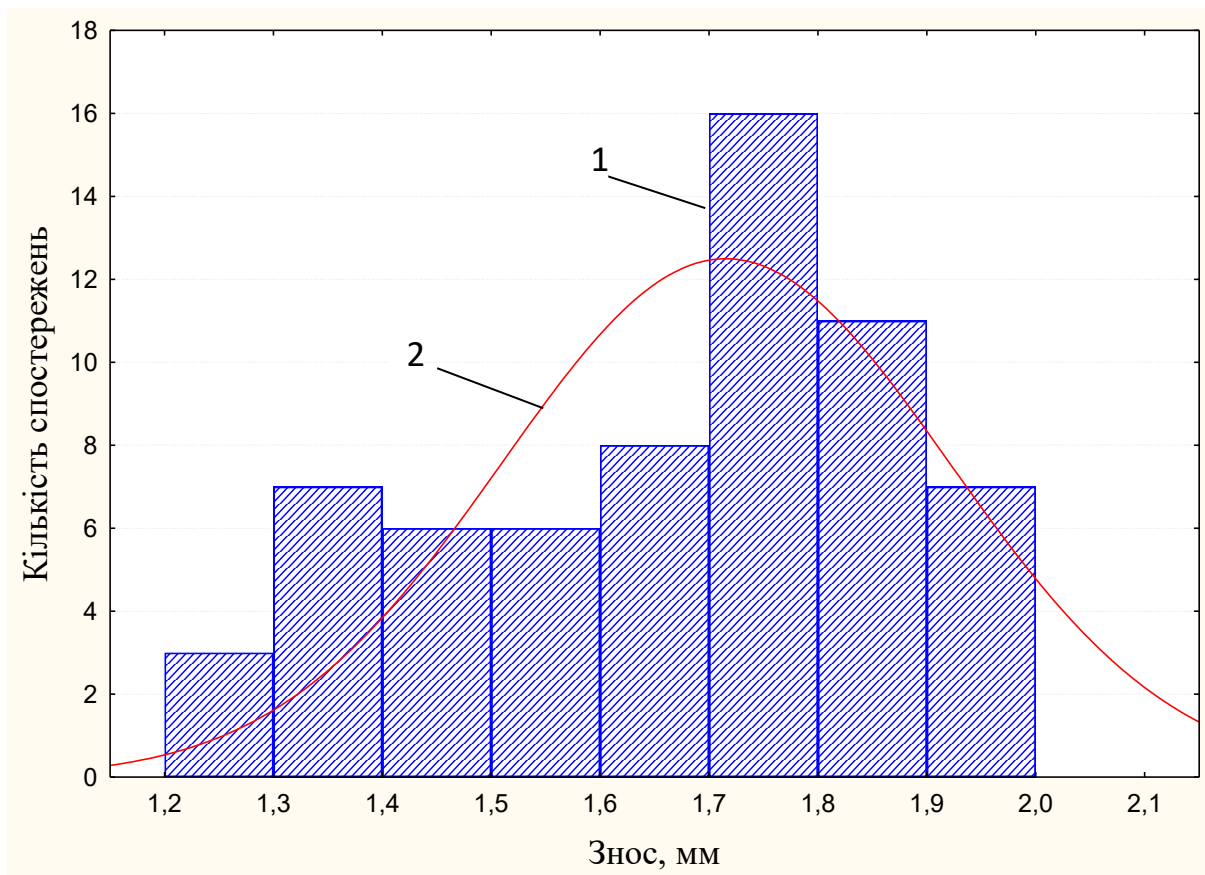


Рис. 4.1. Розподіл розмірів експериментальних деталей, виготовлених з ПКМ, в процесі зношування

1 – гістограма розмірів деталей, 2 – теоретична крива розподілу

Отже, можна зробити висновок, що нормальний закон розподілу досить точно відображає отримані експериментальні дані. Це підтверджується

результатами перевірки за критерієм Колмогорова, а також видно з графіка розподілу величини зносу полімерних деталей, наведеного на рисунку 4.1.

4.2. Оцінювання ймовірності безвідмовної роботи елементів удосконаленої конструкції

Оцінювання показників надійності за підсумками скорочених випробувань здійснювалося відповідно до стандартизованих методик [21, 22].

У ході випробувань механізму копіювання посівного агрегату з удосконаленими вузлами у зонах динамічних з'єднань було отримано вибірку, цензуровану за показником зносу. Результати цих досліджень наведені в таблиці 4.2.

