МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Олійник Аркадій Вікторович

УДК 631.3:633.11

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Удосконалення комплексу машин для вирощування озимої пшениці з модернізацією комбінованого ґрунтообробного знаряддя

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Олійник А.В.

Керівник роботи
Грудовий Р.С.
кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Олійник Аркадій Вікторович. Удосконалення комплексу машин для вирощування озимої пшениці з модернізацією комбінованого ґрунтообробного знаряддя. *– Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання удосконалення комплексу машин для виробництва озимої пшениці з модернізацією комбінатора “Компактор-4,0”. Проведено аналіз сучасного стану вирощування озимої пшениці у світі та в Україні, а також визначено основні напрями підвищення ефективності технологічного процесу. Для умов зони Полісся Житомирської області розроблено технологію вирощування озимої пшениці та складено технологічну карту на площу 250 га. У роботі підібрано сучасний комплекс машин для виконання основних польових операцій із урахуванням можливості застосування роботизованих засобів і агродрона для обприскування посівів. Обґрунтовано напрями вдосконалення комбінатора “Компактор-4,0”, зокрема використання енергоощадних робочих органів і пруткового котка для формування насіннєвого ложа. Виконано необхідні конструкційні розрахунки, які підтверджують працездатність запропонованих рішень. Розглянуто питання охорони праці під час виконання механізованих робіт та проведено техніко-економічне обґрунтування проекту. Запропоновані рішення спрямовані на підвищення якості передпосівного обробітку ґрунту, зниження енерговитрат і покращення економічної ефективності виробництва озимої пшениці.

Ключові слова: озима пшениця; ґрунтообробне знаряддя; механізація; технологічна карта; агродрон; охорона праці; економічна ефективність.

ANNOTATION

Arkady Viktorovich Oliinyk. Improvements to the machinery used for growing winter wheat, including the modernisation of combined tillage implements. *– Qualification work on the rights of the manuscript*.

Qualification work for obtaining a bachelor's degree in the specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

This thesis examines the improvement of machinery for winter wheat production, including the modernisation of the ‘Compactor-4.0’ combine harvester. It analyses the current state of winter wheat cultivation worldwide and in Ukraine, and identifies key areas for enhancing the efficiency of the production process. A technology for growing winter wheat has been developed for the conditions of the Polissia region of Zhytomyr Oblast, and a technological map has been drawn up for an area of 250 ha. The thesis identifies a modern range of machinery for carrying out the main field operations, taking into account the possibility of using robotic equipment and agricultural drones for crop spraying. Directions for improving the ‘Compactor-4.0’ cultivator have been substantiated, in particular the use of energy-saving working bodies and a bar roller for seedbed formation. The necessary structural calculations have been carried out, confirming the feasibility of the proposed solutions. Occupational health and safety issues during mechanised operations have been addressed, and a technical and economic justification of the project has been carried out. The proposed solutions are aimed at improving the quality of pre-sowing soil cultivation, reducing energy consumption and enhancing the economic efficiency of winter wheat production.

Keywords: winter wheat; tillage implements; mechanisation; technological map; agricultural drone; occupational safety; economic efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП……6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ……..10
1.1. Значення озимої пшениці та стан світового виробництва……..……10
1.2. Стан виробництва пшениці в Україні…….…..11
1.3. Аналіз технологій вирощування озимої пшениці……...12
1.4. Перспективні засоби механізації та роботизації……..14
Висновки по розділу…….…….15
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ В УМОВАХ ЗОНИ ПОЛІССЯ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ……...…….16
2.1. Вихідні умови проектування технології……..……16
2.2. Обґрунтування технологічної схеми вирощування……...……..17
2.3. Добір комплексу машин та елементів роботизації……..19
2.4. Розрахунок основних технологічних параметрів……21
2.5. Технологічна карта вирощування озимої пшениці на площі 250 га……..…22
2.6. Потреба в матеріалах, енерговитратах і робочому часі……..24
2.7. Особливості застосування агродрона у системі захисту посівів…….…..25
2.8. Очікувана ефективність запропонованої технології……..…….25
Висновки по розділу……..26
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ КОМБІНАТОРА «КОМПАКТОР-4,0» У СКЛАДІ КОМПЛЕКСУ МАШИН ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ……..28
3.1. Вихідні передумови та напрями удосконалення комбінованих ґрунтообробних машин……...……..28
3.2. Агротехнічні вимоги до передпосівного обробітку під озиму пшеницю….31
3.3. Обґрунтування конструкційно-технологічної схеми вдосконаленого комбінатора…….……32
3.4. Розрахунок і вибір параметрів розпушувальних робочих органів…….……35

3.5. Розрахунок параметрів пруткового котка формування насіннєвого ложа....37
3.6. Перевірка довговічності підшипників котка……...…….39
3.7. Розрахунок міцності різьбового кріплення котка……...…….41
3.8. Технологічна оцінка запропонованого удосконалення…….…..42
Висновки до розділу…….…….44
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ……...…….45
4.1. Загальні положення та умови безпечного виконання робіт……45
4.2. Аналіз ризиків під час експлуатації комплексу машин……...……46
4.3. Заходи безпеки під час роботи з комбінатором та агродроном…….….47
4.4. Розрахунок шумового навантаження на оператора……...…..47
Висновки по розділу……..48
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ……..……....49
5.1. Мета та методика економічної оцінки……..……50
5.2. Обґрунтування витрат на проектні рішення……..……..50
5.3. Порівняння експлуатаційних витрат…….51
5.4. Розрахунок річного економічного ефекту……...…….52
5.5. Строк окупності та аналіз чутливості…….……..53
5.6. Техніко-економічні висновки……..……..54
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……..…….56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….…….58

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Виробництво зерна є однією з провідних галузей аграрного сектору України, оскільки воно безпосередньо впливає на продовольчу безпеку держави, експортний потенціал, рівень зайнятості в сільській місцевості та загальну ефективність функціонування агропромислового комплексу. Серед зернових культур особливе місце займає озима пшениця, яка є основною продовольчою культурою та використовується для виробництва борошна, хлібобулочних виробів, комбікормів і як важлива складова експортної продукції.

Ефективність вирощування озимої пшениці значною мірою залежить від правильного вибору технології, строків виконання польових робіт, якості підготовки ґрунту, рівномірності сівби, системи удобрення, захисту рослин і своєчасного збирання врожаю. Водночас у сучасних умовах господарювання важливого значення набуває не лише підвищення врожайності, а й зниження енерговитрат, економія пального, зменшення кількості проходів техніки по полю, збереження структури ґрунту та раціональне використання машинно-тракторного парку.

Особливо важливим етапом технології вирощування озимої пшениці є передпосівний обробіток ґрунту. Від його якості залежить формування насіннєвого ложа, рівномірність загортання насіння, дружність появи сходів, розвиток кореневої системи та подальша продуктивність рослин. Для виконання цього процесу широко застосовують комбіновані ґрунтообробні агрегати, які за один прохід виконують декілька технологічних операцій: розпушування, кришення, вирівнювання, ущільнення та формування посівного шару.

Одним із таких агрегатів є комбінатор “Компактор-4,0”, призначений для передпосівного обробітку ґрунту. Проте в процесі експлуатації базова конструкція машини потребує вдосконалення з метою зменшення тягового опору, покращення якості розпушування, підвищення стабільності глибини

обробітку та формування більш якісного насіннєвого ложа. Перспективним напрямом модернізації є застосування енергоощадних робочих органів, зокрема розпушувальних лап на пружних S-подібних стійках, а також удосконалення коткової частини агрегату.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи полягає в необхідності підвищення ефективності технологічного процесу вирощування озимої пшениці шляхом удосконалення комплексу машин і модернізації комбінатора “Компактор-4,0”. Це дає можливість зменшити витрати пального, підвищити продуктивність агрегатів, покращити якість підготовки ґрунту, знизити собівартість виробництва зерна та забезпечити кращі умови для росту й розвитку рослин.

Метою кваліфікаційної роботи є удосконалення комплексу машин для виробництва озимої пшениці в умовах зони Полісся Житомирської області з розробленням проектних рішень щодо модернізації комбінатора “Компактор-4,0”.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати сучасний стан виробництва озимої пшениці у світі та в Україні;

– розглянути існуючі технології вирощування озимої пшениці та визначити їх особливості;

– обґрунтувати технологію вирощування озимої пшениці для умов Полісся Житомирської області;

– розробити технологічну карту вирощування культури на площі 250 га;

– підібрати сучасний комплекс машин для виконання основних технологічних операцій;

– розглянути можливості використання роботизованих і автоматизованих засобів, зокрема агродронів для обприскування;

– провести аналіз конструкції комбінатора “Компактор-4,0” та визначити напрями його вдосконалення;

– виконати необхідні конструкційні розрахунки робочих органів модернізованого агрегату;

– розробити заходи з охорони праці під час виконання механізованих робіт;

– виконати техніко-економічне обґрунтування запропонованих проектних рішень.

Об’єктом дослідження є технологічний процес вирощування озимої пшениці із застосуванням комплексу машин для обробітку ґрунту, сівби, догляду за посівами та збирання врожаю.

Предметом дослідження є конструкційно-технологічні параметри комбінатора “Компактор-4,0” та ефективність його використання у складі комплексу машин для виробництва озимої пшениці.

Методи дослідження включають аналіз науково-технічної літератури, порівняльну оцінку існуючих технологій і машин, розрахунково-аналітичний метод визначення параметрів робочих органів, техніко-економічні розрахунки, а також узагальнення практичного досвіду застосування сучасної сільськогосподарської техніки.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Дерев’янко Д. А., Отвивінський В. А., **Олійник А. В.,** Кравченко А. Ю., Ткачук Б. Р. Способи підвищення зносостійкості стрілчастих лап культиваторів. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 119-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 19-20 лют. 2026 р., м. Київ / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2026.С. 123-126.

2. Борак К.В., Герасимчук Д.В., Грудовий Р.С., **Олійник А.В.,** Мельник Р.П. Підвищення надійності робочих органів ґрунтообробних машин методами зміцнення та наплавлення. Збірник тез XII Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та

технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь». 29 квітня 2026 року. Житомир. Видавничий центр ЖАТФК. 2026. С. 107-111.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої технології та модернізованого комплексу машин у господарствах зони Полісся Житомирської області. Удосконалення комбінатора “Компактор-4,0” спрямоване на підвищення якості передпосівного обробітку ґрунту, зменшення витрат енергії, поліпшення умов формування насіннєвого ложа та підвищення загальної ефективності вирощування озимої пшениці.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 36 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 31 сторінка комп’ютерного тексту, містить 12 рисунків, 20 таблиць та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ

1.1. Значення озимої пшениці та стан світового виробництва

Озима пшениця є базовою продовольчою культурою, від якої залежать продовольча безпека, експортний потенціал і рівень завантаження машинно-тракторного парку. Для України культура має особливе значення, оскільки основна частина валового збору пшениці формується озимими посівами, а результат значною мірою визначається якістю осінньої підготовки ґрунту та строками сівби.

За даними USDA, у 2021/22–2025/26 маркетингових роках світове виробництво пшениці зросло з 780,8 до 816,2 млн т, тобто на 4,5 %. Споживання зросло повільніше, але залишалося близьким до обсягу виробництва, а кінцеві запаси зменшилися з 275,3 до 264,1 млн т. Це свідчить про напружений баланс і високу чутливість ринку до погодних, логістичних та воєнних ризиків.

Таблиця 1.1 – Динаміка світового балансу пшениці та частки України (USDA, вересень 2025 р.)

МР	Світове виробництво, млн т	Споживання, млн т	Запаси, млн т	Україна, млн т	Частка України, %
2021/22	780.8	790.8	275.3	33.0	4.23
2022/23	790.5	791.1	274.7	21.5	2.72
2023/24	792.3	796.3	270.7	23.0	2.90
2024/25	800.9	809.1	262.4	23.4	2.92
2025/26 (прогноз)	816.2	814.6	264.1	23.0	2.82

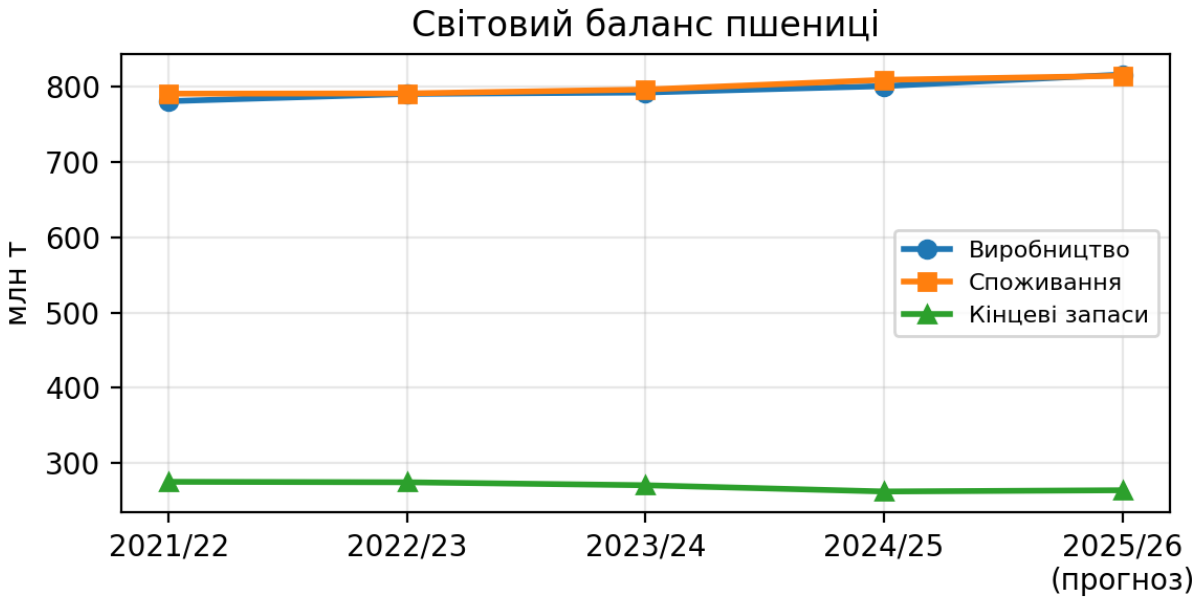


Рис. 1.1. Світове виробництво, споживання та кінцеві запаси пшениці

Найбільший вплив на світову пропозицію формують Європейський Союз, Китай, Індія, Росія, США, Канада й Австралія. Україна поступається їм за абсолютним обсягом виробництва, проте її роль є значною через експортну орієнтацію. Тому стабільність українського виробництва залежить не лише від площ і врожайності, а й від технологічної готовності господарств швидко виконувати польові операції.

