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

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Словінський Андрій Йосипович

УДК 631.3:633.15

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Удосконалення комплексу машин для вирощування кукурудзи на зерно з розробкою машини для основного обробітку ґрунту

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 _____ Словінський А.Й.

Керівник роботи
Борак К.В.
доктор технічних наук, професор

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Словінський Андрій Йосипович. Удосконалення комплексу машин для вирощування кукурудзи на зерно з розробкою машини для основного обробітку ґрунту. *– 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 вирощування кукурудзи на зерно з розробкою машини для основного обробітку ґрунту. Обґрунтовано актуальність підвищення ефективності механізованих технологій вирощування кукурудзи в умовах Житомирської області. Проаналізовано сучасні технології вирощування кукурудзи на зерно, світові тенденції розвитку галузі та перспективи впровадження ресурсозберігаючих і роботизованих рішень. Розроблено технологію вирощування культури із застосуванням сучасного комплексу машин, зокрема агрегату Fendt 900 Vario з 8-корпусним плугом-розпушувачем для основного обробітку ґрунту. Для післясходової боротьби з бур’янами передбачено використання робота FarmDroid FD20, що дозволяє зменшити потребу в ручній праці та хімічному навантаженні на агроекосистему. У конструктивній частині виконано обґрунтування параметрів плуга-розпушувача, розраховано його основні конструктивні та тягово-енергетичні показники. Техніко-економічне обґрунтування підтвердило доцільність запропонованих проєктних рішень, оскільки вони сприяють підвищенню продуктивності, зниженню витрат і покращенню ефективності виробництва зерна кукурудзи.

Ключові слова: кукурудза на зерно, комплекс машин, основний обробіток ґрунту, плуг-розпушувач, роботизація, техніко-економічне обґрунтування.

ANNOTATION

Andrii Yosypovych Slovinskyi. Improvements to a range of machinery for growing maize for grain, including the development of a machine for primary soil cultivation. *– 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 ways of improving the range of machinery used for growing maize for grain, including the development of a machine for primary soil cultivation. It demonstrates the importance of enhancing the efficiency of mechanised maize cultivation technologies in the Zhytomyr region. Modern technologies for growing grain maize, global trends in the sector’s development, and the prospects for implementing resource-saving and robotic solutions are analysed. A crop cultivation technology has been developed using a modern range of machinery, in particular the Fendt 900 Vario unit with an 8-body plough-cultivator for primary tillage. For post-emergence weed control, the FarmDroid FD20 robot is to be used, which reduces the need for manual labour and the chemical load on the agroecosystem. In the design section, the parameters of the plough-cultivator are justified, and its main design and traction-energy indicators are calculated. The technical and economic justification has confirmed the feasibility of the proposed design solutions, as they contribute to increased productivity, reduced costs and improved efficiency in maize grain production.

Keywords: grain maize, machinery complex, primary tillage, plough-cultivator, robotisation, technical and economic justification.

ЗМІСТ

ВСТУП……..……..……5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО……..……..8
1.1. Значення кукурудзи на зерно та світові тенденції розвитку виробництва…..8
1.2. Сучасні технології вирощування кукурудзи на зерно…….…..9
1.3. Аналіз машинних технологій основного обробітку ґрунту під кукурудзу……...…….10
1.4. Світові напрями вдосконалення технологій вирощування кукурудзи…..…..11
1.5. Можливості роботизації окремих процесів……12
1.6. Перспективи та шляхи вдосконалення комплексу машин……14
Висновки по розділу……..15
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО В УМОВАХ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ……16
2.1. Вихідні умови та агротехнічні вимоги до технології…….…….16
2.2. Обґрунтування складу комплексу машин…….……17
2.3. Технологічна схема вирощування кукурудзи на зерно……...……19
2.4. Розрахунок параметрів сівби, добрив і потреби в матеріалах……..……..21
2.5. Розрахунок продуктивності основного агрегату…….……22
2.6. Розрахунок використання FarmDroid FD20 у післясходовій боротьбі з бур’янами……...…….23
2.7. Сучасна технологічна карта вирощування кукурудзи на зерно…….……25
2.9. Календарне планування та контроль якості робіт…….……..26
2.10. Очікуваний ефект від впровадження проєктованої технології……...….27
2.8. Розрахунок потреби у техніці на площу 500 га……...……28
Висновок до розділу…….…….30
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНА ЧАСТИНА. РОЗРОБКА МАШИНИ ДЛЯ ОСНОВНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ……31

3.1 Загальні передумови удосконалення комплексу машин для вирощування кукурудзи на зерно…….31
3.2 Огляд і вибір конструктивної схеми машини для основного обробітку……32
3.3 Обґрунтування необхідності розробки плуга-розпушувача та опис його конструкції……...……..33
3.4 Особливості робочого процесу і агротехнічні вимоги……...……..35
3.5 Розрахунок тягового опору полицевого плуга і плуга-розпушувача……...…36
3.6 Розрахунок основних параметрів робочих органів……..40
3.7 Розрахунок шляху заглиблення робочих органів……..……41
3.8 Розрахунок тягового опору розробленого плуга-розпушувача……..43
3.9 Визначення висоти стояка та конструктивні рекомендації……..44
Висновки по розділу…….45
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ……..……47
4.1. Мета та вихідні умови розрахунку……47
4.2. Вплив проєктних рішень на витрати виробництва…….……47
4.3. Розрахунок додаткових капітальних вкладень……48
4.4. Розрахунок експлуатаційних витрат…….……49
4.5. Визначення економічної ефективності…….……49
4.6. Аналіз чутливості результатів……...……50
4.7. Організаційні умови реалізації економічного ефекту…….……51
Висновки по розділу……..……52
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……...……54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..……56

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Кукурудза на зерно є однією з найважливіших сільськогосподарських культур сучасного аграрного виробництва. Вона має високу врожайність, широкий спектр використання та значне економічне значення для зернового балансу України. Зерно кукурудзи застосовують у харчовій, комбікормовій, крохмале-патоковій, спиртовій та біоенергетичній промисловості. У зв'язку зі зростанням попиту на зернову продукцію особливого значення набуває підвищення ефективності технологій вирощування кукурудзи, зменшення виробничих витрат, раціональне використання енергетичних ресурсів і збереження родючості ґрунтів.

Сучасне вирощування кукурудзи на зерно потребує використання високопродуктивних машинно-тракторних агрегатів, точного дотримання агротехнічних строків виконання операцій та впровадження ресурсозберігаючих технологій. Особливо важливе місце в технологічному процесі займає основний обробіток ґрунту, від якого залежать умови накопичення й збереження вологи, розвиток кореневої системи, а також рівень забур'яненості посівів. У багатьох господарствах застосування традиційної оранки не завжди забезпечує оптимальну структуру ґрунту, оскільки може призводити до утворення плужної підошви, надмірного ущільнення, підвищених витрат пального та погіршення водно-повітряного режиму.

Актуальність теми роботи полягає в необхідності удосконалення комплексу машин для вирощування кукурудзи на зерно шляхом впровадження ефективного агрегату для основного обробітку ґрунту. Розробка плуга-розпушувача дає змогу поєднати якісне глибоке розпушування ґрунту зі зменшенням енерговитрат, поліпшенням умов розвитку рослин і підвищенням продуктивності технологічного процесу. Крім того, перспективним напрямом є застосування елементів роботизації, зокрема для післясходового догляду за посівами та боротьби з бур'янами, що дозволяє зменшити потребу в ручній праці та скоротити використання хімічних засобів захисту рослин.

Метою кваліфікаційної роботи є удосконалення комплексу машин для вирощування кукурудзи на зерно в умовах Житомирської області з розробкою машини для основного обробітку ґрунту, яка забезпечує підвищення якості розпушування, зменшення тягового опору та покращення техніко-економічних показників виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати сучасні технології вирощування кукурудзи на зерно та світові тенденції їх розвитку; обґрунтувати технологію вирощування культури в умовах Житомирської області; розробити технологічну карту виконання основних виробничих операцій; обґрунтувати доцільність використання агрегату Fendt 900 Vario з 8-корпусним плугом-розпушувачем для основного обробітку ґрунту; розглянути можливість застосування робота FarmDroid FD20 для післясходової боротьби з бур'янами; виконати конструктивні розрахунки машини для основного обробітку ґрунту; розробити заходи з охорони праці та виконати техніко-економічне обґрунтування проєктних рішень.

Об'єктом дослідження є технологічний процес вирощування кукурудзи на зерно та комплекс машин, що використовується для виконання основних польових операцій.

Предметом дослідження є конструктивно-технологічні параметри машини для основного обробітку ґрунту та ефективність її використання у складі машинно-тракторного агрегату.

У роботі використано методи аналізу сучасних технологій вирощування сільськогосподарських культур, порівняння машинно-тракторних агрегатів, агротехнічного обґрунтування операцій, конструктивного та тягово-енергетичного розрахунку, а також техніко-економічної оцінки запропонованих рішень.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Борак К. В., Шевчук О. А., Федорчук А. О., Коплич А.В., **Словінський А.Й**., Юрченко Б. Ю Методи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. 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. 94-99.

2. Білецький В.Р., **Словінський А.Й.,** Ткачук Б.Р. Оптимізація машинно-тракторних агрегатів для основного обробітку ґрунту в умовах мінливого зволоження. 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. 89-91.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонований комплекс машин може бути використаний для підвищення ефективності вирощування кукурудзи на зерно, зменшення енергетичних витрат, покращення якості основного обробітку ґрунту та впровадження сучасних автоматизованих і роботизованих технологій догляду за посівами. Реалізація запропонованих рішень сприятиме підвищенню врожайності культури, зниженню собівартості продукції та забезпеченню більш раціонального використання виробничих ресурсів господарства.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 30 найменування. Загальний обсяг роботи становить 60 сторінок комп’ютерного тексту, містить 9 рисунків, 19 таблиць та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО

1.1. Значення кукурудзи на зерно та світові тенденції розвитку виробництва

Кукурудза на зерно є однією з провідних культур світового землеробства. Її вирощують для одержання концентрованого корму, сировини для харчової, крохмале-патокової та біоенергетичної промисловості. Висока потенційна врожайність, добра реакція на інтенсивні технології та широка зона вирощування роблять кукурудзу важливою культурою як для великих агропідприємств, так і для господарств середнього розміру.