Розмах вибірки дорівнює:

$$r = 33,1 - 32,3 = 0,8 \text{ (мм)}$$

У випадку, коли кількість інтервалів дорівнює 8:

$$h = \frac{0,8}{8} = 0,1 \text{ (мм)}$$

Отже межі інтервалів приймають значення:

$$\begin{aligned} x_{\min} &= 32,3 \text{ мм}; & x_1 &= 32,3 + 0,1 = 32,4 \text{ (мм)}; \\ & & x_2 &= 32,4 + 0,1 = 32,5 \text{ (мм)}; \\ & & x_3 &= 32,5 + 0,1 = 32,6 \text{ (мм)}; \\ & & & \dots \dots \dots \\ & & x_8 &= 32,9 + 0,1 = 33,0 \text{ (мм)}. \end{aligned}$$

Відповідно до стандартизованої методики визначаємо кількість зупинок випробувань n_{pi} , що сталися в межах кожного інтервалу, та фіксуємо ці дані в таблиці 4.2. Далі розраховуємо частість ω_i , тобто ймовірність того, що зупинка випробування припаде на певний інтервал. Зокрема, для першого інтервалу значення ω_1 буде дорівнювати:

$$\omega_1 = 7 / 64 = 0,1094,$$

- для наступного інтервалу:

$$\omega_2 = 11 / 57 = 0,1930$$

Значення частотей для наступних інтервалів розраховуються аналогічним чином, а отримані результати заносяться до таблиці 4.3.

Таблиця 4.2

Оцінка імовірності безвідмовної роботи за емпіричними даними

№ інтервалу	Межі інтервалу, мм	$n_{\text{п}}$	ω_i	θ_i	n_i	P_i	$P_{\text{ін}}$
1	32,3...32,4	7	0,1094	0,5145	60,3987	0,8841	0,7516
2	32,4...32,5	11	0,1930	0,5268	51,2055	0,6942	0,5616
3	32,5...32,6	15	0,3261	0,5492	37,7624	0,4184	0,2859
4	32,6...32,7	8	0,2581	0,5372	26,7021	0,2931	0,1605
5	32,7...32,8	6	0,2609	0,5377	19,7737	0,2041	0,0716
6	32,8...32,9	7	0,4118	0,5659	13,0384	0,0945	0
7	32,9...33,0	6	0,6000	0,6126	6,3246	0,0049	0
8	33,0...33,1	4	-	-	-	-	-

Виконуємо розрахунок параметра, що характеризує частку напрацювання до моменту припинення спостережень, яку враховують для кожного інтервалу під час оцінювання показників надійності.

- для першого інтервалу:

$$\theta_1 = \frac{1 - \sqrt{1 - 0,1094}}{0,1094} = 0,5145;$$

- для другого інтервалу:

$$\theta_2 = \frac{1 - \sqrt{1 - 0,1930}}{0,1930} = 0,5268.$$

Розрахунки для наступних інтервалів проводимо за аналогією, а отримані результати наводимо в таблиці 5.3. Умовну кількість елементів, які проходили випробування в кожному інтервалі, визначаємо таким чином:

- для першого інтервалу:

$$n_1 = 64 - 0,5145 \cdot 7 = 60,3987;$$

- для другого інтервалу:

$$n_2 = 64 - 7 - 0,5268 \cdot 11 = 51,2055,$$

Розрахунки для наступних інтервалів виконуємо за тим самим принципом, а отримані дані подаємо в таблиці 5.3. Ймовірність безвідмовної роботи модернізованих зразків із полімерного матеріалу, згідно з результатами випробувань, визначаємо наступним чином:

для першого інтервалу:

$$P_1 = 1 - \frac{7}{60,3987} = 0,8841,$$

для другого інтервалу:

$$P_2 = \left(1 - \frac{7}{60,3987}\right) \cdot \left(1 - \frac{11}{51,2055}\right) = 0,6942,$$

Розрахунки для наступних інтервалів проводяться аналогічним чином, а отримані значення наведені в таблиці 5.3.

4.3 Розрахунок експлуатаційного ресурсу модернізованих елементів копіювального механізму посівного агрегату[23-26].

Перша група модернізованих деталей, що відпрацювала 9180 га, мала середній знос 0,967 мм. Для другої групи, при напрацюванні 17520 га, середнє значення зносу становило 1,771 мм.