1.2. Стан виробництва пшениці в Україні

У 2021/22 МР Україна зібрала близько 33,0 млн т пшениці. Після 2022 року виробництво зменшилося через скорочення доступних площ, мінування, окупацію частини територій, логістичні ускладнення та подорожчання ресурсів. У 2022/23 МР виробництво впало до 21,5 млн т, а у наступні сезони стабілізувалося поблизу 23 млн т.

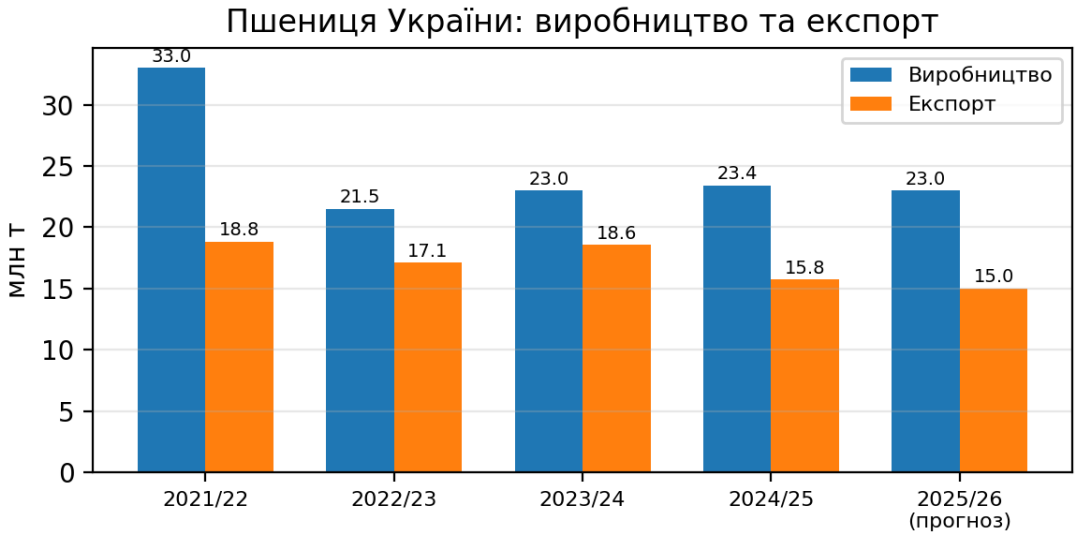


Рис. 1.2. Виробництво та експорт пшениці України.

За повідомленням Reuters із посиланням на першого заступника міністра аграрної політики, урожай пшениці 2024 року оцінювався приблизно у 22 млн т проти 25–28 млн т до повномасштабної війни. Прогноз на 2025 рік передбачав можливе збільшення збору завдяки розширенню площі під пшеницею до 5,0 млн га проти 4,6 млн га у 2024 році. Оскільки озима пшениця забезпечує близько 95 % загального виробництва пшениці, вирішальною є якість підготовки поля восени.

Для машинного забезпечення це означає необхідність зменшувати кількість проходів агрегатів, скорочувати витрати палива, забезпечувати рівномірне кришення ґрунту, стабільну глибину розпушування і створення ущільненого насіннєвого ложа. Саме ці завдання пов’язані з удосконаленням комбінатора «Компактор-4,0».

1.3. Аналіз технологій вирощування озимої пшениці

Технології вирощування озимої пшениці відрізняються за способом обробітку ґрунту, кількістю проходів, рівнем використання цифрових систем та здатністю зберігати вологу. У виробничих умовах України найчастіше застосовуються класична та мінімізована технології. Водночас зростає інтерес до елементів консерваційного землеробства: мінімального обробітку, прямої сівби, локального обробітку смуг і диференційованого внесення матеріалів.

ФАО визначає консерваційне землеробство через три принципи: мінімальне механічне порушення ґрунту, постійний органічний покрив і диверсифікацію культур. Для озимої пшениці ці принципи важливі насамперед через потребу зберегти вологу та сформувати однорідні сходи. Однак повна відмова від передпосівного обробітку не завжди можлива, особливо на полях із нерівною поверхнею, великою кількістю рослинних решток або ущільненим шаром.

Таблиця 1.2 – Порівняння технологій вирощування озимої пшениці

Технологія	Типовий комплекс операцій	Переваги	Обмеження
Класична	Оранка або глибокий обробіток, культивація, сівба	Добра заробка решток і контроль бур’янів	Багато проходів, високі витрати палива, ризик ущільнення
Мінімізована	Поверхневий обробіток і комбінована передпосівна підготовка	Економія часу, вологи і палива; висока продуктивність	Високі вимоги до комбінованого агрегату та налаштувань
No-till	Сівба без попередньої механічної підготовки	Найменше порушення ґрунту, протиерозійний ефект	Вимоги до сівалки, хімічного захисту і управління рештками
Strip-till	Локальний обробіток смуг із можливим внесенням добрив	Поєднання ресурсозбереження з підготовкою рядка	Потребує RTK-навігації та точного повторення проходів
Цифрова адаптивна	GPS, карти полів, сенсори, VRT, БПЛА	Оптимізація норм висіву, добрив і ЗЗР	Потребує інвестицій, даних і підготовленого персоналу

Найбільш придатною для обґрунтування удосконалення «Компактора-4,0» є мінімізована технологія, у якій передпосівна підготовка виконується за один прохід. Комбінований агрегат має послідовно вирівняти поверхню, розпушити верхній шар, подрібнити грудки та ущільнити ложе на глибині загортання насіння. Невиконання хоча б однієї з цих функцій призводить до нерівномірних сходів і зниження ефективності сівби.

1.4. Перспективні засоби механізації та роботизації

Сучасний розвиток аграрної техніки переходить від простої механізації до цифрових і частково автономних систем. ФАО розглядає роботизоване та автоматизоване обладнання як складову Agriculture 4.0, що допомагає зменшити залежність від ручної праці та підвищити точність операцій. Європейська Комісія наголошує на ролі IoT, сенсорів, аналітики даних, штучного інтелекту та систем підтримки рішень у підвищенні продуктивності й сталості аграрного виробництва.

Для озимої пшениці найбільш практичними є GPS/RTK-навігація, автопілотування тракторів, контроль перекриттів, телематика, диференційоване внесення добрив, БПЛА для моніторингу стану посівів і камерні обприскувачі. Наприклад, системи точкового обприскування на основі камер і машинного навчання вже застосовуються для розпізнавання бур'янів у посівах пшениці та змінного внесення препарату.

Таблиця 1.3 – Перспективні засоби механізації та роботизації процесу вирощування

Напрям технічного розвитку	Застосування у технології пшениці	Очікуваний ефект
GPS/RTK та автопілот	Обробіток, сівба, внесення добрив, обприскування	Зменшення перекриттів, економія палива, точні стикові проходи
Телематика машин	Усі польові операції	Контроль продуктивності, витрат палива, простоїв і якості використання техніки
Диференційоване внесення	Добрива, насіння, ЗЗР	Оптимізація норм за зонами поля, зменшення перевитрат ресурсів
БПЛА та супутниковий моніторинг	Оцінка сходів, перезимівлі, стресу, хвороб	Швидке виявлення проблемних зон і планування агрозаходів
Камерне точкове обприскування	Захист від бур'янів	Зменшення витрат гербіцидів і навантаження на довкілля
Автономні трактори і роботи	Обробіток, сівба, моніторинг	Робота у вузькі строки та зменшення залежності від дефіциту операторів

Роботизація не замінює потреби в якісних робочих органах. Навпаки, точна навігація робить більш помітними недоліки агрегату: нестабільну глибину, зайвий тяговий опір, неякісне кришення або нерівномірне ущільнення. Тому модернізація комбінатора є логічною складовою переходу до точного землеробства.

Висновки по розділу

Світовий ринок пшениці характеризується повільним зростанням виробництва та скороченням запасів, що підвищує значення стабільних експортерів. Україна зберігає важливу роль на ринку, але після 2022 року виробництво зменшилося порівняно з довоєнним рівнем; ключовим резервом є підвищення технологічної ефективності. Для озимої пшениці вирішальне значення має передпосівна підготовка, оскільки вона визначає рівномірність глибини сівби, збереження вологи та дружність сходів.Удосконалення комбінатора «Компактор-4,0» доцільно розглядати як елемент ресурсоощадної технології, спрямований на зменшення проходів, тягового опору та підвищення якості насіннєвого ложа. Перспективні цифрові та роботизовані засоби мають найбільший ефект у поєднанні з технічно досконалими ґрунтообробними машинами.

РОЗДІЛ 2
ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ В УМОВАХ ЗОНИ ПОЛІССЯ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ

2.1. Вихідні умови проектування технології

Проектування технології вирощування озимої пшениці виконано для умов зони Полісся Житомирської області на площі 250 га. Основним завданням розділу є формування такого комплексу машин, який забезпечує своєчасне виконання агротехнічних операцій, стабільне формування насіннєвого ложа, зниження кількості проходів техніки по полю та часткову роботизацію процесів моніторингу і захисту рослин. У системі машин центральне місце займає удосконалений комбінатор "Компактор-4,0", який використовується для передпосівного обробітку ґрунту перед сівбою озимої пшениці.

Зона Полісся характеризується достатнім зволоженням, відносно прохолоднішим весняно-осіннім періодом, строкатістю ґрунтового покриву та поширенням легких за гранулометричним складом ґрунтів. Для Житомирської області характерна волога, помірно тепла агрокліматична зона з помірно-континентальним кліматом; у північній частині області кількість опадів досягає близько 600 мм за рік, у південній - близько 570 мм [1]. Для поліських ґрунтів типовими є дерново-підзолисті та оглеєні ґрунти, що часто мають нижчу природну родючість, підвищену кислотність і потребують системного удобрення, вапнування за результатами аналізу та якісного передпосівного обробітку [2].

У технології приймається попередник - ріпак озимий або зернобобова культура, що рано звільняє поле і дає можливість якісно підготувати ґрунт до сівби. Планова урожайність для розрахунків прийнята на рівні 6,0 т/га. Отже, очікуваний валовий збір зерна з площі 250 га становитиме близько 1500 т. Технологія орієнтується на ресурсоощадну систему обробітку, точне внесення добрив, застосування навігації, електронного обліку виконаних робіт і використання агродрона для операцій обприскування.

Таблиця 2.1 - Основні проектні умови для розроблення технології

Показник	Прийняте значення	Вплив на технологію	Технічне рішення
Площа посіву	250 га	Визначає потребу в продуктивності агрегатів	Одна основна машинно-тракторна ланка + агродронна бригада
Культура	Озима пшениця	Потребує вирівняного насіннєвого ложа і точного строку сівби	Передпосівний обробіток комбінатором "Компактор-4,0"
Зона вирощування	Полісся Житомирської області	Достатнє зволоження, ризик ущільнення і кислотності ґрунтів	Мінімізація проходів, контроль pH, диференційоване удобрення
Попередник	Ріпак озимий або зернобобові	Раннє звільнення поля, краща структура ґрунту	Лущення стерні, основний безполицевий обробіток
Планова урожайність	6,0 т/га	Формує потребу в живленні та логістиці зерна	1500 т зерна, організація транспорту під час жнив
Обприскування	Агродрон	Зменшення технологічних колій та ущільнення ґрунту	DJI Agras T50 або аналог із сертифікованим оператором

2.2. Обґрунтування технологічної схеми вирощування

Для умов Полісся доцільною є технологічна схема, яка поєднує якісне післязбиральне лущення стерні, основний обробіток на глибину 18-22 см, вирівнювання та передпосівне кришення ґрунту комбінатором, сівбу сучасною комбінованою сівалкою, дробне азотне підживлення і захист посівів агродроном. Такий підхід дає змогу уникнути надмірного висушування орного шару, обмежити кількість проходів важкої техніки та забезпечити рівномірність глибини загортання насіння.

Ключовою вимогою до передпосівного обробітку є формування дрібногрудкуватого посівного шару на глибину 4-6 см із достатньо ущільненим насіннєвим ложем. Саме на цьому етапі доцільно застосувати удосконалений "Компактор-4,0": він виконує вирівнювання поверхні, кришення грудок, розпушення верхнього шару і часткове ущільнення. За рахунок комбінованої дії

робочих органів агрегат замінює кілька окремих операцій, зменшує витрати пального та забезпечує кращі умови для сівби.

Сівбу доцільно виконувати в оптимальні для Полісся строки - переважно в другій декаді вересня, з коригуванням за фактичною вологістю ґрунту і прогнозом температур. Норма висіву у проекті приймається 5,0 млн схожих насінин/га, що для середньої маси 1000 насінин 42-44 г відповідає орієнтовно 210-220 кг/га. Цей показник необхідно уточнювати за лабораторною схожістю, масою 1000 насінин і строком сівби.

Таблиця 2.2 - Технологічна схема вирощування озимої пшениці

Етап	Мета операцій	Агротехнічний строк	Основні машини	Результат
Післязбиральний період	Провокація падалиці і бур’янів, заробка решток	серпень	John Deere 6R 185 + Lemken Rubin 10/500 KUA	Рівномірне мульчування, старт мінералізації решток
Основний обробіток	Розпушення орного шару, усунення ущільнення	кінець серпня - початок вересня	John Deere 6R 185 + Lemken Karat 10/500 KUA	Структурований шар 18-22 см
Передпосівний обробіток	Формування насіннєвого ложа	перша-друга декада вересня	John Deere 6M/6R + удосконалений Компактор-4,0	Вирівняна поверхня і шар 4-6 см
Сівба	Рівномірне розміщення насіння і стартового живлення	10-25 вересня	Väderstad Rapid 400C	Суцільний рівномірний посів
Догляд за посівами	Контроль бур’янів, хвороб, шкідників, живлення	жовтень - червень	DJI Agras T50; Amazone ZA-TS	Збереження густоти і продуктивного стеблостою
Збирання	Збирання зерна з мінімальними втратами	липень	CLAAS LEXION 7600 + Convio 770	Отримання зерна з прогнозним валом 1500 т

2.3. Добір комплексу машин та елементів роботизації

Комплекс машин підібрано за принципом поєднання достатньої продуктивності, технологічної універсальності та можливості використання цифрових систем керування. Для енергонасичених операцій прийнято трактор John Deere 6R 185, який має номінальну потужність 185 hp і максимальну потужність 205 hp, а в окремих європейських специфікаціях для моделі 6R 185 вказується до 234 hp з інтелектуальним керуванням потужністю [3]. Це дозволяє агрегатувати його з 4-5-метровими ґрунтообробними машинами та 4-метровою комбінованою сівалкою.