Світове виробництво кукурудзи зберігає тенденцію до зростання. За даними USDA FAS, у 2024/2025 маркетинговому році воно становило близько 1,23 млрд т, а середній приріст за десятиріччя оцінюється приблизно у 2 % на рік [1]. Основними виробниками залишаються США, Китай, Бразилія, Аргентина, країни ЄС та Україна. Збільшення виробництва відбувається переважно через підвищення врожайності, застосування продуктивних гібридів, точне землеробство та вдосконалення машинних технологій.

Прогнози OECD-FAO до 2033 року показують, що попит на зернові культури, зокрема кукурудзу, буде підтримуватися потребами тваринництва, харчової промисловості та виробництва біопалива [2]. Водночас посилюється конкуренція за земельні, водні й енергетичні ресурси. Тому в розвинених країнах головний акцент робиться не лише на нарощуванні валового збору, а на зменшенні витрат на одиницю продукції, стабілізації врожайності та збереженні родючості ґрунтів.

Україна має вагомі позиції на світовому ринку кукурудзи завдяки родючим ґрунтам, значним площам орних земель і досвіду вирощування культури. FAO GIEWS оцінювала виробництво кукурудзи в Україні у 2025 році на рівні 30,7 млн т, що на 14 % більше, ніж у попередньому році [3]. Водночас

українські господарства працюють в умовах високої вартості пального, добрив, запасних частин і логістики, тому потребують енергоощадних та адаптивних технологічних рішень.

Сучасна технологія вирощування кукурудзи все більше переходить від шаблонного виконання операцій до адаптивного управління полем. Рішення щодо обробітку ґрунту, строків сівби, густоти стояння, норм добрив і захисту рослин приймають з урахуванням вологи, ущільнення, забур'яненості, попередника та прогнозу погоди. Це потребує узгодженого комплексу машин, у якому кожна операція створює умови для якісного виконання наступної.

1.2. Сучасні технології вирощування кукурудзи на зерно

Технологія вирощування кукурудзи включає вибір попередника, основний і передпосівний обробіток ґрунту, удобрення, сівбу, догляд за посівами, захист від бур'янів, шкідників і хвороб, збирання та післязбиральну доробку зерна. Найпоширенішою залишається інтенсивна технологія, яка передбачає глибокий обробіток або оранку, передпосівну культивацію, точну сівбу пунктирними сівалками, хімічний захист і комбайнове збирання.

Перевагами інтенсивної технології є якісне розпушення ґрунту, заробляння рослинних решток і добрив, зменшення запасу бур'янів та формування вирівняного посівного ложа. Недоліками є висока енергоємність, велика кількість проходів техніки, підвищений ризик ущільнення та ерозії. Тому у світовій практиці дедалі більше застосовують мінімальний обробіток, strip-till, no-till і вертикальний обробіток.

Мінімальний обробіток зменшує кількість операцій і витрати пального, але потребує якісного подрібнення решток та доброго контролю бур'янів. Технологія strip-till передбачає обробіток лише вузької смуги майбутнього рядка, а міжряддя залишаються вкритими рослинними рештками. Це дає змогу зберегти вологу, зменшити ерозію та водночас створити розпушену й прогріту зону для висіву насіння. Для її ефективного застосування потрібні точна навігація, стабільна робота сівалки та якісний розподіл решток попередника.

Технологія no-till забезпечує максимальне збереження структури ґрунту та зменшує витрати пального, однак потребує високої культури землеробства, правильної сівозміни, ефективного гербіцидного захисту та спеціальних сівалок. Для кукурудзи no-till доцільний не на всіх ґрунтах, оскільки за великої кількості решток і холодної весни посівний шар може повільніше прогріватися. Тому вибір технології повинен враховувати конкретні умови поля.

Важливим елементом сучасної технології є точна сівба. Просапні сівалки з електроприводами, контролем пропусків, датчиками притискного зусилля і секційним відключенням забезпечують рівномірне розміщення рослин. Це підвищує ефективність використання світла, вологи й поживних речовин, а також створює передумови для точного міжрядного обробітку та роботизованого догляду за посівами.

1.3. Аналіз машинних технологій основного обробітку ґрунту під кукурудзу

Основний обробіток ґрунту має вирішальне значення для формування умов росту кукурудзи. Культура має потужну кореневу систему, але її розвиток обмежується за наявності ущільнених шарів, плужної підошви, поганого водно-повітряного режиму та нестачі доступної вологи. Тому машина для основного обробітку повинна забезпечувати не тільки механічне розпушення, а й агротехнічно доцільну структуру ґрунту.

У практиці використовують полицеві плуги, чизельні плуги, глибокорозпушувачі, дискові борони, комбіновані агрегати та знаряддя вертикального обробітку. Полицева оранка добре заробляє рослинні рештки й насіння бур’янів, однак є енергоємною та за систематичного застосування може сприяти утворенню плужної підошви. На полях із ризиком ерозії повне перевертання пласта також не завжди доцільне.

Чизельний обробіток і глибоке розпушування є перспективними для кукурудзи, оскільки вони руйнують ущільнені горизонти без повного перевертання скиби. Частина рослинних решток залишається на поверхні,

зменшуючи випаровування вологи й захищаючи поле від ерозії. Робочі органи створюють тріщини, покращують інфільтрацію опадів і полегшують проникнення коренів у глибші шари ґрунту.

Дискові знаряддя ефективно подрібнюють і перемішують рештки, але за надмірного застосування можуть ущільнювати шар на межі ходу дисків. Тому їх доцільно використовувати як елемент поверхневого або післяжнивного обробітку. Для основного обробітку під кукурудзу більш раціональними є агрегати, що поєднують глибоке розпушування, помірне перемішування верхнього шару та збереження частини мульчі.

Розроблювана машина для основного обробітку ґрунту повинна відповідати таким вимогам: руйнувати ущільнений шар, забезпечувати стабільну глибину, не забиватися рослинними рештками, мати помірний тяговий опір і можливість регулювання параметрів роботи. Зниження енергоємності може бути досягнуте за рахунок раціональної форми стояків, правильного кута різання доліт, оптимального розміщення робочих органів на рамі та зменшення зайвого переміщення ґрунту.

1.4. Світові напрями вдосконалення технологій вирощування кукурудзи

Світові напрями вдосконалення технологій вирощування кукурудзи пов’язані з ресурсозбереженням, точним землеробством, кліматичною адаптацією, цифровим контролем операцій та екологізацією захисту рослин. У провідних країнах виробники прагнуть не лише підвищити врожайність, а й зменшити витрати пального, добрив і засобів захисту рослин на кожну тонну зерна.

Ресурсозбереження передбачає скорочення кількості проходів техніки, застосування комбінованих агрегатів, контроль перекриттів, автоматичне водіння та секційне відключення робочих органів. У внесенні добрив і ЗЗР поширюється диференційоване дозування за картами-завданнями. Для

кукурудзи це дає змогу враховувати неоднорідність поля, різний рівень родючості, запаси вологи й потенціал продуктивності окремих ділянок.

Кліматична адаптація набуває особливого значення через часті посухи, нерівномірні опади та хвилі спеки. Для зменшення ризиків використовують мульчування, смуговий або мінімальний обробіток, глибоке розпушування ущільнених горизонтів, підбір посухостійких гібридів і оптимізацію густоти стояння. У зонах нестійкого зволоження кожна операція повинна бути спрямована на збереження вологи.

Цифровізація базується на використанні супутникових знімків, дронів, метеостанцій, датчиків вологості, карт урожайності та систем моніторингу техніки. За оглядовими дослідженнями, GPS-керована техніка, дистанційне зондування, дрони та сенсорні системи є основою для адресного управління ресурсами у точному землеробстві [7]. Отримані дані допомагають визначати проблемні ділянки, планувати норми внесення і контролювати якість операцій.

Екологізація технологій полягає у переході до інтегрованого захисту рослин. Хімічні препарати доцільно поєднувати з агротехнічними, механічними, біологічними та цифровими методами. Для кукурудзи це означає якісний основний обробіток, оптимальні строки сівби, конкурентну густоту посіву, міжрядний обробіток, локальне внесення гербіцидів і регулярний моніторинг шкідників.

1.5. Можливості роботизації окремих процесів

Роботизація у вирощуванні кукурудзи розвивається як відповідь на дефіцит робочої сили, потребу в точному виконанні операцій і необхідність зменшення хімічного навантаження. Найбільш перспективними є роботизований моніторинг стану посівів, боротьба з бур’янами, точкове внесення засобів захисту, виявлення осередків шкідників і камерне ведення міжрядних культиваторів.

Боротьба з бур’янами може виконуватися механічно за допомогою інтелектуальних культиваторів або автономних платформ. Камери розпізнають

рядки кукурудзи, визначають положення культурних рослин і керують робочими органами так, щоб не пошкодити посів. Дослідження навігації у рядках кукурудзи підтверджують, що точне визначення лінії рядка є важливою умовою роботи автоматизованих машин догляду [4].

Іншим напрямом є точкове обприскування. Робот або інтелектуальний обприскувач виявляє бур'яни й вносить препарат тільки в потрібному місці. Це зменшує витрати гербіцидів, знижує навантаження на ґрунт і дає змогу боротися з осередковою забур'яненістю. У перспективі такі системи можуть працювати за картами, створеними дронами або супутниковим моніторингом.