Виходячи з цих даних, визначимо середню інтенсивність зносу модернізованих деталей:

$$\bar{I}_{д1} = \frac{0,967}{9179,5} = 0,0001053 \text{ мм / га}$$

$$\bar{I}_{д2} = \frac{1,771}{17521} = 0,0001010 \text{ мм / га}$$

У такому випадку середнє квадратичне відхилення набуває значення:

$$\sigma_{\bar{U}_1} = 0,272 \text{ мм}$$

$$\sigma_{\bar{U}_2} = 0,194 \text{ мм}$$

Тоді:

$$\bar{I}_U = \frac{0,967 \cdot 9179,5 + 1,771 \cdot 17521}{9179,5^2 + 17521^2} = 0,000102 \text{ мм / га}$$

$$\sigma_{\bar{I}} = \frac{0,272 \cdot 9179,5 + 0,391 \cdot 17521}{9179,5^2 + 17521^2} = 0,000015 \text{ мм / га}$$

Значення середнього ресурсу буде відповідати:

$$\bar{T} = \frac{2}{0,000102} = 20588 \text{ га}$$

За середнього сезонного навантаження посівного агрегату Turbosem II 19-60 до 4 тис. га, термін експлуатації модернізованих з'єднань становить приблизно п'ять посівних сезонів. [27-28] Це щонайменше вчетверо більше порівняно з ресурсом з'єднань заводського виготовлення.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що головним недоліком експлуатації посівних комплексів із паралелограмними механізмами копіювання є часта необхідність технічного обслуговування рухомих з'єднань, приблизно кожні 40-50 годин роботи. Якщо ці вимоги з обслуговування не виконуються, абразивні частинки потрапляють у шарніри механізму копіювання, що змінює режими тертя і призводить до скорочення терміну експлуатації. Середній ресурс рухомих з'єднань у серійних паралелограмних механізмах становить 2,0-2,5 тис. га (або 35-45 га на одну секцію).

Польові випробування посівного комплексу «Агро-Союз Turbosem II 19-60» підтвердили ефективність отриманих раніше теоретичних і стендових досліджень. Середнє значення зносу дослідних деталей склало 1,77 мм, а середня інтенсивність їх зношування – $1,01 \cdot 10^{-4}$ мм/га.

Виявлено, що величина зносу деталей із полімерно-композитного матеріалу УПА-6-30 в рухомих з'єднаннях механізму копіювання має нормальний закон розподілу з коефіцієнтом варіації $v = 0,109$, що дозволяє з високою точністю прогнозувати їх довговічність. Середній ресурс експериментальних деталей складає 20588 га, що вчетверо перевищує ресурс серійних аналогів.

Виконано оцінювання показників довговічності механізму копіювання посівного комплексу «Агро-Союз Turbosem II 19-60» з полімерно-композитними деталями УПА-6-30 в рухомих з'єднаннях. Цей ресурс складає понад 20 тис. га, що еквівалентно приблизно п'яти посівним сезонам і принаймні у чотири рази більший за аналогічний показник заводських з'єднань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Статистичний щорічник України за 2020 рік. Державний комітет статистики України. – К.: /«Консультант»/, 2022. – 534 с. 3.
2. Техніка для ресурсосберегаючого земледелія. Каталог продукції ООО «Союз-Спецтехніка». URL: <http://www.soyuz-st.com/download/booklet.pdf> (дата звернення 25.09.2025).
3. Зернові сівалки ПАТ «Elvorti». URL: <http://www.elvorti.com/index.php?part=production&lang=ru#tab3> (дата звернення 25.09.2023).
4. Інструкції з експлуатації посівної техніки Great Plains. URL: <https://www.greatplainsmfg.com.ua/ru/node/2599> (дата звернення 05.10.2025).
5. Каталог продукції Amazone. GO for Innovation 2018. Agritechnica 2017. URL: <http://info.amazone.de/DisplayInfo.aspx?id=45644> (дата звернення 05.10.2025).
6. Maschio Gaspardo product range. URL: <http://www.maschio.com/assets/Download-sito-2014/W00227326RGammaProdottiEN-LR.pdf> (дата звернення 25.11.2025)
7. Каталог техніки. Сівалки точного висіву John Deere. URL: http://origin-www.deere.ua/uk_UA/docs/product/equipment/seeding/db_series/specs/1014608_Planters_RUS.pdf. (дата звернення 05.10.2025).
8. Пропашині сівалки KINZE. URL: https://ag-tng.com.ua/pdf/KINZE_PlanterBookUkraine.pdf. (дата звернення 05.10.2025).
9. Сисолін П.В. Конструкторські розробки нових вітчизняних, універсальних машин для звичайної, стерньової, мульчо-стерньової, екологічнобезпечної, енергозберігаючої технології вирощування сільськогосподарських культур в Україні: [наукове видання] / Петро Васильович Сисолін.– Кіровоград: КОД, 2023. – 128 с.
10. Пастухов В. І. Перспективні напрямки модернізації зернових сівалок / В. І. Пастухов, М. В. Бакум, С. П. Нікітін, А. Д. Михайлов, М. М. Абдуєв, Р. В. Кириченко, Д. А. Ящук // Вісник Харківського національного

технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2022. – Вип. 148. – С. 77-81.