Для сівби обрано Väderstad Rapid 400C. Виробник зазначає, що лінійка Rapid 300-400 доступна у 3- і 4-метровому виконанні, а комбінована версія Rapid C може одночасно працювати з насінням і добривами [4]. Такий тип сівалки доцільний для озимої пшениці, оскільки поєднує підготовку посівної смуги, точне дозування та ущільнення рядка. Для передпосівного обробітку використовується удосконалений "Компактор-4,0", конструкція якого має забезпечити кришення, вирівнювання і ущільнення верхнього шару ґрунту без зайвого розпилювання.

Усі операції обприскування у проекті виконуються агродроном. Як базову модель прийнято DJI Agras T50: за даними виробника, дрон розрахований на 40 кг робочого навантаження під час обприскування, 50 кг під час розкидання та має продуктивну систему подачі рідини до 16 л/хв [5]. У технологічній карті дрон розглядається як професійний комплекс, що обслуговується підготовленим оператором з дотриманням чинних регламентів застосування засобів захисту рослин. Перевага такого рішення - відсутність технологічних колій від самохідного або причіпного обприскувача у вологі періоди, що особливо важливо на легких ґрунтах Полісся.

Роботизація також може бути реалізована через автопілот тракторів, RTK-навігацію, автоматичне відключення секцій сівалки та розкидача добрив, дистанційний моніторинг машин, картування урожайності, а в перспективі - застосування автономних тракторів. John Deere вже позиціонує окремі серії 8R,

8RX, 9R та 9RX як платформи, готові до автономізації [6]. Для збирання зерна доцільно використовувати комбайн із системами автоматичного налаштування. Наприклад, CLAAS CEMOS Automatic описується виробником як самонавчальна система, що автоматично підтримує оптимізацію процесу обмолоту, очистки та якості зерна [7].

Таблиця 2.3 – Пропонований комплекс машин для площі 250 га

Операційна група	Марка техніки	Ключові параметри	Функція в технології	Цифровізація / роботизація
Трактор енергонасичений	John Deere 6R 185	185 hp номінально; GPS/ISOBUS	Ґрунтообробні агрегати, сівба	Автопілот, карти завдань, телеметрія
Лущення стерні	Lemken Rubin 10/500 KUA	ширина 5,0 м	Заробка решток і провокація бур’янів	Контроль перекриттів за GPS
Основний обробіток	Lemken Karat 10/500 KUA або Horsch Tiger 4 AS	18-22 см	Безполицеве розпушення	Змінна глибина за картою ущільнення
Передпосівний обробіток	Удосконалений Компактор-4,0	ширина 4,0 м; котки + лапи	Формування насіннєвого ложа	Контроль швидкості, прямолінійність проходів
Сівба	Väderstad Rapid 400C	4,0 м; 125 мм міжряддя	Сівба з можливим внесенням добрив	ISOBUS, контроль висіву
Удобрення	Amazone ZA-TS 4200 Profis Hydro	дводисковий розкидач	Основне і весняне підживлення	Вагове дозування, карти норм
Обприскування	DJI Agras T50	40 кг обприскування; до 16 л/хв	Усі обробки посівів	Автономний маршрут, диференційовані карти
Моніторинг	DJI Mavic 3M або аналог	мультиспектральна камера	NDVI, густота, стрес рослин	Карта завдань для дрона і добрив
Збирання	CLAAS LEXION 7600 + Convio 770	зернозбиральний комбайн	Збирання 1500 т зерна	CEMOS, карти урожайності

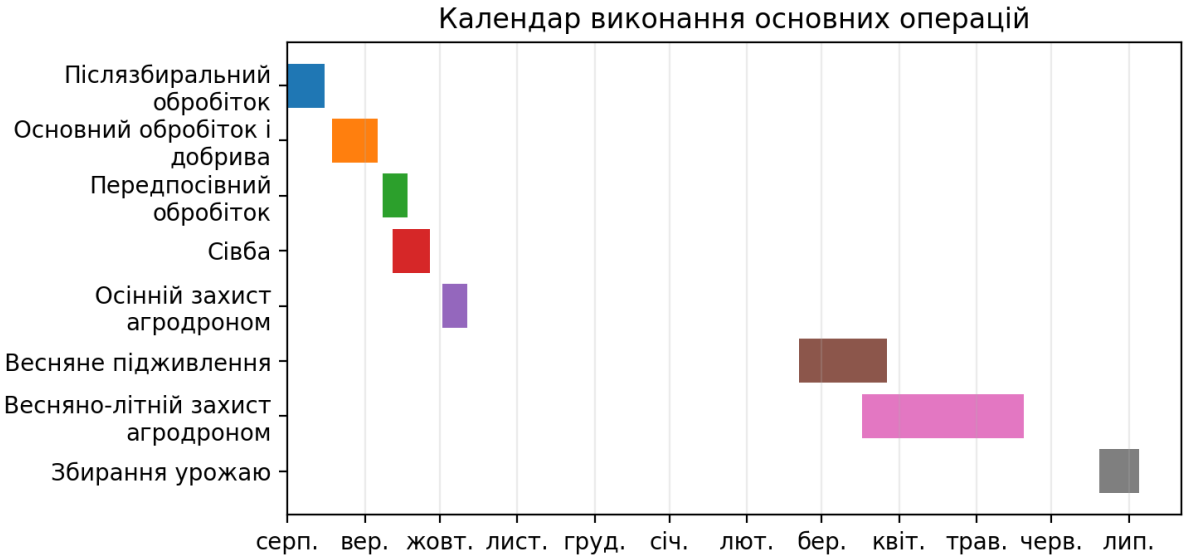


Рис. 2.1. Календар виконання основних технологічних операцій.

2.4. Розрахунок основних технологічних параметрів

Для розрахунків прийнято робочу зміну тривалістю 8 год для тракторних агрегатів і 10 год для збирального комплексу в період жнив. Продуктивність агрегатів визначено за типовою залежністю $W = B \cdot V \cdot \eta / 10$, де B - робоча ширина захвату, м; V - робоча швидкість, км/год; η - коефіцієнт використання часу зміни. Прийняті значення є проектними і можуть уточнюватися залежно від конфігурації поля, вологості ґрунту, кваліфікації оператора і фактичного стану машин.

Потреба в насінні за норми висіву 220 кг/га становить 55,0 т. Якщо господарство використовує насіння із вищою масою 1000 насінин або сівба проводиться пізніше оптимального строку, норму висіву коригують після визначення лабораторної схожості. Плановий валовий збір зерна за урожайності 6,0 т/га становить 1500 т, тому під час збирання необхідно передбачити одночасну роботу комбайна, перевантажувального бункера або тракторних причепів і автомобільного транспорту до току чи елеватора.

Загальна логіка роботизації полягає не в повній заміні механізатора, а в перенесенні найбільш повторюваних операцій у режим автоматизованого контролю. Перший рівень - паралельне водіння і контроль перекриттів. Другий

рівень - карти завдань для добрив і агродрона. Третій рівень - автономна або напівавтономна робота агрегатів у межах заданого поля. Для площі 250 га економічно доцільним є другий рівень: він не потребує повної автономної техніки, але суттєво підвищує точність і документування процесу.

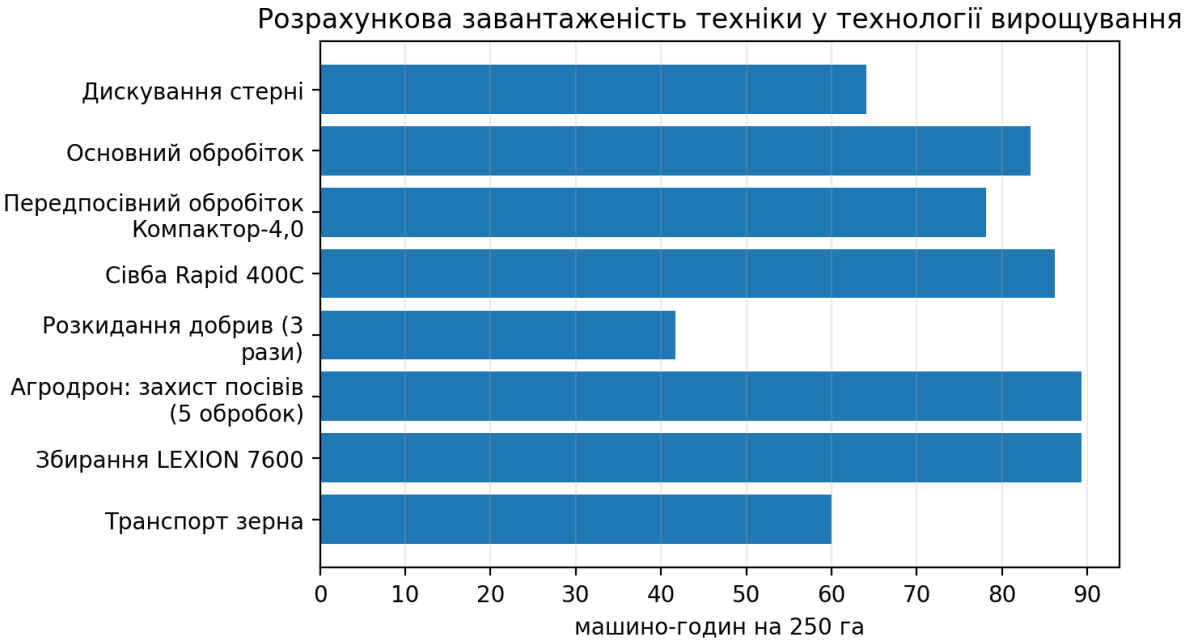


Рис. 2.2. Завантаженість основних машин за технологічною картою.

2.5. Технологічна карта вирощування озимої пшениці на площі 250 га

Технологічну карту складено для одного поля або масиву полів загальною площею 250 га. Усі операції обприскування запроектовано з використанням агродрона. Норми препаратів у карті не деталізуються, оскільки вони встановлюються виключно за чинною реєстрацією препарату, етикеткою та фактичним фітосанітарним станом посівів; у розрахунках наведено тільки виробничо-технічні параметри виконання операцій.

.

Таблиця 2.4 – Технологічна карта вирощування озимої пшениці на площі 250 га.

№	Операція	Строк виконання	Обсяг	Склад агрегату / марка	Норма або режим	W, га/год	Тривалість і автоматизація
1	Агрохімічне обстеження, електронна карта поля	липень-серпень	250 га	UAV DJI Mavic 3M + ґрунтовий відбірник; ПЗ Cropio / JD Operations Center	Сітка 5-10 га; pH, NPK, гумус	до 100 га/день	3 дні; база для карт-завдань
2	Лущення стерні після попередника	серпень	250 га	John Deere 6R 185 + Lemken Rubin 10/500 KUA	6-8 см; 9-10 км/год	3,9	64 год; 8 змін
3	Внесення фосфорно-калійних добрив	серпень	250 га	John Deere 6M 155 + Amazone ZA-TS 4200 Profis Hydro	За аналізом ґрунту; орієнтовно 180-220 кг/га комплексних добрив	18,0	14 год; GPS-секції
4	Основний безполицевий обробіток	кінець серпня	250 га	John Deere 6R 185 + Lemken Karat 10/500 KUA	18-22 см; 7-8 км/год	3,0	83 год; 10-11 змін
5	Передпосівний обробіток ґрунту	5-15 вересня	250 га	John Deere 6R 185 + удосконалений Компактор-4,0	4-6 см; 9-10 км/год; вирівнювання + ущільнення	3,2	78 год; 10 змін
6	Підготовка і протруювання насіння	до сівби	55 т	Лінія очищення Petkus + протруювач ПС-10 або мобільний сервіс	Норма висіву 220 кг/га; тільки дозволені препарати	5 т/год	11-12 год; контроль якості
7	Сівба озимої пшениці	10-25 вересня	250 га	John Deere 6R 185 + Väderstad Rapid 400C	Міжряддя 125 мм; глибина 3-5 см; 5,0 млн насінин/га	2,9	86 год; 11 змін; контроль висіву
8	Коткування після сівби за сухих умов	вересень	250 га	John Deere 6M 155 + Dal-Bo MaxiRoll 630 Greenline	Виконувати лише за потреби, без перезволоження	5,0	50 год; 6-7 змін
9	Осінній моніторинг і гербіцидний захист	жовтень	250 га	DJI Agras T50 + станція заряджання	Маршрут за картою забур’яненості; робоча рідина за регламентом	14,0	18 год; без колій у полі
10	Перше весняне азотне підживлення	березень	250 га	John Deere 6M 155 + Amazone ZA-TS 4200	По мерзлоталому або стиглому ґрунту; норма за діагностикою	18,0	14 год; карти норм
11	Весняний захист агродроном: гербіцид/регулятор/фунгіцид	квітень-травень	500 га-обробок	DJI Agras T50	2 проходи за потреби; рішення за моніторингом	14,0	36 год; автономні маршрути
12	Друге азотне підживлення	квітень	250 га	John Deere 6M 155 + Amazone ZA-TS 4200	У фазі виходу в трубку; диференційовано за NDVI	18,0	14 год; точне дозування
13	Фунгіцидно-інсектицидний захист агродроном	травень-червень	500 га-обробок	DJI Agras T50	2 проходи за фітосанітарним станом; безпечні метеоумови	14,0	36 год; мінімізація ущільнення
14	Збирання урожаю	липень	250 га	CLAAS LEXION 7600 + жатка Convio 770	Вологість зерна за вимогами зберігання; подрібнення соломи	2,8	89 год; 9-10 днів
15	Транспортування зерна і післязбиральний облік	липень	1500 т	Fendt 724 + бункер-перевантажувач Kinze 851; автотранспорт	Логістика до току/елеватора; зважування партій	150 т/день	10 днів; карта урожайності

2.6. Потреба в матеріалах, енерговитратах і робочому часі

Ресурсне забезпечення технології розраховано для всієї площі 250 га. Найбільше навантаження припадає на основний обробіток ґрунту, сівбу та збирання. Саме ці операції визначають потребу в енергонасиченому тракторі та достатній пропускній здатності зернозбирального комплексу. Використання агродрона у захисті рослин зменшує потребу в самохідному обприскувачі, проте потребує чіткої організації підвезення води, заряджання акумуляторів і погодного контролю.