Перспективними є також фізичні способи знищення бур'янів: електричне, лазерне, термічне або механічне ураження. Вони ще мають обмеження щодо продуктивності та енергоспоживання, але можуть бути корисними в органічному виробництві або за стійкості бур'янів до гербіцидів. Сучасні огляди підкреслюють, що ефективні роботизовані системи повинні поєднувати сенсори, алгоритми розпізнавання та точні виконавчі механізми [5; 6].

Для боротьби зі шкідниками роботизація може включати дрони, наземні платформи та стаціонарні пастки з датчиками. Дрони швидко виявляють неоднорідність розвитку рослин, пошкодження листків або стресові ділянки. Наземні роботи можуть рухатися між рядками, фотографувати рослини, визначати координати проблемних зон і передавати дані для точкового внесення інсектицидів або біопрепаратів.

Для більшості господарств доцільним є поетапне впровадження роботизації. Спочатку варто застосовувати GPS-навігацію, автопілот, моніторинг сівби та карти врожайності. Наступним етапом можуть бути дрони, диференційоване внесення добрив і камерне ведення культиваторів. Після цього можливе використання автономних платформ для точкового знищення бур'янів і локального захисту рослин.

1.6. Перспективи та шляхи вдосконалення комплексу машин

Удосконалення комплексу машин для вирощування кукурудзи повинно бути спрямоване на узгодження всіх операцій технологічного процесу. Недостатньо придбати окрему продуктивну машину, якщо вона не відповідає системі обробітку, наявним тракторам, сівозміні, стану ґрунту та вимогам наступних операцій. Ефективний комплекс має забезпечувати своєчасність робіт, якість виконання та мінімальні витрати на одиницю зерна.

Першим шляхом вдосконалення є диференційований підхід до основного обробітку. На полях з плужною підошвою та ущільненням доцільно застосовувати чизельний обробіток або глибоке розпушування. На ерозійно небезпечних землях слід зберігати мульчу на поверхні. За достатнього рівня культури землеробства перспективними є strip-till і мінімальний обробіток. Розроблювана машина повинна поєднувати глибоке розпушування, енергоощадність і можливість роботи з рослинними рештками.

Другим шляхом є підвищення точності сівби та догляду за посівами. Точне розміщення насіння, стабільна глибина загортання, контроль густоти та рівномірність рядків дають змогу краще використовувати потенціал гібридів і створюють умови для міжрядного обробітку. Третім шляхом є інтеграція машин із цифровими системами, які фіксують швидкість, глибину, норму внесення, витрату пального, перекриття та врожайність.

Четвертим напрямом є зменшення залежності від суцільного хімічного захисту. Поєднання механічного обробітку, точкового внесення гербіцидів, дронового моніторингу та роботизованого видалення бур’янів дозволяє зменшити витрати препаратів. Для шкідників перспективним є використання прогнозних моделей, феромонних пасток, дронів і локального внесення препаратів тільки в осередках ураження.

П’ятим напрямом є підвищення енергоефективності. Для машини основного обробітку це означає раціональну форму робочих органів, надійне регулювання глибини, правильне розміщення стояків і достатню прохідність у рослинних рештках. Зменшення тягового опору без погіршення якості

розпушування забезпечує економію пального, підвищує продуктивність агрегату та знижує собівартість вирощування кукурудзи.

Висновки по розділу

Кукурудза на зерно залишається стратегічною культурою світового й українського землеробства. Сучасні тенденції її вирощування пов’язані з ресурсозбереженням, точним землеробством, кліматичною адаптацією, цифровим контролем і поступовою роботизацією польових процесів.

Для умов України особливо актуальним є вдосконалення комплексу машин, що забезпечує своєчасний основний обробіток, точну сівбу, ефективний догляд за посівами та економне використання пального, добрив і засобів захисту. Перспективною є розробка машини для основного обробітку ґрунту, здатної руйнувати ущільнені шари, зберігати вологу, працювати з рослинними рештками та мати помірний тяговий опір.

Роботизація окремих процесів є реальним напрямом розвитку технології вирощування кукурудзи. Найближчими до практичного застосування є камерне ведення міжрядних культиваторів, роботизоване або точкове знищення бур’янів, дроновий моніторинг, локальне внесення препаратів і цифровий контроль якості виконання операцій.

РОЗДІЛ 2
ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО В УМОВАХ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ

2.1. Вихідні умови та агротехнічні вимоги до технології

Житомирська область належить до регіонів, у яких вирощування кукурудзи на зерно потребує поєднання високої технологічної дисципліни, раціонального використання вологи та збереження фізичних властивостей ґрунту. Для зони характерні чергування періодів достатнього зволоження з короткочасними посухами в літній період, тому основний обробіток має не тільки розпушувати ґрунт, а й створювати умови для акумуляції зимово-весняної вологи. У межах області поширені дерново-підзолисті, сірі лісові та опідзолені ґрунти, які за інтенсивного використання схильні до ущільнення, втрати структури та формування підорного ущільненого шару.

Проєктована технологія спрямована на одержання стабільної врожайності зерна кукурудзи на рівні 8,0-9,0 т/га за умови дотримання оптимальних строків виконання робіт і застосування сучасного комплексу машин. Основним завданням є заміна енергоємної традиційної оранки технологією глибокого розпушування без повного перевертання пласта. Такий підхід дає можливість зменшити негативний вплив на структуру ґрунту, поліпшити інфільтрацію опадів і створити сприятливі умови для розвитку потужної кореневої системи кукурудзи.

У розділі прийнято розрахункову площу посіву 500 га. Така площа є достатньою для оцінювання потреби в техніці, складання календарного плану робіт і визначення кількості агрегатів, необхідних для виконання операцій у стислі агротехнічні строки. Показники технологічної карти наведено у перерахунку на 1 га та на всю розрахункову площу, а потребу в техніці розраховано за продуктивністю конкретних марок тракторів і сільськогосподарських машин.

Агротехнічні вимоги до вирощування кукурудзи на зерно передбачають: розміщення культури після кращих попередників, які залишають поле чистим від бур’янів; якісне подрібнення і рівномірний розподіл післяжнивних решток; основний обробіток на глибину 30-35 см; весняне вирівнювання поверхні поля; точне висівання насіння на однакову глибину; своєчасний післясходовий догляд; захист від бур’янів, шкідників і хвороб; збирання за оптимальної вологості зерна. Особливу увагу в роботі приділено роботизованому догляду за посівами, оскільки саме рання конкуренція бур’янів істотно знижує продуктивність кукурудзи.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для проєктування технології на площу 500 га

Показник	Прийняте значення	Одиниця	Примітка
Розрахункова площа посіву	500	га	для технологічної карти і розрахунку потреби в техніці
Планова врожайність зерна	8,5	т/га	середньоінтенсивна технологія
Попередник	озима пшениця / зернобобові	-	залежно від структури сівозміни
Глибина основного обробітку	0,30-0,35	м	плуг-розпушувач
Ширина захвату плуга-розпушувача	4,0	м	8 корпусів по 0,5 м
Міжряддя кукурудзи	0,70	м	сумісно з роботизованим доглядом
Запланована густота перед збиранням	70	тис. рослин/га	для гібридів ФАО 230-300
Кількість післясходових роботизованих проходів	2	рази	у фазах 2-4 та 5-7 листків

2.2. Обґрунтування складу комплексу машин

Комплекс машин для вирощування кукурудзи на зерно має забезпечувати високу продуктивність у стислі агротехнічні строки, мінімальне ущільнення ґрунту, точність виконання операцій і можливість цифрового контролю. У проєктованій технології ключовими елементами є енергонасичений трактор

Fendt 900 Vario, розроблений 8-корпусний плуг-розпушувач для основного обробітку ґрунту та робот FarmDroid FD20 для післясходової боротьби з бур’янами.

Трактори серії Fendt 900 Vario належать до класу високопотужних універсальних тракторів. Вони мають потужність у діапазоні, достатньому для агрегатування з широкозахватними ґрунтообробними знаряддями, а безступінчаста трансмісія дає можливість підтримувати стабільну робочу швидкість при змінному тяговому навантаженні. Для агрегатування з плугом-розпушувачем доцільно використовувати моделі Fendt 936, Fendt 939 або Fendt 942 Vario, оскільки їх потужність забезпечує необхідний запас для роботи на ущільнених ґрунтах і на глибині до 35 см.

Розроблений 8-корпусний плуг-розпушувач призначений для глибокого безполицевого розпушування. Робочі органи розміщуються на рамі так, щоб зони деформації ґрунту перекривалися, але не спричиняли забивання рослинними рештками. При ширині між корпусами 0,5 м загальна ширина захвату становить 4,0 м. Основний ефект від застосування такого знаряддя полягає у руйнуванні плужної підошви, поліпшенні водопроникності та зниженні надмірного обертання пласта, що важливо для збереження біологічної активності ґрунту.

Робот FarmDroid FD20 у технологічній карті використовується для післясходової механічної боротьби з бур’янами. Його застосування базується на точному веденні за RTK-координатами рядків. Робот може виконувати міжрядний і внутрішньорядний обробіток, що особливо цінно на ранніх фазах розвитку кукурудзи, коли культура чутлива до конкуренції бур’янів. Для ефективної роботи потрібне попереднє точне формування рядків, цифрове картування поля, достатньо вирівняна поверхня та відсутність великих грудок, які можуть порушувати роботу робочих органів.