11. Борзенко В. Багатофункціональні посівні агрегати/ В.Борзенко // Агробізнес сьогодні. – 2022. – №22(269). – С.58-64.

12. Мунтян Л.В. Продуктивність сортів пшениці озимої залежно від норм висіву та удобрення в рисових сівозмінах південного Степу України: дис. ... канд. с.-г. наук: 06.01.09. Херсон, 2021. 160 с.

13. Кавунець В.П. Посівні якості насіння озимої пшениці залежно від норм висіву / В.П. Кавунець, В.Я. Дворник // Наукові розробки і реалізація потенціалу с.-г. культур. Зб. наук. праць УААН. – К.: Аграрна наука, 2020. – С. 74-77.

14. Лихочвор В. В. Структура врожаю озимої пшениці : монографія / В. В. Лихочвор. – Львів : Українські технології, 2024. – 200 с.

15. Гирка А.Д. Агробіологічні основи формування продуктивності озимих та ярих зернових культур у північному Степу України: дис. ... докт. с.-г. наук: 06.01.09. Дніпропетровськ, 2023. 353 с.

16. Инструкция по эксплуатации и технического обслуживания сеялки Агро-Союз Turbosem II, 57 с.

17. Jahanmir S., and Beltzer M. " Effect of Additive Molecular Structure on Friction Coefficient and Adsorption". Journal of Tribology, Vol.108, №1, 2021, P. 109-116.

18. Кузнецова О.Ю. Розробка фулеренвмісних композитних матеріалів на основі фенілону для деталей конструкційного призначення: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.01 / Луцький національний технічний університет, 2021. – 23 с.

19. Наукові основи розробки полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення на основі політетрафторетилену [Текст]: монографія / Х.В. Берладір, О.А. Будник, К.О. Дядюра [та ін.]; За ред. К.О. Дядюри. – Суми: СумДУ, 2020. – 176 с.

20. Кашицький В. П. Наукові підходи до створення самозмащувальних епоксикомпозитних трибоматеріалів / В. П. Кашицький, П. П. Савчук // Наукові нотатки. – 2024. – Вип. 50. – С. 76-80.

21. Гринченко О.С.; Кухтов В.Г.; Алфьоров О.І. Надійність машин: Практикум; ТОВ «Планета - Принт».: Харьков, Україна, 2023; 140с.

22. Стандарт Мінагрополітики України. Випробування сільськогосподарської техніки. Оцінювання показників надійності при скорочених ресурсних випробуваннях / В. Кухтов, О. Гринченко, О. Алфьоров [та ін.] // СОУ 74.3-37-04604309-904:2011. – Київ, 2022. – 16 с.

23. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Т. 2. № 7. P. 63 – 69.

24. Vadym Bredykhin, Petro Gurskyi, Oleksiy Alforyov, Khrystyna Bredykhina, Andrey Pak. Improving the mechanical-mathematical model of grain mass separation in a fluidized bed. European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Т. 3/1. № 111. P. 79 – 86.

25. Bredykhin Vadim, Pak Andrey, Gurskyi Petro, Denisenko Sergey, Bredykhina Khrystyna. Improving the mechanical mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Т. 4/1. № 112. P. 54 – 61.

26. Bredykhin Vadym, Tikunov Stanislav, Slipchenko Maksim, Aifyorov Oleksiy, Bogomolov Alexey, Shchur Taras, Kocira Slawomir, Kiczorowski Piotr, Paslavskyu Rostyslav (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. Sciendo. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 27, No. 1. P. 241 – 253. DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0018>

27. Slipchenko Maksym, Bredykhin Vadym, Kis-Korkishhenko Liliia, Pak Andrey, Alforyov Oleksiy. Construction of a physical-mathematical model of oscillations of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. European

Journal of Enterprise Technologies. 2023. T. 4/7. № 124. P. 89 – 98.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281425>

28. Slipchenko M., Bredykhin V., Pak A., Gurskyi P., Alfyorov O., Pak A. (2023). Constructing a physical-mathematical model of grain mass selfheating by a rod site of rectangular cross-section. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/8 №125. P. 24 – 30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287391>

ДОДАТКИ