Таблиця 2.5 – Зведена потреба в ресурсах для площі 250 га

Ресурс / показник	Норма або вихідне значення	Потреба на 250 га	Примітка	Роботизований контроль
Насіння озимої пшениці	220 кг/га	55,0 т	Уточнити за схожістю і масою 1000 насінин	Контроль висіву сівалкою
Плановий збір зерна	6,0 т/га	1500 т	Потрібне зважування і сушіння за потреби	Карта урожайності комбайна
Базові добрива	180-220 кг/га	45-55 т	Конкретна формула за аналізом ґрунту	Диференційоване внесення
Азотні підживлення	2 строки	За планом живлення	Коригування за NDVI та густотою	Карти норм для розкидача
Обробки агродроном	5 проходів	1250 га-обробок	Без деталізації препаратів; тільки за регламентом	Автономний маршрут
Умовні енерговитрати	близько 69,5 л/га	≈17,4 тис. л умовного дизеля	Оцінка для планування, включає збирання і логістику	Телеметрія витрат пального

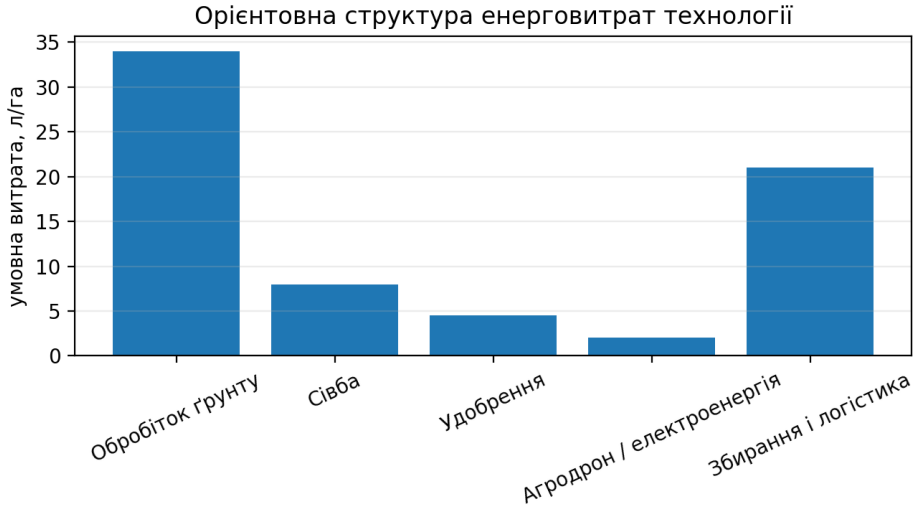


Рис. 2.3. Орієнтовна структура енерговитрат за групами операцій

2.7. Особливості застосування агродрона у системі захисту посівів

Агродрон у даній технології виконує не лише функцію обприскування, а й є елементом цифрового управління посівами. Перед виконанням робіт доцільно проводити аерофотомоніторинг, формувати карти проблемних ділянок і виконувати обробку лише за потреби. Це зменшує витрати робочої рідини, не створює колій, а також дає можливість працювати тоді, коли важка наземна техніка не може зайти в поле через перезволоження. Для Полісся ця перевага є особливо важливою навесні.

Разом з тим агродрон не скасовує вимог до безпеки. Обробки повинні виконуватися сертифікованим оператором, із дотриманням санітарних зон, обмежень за швидкістю вітру, температурою, близькістю водойм, населених пунктів і пасік. У технологічній карті не наведено конкретних назв препаратів і доз, оскільки їх вибір визначається результатами обстеження посіву, фазою розвитку культури, переліком дозволених засобів захисту та офіційною етикеткою кожного препарату. У кваліфікаційній роботі такий підхід дозволяє показати механізацію процесу без переходу до небезпечних інструкцій з приготування робочих сумішей.

Організаційно агродронна бригада повинна мати транспорт для підвезення води, зарядну станцію або комплект змінних акумуляторів, засоби зв’язку, журнал виконаних робіт та електронні карти маршрутів. Під час виконання 5 запланованих обробок загальний обсяг становить 1250 га-обробок. За проектної продуктивності 14 га/год сумарна тривалість польового внесення становитиме близько 89 год, що можна виконати в стислі агротехнічні строки за рахунок гнучкого планування і роботи у кілька вильотів.

2.8. Очікувана ефективність запропонованої технології

Запропонована технологія має кілька техніко-економічних переваг. По-перше, удосконалений "Компактор-4,0" концентрує передпосівні операції в одному проході: вирівнювання, кришення, розпушення і прикочування. Це особливо важливо для озимої пшениці, оскільки якість насіннєвого ложа

визначає рівномірність сходів, зимостійкість і конкурентність посівів проти бур’янів. По-друге, застосування комбінованої сівалки з контролем висіву дає можливість стабільно дотримуватися глибини загортання насіння і зменшувати пропуски.

По-третє, перенесення обприскування на агродрон зменшує ущільнення ґрунту і втрати площі через технологічні колії. У роки з надмірним зволоженням це може бути вирішальним фактором своєчасного захисту посівів. По-четверте, використання навігації, карт-завдань, NDVI-моніторингу і телеметрії створює інформаційну базу для наступного сезону: можна порівнювати урожайність, якість обробітку, витрати пального та ефективність підживлення.

За умови дотримання строків сівби, якісного передпосівного обробітку і збалансованого живлення проектна урожайність 6,0 т/га є досяжним цільовим показником для господарств Полісся на окультурених ґрунтах. Водночас головними ризиками залишаються кислотність і неоднорідність ґрунтів, перезволоження у весняний період, хвороби листкового апарату в умовах високої вологості та організаційні затримки під час жнив. Саме тому технологія повинна бути гнучкою: строки і норми виконання операцій коригують за фактичним станом поля, а механізований комплекс повинен мати запас продуктивності.

Висновки по розділу

Для площі 250 га в умовах Полісся Житомирської області запропоновано ресурсоощадну технологію вирощування озимої пшениці з плановою урожайністю 6,0 т/га і валовим збором близько 1500 т зерна. Основним елементом підготовки ґрунту до сівби є удосконалений комбінатор "Компактор-4,0", який забезпечує формування вирівняного та ущільненого насіннєвого ложа за один прохід. Технологічна карта включає сучасні машини: John Deere 6R 185, Lemken Rubin/Karat, Väderstad Rapid 400C, Amazone ZA-TS, DJI Agras T50 та CLAAS LEXION 7600. Усі операції обприскування винесено

на агродрон, що зменшує ущільнення ґрунту, покращує доступність поля у вологий період і створює основу для точного землеробства. Роботизація процесів передбачена через GPS/RTK-навігацію, карти завдань, автоматизований контроль висіву, диференційоване внесення добрив, UAV-моніторинг і автоматичні системи комбайна.

РОЗДІЛ 3
УДОСКОНАЛЕННЯ КОМБІНАТОРА «КОМПАКТОР-4,0» У СКЛАДІ КОМПЛЕКСУ МАШИН ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ

3.1. Вихідні передумови та напрями удосконалення комбінованих ґрунтообробних машин

Передпосівний обробіток ґрунту є одним із завершальних і водночас найбільш відповідальних етапів технології вирощування озимої пшениці. Саме на цій операції формується стан посівного шару, від якого залежать рівномірність загортання насіння, контакт насінини з вологим ґрунтом, дружність появи сходів і подальша зимостійкість рослин. Для господарств, що працюють у стислих агротехнічних строках, особливого значення набуває застосування комбінованих агрегатів, здатних за один прохід виконати кілька операцій: подрібнити грудки, вирівняти поверхню, розпушити посівний шар, ущільнити ложе і підготувати поле до роботи сівалки.

Комбінатор «Компактор-4,0» належить до машин, призначених для якісної підготовки легких і середніх ґрунтів після основного обробітку. Його базове компонування містить послідовно встановлені котки, ножові вирівнювачі та розпушувальні лапи. Така схема в цілому відповідає вимогам передпосівної підготовки, проте під час роботи в реальних польових умовах виявляються резерви для зменшення тягового опору, підвищення стабільності глибини ходу робочих органів і поліпшення структури верхнього шару ґрунту.

Основним напрямом удосконалення є заміна частини робочих органів на енергоощадні елементи з більш сприятливою взаємодією з ґрунтом. До таких елементів належать пружні S-подібні стовби з вузькими або стрілчастими наконечниками, а також пруткові котки, які одночасно виконують функції подрібнення, вирівнювання та опори. Перехід від жорстких стовб до пружних дає змогу знизити пікові навантаження на раму й робочий орган, оскільки частина енергії удару по ущільнених грудках і локальних перешкодах поглинається деформацією стовби. Крім того, коливальний рух лапи сприяє

самоочищенню, кращому кришенню ґрунту і зменшенню залипання за підвищеної вологості.

Під час вибору робочих органів для модернізації необхідно враховувати не лише їхню геометрію, а й взаємне розташування в агрегаті. Передній блок має підготувати рівну опорну поверхню для стабільної глибини обробітку. Середній блок повинен забезпечити суцільне розпушування без необроблених смуг і надмірного виносу вологого ґрунту на поверхню. Задній блок завершує процес формуванням дрібногрудкуватого поверхневого шару і більш ущільненого посівного ложа на глибині розміщення насіння.

У сучасних комбінованих ґрунтообробних машинах широкого застосування набули лапи на S-подібних пружних стовбах. Їх робота ґрунтується на поєднанні поступального руху агрегату з пружними коливаннями стовби. При зустрічі з неоднорідністю ґрунту стовба не передає удар у повному обсязі на раму, а тимчасово відхиляється, після чого повертається у вихідне положення. За рахунок цього робочий орган діє м’якше, а агрегат зберігає стійкість руху навіть на полях з нерівномірним агрегатним складом.

Важливою перевагою S-подібних стовб є можливість комплектування їх наконечниками різної ширини. Вузькі наконечники застосовують тоді, коли потрібно розпушити шар із мінімальним переміщенням ґрунту і малим тяговим опором. Стрілчасті наконечники доцільні для суцільного підрізання й інтенсивнішого перемішування верхнього шару. У випадку підготовки поля під озиму пшеницю доцільно поєднати достатню ширину захвату наконечника з помірним кутом входження в ґрунт, щоб забезпечити рівномірний розпушений шар без утворення гребенів або надмірного виносу нижніх вологих частинок на поверхню.

Другим важливим конструкційним елементом є котки. У комбінованих агрегатах вони не обмежуються функцією прикочування, а виконують цілий комплекс дій: подрібнюють грудки, підтримують стабільну глибину ходу машини, частково вирівнюють мікрорельєф і ущільнюють шар, у якому

повинно розміститися насіння. Порівняно з гладкими, кільчастими або важкими кроскільними котками пруткові котки мають простішу конструкцію, меншу масу, кращу самоочисну здатність і нижчий тяговий опір на легких та середніх ґрунтах.

Саме тому для удосконалення комбінатора «Компактор-4,0» приймається конструкційне рішення, за яким розпушувальні лапи на жорстких стовбах замінюються на лапи із S-подібними пружними стовбами, а коток формування насіннєвого ложа виконується прутковим. Такий підхід не потребує повної зміни принципу роботи машини, але дозволяє підвищити адаптивність агрегату до неоднорідного стану поля і зменшити енергоємність передпосівного обробітку.

Таблиця 3.1 – Порівняльна оцінка робочих органів для передпосівного обробітку

Робочий орган	Основна дія на ґрунт	Переваги	Обмеження	Доцільність для удосконалення
Лапа на жорсткій стовбі	Підрізання та переміщення шару	Проста будова, достатня міцність	Підвищений тяговий опір, ударні навантаження, гірше копіювання мікрорельєфу	Доцільно замінити на пружну стовбу
S-подібна пружна стовба	Розпушування з коливальним впливом	Менші пікові навантаження, краща самоочистка, стабільніша робота на неоднорідному ґрунті	Потребує правильного вибору жорсткості та наконечника	Приймається як базовий елемент модернізації
Кроскільний коток	Інтенсивне подрібнення і ущільнення	Добре руйнує грудки на важчих ґрунтах	Більша маса, вищий опір, ризик надмірного ущільнення легких ґрунтів	Доцільно замінити в задньому блоці
Прутковий коток	Подрібнення, вирівнювання, опора і помірне ущільнення	Мала енергоємність, простота, самоочищення, універсальність	На дуже важких пересушених ґрунтах може поступатися важким коткам	Приймається для формування насіннєвого ложа

3.2. Агротехнічні вимоги до передпосівного обробітку під озиму пшеницю

Озима пшениця чутливо реагує на якість підготовки посівного шару, оскільки на початку вегетації рослини мають сформувати розвинену кореневу систему і достатню кількість пагонів для успішної перезимівлі. Для цього насіння повинно бути загорнуте на однакову глибину, а шар ґрунту навколо нього має забезпечувати доступ вологи, повітря і тепла. Якщо поверхня поля хвиляста або грудкувата, сівалка працює нестабільно: частина насіння загортається надто мілко, частина – надмірно глибоко. У результаті сходи з’являються нерівномірно, що ускладнює подальше формування продуктивного стеблостою.

Передпосівний агрегат повинен виконувати обробіток без руйнування нижніх вологих горизонтів. Надмірне розпушування і перемішування призводить до пересихання верхнього шару, особливо у посушливих умовах кінця літа та початку осені. З іншого боку, недостатнє кришення не дає можливості створити щільний контакт насіння з ґрунтом. Тому конструкція комбінатора має забезпечувати диференційований стан шару: знизу – помірно ущільнене ложе, зверху – мульчувальний дрібногрудкуватий шар, здатний зменшувати випаровування вологи.

Для озимої пшениці важливим є формування насіннєвого ложа на глибині, близькій до глибини сівби. У більшості виробничих умов ця глибина становить приблизно 4–6 см, а розпушування передпосівного шару виконують із невеликим запасом, щоб сівальні сошники працювали в однорідному середовищі. Тому задній коток модернізованого комбінатора повинен забезпечувати ущільнювальну дію саме в цій зоні, не створюючи надмірного тиску на глибші горизонти.

Комплекс машин для виробництва озимої пшениці повинен працювати узгоджено: після основного обробітку поле має бути доведене до стану, придатного для сівби, а сівалка повинна отримати рівну поверхню та стабільну щільність ґрунту. У цьому ланцюгу комбінатор виконує роль технологічного

“стабілізатора”, який усуває нерівномірності попередніх операцій і формує остаточні умови для висіву. Саме тому удосконалення «Компактора-4,0» розглядається не як ізольована зміна окремого вузла, а як підвищення ефективності всього комплексу машин.

Вимоги до модернізованої машини можна згрупувати за трьома напрямами: агротехнічні, енергетичні та експлуатаційні. Агротехнічні вимоги пов’язані з якістю ґрунту та стабільністю глибини. Енергетичні вимоги передбачають зменшення тягового опору і питомих витрат палива. Експлуатаційні вимоги охоплюють простоту регулювання, надійність, ремонтопридатність і можливість встановлення нових робочих органів без істотної зміни несучої рами.