Таблиця 2.2 – Основні машини, передбачені проєктованою технологією

Машина або агрегат	Призначення	Основні параметри	Переваги в технології	Обмеження
Fendt 942 Vario (серія 900 Vario)	тягово-енергетичний засіб для важких робіт	потужність, достатня для агрегатування з 8-корпусним розпушувачем; безступінчаста трансмісія Vario	стабільна швидкість, точне водіння, можливість роботи з широкозахватними знаряддями	висока вартість, потреба у кваліфікованому сервісі
8-корпусний плуг-розпушувач	основний обробіток ґрунту	ширина 4,0 м; глибина 30-35 см; 8 робочих органів	руйнування ущільненого шару, накопичення вологи, збереження структури ґрунту	потребує високої тягової потужності
Väderstad Tempo V 12	точна сівба кукурудзи	12 рядків; міжряддя 70 см; контроль висіву та сумісність з RTK	рівномірне розміщення рослин, висока змінна продуктивність	потребує якісного насіннєвого ложа
FarmDroid FD20	післясходова боротьба з бур’янами	робоча ширина до 3,5 м; RTK-точність; 2-12 рядів; автономна робота	зменшення ручної праці та хімічного навантаження, робота між і в рядку	краща ефективність за наявності точних координат рослин
Claas Lexion 770 + Claas Corio 8-70	збирання врожаю	кукурудзяна жатка 8 рядків; подрібнення решток	своєчасне збирання і зменшення втрат	потребує організації транспорту та сушіння зерна

2.3. Технологічна схема вирощування кукурудзи на зерно

Проєктована технологія побудована за принципом послідовного формування сприятливих умов для росту рослин: післязбиральне управління рештками, глибоке розпушування, весняне збереження вологи, точна сівба, роботизований догляд, моніторинг стану посівів і своєчасне збирання. Основний обробіток виконується восени після попередника. Це дозволяє використати природне проморожування та зволоження ґрунту для додаткового руйнування брил, поліпшити нагромадження вологи і підготувати поле до ранньовесняного вирівнювання.

За наявності значної кількості післяжнивних решток перед глибоким розпушуванням доцільно провести лущення стерні або дискування на глибину

8-10 см. Мета цієї операції полягає в подрібненні решток, провокуванні проростання падалиці та бур’янів, вирівнюванні поверхні поля. Після появи сходів бур’янів та падалиці проводиться основний обробіток агрегатом Fendt 900 Vario + 8-корпусний плуг-розпушувач. Знаряддя не перевертає пласт повністю, а розпушує його на глибину до 35 см, створюючи вертикальні щілини і поліпшуючи водопроникність.

Навесні застосовують мінімальну кількість проходів. Першим виконують закриття вологи легкими боронами або шлейф-боронами, після чого проводять передпосівну культивацію на глибину загортання насіння. За потреби добрива вносять локально або диференційовано на основі карт агрохімічного обстеження. Сівбу виконують у прогрітий ґрунт, коли температура на глибині загортання насіння досягає 10-12 °C, а поле має достатню несучу здатність.

Після появи сходів важливим елементом технології є механічний контроль бур’янів. Використання FarmDroid FD20 дозволяє перейти від суцільного застосування гербіцидів до точного механічного обробітку, який може доповнюватися локальним хімічним захистом лише на проблемних ділянках. Це відповідає тенденціям сталого землеробства та зменшує пестицидне навантаження на агроекосистему.



Рис. 2.1. Схема послідовності технологічного процесу.

2.4. Розрахунок параметрів сівби, добрив і потреби в матеріалах

Густота стояння рослин є одним із найважливіших елементів технології. Для умов Житомирської області та гібридів середньоранньої групи стиглості приймаємо планову густоту перед збиранням 70 тис. рослин/га. З урахуванням лабораторної схожості насіння, польової схожості та страхового коефіцієнта розраховуємо норму висіву.

Норма висіву насіння визначається за формулою:

$$N_в = N_{пл} \cdot k_с / (K_л \cdot K_п), \quad (1.1)$$

де $N_{пл}$ – запланована кількість рослин перед збиранням, тис. шт./га; kc - страховий коефіцієнт; $K_л$ – лабораторна схожість; $K_п$ - польова схожість. Приймаємо $N_{пл}$ = 70 тис. шт./га, $k_с$ = 1,03, $K_л$ = 0,95, $K_п$ = 0,92. Тоді $N_в$ = 70 · 1,03 / (0,95 · 0,92) = 82,5 тис. насінин/га.

За міжряддя 0,70 м відстань між насінинами в рядку становитиме:

$$l = 10000 / (N_в \cdot b), \quad (1.2)$$

де l – відстань у рядку, м; $N_в$ – кількість насінин, шт./га; b – ширина міжряддя, м. Після підстановки одержуємо l = 10000 / (82500 · 0,70) = 0,173 м, або приблизно 17,3 см. Такий інтервал забезпечує рівномірне живлення рослин і сумісний з роботизованим доглядом по координатах рядків.

Потреба в насінні на площу 500 га становить 41,25 млн насінин. Якщо в одній посівній одиниці міститься 80 тис. насінин, необхідно 41,25 млн / 80 тис. = 515,6 посівних одиниць. З урахуванням технологічного резерву 2-3 % приймаємо 531 посівну одиницю.

Система удобрення формується з урахуванням планової врожайності та родючості ґрунту. Для розрахункового варіанта приймаємо внесення N120P60K90 у діючій речовині. Частину фосфорних добрив доцільно вносити локально під час сівби, а азот розподіляти між передпосівним внесенням і підживленням у фазі активного росту. Такий підхід зменшує втрати елементів живлення і підвищує коефіцієнт їх використання рослинами.

Таблиця 2.3 - Розрахунок потреби в насінні та добривах на площу 500 га

Показник	Формула або норма	На 1 га	На 500 га	Одиниця	Примітка
Норма висіву	70·1,03/(0,95·0,92)	82,5	41250	тис. насінин	з урахуванням польової схожості
Відстань у рядку	10000/(82500·0,70)	17,3	-	см	міжряддя 70 см
Посівні одиниці	80 тис. насінин/од.	1,03	515,6	од.	без резерву
Посівні одиниці з резервом	+3 %	1,06	531	од.	прийнято до закупівлі
Азот N	N120	120	60000	кг д.р.	передпосівно + підживлення
Фосфор P2O5	P60	60	30000	кг д.р.	локально і основне внесення
Калій K2O	K90	90	45000	кг д.р.	під основний обробіток

2.5. Розрахунок продуктивності основного агрегату

Для основного обробітку ґрунту приймаємо агрегат Fendt 900 Vario + розроблений 8-корпусний плуг-розпушувач. Вихідні параметри: ширина захвату B = 4,0 м; робоча швидкість V = 8 км/год; коефіцієнт використання часу зміни τ = 0,80; глибина обробітку a = 0,30-0,35 м. Теоретична годинна продуктивність визначається за формулою:

$$W_т = 0{,}1 \cdot B \cdot V. \quad (1.1)$$

$$W_т = 0{,}1 \cdot 4{,}0 \cdot 8 = 3{,}20 \text{ га/год.}$$

З урахуванням поворотів, регулювань, технологічних зупинок і контролю якості фактична продуктивність становить:

$$W_ф = W_т \cdot \tau = 3{,}20 \cdot 0{,}80 = 2{,}56 \text{ га/год.} \quad (1.2)$$

Тоді час на виконання основного обробітку на площі 500 га дорівнює:

$$T = F / W_ф = 500 / 2{,}56 = 195{,}3 \text{ год.}$$

Орієнтовна потреба в змінному часі при тривалості зміни 8 год становить 195,3 / 8 = 24,4 зміни для одного агрегату. Для завершення роботи в межах 10 діб приймаємо два агрегати Fendt 900 Vario + 8-корпусний плуг-розпушувач за коефіцієнта змінності 1,5 або три агрегати за однозмінної роботи.

Тягово-енергетична оцінка виконується за орієнтовним тяговим опором розробленого плуга-розпушувача R = 44 кН. При робочій швидкості 8 км/год, або 2,22 м/с, потрібна тягової потужність становить:

$$N_т = R \cdot v = 44 \cdot 2{,}22 = 97{,}7 \text{ кВт}. \quad (1.3)$$

З урахуванням втрат у трансмісії, буксування і нерівномірності опору необхідна ефективна потужність трактора має бути не меншою 140-160 кВт. Трактор Fendt 900 Vario має достатній запас потужності для роботи з таким знаряддям, що забезпечує стабільність глибини та швидкості.

Таблиця 2.4 – Розрахунок продуктивності агрегату Fendt 900 Vario + 8-корпусний плуг-розпушувач на площі 500 га

Показник	Позначення	Значення	Одиниця	Розрахунок / пояснення
Ширина захвату	B	4,0	м	8 корпусів по 0,5 м
Робоча швидкість	V	8,0	км/год	для глибокого розпушування
Коефіцієнт використання часу	τ	0,80	-	повороти, налаштування, контроль
Теоретична продуктивність	Wт	3,20	га/год	0,1·4,0·8
Фактична продуктивність	Wф	2,56	га/год	3,20·0,80
Час на 500 га	T	195,3	год	500/2,56
Кількість 8-годинних змін	nзм	24,4	зміни	для одного агрегату; при 2 агрегатах - 12,2 зміни
Тяговий опір	R	44	кН	розрахункове значення
Потрібна тягова потужність	Nт	97,7	кВт	44·2,22

2.6. Розрахунок використання FarmDroid FD20 у післясходовій боротьбі з бур’янами

Післясходова боротьба з бур’янами в кукурудзі має виконуватися у ранні фази розвитку культури, оскільки бур’яни швидко споживають вологу і поживні речовини, затінюють сходи та ускладнюють подальший догляд. У традиційних технологіях для цього застосовують міжрядні культиватори та гербіциди. У запропонованій технології частина хімічного навантаження замінюється роботизованим механічним обробітком.