Таблиця 3.2 – Основні вимоги до роботи комбінатора під час підготовки поля під озиму пшеницю

Показник	Бажаний технологічний результат	Конструкційний засіб забезпечення
Рівномірність глибини обробітку	Відхилення мають бути мінімальними по ширині захвату і довжині гону	Опорні пруткові котки, шарнірне кріплення секцій, регулювання положення лап
Якість кришення	Переважання дрібних і середніх агрегатів без надмірного пилення	Коливальна дія S-подібних лап, повторне прикочування
Стан насіннєвого ложа	Ущільнений шар на глибині розміщення насіння, зверху – пухкий захисний шар	Прутковий коток формування ложа з підібраним діаметром і навантаженням
Збереження вологи	Мінімальне винесення вологого ґрунту на поверхню	Помірний кут входження лап і відмова від надмірно агресивного перемішування
Енергоощадність	Зменшення тягового опору без втрати якості обробітку	Пружні стовби, пруткові котки, раціональна послідовність робочих органів

3.3. Обґрунтування конструкційно-технологічної схеми вдосконаленого комбінатора

Базова машина «Компактор-4,0» має ширину захвату 4 м і складається з несучої балки, штанг, шарнірно закріплених секцій та набору робочих органів. У типовій секції передбачено передній прутковий коток із ножовою планкою,

два ряди стрілчастих лап на жорстких стовбах, задній прутковий коток із вирівнювальною планкою та коток кроскільного типу. Таке компонування забезпечує багатоступеневий вплив на ґрунт, однак частина елементів може бути замінена без порушення загальної логіки роботи агрегату.

Технологічна послідовність у базовій машині є правильною: спочатку поверхня попередньо ущільнюється і вирівнюється, потім посівний шар розпушується, після чого здійснюється повторне вирівнювання та формування ложа. Тому під час модернізації недоцільно повністю змінювати порядок розташування робочих органів. Раціональніше зберегти перевірену схему, але замінити ті елементи, які створюють зайвий тяговий опір або надмірно ущільнюють ґрунт.

Першим етапом роботи агрегату залишаються слідорозпушувачі, які усувають ущільнені смуги після коліс трактора. Їх наявність особливо важлива для стабільної роботи всієї машини, оскільки ущільнений слід має вищу твердість і гірше піддається подальшому розпушуванню. Після цього передній прутковий коток частково руйнує грудки, вирівнює поверхню і створює опорну базу для секції. Передній ніж-вирівнювач зрізає дрібні гребені та розподіляє ґрунт перед розпушувальними лапами.

У центральній частині машини запропоновано встановити два ряди стрілчастих лап на S-подібних пружних стовбах. Збереження дворядної схеми важливе з погляду суцільності обробітку: лапи другого ряду перекривають проміжки між лапами першого ряду, а навантаження на ґрунт розподіляється рівномірніше. У порівнянні з жорсткими стовбами пружні стовби менш різко реагують на локальні перешкоди, зменшують ривки тягового зусилля та поліпшують кришення ґрунту в зоні дії наконечника.

Після проходу лап поверхня поля частково втрачає вирівняність, тому задній прутковий коток і ніж-вирівнювач залишаються необхідними. Вони руйнують грудки, що піднялися після розпушування, та формують більш рівну поверхню для остаточного ущільнення. Завершальним робочим органом у вдосконаленій схемі приймається прутковий коток насіннєвого ложа. Він

замінює кроскільний коток, оскільки для легких і середніх ґрунтів під озиму пшеницю важливішим є помірне ущільнення на заданій глибині, а не інтенсивне важке прикочування.

Отже, запропоноване удосконалення не руйнує базову кінематичну і компонувальну структуру «Компактора-4,0», а переводить машину на енергоощадніший режим взаємодії з ґрунтом. Такий підхід полегшує впровадження модернізації у виробничих умовах, оскільки зберігаються основна рама, секційність, принцип регулювання глибини і більшість вузлів кріплення.



Рис. 3.1. Технологічна послідовність роботи вдосконаленого комбінатора.



Рис. 3.2. Узагальнена конструкційна схема модернізованого «Компактора-4,0»

Таблиця 3.3 – Обґрунтування послідовності розміщення робочих органів

Позиція в агрегаті	Робочий орган	Функція в технологічному процесі	Очікуваний ефект від модернізації
1	Слідорозпушувачі	Розпушування ущільнених слідів трактора	Вирівнювання умов роботи по всій ширині захвату
2	Передній прутковий коток	Попереднє подрібнення грудок і опора секції	Стабілізація глибини подальшого обробітку
3	Передній ніж-вирівнювач	Зрізання мікрогребенів і розподіл ґрунту	Поліпшення умов входження лап у ґрунт
4	Два ряди S-подібних лап	Суцільне розпушування та підрізання посівного шару	Зменшення тягового опору і ударних навантажень
5–6	Задній коток і ніж	Повторне кришення та вирівнювання після лап	Підготовка поверхні до остаточного ущільнення
7	Прутковий коток насіннєвого ложа	Формування ущільненого шару на глибині сівби	Рівномірніше загортання насіння озимої пшениці

3.4. Розрахунок і вибір параметрів розпушувальних робочих органів

Розпушувальні лапи на S-подібних стовбах серійно виготовляються багатьма підприємствами, тому під час модернізації доцільно не розробляти стовбу заново, а підібрати типорозмір, який відповідає компонувальним можливостям «Компактора-4,0». Основним розрахунковим завданням є перевірка, чи забезпечить прийнята ширина наконечника суцільний обробіток за наявної кількості лап і ширини захвату машини.

За вихідну умову приймається збереження двох рядів лап, як у базовому агрегаті. Такий підхід забезпечує технологічну наступність і дозволяє використати існуючі поперечні бруси або близькі до них місця кріплення. Загальна кількість лап приймається n = 16 шт., ширина захвату агрегату B = 4000 мм. Для кожної лапи приймається стрілчастий наконечник шириною b = 120 мм, який забезпечує достатнє перекриття зон дії без надмірного зростання тягового опору.

Для оцінки ширини зони деформації ґрунту використовується залежність, яка пов’язує геометрію наконечника, кут входження лапи, кут тертя ґрунту та напрям поширення деформації. Розрахункова ширина зони деформації b1 визначається за формулою:

$$b_1 = b + (2 \cdot a \cdot \operatorname{tg}(\theta/2)) / \cos(\varphi + \alpha) \qquad (3.1)$$

де b – ширина захвату наконечника лапи, мм; a – розрахунковий параметр глибини дії робочого органу; α – кут входження лапи в ґрунт; φ – кут тертя ґрунту; θ/2 – кут нахилу межі деформованої зони. Для розрахунку приймаємо φ = 20°, θ = 60°, α = 15°, b = 120 мм.

Підставивши прийняті значення, отримуємо розрахункову ширину зони деформації:

$$b_1 = 120 + (2 \cdot 12 \cdot \operatorname{tg}(60/2)) / \cos(20 + 15) \approx 145 \text{ мм}$$

Отже, одна лапа формує зону деформації, достатню для перекриття із сусідніми робочими органами за умови правильного поперечного розміщення. Для суцільного обробітку необхідно, щоб фактична відстань між лапами A відповідала нерівності:

$$2b_1 \geq A \geq b_1 \quad (3.2)$$

З урахуванням b1 = 145 мм допустимий інтервал між лапами становить:

$$290 \text{ мм} \geq A \geq 145 \text{ мм}$$

Фактична відстань між лапами за умови збереження 16 робочих органів визначається за формулою:

$$A_b = B / n \quad (3.3)$$

$$A_b = 4000 / 16 = 250 \text{ мм}$$

Під час вибору остаточного типорозміру S-подібної стовби необхідно враховувати висоту рами, вільний прохід рослинних решток і можливість регулювання глибини. Для передпосівного обробітку під озиму пшеницю доцільно застосовувати стовби висотою близько 450–600 мм і товщиною 8–10 мм. Така стовба має достатню пружність для коливальної роботи, але зберігає міцність під час зустрічі з ущільненими грудками або окремими перешкодами.

Кут входження наконечника доцільно приймати помірним. Надто малий кут погіршує заглиблення лапи та стабільність ходу, а надто великий – збільшує перемішування і тяговий опір. Прийняте значення α = 15° є компромісним для модернізованого комбінатора, оскільки агрегат працює на попередньо зораному і частково підготовленому ґрунті.

Таблиця 3.4 – Прийняті параметри розпушувальних органів модернізованого комбінатора

Параметр	Позначення	Прийняте значення	Обґрунтування
Ширина захвату агрегату	B	4000 мм	Відповідає базовій машині «Компактор-4,0»
Кількість лап	n	16 шт.	Зберігається базова дворядна схема
Відстань між лапами	A_b	250 мм	Забезпечує перекриття зон деформації
Ширина наконечника	b	120 мм	Достатня для суцільного підрізання без надмірного опору
Розрахункова зона деформації	b_1	145 мм	Визначена за умовами поширення деформації ґрунту
Кут входження лапи	α	15°	Компроміс між заглибленням і енергоощадністю
Кількість рядів	–	2	Дає змогу забезпечити суцільний обробіток і розосередити навантаження

3.5. Розрахунок параметрів пруткового котка формування насіннєвого ложа

Завершальний коток у модернізованій схемі повинен формувати ущільнене насіннєве ложе на глибині, близькій до глибини загортання насіння озимої пшениці. Для цього коток має мати достатній діаметр і масу, але не повинен створювати надмірного ущільнення нижчих шарів. Пруткова конструкція є доцільною, оскільки забезпечує помірне прикочування, дроблення грудок і одночасно не забивається ґрунтом так інтенсивно, як суцільні або кільчасті котки.

Діаметр котка визначає глибину його взаємодії з ґрунтом і характер кочення. Занадто малий діаметр збільшує занурення і опір, а надмірно великий ускладнює конструкцію, підвищує масу та габарити. Для попереднього визначення діаметра використовується залежність:

$$D = \sqrt{(G_r / (B \cdot \mu^3 \cdot g))} \quad (3.4)$$

де D – розрахунковий діаметр котка, см; G_r – вертикальне навантаження на вісь котка, Н; B – ширина захвату, см; μ – коефіцієнт опору коченню; g – коефіцієнт опору ґрунту зминанню, Н/см³. Для обробленого поля приймаємо μ = 0,2, g = 3 Н/см³, B = 400 см.

Вертикальне навантаження на вісь котка визначається з урахуванням маси агрегату та розподілу навантаження між трьома рядами котків:

$$G_r = K_d \cdot K_j \cdot G_m / 3 \quad (3.5)$$

де K_d – коефіцієнт динамічних навантажень; K_j – коефіцієнт, що враховує вплив інших робочих органів; G_m – вага агрегату. Для консервативного розрахунку приймаємо K_d = 1,5, K_j = 0,9, G_m = 25000 Н.

$$G_r = (1{,}5 \cdot 0{,}9 \cdot 25000) / 3 = 11250 \text{ Н}$$

Після підстановки отриманого навантаження в залежність для діаметра маємо:

$$D = \sqrt{(11250 / (400 \cdot 0{,}2^3 \cdot 3))} \approx 34{,}2 \text{ см}$$

Розрахунковий діаметр становить близько 342 мм. З метою уніфікації з наявними вузлами, підвищення прохідності і забезпечення достатнього ресурсу

приймаємо середній діаметр робочої поверхні котка D = 380 мм. Таке збільшення є технологічно виправданим: коток краще перекочується через грудки, менше занурюється в пухкий шар і стабільніше підтримує раму агрегату.

За прийнятим діаметром можна оцінити глибину дії котка, тобто глибину, на якій формується ущільнене ложе. Для цього використовується залежність:

$$h = 1{,}5 \cdot \sqrt[3]{(G_r^2 / (B^2 \cdot \mu^2 \cdot D))} \quad (3.6)$$

Підставляючи значення G_r = 11250 Н, B = 400 см, μ = 0,2, D = 38 см, отримуємо:

$$h = 1{,}5 \cdot \sqrt[3]{(11250^2 / (400^2 \cdot 0{,}2^2 \cdot 38))} \approx 5{,}92 \text{ см}$$

Отримана глибина h ≈ 5,9 см відповідає вимогам формування насіннєвого ложа для озимої пшениці. Це означає, що прийнятий коток здатний ущільнювати саме той шар, у якому буде розміщуватися насіння, не створюючи надмірного тиску на глибші горизонти.

Конструкційно прутковий коток доцільно виконати з 8–10 прутків, розташованих по колу. Діаметр прутків приймається в межах 20–40 мм залежно від наявного сортаменту металопрокату і бажаної інтенсивності подрібнення. Для універсального використання на легких і середніх ґрунтах раціональним є застосування круглих прутків діаметром 20–25 мм. Вони забезпечують достатню міцність, не утворюють суцільної ущільнювальної поверхні та добре самоочищуються.

Прутки можуть бути встановлені паралельно осі або з невеликим кутом навивки. Наявність кута покращує самоочищення і зменшує ударне навантаження, оскільки контакт з ґрунтом відбувається поступово. Водночас надмірна спіральність ускладнює виготовлення, тому для модернізації доцільно застосувати просту конструкцію з помірним кутом або прямолінійними прутками, що забезпечить ремонтопридатність у звичайних майстернях.

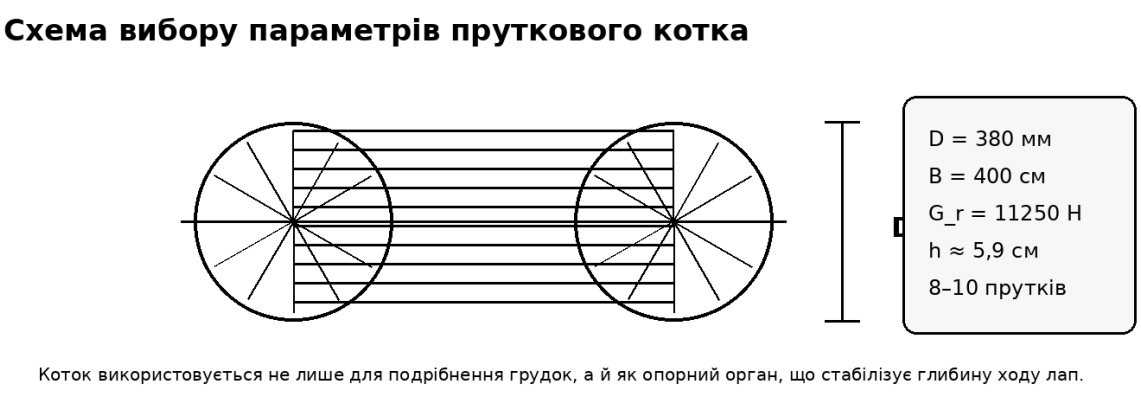


Рис. 3.3. Схема вибору параметрів пруткового котка.