FarmDroid FD20 є легким автономним роботом, що працює від сонячних батарей і використовує високоточне RTK-позиціонування. Для кукурудзи з міжряддям 70 см робоча ширина 3,5 м дає змогу одночасно працювати приблизно з п’ятьма рядками. Основною умовою якісної роботи є точність сівби та наявність цифрових координат рядків. Перший післясходовий прохід доцільно проводити у фазі 2-4 листків кукурудзи, другий – у фазі 5-7 листків або за появи другої хвилі бур’янів.

За добової продуктивності до 6 га/добу час роботи одного FarmDroid FD20 на площі 500 га за один прохід становить: $T_{p1} = 500 / 6 = 83,3$ доби. Для двох проходів $T_{p2} = 2 \cdot 83,3 = 166,7$ роботодоби. Тому для своєчасного післясходового догляду формуємо парк із 6 роботів, який дозволяє виконати один повний прохід за 14 діб.

Перевагою роботизованого обробітку є практично відсутні витрати дизельного пального, зменшення ручної праці, можливість роботи протягом тривалого часу та точний вплив на бур’яни. Однак технологія потребує цифрової карти поля, огородження небезпечних зон, контролю перешкод, стабільного RTK-сигналу і навчання персоналу.

Таблиця 2.5 – Розрахунок використання FarmDroid FD20 для догляду за посівами на площі 500 га

Показник	Значення	Одиниця	На 500 га	Пояснення
Робоча ширина	3,5	м	-	за міжряддя 70 см - близько 5 рядків
Добова продуктивність	6	га/добу	83,3 доби/прохід для 1 робота	для дотримання строку потрібен парк роботів
Кількість проходів	2	рази	166,7 роботодоби	два післясходові обробітки
Витрати дизельного пального	0	кг/га	0	енергія від сонячних панелей
Контроль оператора	0,05	люд.-год/га	25 люд.-год	налаштування і моніторинг
Прийнята кількість роботів	6	шт.	500/(6·14)=5,95	один прохід за 14 діб

2.7. Сучасна технологічна карта вирощування кукурудзи на зерно

Технологічна карта є основним документом для організації польових робіт. Вона визначає послідовність операцій, строки їх виконання, склад агрегатів, агротехнічні параметри, продуктивність, витрати пального та потребу в праці. У таблиці 2.6 наведено проєктовану технологічну карту для площі 500 га з урахуванням конкретних марок тракторів і сільськогосподарських машин, застосування агрегату Fendt 900 Vario + 8-корпусний плуг-розпушувач і парку роботів FarmDroid FD20.

Таблиця 2.6 – Технологічна карта вирощування кукурудзи на зерно на площі 500 га із зазначенням марок техніки

№	Строк виконання	Операція	Марка трактора і сільськогосподарської машини	Агротехнічні параметри	Продуктивність	Витрати і примітки
1	липень-серпень	Збирання попередника та подрібнення решток	Claas Lexion 770 + жатка Claas Vario 770 + подрібнювач соломи	висота стерні 12-18 см;	25-35 га/зміну	підготовка фону для лущення стерні
2	після збирання	Лущення стерні	Fendt 724 Vario + Lemken Rubin 10/600 KUA	глибина 8-10 см;	5,76 га/год	для 500 га прийнято 2 агр.
3	серпень-вересень	Внесення калійних і частини фосфорних добрив	Fendt 724 Vario + Amazone ZA-TS 4200	K90 + частина P60;	до 20 га/год	можливе диференційоване внесення
4	вересень-жовтень	Основний обробіток ґрунту	Fendt 942 Vario + 8-корпусний плуг-розпушувач	глибина 30-35 см; ширина 4,0 м; швидкість 7-8 км/год	2,56 га/год	на 500 га потрібно 2 агрегати за 10 днів і Кзм=1,5
5	березень-квітень	Закриття вологи	John Deere 6175M + Lemken Korund 9/900 K	мінімальне розпушення верхнього шару; збереження вологи	10-12 га/год	для 500 га прийнято 2 агрегати
6	квітень	Передпосівна культивація	Fendt 724 Vario + Lemken Kompaktor K 600 A	глибина 5-6 см; вирівняне насіннєве ложе	4,8 га/год	для 500 га прийнято 3 агрегати
7	квітень	Передпосівне внесення азоту	Fendt 516 Vario + Amazone UF 2002 / ZA-TS 4200	N60-80 залежно від забезпеченості ґрунту	15-20 га/год	працювати за картами продуктивності
8	травень	Сівба кукурудзи	John Deere 6195M + Väderstad Tempo V 12	міжряддя 70 см; глибина 5-6 см; 82,5 тис. нас./га	5,04 га/год	для 500 га прийн. 2 пос. агр.
9	після сівби	Прикочування за потреби	John Deere 6175M + Dal-Bo MaxiRoll 1230	ущільнення насіннєвого ложа без утворення кірки	8-10 га/год	виконувати за недостатнього контакту насіння з ґрунтом
10	до сходів	Моніторинг поля та уточнення карти рядків	DJI Mavic 3M RTK + польовий планшет з ГІС-картою	перевірка меж, перешкод, стану поверхні і рядків	до 250 га/день	підготовка карт для FarmDroid FD20
11	фаза 2-4 листків	Перший післясходовий роботизований обробіток	FarmDroid FD20, парк 6 роботів	механічний контроль бур'янів між рядками і в рядку	6 га/добу на 1 робот	500 га за 14 діб одним проходом
12	фаза 5-7 листків	Другий роботизований обробіток	FarmDroid FD20, парк 6 роботів	повторний контроль другої хвилі бур'янів; робота за RTK	6 га/добу на 1 робот	зменшення потреби у гербіцидах
13	червень	Міжрядне підживлення за потреби	John Deere 6195M + КРН-5,6 / Yetter 2984 з аплікатором КАС	N30-40; локально в міжряддя	3-4 га/год	операція виконується за результатами моніторингу
14	червень-липень	Моніторинг шкідників і хвороб	DJI Mavic 3M RTK; за потреби Fendt 516 Vario + Amazone UF 2002	пороговий принцип прийняття рішень; локальний або суцільний захист	до 250 га/день; обприскування 20 га/год	захист виконувати лише за економічного порогу шкодочинності
15	вересень-жовтень	Збирання кукурудзи на зерно	Claas Lexion 770 + жатка Claas Corio 8-70	вологість зерна 18-25 %; мінімізація втрат	до 3,2 га/год	для 500 га прийнято 2 комбайни
16	після збирання	Транспортування, очищення і сушіння зерна	Fendt 724 Vario + Pronar T780; зерносушарка Sukup / Brice-Baker	доведення до кондиційної вологості; оперативне відвезення зерна	4 транспортні агрегати	за врожайності 8,5 т/га валовий збір 4250 т

2.9. Календарне планування та контроль якості робіт

Календарне планування передбачає розподіл операцій за агротехнічними строками і технічними можливостями машин. Найбільш напруженими періодами є осінній основний обробіток, весняна підготовка поля та ранній післясходовий догляд. Для основного обробітку на площі 500 га потрібно 195,3 год, тому в технології прийнято два агрегати Fendt 900 Vario + 8-корпусний плуг-розпушувач за роботи у подовженому режимі. Весняні операції повинні бути максимально скорочені за кількістю проходів, щоб уникнути втрати вологи.

Для роботизованого догляду важливо не тільки визначити загальну тривалість роботи, а й забезпечити щоденний контроль стартових умов: точність RTK-сигналу, відсутність великих перешкод, стан батарей, справність робочих органів, відповідність траєкторії рядкам. Для площі 500 га доцільно розбивати масив на черги обслуговування та одночасно використовувати парк із 6 роботів FarmDroid FD20. За виробничої потреби роботизований догляд може поєднуватися з традиційним міжрядним культиватором на менш чутливих ділянках.

Контроль якості основного обробітку включає вимірювання глибини не менше ніж у 10 точках поля, оцінку рівномірності розпушування, відсутності необроблених смуг, ступеня вирівняності поверхні та проходження рослинних решток. Для сівби контролюють глибину загортання, фактичну норму висіву, відстань між насінинами в рядку та прямолінійність рядків. Для роботи робота контролюють точність проходу, підрізання бур’янів, пошкодження культурних рослин та стан міжрядь після обробітку.

Таблиця 2.8 - Контрольні показники якості технологічних операцій

Операція	Контрольний показник	Допустиме відхилення	Метод контролю
Основний обробіток	глибина розпушування 30-35 см	±2-3 см	замір щупом або лінійкою у контрольних точках
Основний обробіток	відсутність суцільної плужної підошви	не допускається	польовий розріз ґрунту
Передпосівна підготовка	глибина обробітку 5-6 см	±1 см	огляд і вимірювання
Сівба	глибина загортання 5-6 см	±1 см	розкопування рядка
Сівба	відстань між насінинами 17-18 см	±10 %	підрахунок на контрольному відрізку
FarmDroid FD20	пошкодження культурних рослин	не більше 1-2 %	огляд після проходу
FarmDroid FD20	підрізання бур’янів у міжрядді	не менше 85-90 %	облік на пробних площадках
Збирання	втрати зерна за комбайном	до 1,5-2,0 %	рамковий метод

2.10. Очікуваний ефект від впровадження проєктованої технології

Удосконалена технологія вирощування кукурудзи на зерно в умовах Житомирської області поєднує агротехнічну ефективність глибокого розпушування з можливостями цифрового керування та роботизованого догляду. Використання 8-корпусного плуга-розпушувача з трактором Fendt 900 Vario дозволяє виконувати основний обробіток з високою продуктивністю та стабільною глибиною. Руйнування ущільненого шару сприяє кращому розвитку коренів, підвищує використання вологи і зменшує ризик поверхневого стоку під час інтенсивних опадів.

Роботизована післясходова боротьба з бур’янами забезпечує екологічні та організаційні переваги. Механічний вплив на бур’яни дає змогу зменшити гербіцидне навантаження, підвищити точність догляду і скоротити потребу в ручній праці. Крім того, легка маса робота знижує ущільнення ґрунту в міжряддях порівняно з багаторазовими проходами важких тракторних агрегатів.

У технологічному відношенні запропонована система є гнучкою. За достатньої кількості ресурсів її можна розширювати шляхом використання кількох роботів, диференційованого внесення добрив, супутникового моніторингу, карт урожайності та локального захисту рослин. За обмеженого бюджету робот може використовуватись на частині площі, а традиційні агрегати - на решті масиву. Таким чином забезпечується поступовий перехід до точного і роботизованого землеробства без різкого порушення наявної виробничої системи.

Отже, розроблена технологія відповідає сучасним вимогам до вирощування кукурудзи на зерно: підвищує якість основного обробітку ґрунту, знижує ризик ущільнення, забезпечує точне виконання сівби та догляду, створює умови для зменшення витрат пального і засобів захисту рослин. Включення агрегату Fendt 900 Vario + 8-корпусний плуг-розпушувач і робота FarmDroid FD20 у технологічну карту є обґрунтованим напрямом удосконалення комплексу машин для умов Житомирської області.

2.8. Розрахунок потреби у техніці на площу 500 га

Необхідну кількість агрегатів визначаємо за умови виконання робіт на площі F = 500 га у допустимі агротехнічні строки. Для тракторних агрегатів годинну продуктивність розраховуємо за формулою:

$$W_{год} = 0{,}1 \cdot B \cdot V \cdot \tau, \quad (1.4)$$

де B - ширина захвату, м; V - робоча швидкість, км/год; τ - коефіцієнт використання часу зміни.

Добова продуктивність становить:

$$W_{доб} = W_{год} \cdot T_{зм} \cdot K_{зм}, \quad (1.5)$$

де $T_{зм}$ = 8 год, $K_{зм}$ – коефіцієнт змінності. Кількість агрегатів приймаємо за формулою: $n = F/(W_{доб} \cdot D)$ з округленням у більший бік, де D – допустима тривалість виконання операції, діб.

Для робота FarmDroid FD20 застосовується добова продуктивність, оскільки машина працює автономно і оцінюється не за змінною, а за

календарною тривалістю проходу. При прийнятій продуктивності 6 га/добу та агротехнічному строку 14 діб для одного післясходового проходу потрібно 6 роботів. Розрахунок показує, що один робот не може своєчасно обробити площу 500 га, тому роботизований догляд доцільно планувати як роботу парку машин.

Таблиця 2.7 – Розрахунок необхідної кількості техніки для площі 500 га

Операція	Марка трактора / машини	B, м	V, км/год	τ	$W_{год}$, га/год	Кзм	D, діб	Розрахунок n	Прийнято, шт.
Лущення стерні	Fendt 724 Vario + Lemken Rubin 10/600 KUA	6,0	12	0,80	5,76	1,5	5	500/(5,76·8·1,5·5)=1,45	2
Внесення добрив	Fendt 724 Vario + Amazone ZA-TS 4200	24	12	0,70	20,16	1,0	4	500/(20,16·8·1,0·4)=0,77	1
Основний обробіток	Fendt 942 Vario + 8-корпусний плуг-розпушувач	4,0	8	0,80	2,56	1,5	10	500/(2,56·8·1,5·10)=1,63	2
Закриття вологи	John Deere 6175M + Lemken Korund 9/900 K	12	12	0,85	12,24	1,0	3	500/(12,24·8·1,0·3)=1,36	2
Передпосівна культивація	Fendt 724 Vario + Lemken Kompaktor K 600 A	6,0	10	0,80	4,80	1,5	4	500/(4,80·8·1,5·4)=2,17	3
Сівба	John Deere 6195M + Väderstad Tempo V 12	8,4	8	0,75	5,04	1,5	6	500/(5,04·8·1,5·6)=1,38	2
Обприскування/позакореневий захист	Fendt 516 Vario + Amazone UF 2002	24	12	0,75	21,60	1,0	3	500/(21,60·8·1,0·3)=0,96	1
Післясходовий роботизований догляд	FarmDroid FD20	3,5	-	-	6 га/добу	-	14	500/(6·14)=5,95	6
Збирання кукурудзи	Claas Lexion 770 + Claas Corio 8-70	5,6	6	0,95	3,20	1,5	12	500/(3,20·8·1,5·12)=1,09	2
Транспортування зерна	Fendt 724 Vario + Pronar T780	-	-	-	≈180 т/добу	-	-	653 т/добу / 180 = 3,63	4

Отже, для своєчасного виконання основних операцій на площі 500 га необхідно передбачити такий розрахунковий парк: 2 агрегати Fendt 942 Vario з 8-корпусними плугами-розпушувачами, 3 передпосівні агрегати Fendt 724 Vario з компакторами, 2 посівні агрегати John Deere 6195M з Väderstad Tempo V 12, 6 роботів FarmDroid FD20, 2 зернозбиральні комбайни Claas Lexion 770 із жатками Corio 8-70 та 4 транспортні агрегати для відвезення зерна. Частина універсальних тракторів може використовуватися послідовно на різних

операціях, тому фактичний склад машинного парку уточнюється з урахуванням календарного графіка і наявної техніки господарства.

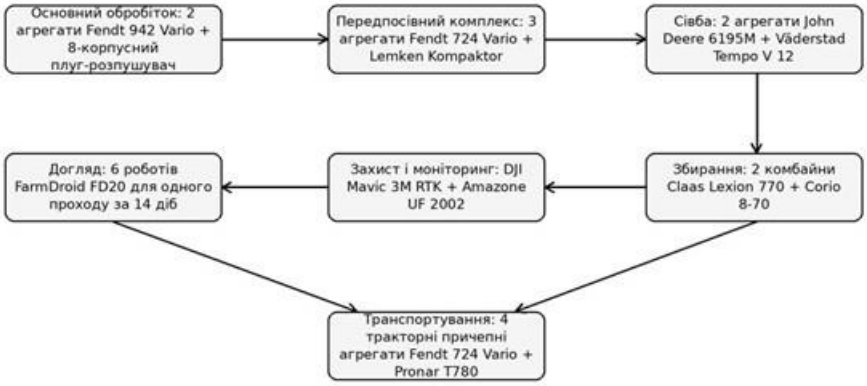


Рис. 2.2. Схема розрахункової потреби у техніці для площі 500 га

Висновок до розділу

У другому розділі спроєктовано технологію вирощування кукурудзи на зерно для умов Житомирської області на розрахункову площу 500 га. Обґрунтовано вихідні агротехнічні параметри, норму висіву, потребу в основних матеріалах, продуктивність агрегату для основного обробітку, марки тракторів і сільськогосподарських машин у технологічній карті та необхідну кількість техніки для виконання робіт у встановлені строки.

Основний обробіток запропоновано виконувати агрегатом Fendt 900 Vario + 8-корпусний плуг-розпушувач з шириною захвату 4,0 м і фактичною продуктивністю близько 2,56 га/год. Післясходовий догляд запропоновано виконувати FarmDroid FD20, який забезпечує точний механічний контроль бур’янів у міжряддях і в рядку, зменшує потребу в хімічному захисті та відповідає тенденціям роботизації землеробства. Наведені розрахунки, таблиці та схеми підтверджують технологічну доцільність запропонованого комплексу машин.

РОЗДІЛ 3
КОНСТРУКТИВНА ЧАСТИНА. РОЗРОБКА МАШИНИ ДЛЯ ОСНОВНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

3.1 Загальні передумови удосконалення комплексу машин для вирощування кукурудзи на зерно

Кукурудза на зерно належить до культур, які дуже чутливо реагують на якість основного обробітку ґрунту, стан кореневмісного шару, запас продуктивної вологи та рівномірність розміщення рослин у рядку. Тому удосконалення комплексу машин для її вирощування доцільно починати саме з операцій, що формують фізичний стан ґрунту перед сівбою. За наявності ущільненого підорного шару навіть якісне внесення добрив, точний висів і своєчасний догляд не забезпечують повної реалізації потенціалу культури.

У виробничих умовах основними причинами погіршення структури ґрунту є багаторазові проходи важких тракторів і збиральної техніки, обробіток за підвищеної вологості, постійне використання однакової глибини оранки, нестача органічної речовини та часте вирощування культур з подібною кореневою системою. Унаслідок цього зростає об’ємна маса ґрунту, зменшується кількість макропор, порушується повітрообмін і ускладнюється інфільтрація вологи.

Для кукурудзи особливо небезпечним є ущільнення на глибині нижче традиційного орного шару. Коренева система цієї культури здатна проникати на значну глибину, проте наявність щільного прошарку обмежує її розвиток, зменшує використання вологи з нижніх горизонтів та підвищує ризик пригнічення рослин у посушливі періоди. Крім того, переущільнення збільшує тяговий опір ґрунтообробних агрегатів, підвищує витрати пального і скорочує продуктивність машинно-тракторного агрегату.

З огляду на це, у комплексі машин для вирощування кукурудзи на зерно необхідно передбачити таку машину для основного обробітку, яка поєднує розпушування ущільненого шару з мінімальним переміщенням ґрунту.

Найбільш придатною для цього є машина чизельного типу, або плуг-розпушувач, що працює без повного обертання скиби, руйнує плужну підошву і зберігає частину рослинних решток на поверхні поля.