Таблиця 3.5 – Прийняті параметри пруткового котка насіннєвого ложа

Параметр	Прийняте значення	Пояснення
Тип котка	Прутковий	Енергоощадна конструкція з доброю самоочисною здатністю
Розрахунковий діаметр	342 мм	Визначений за навантаженням і опором ґрунту
Прийнятий діаметр	380 мм	Прийнятий з урахуванням уніфікації, прохідності й стійкості руху
Глибина формування ложа	≈ 5,9 см	Відповідає глибині розміщення насіння озимої пшениці
Кількість прутків	8–10 шт.	Забезпечує достатню частоту контакту з ґрунтом
Діаметр прутка	20–25 мм	Раціональний для легких і середніх ґрунтів
Функціональне призначення	Опора, кришення, ущільнення	Поєднання декількох операцій за один прохід

3.6. Перевірка довговічності підшипників котка

Підшипникові вузли котка працюють у складних умовах: на них діє змінне радіальне навантаження від маси агрегату, опору ґрунту, ударів по грудках і нерівностей поля. Тому навіть за відносно невеликої частоти обертання необхідно перевірити, чи забезпечує вибраний підшипник достатню довговічність. Для модернізованого котка приймається радіальний однорядний кульковий підшипник 306, динамічна вантажопідйомність якого становить C = 22 кН.

Номінальна довговічність підшипника в мільйонах обертів визначається залежністю:

$$L = (C / P)^p \qquad (3.7)$$

де C – динамічна вантажопідйомність підшипника, кН; P – еквівалентне динамічне навантаження, кН; p – показник степеня, для кулькових підшипників p = 3.

Оскільки навантаження G_r = 11250 Н розподіляється між чотирма підшипниковими вузлами, розрахункове навантаження на один підшипник становить:

$$P = G_r / 4 = 11250 / 4 = 2812{,}5 \text{ Н} = 2{,}8125 \text{ кН}$$

Тоді довговічність у мільйонах обертів дорівнює:

$$L = (22 / 2{,}8125)^3 \approx 476 \text{ млн об.}$$

Для переходу до довговічності в годинах необхідно визначити частоту обертання котка. Вона залежить від робочої швидкості руху агрегату V і діаметра котка D:

$$n = 60V / (\pi D) \qquad (3.8)$$

За робочої швидкості V = 11,4 км/год = 3,17 м/с і D = 0,38 м частота обертання становить:

$$n = (60 \cdot 3{,}17) / (3{,}14 \cdot 0{,}38) \approx 160 \text{ об/хв}$$

Довговічність підшипника в годинах визначається за формулою:

$$L_h = (10^6 \cdot L) / (60n) \qquad (3.9)$$

$$L_h = (10^6 \cdot 476) / (60 \cdot 160) \approx 49\,583\,000 \text{ год}$$

Одержане значення істотно перевищує фактичне сезонне навантаження, яке для комбінованих ґрунтообробних машин зазвичай обмежується періодом передпосівної підготовки. Навіть якщо врахувати погіршення умов роботи, пил, вібрацію, забруднення мастила та нерівномірність навантаження, запас довговічності підшипникового вузла є достатнім. Отже, підшипник 306 може бути прийнятий для конструкції котка без збільшення типорозміру.

Для забезпечення фактичної надійності розрахунковий запас повинен бути підтриманий правильним конструкційним виконанням вузла. Необхідно передбачити захист від потрапляння пилу і рослинних решток, можливість періодичного змащування, надійне фіксування підшипника на валу і відсутність перекосів під час монтажу секцій. Особливо важливо, щоб після заміни котка

не виникало осьового підтискання підшипника, оскільки воно може зменшити ресурс навіть за невеликого радіального навантаження.

3.7. Розрахунок міцності різьбового кріплення котка

Коток кріпиться до секції за допомогою болтових з’єднань, тому необхідно перевірити міцність болтів на зріз. Згідно з прийнятою схемою з кожного боку котка встановлюється по два болти М10. Загальна кількість болтів, які сприймають радіальне навантаження, становить вісім. Розрахункове навантаження на один болт визначається як частка від вертикального навантаження на коток:

$$P_b = G_r / 8 = 11250 / 8 = 1406{,}25 \text{ Н}$$

Умова міцності тіла болта на зріз записується так:

$$P_b \le (\pi \cdot d_1^2 / 4) \cdot [\tau]_{зр} \qquad (3.10)$$

де d_1 – внутрішній діаметр різьби болта; $[\tau]_{зр}$ – допустиме напруження матеріалу на зріз. Допустиме напруження приймається через межу текучості матеріалу болта:

$$[\tau]_{зр} = 0{,}3 \cdot \sigma_t / [n_t] \qquad (3.11)$$

Для сталі 20 приймаємо σ_t = 245 Н/мм², необхідний коефіцієнт запасу міцності $[n_t] = 2$. Тоді:

$$[\tau]_{зр} = (0{,}3 \cdot 245) / 2 = 36{,}75 \text{ Н/мм}^2$$

Мінімально допустимий діаметр болта визначається з перетвореної умови міцності:

$$d_б = \sqrt{(4P_b / (\pi \cdot [\tau]_{зр}))} \qquad (3.12)$$

$$d_б = \sqrt{(4 \cdot 1406{,}25 / (3{,}14 \cdot 36{,}75))} \approx 7 \text{ мм}$$

Отриманий мінімальний діаметр становить близько 7 мм, тоді як у конструкції передбачено болти М10. Отже, різьбове кріплення має достатній запас міцності за умовою зрізу і не потребує підсилення. Разом з тим під час виготовлення та експлуатації необхідно контролювати якість затягування, застосовувати пружинні шайби або інші засоби проти самовідгвинчування, а також періодично перевіряти стан отворів у кронштейнах.

Оскільки коток працює з вібраціями і змінним навантаженням, на практиці небезпечним може бути не статичне руйнування болта, а поступове послаблення з’єднання. Тому в модернізованій конструкції доцільно передбачити технологічні рекомендації з обслуговування: перевірка затягування після перших годин роботи, огляд з’єднань після переїздів дорогами і очищення вузлів від налиплого ґрунту. Це дозволить реалізувати розрахунковий запас міцності в реальних польових умовах.

3.8. Технологічна оцінка запропонованого удосконалення

Запропонована модернізація має комплексний характер, оскільки впливає одразу на кілька показників роботи машини. Заміна жорстких стовб на S-подібні пружні зменшує різкість взаємодії лап із ґрунтом, а заміна кроскільного котка на прутковий знижує надлишкове ущільнення і масу заднього блоку. У сукупності це дає можливість підвищити енергоощадність агрегату без скорочення кількості технологічних операцій за один прохід.

Пружні лапи створюють більш рівномірний тяговий режим. Під час входження в ущільнену грудку або ділянку з більшою твердістю лапа частково відхиляється, після чого повертається у робоче положення. Внаслідок цього навантаження на трактор і раму агрегату стає менш імпульсним, а ризик поломки або деформації стовби зменшується. Для передпосівного обробітку, де важлива не глибока оранка, а якісне доведення посівного шару, такий режим є технологічно доцільним.

Прутковий коток насіннєвого ложа забезпечує більш м’яке ущільнення порівняно з важкими котками. Він не створює суцільного тиску по всій поверхні, а діє окремими прутками, завдяки чому верхній шар залишається структурним і менш схильним до утворення кірки. Для озимої пшениці це важливо, оскільки після сівби поле повинно зберігати вологу, але не перешкоджати виходу сходів.

З експлуатаційної точки зору модернізація є зручною, оскільки передбачає заміну типових вузлів, а не повне переобладнання машини. S-

подібні стовби і пруткові котки належать до поширених конструкцій, тому їх виготовлення або придбання не створює значних організаційних труднощів. Крім того, зберігається можливість регулювання глибини ходу, транспортування агрегату і використання його з тракторами відповідного тягового класу.

Особливу увагу слід приділити налаштуванню агрегату в полі. Навіть правильно розрахована конструкція не забезпечить належної якості, якщо секції виставлені нерівномірно, ножі-вирівнювачі занадто заглиблені, а котки перевантажені. Тому після модернізації необхідно виконати пробний прохід, оцінити глибину розпушування, рівність поверхні та стан насіннєвого ложа. За потреби регулюють положення лап, кут дії вирівнювачів і навантаження на котки.

Очікуваний результат удосконалення полягає у підвищенні якості передпосівної підготовки під озиму пшеницю, зменшенні енергоємності процесу і поліпшенні умов роботи сівалки. Рівномірніше насіннєве ложе сприяє стабільній глибині загортання насіння, а дрібногрудкуватий поверхневий шар зменшує втрати вологи і захищає поле від утворення кірки. У виробничих умовах це може позитивно вплинути на дружність сходів і вирівняність посіву.

Таблиця 3.6 – Очікуваний вплив модернізації на роботу агрегату

Елемент удосконалення	Що змінюється в роботі машини	Практичне значення для виробництва озимої пшениці
S-подібні пружні стовби замість жорстких	Зменшуються ударні навантаження і різкість зміни тягового опору	Стабільніша робота агрегату, менший ризик пошкоджень, якісніше кришення
Стрілчасті наконечники шириною 120 мм	Забезпечується суцільне підрізання посівного шару	Поле готується рівномірно по всій ширині захвату
Збереження дворядної схеми лап	Перекриваються міжрядні проміжки, навантаження розподіляється поступово	Не потрібна радикальна переробка рами
Прутковий коток насіннєвого ложа	Забезпечується помірне ущільнення на глибині близько 6 см	Покращується контакт насіння з ґрунтом і робота сівалки
Збереження переднього та заднього вирівнювання	Поверхня поля вирівнюється до і після дії лап	Зменшуються коливання глибини сівби

Висновки до розділу

У результаті аналізу конструкцій робочих органів встановлено, що для передпосівного обробітку легких і середніх ґрунтів під озиму пшеницю доцільно застосовувати енергоощадні елементи: S-подібні пружні стовби та пруткові котки.

Запропоновано зберегти загальну конструкційно-технологічну схему комбінатора «Компактор-4,0», але замінити два ряди лап на жорстких стовбах лапами на пружних S-подібних стовбах, а коток кроскільного типу – прутковим котком формування насіннєвого ложа.

Розрахунок розміщення лап показав, що за ширини захвату агрегату B = 4000 мм, кількості лап n = 16 і ширини наконечника b = 120 мм фактична відстань між лапами A_b = 250 мм відповідає умові суцільного обробітку 290 мм ≥ A ≥ 145 мм.

Для пруткового котка насіннєвого ложа визначено розрахунковий діаметр 342 мм; з урахуванням уніфікації та стійкості роботи прийнято D = 380 мм. За такого діаметра глибина формування ущільненого ложа становить близько 5,9 см, що відповідає вимогам сівби озимої пшениці.

Перевірка підшипника 306 засвідчила значний запас довговічності за прийнятих навантажень і робочої швидкості агрегату. Розрахунок болтів М10 на зріз показав, що мінімально необхідний діаметр становить близько 7 мм, тому прийняте різьбове кріплення має достатню міцність.

Запропонована модернізація покращує адаптацію комбінатора до неоднорідних польових умов, сприяє зменшенню тягового опору, стабілізує глибину обробітку та підвищує якість формування насіннєвого ложа в технології виробництва озимої пшениці.

РОЗДІЛ 4
ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Загальні положення та умови безпечного виконання робіт

Охорона праці у технології вирощування озимої пшениці є складовою проектування всього машинно-тракторного комплексу. У роботі розглядається виробництво культури з використанням трактора, удосконаленого комбінатора “Компактор-4,0”, сівалки, зернозбирального комбайна, транспортних засобів і агродрона для обприскування. Безпечність такої технології залежить від технічного стану машин, кваліфікації працівників, організації руху агрегатів полем, дотримання вимог щодо роботи з пестицидами та правил експлуатації безпілотних повітряних суден.

Нормативну основу розділу становлять Закон України “Про охорону праці”, Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві, ДСН 3.3.6.037-99 щодо виробничого шуму, ДСП 8.8.1.2.001-98 щодо пестицидів та вимоги, пов’язані з використанням БПЛА. Умови Полісся Житомирської області додатково зумовлюють потребу враховувати підвищену вологість ґрунтів, нерівність полів, сезонні строки робіт і можливість роботи агрегатів на ділянках із неоднорідною несучою здатністю ґрунту.

Таблиця 4.1 – Небезпечні та шкідливі фактори під час вирощування озимої пшениці

Етап робіт	Техніка	Небезпечний фактор	Можливі наслідки	Основні заходи безпеки
Підготовка ґрунту	Трактор + “Компактор-4,0”	рухомі лапи, ножі, котки, гідравліка, шум	травмування, перевтома, підвищене шумове навантаження	огляд, зупинка двигуна перед регулюванням, справні кожухи
Сівба	Трактор + зернова сівалка	зчіпний пристрій, маркери, пил, нерівність поля	затискання, падіння, подразнення дихальних шляхів	сигнали під час агрегатування, респіратор у пилу, контроль швидкості
Догляд за посівами	Агродрон-обприскувач	пестициди, гвинти, акумулятори, знос крапель	отруєння, порізи, забруднення суміжних ділянок	ЗІЗ, буферна зона, контроль вітру, навчений оператор
Збирання	Зернозбиральний комбайн	пил, шум, пожежна небезпека, обертові вузли	пожежа, травмування, професійні захворювання	вогнегасники, очищення машини, закриті кожухи
ТО і ремонт	Майстерня, польовий ремонт	підняті секції, гострі кромки, різьбові з’єднання	удари, порізи, падіння вузлів	підставки, блокування гідросистеми, справний інструмент

4.2. Аналіз ризиків під час експлуатації комплексу машин

Найбільш небезпечними у запропонованій технології є операції, де працівник перебуває поруч із рухомими або енергетично навантаженими вузлами. Для комбінатора “Компактор-4,0” такими вузлами є пружні стовби зі стрілчастими лапами, ножі-вирівнювачі, пруткові котки, підшипникові вузли та гідравлічні механізми переведення секцій. При забиванні робочих органів рослинними рештками або вологим ґрунтом забороняється очищати їх рукою без повної зупинки агрегату.

Використання агродрона зменшує кількість проходів наземної техніки по полю, знижує ущільнення ґрунту й скорочує контакт механізатора з робочим розчином. Разом з тим така операція потребує окремої системи безпеки: розмітки майданчика, перевірки маршруту польоту, контролю швидкості вітру, справності форсунок, акумуляторів і відсутності сторонніх осіб у робочій зоні.

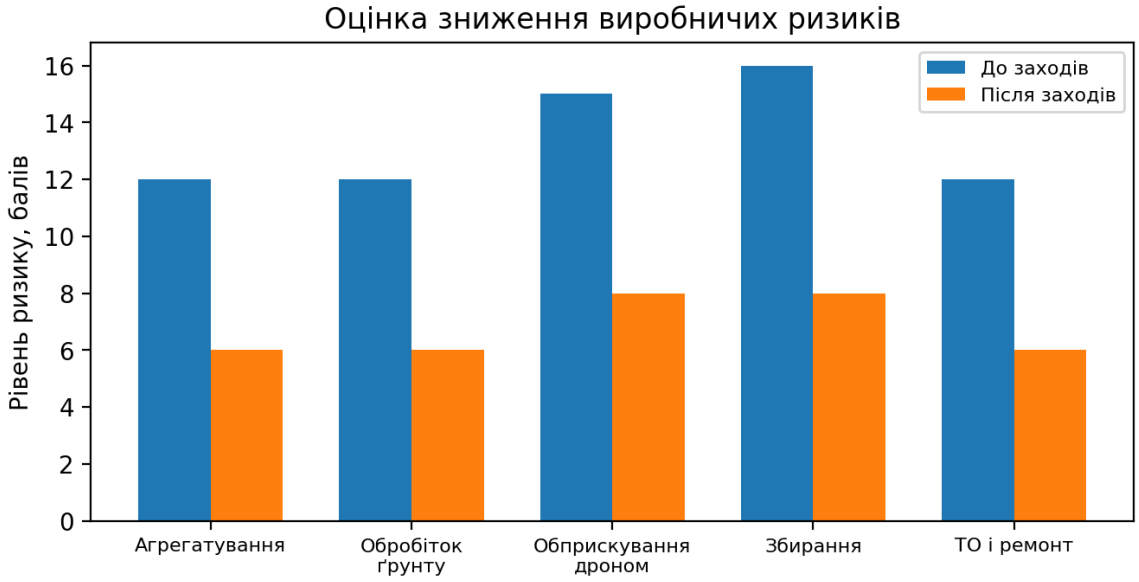


Рис. 4.1. Орієнтовне зниження виробничих ризиків після впровадження заходів безпеки

З рисунка 4.1 видно, що найбільший початковий ризик пов’язаний зі збиранням і хімічним захистом посівів. Після впровадження технічних, організаційних і санітарно-гігієнічних заходів ризик зменшується приблизно у 1,8–2,0 раза, але не зникає повністю, тому контроль безпеки має здійснюватися протягом усього технологічного циклу.

4.3. Заходи безпеки під час роботи з комбінатором та агродроном

Перед початком зміни механізатор перевіряє справність трактора, зчіпки, гідрорукавів, освітлення, гальм, сигнальних знаків, болтових з’єднань і робочих органів комбінатора. Агрегатування виконують на рівному майданчику. Працівник, який допомагає під’єднанню, повинен перебувати збоку від зчіпного пристрою, а не між трактором і машиною. Регулювання глибини ходу, заміну лап, підтягування кріплень і очищення котків дозволено виконувати тільки після зупинки двигуна, опускання агрегату на землю та зняття тиску в гідросистемі.

Під час руху полем швидкість вибирають відповідно до рельєфу, вологості та стану ґрунту. На поворотах, розворотних смугах і під час переїзду через нерівності швидкість знижують. Забороняється перевозити людей на рамі комбінатора або на робочих органах. Для зменшення втоми оператора доцільно використовувати системи паралельного водіння або автопілотування, які забезпечують рівномірність проходів і скорочують кількість зайвих маневрів.

Під час обприскування агродроном працівники використовують захисний одяг, рукавиці, окуляри або щиток та респіратор. Майданчик заправлення обладнують піддоном або іншим засобом для недопущення потрапляння робочого розчину в ґрунт. Перед запуском перевіряють гвинти, акумулятори, канал зв’язку, маршрут польоту та аварійне повернення. Підхід до апарата дозволений лише після повної зупинки гвинтів і вимкнення живлення.

4.4. Розрахунок шумового навантаження на оператора

Для кількісної оцінки умов праці проведемо розрахунок еквівалентного рівня шуму за восьмигодинну зміну. Еквівалентний рівень шуму визначаємо за залежністю:

$$L_{екв} = 10 \cdot \lg \left[\left(\Sigma\, t_i \cdot 10^{\wedge}(0{,}1 \cdot L_i) \right) / T \right], \qquad (4.1)$$

де L_i – рівень шуму під час і-ї операції, дБА; t_i – тривалість операції, год; T – загальна тривалість зміни, год.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані для розрахунку шумового навантаження

Операція	Тривалість, год	Рівень шуму, дБА	Умови роботи
Трактор з комбінатором	2,5	84	передпосівний обробіток
Транспортні переїзди	1,0	78	розвороти та переїзди
Підготовка агродрона	1,0	72	майданчик запуску
Допоміжні операції	3,5	65	огляд, очікування, документація

Після підстановки даних одержуємо:

$L_{екв} = 10 \cdot \lg [(2{,}5 \cdot 10^{8{,}4} + 1{,}0 \cdot 10^{7{,}8} + 1{,}0 \cdot 10^{7{,}2} + 3{,}5 \cdot 10^{6{,}5}) / 8] = 79{,}5$ дБА.

Отримане значення 79,5 дБА не перевищує орієнтовно допустимого для восьмигодинної зміни рівня 80 дБА, але запас є малим. Тому при тривалішому передпосівному обробітку, роботі з відкритими вікнами кабіни або несправній шумоізоляції необхідно застосовувати протишумові навушники чи вкладиші, підтримувати справність двигуна та підшипникових вузлів і чергувати операції протягом зміни.

Висновки по розділу

У розділі визначено основні небезпечні та шкідливі фактори під час вирощування озимої пшениці з використанням удосконаленого комбінатора “Компактор-4,0” і агродрона. Встановлено, що головними ризиками є рухомі робочі органи ґрунтообробної машини, гідравлічні системи, шум, пил, пожежна небезпека під час збирання та хімічний фактор при захисті рослин. Запропоновані заходи безпеки передбачають технічний огляд машин, блокування небезпечних вузлів, безпечне агрегатування, застосування засобів індивідуального захисту, навчання персоналу та контроль робочої зони під час польотів агродрона.

Проведений розрахунок показав, що еквівалентний рівень шуму оператора становить 79,5 дБА. Це відповідає допустимому рівню для зміни, однак потребує постійного контролю. Упровадження паралельного водіння, телеметрії та агродронів підвищує безпеку праці, оскільки зменшує втому механізатора, кількість зайвих проходів техніки й прямий контакт персоналу з пестицидами.

РОЗДІЛ 5
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ

5.1. Мета та методика економічної оцінки

Техніко-економічне обґрунтування виконано для встановлення доцільності впровадження проектних рішень у комплексі машин для виробництва озимої пшениці в умовах зони Полісся Житомирської області. У попередніх розділах запропоновано технологію вирощування культури на площі 250 га, застосування сучасних енергетичних засобів, агродрона для обприскування та вдосконалення комбінатора “Компактор-4,0”. Економічна оцінка має показати, чи компенсуються додаткові витрати на модернізацію машини за рахунок зменшення експлуатаційних витрат і підвищення якості підготовки насіннєвого ложа.

Базовим варіантом прийнято традиційний комплекс машин із передпосівним обробітком комбінатором у серійному виконанні, наземним обприскуванням та звичайним контролем проходів агрегатів. Проектний варіант передбачає використання удосконаленого “Компактора-4,0” із пружними S-подібними розпушувальними лапами та прутковим котком формування насіннєвого ложа, точніше дотримання технологічних проходів і виконання операцій захисту рослин агродроном.

Розрахунок виконано за порівняльною методикою: визначено витрати на 1 га у базовому та проектному варіантах, річну економію для площі 250 га, можливий приріст виручки від підвищення урожайності, чистий річний економічний ефект, строк окупності та чутливість результату до зміни урожайності. Оскільки ціни на пальне, зерно й запасні частини змінюються, наведені показники мають розрахунковий характер і можуть уточнюватися перед практичним упровадженням.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для техніко-економічного розрахунку

Показник	Одиниця	Значення
Площа вирощування озимої пшениці	га	250
Ціна реалізації пшениці, прийнята для розрахунку	грн/т	10 000
Середня довідкова ціна дизельного палива	грн/л	82,76
Оплата праці механізатора з нарахуваннями	грн/год	120
Капітальні витрати на модернізацію “Компактора-4,0”	грн	180 000
Додаткові сезонні витрати на обслуговування нових вузлів	грн/рік	18 000

Для ринкових показників прийнято орієнтовні значення, близькі до поточного діапазону українського ринку: закупівельні ціни на пшеницю у портових напрямах перебувають близько 9,9-10,1 тис. грн/т, а довідкова середня ціна дизельного пального на АЗС України перевищує 80 грн/л. У розрахунках застосовано округлену ціну зерна 10000 грн/т і довідкову ціну пального 82,76 грн/л.

5.2. Обґрунтування витрат на проектні рішення

Основні капітальні витрати пов’язані не з придбанням нового ґрунтообробного агрегату, а з модернізацією наявного комбінатора. Такий підхід є економічно доцільним для господарства середнього розміру, оскільки дає змогу підвищити якість передпосівного обробітку без повної заміни машини. До складу витрат включено придбання комплекту пружних стовб із наконечниками, виготовлення або придбання пруткового котка, підшипникових вузлів, кронштейнів, метизів, а також оплату монтажних і регулювальних робіт.

Таблиця 5.2 – Орієнтовна структура капітальних витрат на вдосконалення комбінатора

Стаття витрат	Кількість / склад	Вартість, грн
Комплект S-подібних пружних стовб із розпушувальними лапами	16 шт.	68 000
Прутковий коток формування насіннєвого ложа з валом	1 комплект	54 000
Підшипникові вузли, кронштейни, метизи, захисні елементи	комплект	24 000
Зварювальні, слюсарні та монтажні роботи	комплекс	26 000
Налагодження, фарбування, контрольний запуск	комплекс	8 000
Разом	-	180 000

Роботизація окремих процесів у розрахунку враховується переважно через зменшення технологічних втрат і підвищення точності виконання операцій. Агродрон для внесення засобів захисту рослин доцільно використовувати або як власну машину, або за сервісною моделлю. Для господарства з площею 250 га сервісна модель є більш гнучкою, тому в капітальні витрати розділу не включено повну вартість придбання БПЛА. Витрати на обприскування враховано у складі експлуатаційних витрат проектного варіанта.

Технічні рішення щодо агродрона та систем точного землеробства зменшують перекриття, ущільнення ґрунту і технологічні втрати. Для агродронів типу DJI Agras T50 характерні значна корисна маса та високий робочий потік рідини, що дає змогу виконувати обприскування у стислі строки.

5.3. Порівняння експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати у базовому та проектному варіантах розраховано укрупнено за трьома основними складовими: пальне, оплата праці та витрати на технічне обслуговування, ремонт і амортизацію машин. Найбільшу питому вагу у механізованих операціях займає паливо, тому навіть помірне зниження витрати дизельного пального суттєво впливає на собівартість робіт.

Таблиця 5.3 – Порівняння експлуатаційних показників базового та проектного варіантів

Показник	Одиниця	Базовий	Проектний	Економія / приріст
Витрата дизельного палива	л/га	78,0	71,5	6,5
Затрати праці	люд.-год/га	5,8	5,0	0,8
ТО, ремонт і амортизація	грн/га	2250	2170	80
Експлуатаційні витрати	грн/га	9 401	8 687	714
Урожайність	т/га	5,00	5,15	0,15
Витрати механізованих робіт на 1 т зерна	грн/т	1 880	1 687	193

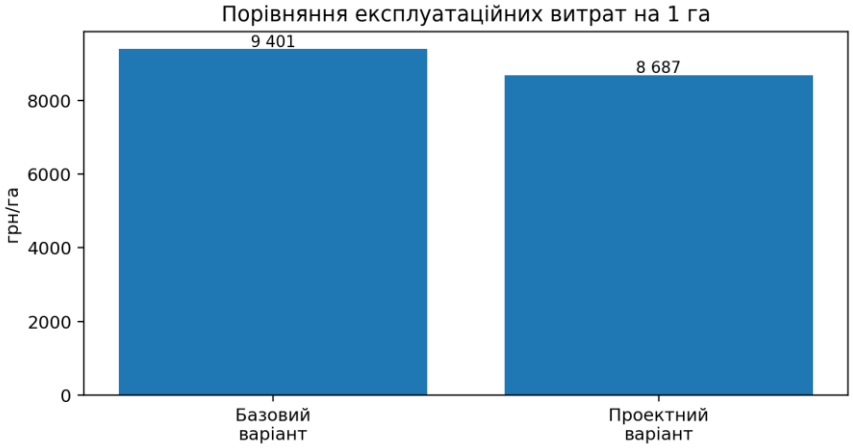


Рис. 5.1. Порівняння експлуатаційних витрат базового та проектного варіантів.

З таблиці 5.3 та рисунка 5.1 видно, що проектний варіант зменшує витрати на механізовані операції приблизно на 715 грн/га. Для площі 250 га це становить близько 178,8 тис. грн прямої річної економії. Зниження досягається завдяки меншому тяговому опору робочих органів, якіснішому ущільненню верхнього шару ґрунту, зменшенню перекриттів і підвищенню продуктивності робіт.

5.4. Розрахунок річного економічного ефекту

Річний економічний ефект від упровадження проектних рішень визначаємо як суму прямої економії експлуатаційних витрат і додаткової виручки від приросту урожайності за мінусом додаткових сезонних витрат на обслуговування модернізованих вузлів:

$$E_р = (С_б - С_п) \cdot А + \Delta Y \cdot А \cdot Ц_з - З_д, \qquad (5.1)$$

де $С_б$ і $С_п$ – експлуатаційні витрати базового та проектного варіантів, грн/га; А – площа вирощування, га; ΔY – приріст урожайності, т/га; Цз – ціна реалізації зерна, грн/т; $З_д$ – додаткові сезонні витрати, грн.

Пряма економія становить: $Е_{пр} = (9\,401 - 8\,687) \cdot 250 = 178\,485$ грн.

Додаткова виручка від приросту урожайності: $Е_в = 0{,}15 \cdot 250 \cdot 10\,000 = 375\,000$ грн.