Таблиця 3.1 – Місце машини для основного обробітку ґрунту в комплексі машин для вирощування кукурудзи на зерно

Операція технології	Типові машини	Вимоги при вирощуванні кукурудзи на зерно
Основний обробіток ґрунту	плуг, чизельний плуг, глибокорозпушувач	руйнування ущільненого шару, накопичення вологи, створення умов для розвитку кореневої системи
Передпосівний обробіток	культиватор, комбінований агрегат	вирівнювання поверхні, збереження вологи, формування посівного ложа
Сівба	сівалка точного висіву	стабільна глибина загортання, рівномірна густота стояння рослин
Догляд за посівами	обприскувач, міжрядний культиватор	знищення бур’янів, мінімальне пошкодження рослин і ґрунтової структури
Збирання	зернозбиральний комбайн з кукурудзяною жаткою	мінімальні втрати зерна, подрібнення і рівномірний розподіл решток

3.2 Огляд і вибір конструктивної схеми машини для основного обробітку

У сучасній технології вирощування кукурудзи застосовують кілька варіантів основного обробітку: традиційну оранку полицевими плугами, безполицеве розпушування, чизелювання, глибоке смугове розпушування та комбіновані системи. Кожний варіант має власну сферу ефективного використання, проте за умов наявності плужної підошви найбільш доцільним є застосування глибокорозпушувальних робочих органів.

Полицевий плуг забезпечує перевертання скиби, добре загортає післяжнивні рештки та бур’яни, але має підвищений тяговий опір і може формувати ущільнений шар на межі глибини оранки. При багаторазовому виконанні оранки на однакову глибину нижня частина леза й польова дошка ущільнюють ґрунт, унаслідок чого утворюється плужна підошва. Це погіршує водопроникність, а в умовах вирощування кукурудзи може зменшувати глибину активного розвитку коренів.

Чизельні знаряддя та плуги-розпушувачі працюють за іншим принципом. Їхні вузькі долотоподібні або лапові робочі органи розрізають і піднімають ґрунтовий пласт, розкривають тріщини, руйнують ущільнений прошарок, але не перевертають скибу повністю. Завдяки цьому зменшується енергоємність процесу, краще зберігається рослинний покрив на поверхні, знижується небезпека вітрової та водної ерозії.

Для умов вирощування кукурудзи на зерно доцільно обрати конструктивну схему плуга-розпушувача з похилими стояками, долотами, дисковими ножами перед робочими органами та опорно-регулювальними колесами. Така схема дає змогу працювати на глибині 0,30...0,35 м, формувати розпушену зону без інтенсивного обороту пласта та підтримувати задану глибину ходу в полі.

Таблиця 3.2 – Порівняння робочого процесу полицевого плуга і плуга-розпушувача

Показник	Полицевий плуг	Плуг-розпушувач
Характер дії на ґрунт	розрізання, піднімання, обертання і переміщення скиби	розрізання, піднімання, кришення і розпушування без повного обертання
Вплив на плужну підошву	за повторної роботи на одній глибині може посилювати ущільнення	руйнує ущільнений шар і покращує водопроникність
Енергоємність	вища через переміщення скиби вбік	нижча, бо відсутня складова на відкидання скиби
Збереження рослинних решток	рештки переважно загортаються	частина решток залишається на поверхні поля
Доцільність для кукурудзи на зерно	ефективний за потреби повного загортання решток	доцільний для глибокого розпушування і поліпшення розвитку коренів

3.3 Обґрунтування необхідності розробки плуга-розпушувача та опис його конструкції

Необхідність розробки плуга-розпушувача зумовлена потребою у зниженні ущільнення ґрунту, підвищенні вологонакопичення та зменшенні енерговитрат при основному обробітку під кукурудзу. Ущільнені ґрунти мають більшу об’ємну масу, меншу пористість і гіршу аерацію. При досягненні

критичної щільності для ґрунтів середнього механічного складу ріст кореневої системи суттєво обмежується, а продуктивність культури знижується.

Ущільнення ґрунтового профілю умовно поділяють на три види: ущільнення у межах орного горизонту, плужну підошву під обробленим шаром та ущільнення підорного горизонту. Плужна підошва формується нижче проходу леза робочих органів і характеризується мінімальною кількістю пор. Її товщина залежить від маси агрегату, форми робочих органів, кількості проходів, вологості та механічного складу ґрунту.

Глибоке розпушування чизельними робочими органами руйнує плужну підошву і створює вертикальні тріщини, через які волога може проникати в нижні горизонти. У посушливий період корені кукурудзи отримують можливість використовувати вологу з глибших шарів, а за надмірного зволоження поліпшується відведення зайвої води з верхнього шару.

Розроблюваний плуг-розпушувач конструктивно складається з несучої рами, триточкового начіпного пристрою, комплекту похилих стояків з долотами, кронштейнів кріплення робочих органів, дискових ножів і опорно-регулювальних коліс. Рама сприймає навантаження від робочих органів і передає їх на начіпний механізм трактора. Опорні колеса дають змогу точно задавати та підтримувати глибину ходу.

Кріплення стояків до рами доцільно виконати за допомогою двох кронштейнів і притискної пластини. Таке рішення дозволяє змінювати відстань між долотами в межах 0,35...0,50 м залежно від глибини обробітку, вологості та забур’яненості поля. Для розпушування на глибину близько 0,35 м приймаємо відстань між долотами 0,50 м, оскільки ширина зони деформації похилим робочим органом становить приблизно 1,25...1,45 глибини обробітку.

Перед кожним стояком доцільно встановити дисковий ніж. Він розрізає пожнивні рештки кукурудзи і поверхневий шар ґрунту, зменшує намотування рослинної маси на стояки та стабілізує напрям руху робочого органу. Це особливо важливо після збирання кукурудзи, коли на полі залишається значна кількість стеблових решток.

3.4 Особливості робочого процесу і агротехнічні вимоги

Робочий процес плуга-розпушувача складається з послідовного розрізання поверхневого шару дисковим ножем, занурення долота, піднімання ґрунтового пласта похилим стояком, утворення тріщин і подальшого осідання розпушеної маси. На відміну від оранки, ґрунт не переміщується на значну відстань у поперечному напрямку, а залишається переважно на місці. Це знижує втрати енергії на відкидання скиби і покращує збереження агрономічно цінної структури.

Основними агротехнічними вимогами до машини є забезпечення заданої глибини розпушування, повне руйнування ущільненого шару у зоні проходу робочих органів, відсутність забивання пожнивними рештками, рівномірність ходу по ширині захвату, недопущення надмірного гребенистого профілю поверхні поля та мінімальне винесення вологого нижнього шару на поверхню.

Для кукурудзи на зерно важливим є не лише глибоке розпушування, а й збереження вологи у верхньому шарі до періоду сівби. Тому робота плуга-розпушувача має виконуватися за оптимальної вологості ґрунту, коли пласт добре кришиться, але не замазується. За надмірної вологості можливе утворення брил і ущільнення стінок щілин, а за пересушеного стану різко зростає тяговий опір.

Прийнята конструкція повинна забезпечувати проходження рослинних решток між стояками і рамою. Для цього необхідні достатній просвіт під рамою, раціональна форма стояка і шахове розміщення робочих органів. Найменша ймовірність забивання спостерігається у стояків з округленою або напівкруглою лобовою частиною, оскільки рослинна маса легше зісковзує з гладкої поверхні.

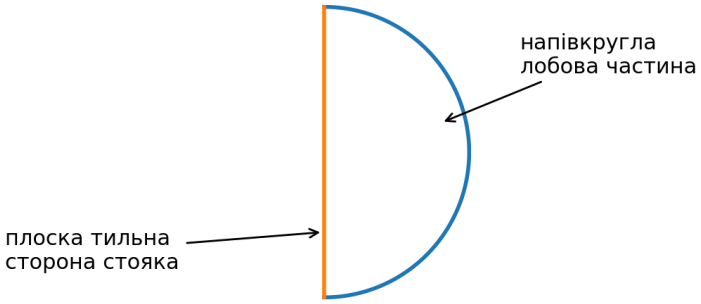


Рис. 3.1. Прийнятий профіль поперечного перерізу стояка робочого органу

Таблиця 3.3 – Основні конструктивно-технологічні параметри плуга-розпушувача

Параметр	Прийняте значення	Обґрунтування
Глибина робочого ходу	0,30...0,35 м	руйнування плужної підошви та створення умов для глибшого розвитку коренів кукурудзи
Ширина захвату машини	4,0 м	узгоджується з кількістю робочих органів і тяговими можливостями трактора
Кількість робочих органів	8 шт.	забезпечує міждолотну відстань 0,50 м
Відстань між долотами	0,50 м	відповідає зоні деформації ґрунту при глибині 0,35 м
Робоча швидкість	до 10 км/год, або 2,8 м/с	дає змогу зберегти продуктивність без різкого зростання опору
Висота стояка	приблизно 0,74 м	забезпечує просвіт для проходження решток і стабільну роботу на максимальній глибині

3.5 Розрахунок тягового опору полицевого плуга і плуга-розпушувача

Для оцінювання доцільності застосування плуга-розпушувача порівняємо його енергетичні показники з показниками полицевого плуга. Загальний тяговий опір полицевого плуга можна подати як суму трьох складових: опору переміщення самого знаряддя, опору деформації скиби та опору, пов’язаного з наданням частинкам ґрунту кінетичної енергії під час відкидання скиби у борозну.

$$R_1 = f \cdot G, \tag{3.1}$$

де f – коефіцієнт, що враховує опір перекочуванню та тертю; G – вага плуга, кН.

$$R_2 = k \cdot a \cdot b, \quad (3.2)$$

де k – коефіцієнт опору ґрунту деформації, кН/м²; a – глибина оранки, м; b – ширина захвату плуга, м.

$$R_3 = \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot V^2, \quad (3.3)$$

де ε – коефіцієнт, що залежить від форми полиці та властивостей ґрунту; V – швидкість руху агрегату, м/с.