Тоді чистий річний економічний ефект: $E_р$ = 178 485 + 375 000 - 18 000 = 535 485 грн.

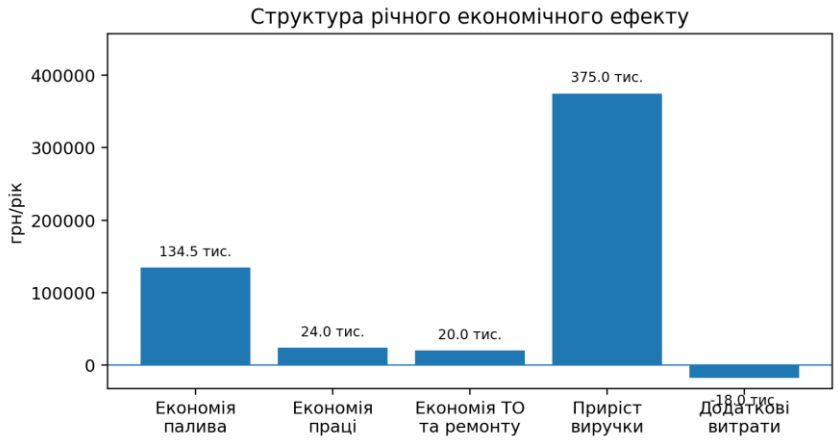


Рис. 5.2. Структура річного економічного ефекту від проектних рішень

Найбільша частка ефекту формується за рахунок стабільнішої урожайності. Це логічно, оскільки для пшениці навіть приріст 0,10-0,15 т/га на площі 250 га створює більший економічний результат, ніж зниження витрати пального на окремих операціях. Проте безпосередня економія ресурсу також є важливою, оскільки вона менше залежить від ринкової ціни зерна та погодних умов.

5.5. Строк окупності та аналіз чутливості

Строк окупності додаткових капітальних вкладень визначаємо за формулою:

$$T_{ок} = К / E_р,$$

де К = 180 000 грн – капітальні витрати на модернізацію. Отже Ток = 180 000 / 535 485 = 0,34 року.

Коефіцієнт рентабельності капітальних вкладень становить: Rк = Ер / К · 100 = 535 485 / 180 000 · 100 = 297.5 %.

Таблиця 5.4 – Чутливість результату до приросту урожайності

Приріст урожайності, т/га	Річний економічний ефект, грн	Строк окупності, року
0,00	160 485	1,12
0,05	285 485	0,63
0,10	410 485	0,44
0,15	535 485	0,34
0,20	660 485	0,27

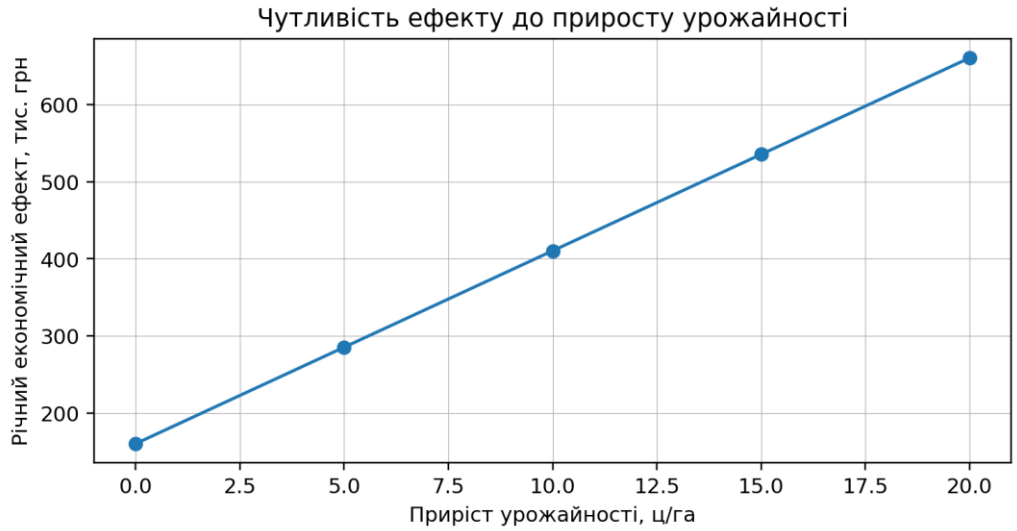


Рис. 5.3. Залежність економічного ефекту від приросту урожайності

Аналіз чутливості показує, що модернізація залишається економічно доцільною навіть без урахування приросту урожайності: у цьому разі строк окупності становить близько 1,1 року. За консервативного приросту урожайності 0,10 т/га строк окупності скорочується до 0,44 року, а за прийнятого у розрахунку приросту 0,15 т/га – до 0,34 року. Це свідчить, що проект має достатній запас економічної стійкості.

5.6. Техніко-економічні висновки

Виконане обґрунтування підтверджує доцільність удосконалення комплексу машин для виробництва озимої пшениці з модернізацією комбінатора “Компактор-4,0”. Порівняно з базовим варіантом проектне рішення забезпечує зниження витрати дизельного пального, скорочення затрат праці, менші витрати на обслуговування робочих органів і кращу якість формування насіннєвого ложа. У поєднанні з точнішим виконанням операцій та використанням агродрона для обприскування це створює передумови для стабільнішої урожайності озимої пшениці.

За прийнятих вихідних даних експлуатаційні витрати зменшуються з 9 401 до 8 687 грн/га, тобто на 714 грн/га. На площі 250 га пряма економія становить 178 485 грн/рік. З урахуванням приросту урожайності 0,15 т/га та

додаткових сезонних витрат чистий річний економічний ефект становить 535 485 грн, а строк окупності капітальних вкладень – 0,34 року.

Отже, модернізація “Компактора-4,0” є економічно виправданою для господарства площею 250 га. Найбільш доцільним є поетапне впровадження: модернізація ґрунтообробної машини, сервісне агродронне обприскування та поступове розширення елементів точного землеробства.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання удосконалення комплексу машин для виробництва озимої пшениці в умовах зони Полісся Житомирської області. Основну увагу приділено підвищенню ефективності передпосівного обробітку ґрунту шляхом модернізації комбінатора “Компактор-4,0” та раціонального добору сучасної техніки для виконання технологічних операцій. Проведений аналіз існуючих технологій вирощування озимої пшениці показав, що ефективність виробництва значною мірою залежить від якості обробітку ґрунту, своєчасності сівби, удобрення, захисту рослин і рівня механізації. Встановлено, що перспективними напрямами розвитку є енергоощадні технології, точне землеробство, автоматизоване керування агрегатами, застосування агродронів і систем моніторингу посівів.

Для умов Полісся Житомирської області розроблено технологію вирощування озимої пшениці та технологічну карту на площу 250 га. У ній передбачено виконання основних операцій: обробітку ґрунту, внесення добрив, сівби, догляду за посівами, збирання та транспортування врожаю. Для обприскування запропоновано використання агродрона, що зменшує ущільнення ґрунту, підвищує точність внесення препаратів і знижує контакт працівників із засобами захисту рослин.

У роботі обґрунтовано удосконалення комбінатора “Компактор-4,0”. Запропоновано замінити лапи на жорстких стовбах на лапи з S-подібними пружними стовбами, а також застосувати прутковий коток для формування насіннєвого ложа. Таке рішення покращує кришення ґрунту, вирівнювання поверхні поля, стабільність глибини обробітку та умови для рівномірного загортання насіння.

За результатами розрахунків обґрунтовано основні параметри робочих органів модернізованого комбінатора. Прийнято дворядну схему розміщення розпушувальних лап із відстанню 250 мм між ними та діаметр котка 380 мм, що забезпечує формування ущільненого шару на глибині близько 6 см. Перевірка

підшипникових вузлів і різьбових з’єднань підтвердила працездатність запропонованої конструкції.

У розділі з охорони праці визначено основні небезпечні фактори під час виконання механізованих робіт і використання агродрона. Запропоновано заходи безпеки, зокрема проведення інструктажів, використання засобів індивідуального захисту, контроль справності машин, дотримання безпечних зон і обмеження доступу сторонніх осіб до робочої зони.

Техніко-економічне обґрунтування показало, що впровадження удосконаленого комплексу машин і модернізованого комбінатора “Компактор-4,0” сприяє зменшенню витрат пального, скороченню кількості проходів техніки полем, підвищенню продуктивності праці та покращенню якості передпосівного обробітку ґрунту. Економічний ефект досягається за рахунок зниження експлуатаційних витрат і створення кращих умов для формування врожаю.

Отже, мету кваліфікаційної роботи досягнуто. Запропоновані проектні рішення можуть бути використані у господарствах зони Полісся для підвищення ефективності вирощування озимої пшениці, зменшення енерговитрат, покращення якості підготовки ґрунту та підвищення рентабельності зернового виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лихочвор В. В. Рослинництво. Технології вирощування сільськогосподарських культур. Львів : Українські технології, 2002. 800 с.

2. Борак К.В., Савченко В.М., Корнійчук Ю.М. Робототехнічні засоби в рослинництві. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–18 жовтня 2025 року). Київ. НУБІП України. С. 589-601.

3. Рослинництво : підручник / за ред. О. І. Зінченка. Київ : Аграрна освіта, 2001. 591 с.

4. Гудзь В. П., Примак І. Д., Будьонний Ю. В., Танчик С. П. Землеробство : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2010. 464 с.

5. Сільськогосподарські та меліоративні машини : підручник / за ред. Д. Г. Войтюка. Київ : Вища освіта, 2004. 544 с.

6. Войтюк Д. Г., Барановський В. М., Булгаков В. М. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : навч. посіб. Київ : Вища освіта, 2005. 464 с.

7. Довідник з машиновикористання в землеробстві / за ред. В. І. Пастухова. Харків : Веста, 2001. 347 с.

8. Механізація вирощування сільськогосподарських культур в Україні / за ред. В. В. Адамчука. Київ : Аграрна наука, 2012. 432 с.

9. Булгаков В. М., Адамчук В. В., Надикто В. Т. Агрегатування сільськогосподарської техніки : навч. посіб. Київ : Аграрна наука, 2018. 240 с.

10. Державна служба статистики України. Сільське, лісове та рибне господарство України : статистична інформація. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/cg.htm (дата звернення: 14.06.2026).

11. Головне управління статистики у Житомирській області. Сільське, лісове та рибне господарство : статистична інформація. URL: https://www.uz.ukrstat.gov.ua/statinfo/apk/index.html (дата звернення: 14.06.2026).

12. FAOSTAT. Crops and livestock products : production database. URL: https://www.fao.org/faostat/en/ (дата звернення: 14.06.2026).

13. USDA Foreign Agricultural Service. Production, Supply and Distribution Online. URL: https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home (дата звернення: 14.06.2026).

14. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. … д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.

15. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». 2020. № 2. С 34–41.

16. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. Проблеми трибології. 2020. № 2. С 34–41.

17. Rogovskii, I. L., Borak, K. V., Maksimovich, E. Yu., Smelik, V. A., Voinash, S. A., Maksimovich, K. Yu., & Sokolova, V. A. (2020). Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes. T-series. Journal of Physics : Conference Series. 1679 (4), art. №. 042084.

18. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.

19. USDA Foreign Agricultural Service. Grain: World Markets and Trade. September 2025. URL: https://apps.fas.usda.gov/PSDOnline/Circulars/2025/09/Grain.pdf (дата звернення: 14.06.2026).

20. USDA. World Agricultural Supply and Demand Estimates. URL: https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde (дата звернення: 14.06.2026).

21. Програма охорони навколишнього природного середовища в Житомирській області на 2023–2027 роки. Житомирська обласна військова адміністрація. URL: https://oda.zht.gov.ua/main/zvity-pro-strategichnu-

ekologichnu-otsinku-proyektiv-programy/programa-ohorony-navkolyshnogo-pryrodnogo-seredovyshha-v-zhytomyrskij-oblasti-na-2023-2027-roky/ (дата звернення: 14.06.2026).

22. Еколого-агрокліматична характеристика Житомирської області. Департамент екології та природних ресурсів Житомирської ОДА. URL: https://eprdep.zht.gov.ua/rd_GRtROO_1-1.htm (дата звернення: 14.06.2026).

23. Інститут сільського господарства Полісся НААН. Наукові матеріали щодо агрокліматичних умов Житомирського Полісся. URL: https://naas.gov.ua/news/?ELEMENT_ID=6834 (дата звернення: 14.06.2026).

24. Kongskilde. Vibro Master 3000 : seedbed cultivator. URL: https://kongskilde.com/machine/vibro-master-3000/ (дата звернення: 14.06.2026).

25. Kongskilde Industries A/S. Vibro Compact : seedbed combination. URL: https://pdf.agriexpo.online/pdf/kongskilde-industries-s/vibro-compact/169501-49070.html (дата звернення: 14.06.2026).

26. DJI Agriculture. AGRAS T50 : specifications. URL: https://ag.dji.com/t50/specs (дата звернення: 14.06.2026).

27. John Deere. AutoTrac Precision Agriculture Solutions. URL: https://www.deere.co.uk/en-gb/products-and-solutions/technology-solutions/precision-agriculture-solutions/autotrac-precision-ag-technology-qvvut1rsqumwmq (дата звернення: 14.06.2026).

28. John Deere. 6R Series Tractors. URL: https://www.deere.com/en/tractors/utility-tractors/6-family-utility-tractors/6r-series-overview/ (дата звернення: 14.06.2026).

29. Väderstad. Rapid A 400–800S : pneumatic seed drill. URL: https://www.vaderstad.com/en/drilling/rapid-seed-drills/rapid-a-s (дата звернення: 14.06.2026).

30. Väderstad. Carrier : versatile disc cultivators. URL: https://www.vaderstad.com/en/tillage/disc-cultivators (дата звернення: 14.06.2026).

31. CLAAS. CEMOS machine optimization system. URL: https://www.claas.com/en-us/smart-farming/cemos (дата звернення: 14.06.2026).

32. CLAAS. CEMOS for combine harvesters. URL: https://www.claas.com/en-sd/digital-solutions/cemos/cemos-combine-harvesters (дата звернення: 14.06.2026).

33. DJI Agriculture. AGRAS T50 : agricultural drone. URL: https://ag.dji.com/t50 (дата звернення: 14.06.2026).

34. Tripoli.land. Ціна на пшеницю в Україні. URL: https://tripoli.land/ua/pshenitsa-furazh (дата звернення: 14.06.2026).

35. Заєць М. Л. Обгрунтування параметрів дискового розкидного апарата мінеральних добрив Біоенергетичні системи: Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 27-31.

36. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12 (дата звернення: 14.06.2026).