Отже, повний тяговий опір полицевого плуга визначається залежністю:

$$R_{пп} = R_1 + R_2 + R_3 = f_G + k_{ab} + \varepsilon_{ab} V^2. \quad (3.4)$$

Для розрахунку приймаємо такі вихідні дані: f = 0,5; G = 13 кН; k = 30 кН/м²; a = 0,30 м; b = 4,0 м; ε = 5 кН·с²/м⁴. Тоді стала частина опору становить 42,5 кН, а швидкісна складова дорівнює $6V^2$.

$$R_{пп} = 42{,}5 + 6V^2. \quad (3.5)$$

Розрахункові значення показують, що при збільшенні швидкості від 1 до 3 м/с тяговий опір полицевого плуга зростає з 48,5 до 96,5 кН. Таке зростання пояснюється значним впливом складової R_3, яка пропорційна квадрату швидкості руху.

Таблиця 3.4 – Розрахунок тягового опору і ККД полицевого плуга

V, м/с	$R_{пп}$, кН	$\eta_{пп}$
1,0	48,5	0,728
1,5	56,0	0,640
2,0	66,5	0,552
2,5	80,0	0,464
3,0	96,5	0,376

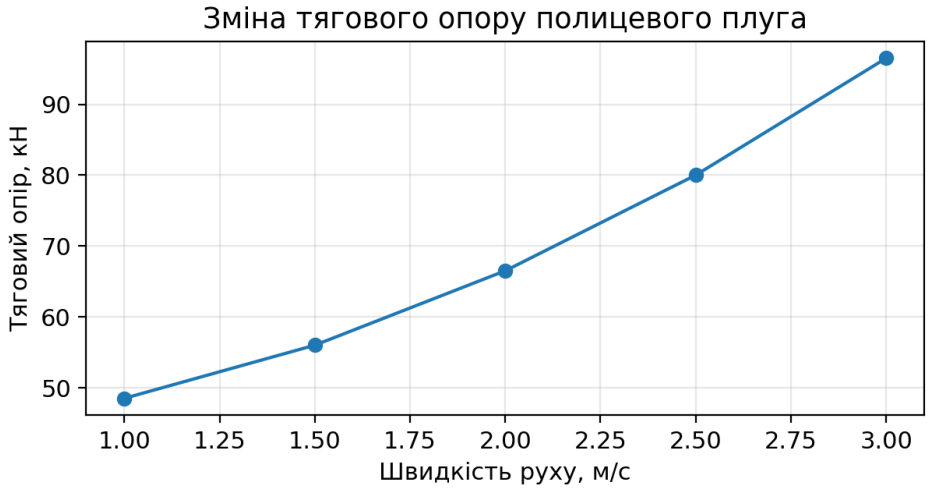


Рис. 3.2. Залежність тягового опору полицевого плуга від швидкості руху

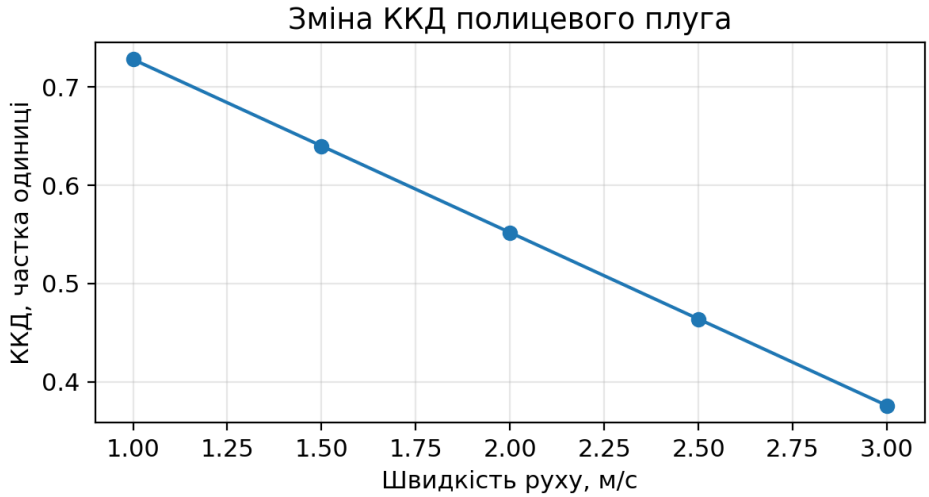


Рис. 3.3. Залежність ККД полицевого плуга від швидкості руху

У плуга-розпушувача відсутні полиці, які переміщують скибу у сусідню борозну. Тому складова $R_з$, пов'язана з відкиданням ґрунту, практично виключається. У спрощеному вигляді тяговий опір можна записати так:

$$R_{пр} = R_1 + R_2 = f_G + k_{ab}. \quad (3.6)$$

Однак на практиці опір будь-якої ґрунтообробної машини зростає зі збільшенням швидкості, тому для уточнення розрахунку використовується залежність:

$$R_{прі} = R_{про} \cdot [1 + \Delta \cdot (V_i - V_0) / 100], \quad (3.7)$$

де $Rпр_i$ – тяговий опір плуга-розпушувача на заданій швидкості, кН; $Rпр_0$ – тяговий опір при швидкості $V_0 = 5$ км/год; Δ – приріст опору при збільшенні швидкості на 1 км/год, %; V_i – поточна швидкість руху, км/год.

Для подальшого аналізу приймаємо темп приросту тягового опору Δ = 5 % на кожний 1 км/год збільшення швидкості. У перерахунку на швидкість у м/с залежність можна подати у вигляді:

$$R_{пр} = 31,9 + 7,6V. \quad (3.8)$$

На відміну від полицевого плуга, зростання опору плуга-розпушувача має більш плавний характер. При швидкості 3 м/с тяговий опір становить близько 54,7 кН, тобто суттєво менше, ніж у полицевого плуга за аналогічних умов.

Таблиця 3.5 – Розрахунок тягового опору і ККД плуга-розпушувача

V, м/с	Rпр, кН	$\eta_{пр}$
1,0	39,5	0,880
1,5	43,3	0,820
2,0	47,1	0,760
2,5	50,9	0,700
3,0	54,7	0,640

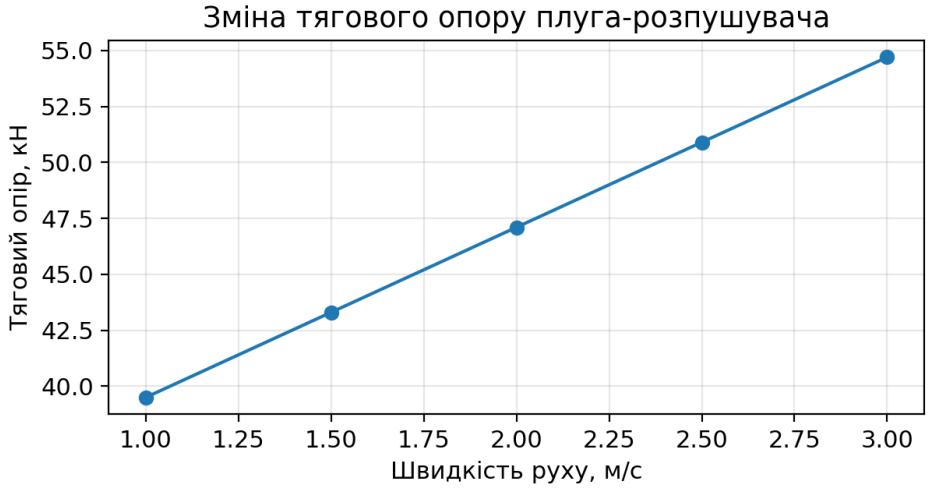


Рис. 3.4. Залежність тягового опору плуга-розпушувача від швидкості руху

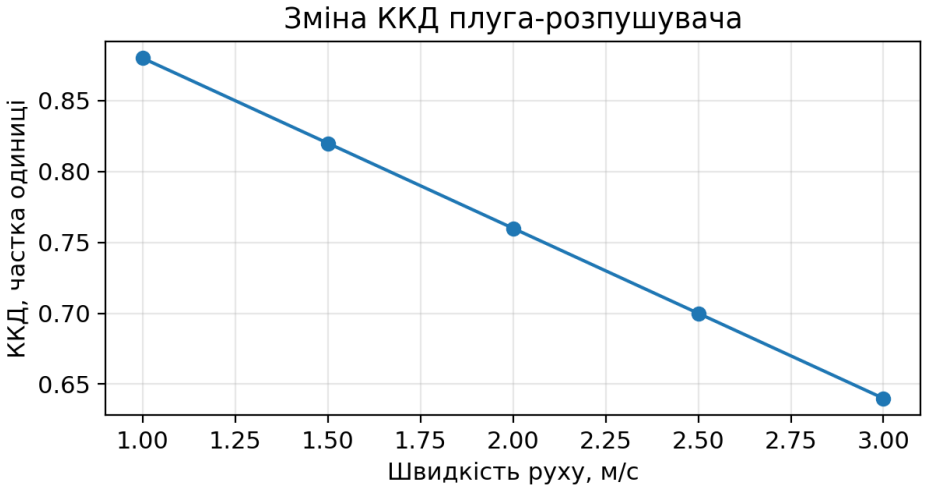


Рис. 3.5. Залежність ККД плуга-розпушувача від швидкості руху

За результатами порівняння можна зробити висновок, що для основного обробітку ґрунту під кукурудзу на зерно доцільніше застосовувати плуг-розпушувач, оскільки він руйнує ущільнений шар, має нижчий тяговий опір і забезпечує вищу енергетичну ефективність у робочому діапазоні швидкостей.

3.6 Розрахунок основних параметрів робочих органів

Розстановку робочих органів на рамі виконуємо з урахуванням ширини зони деформації ґрунту. Відстань між стояками повинна бути такою, щоб зони розпушування перекривалися, а між робочими органами залишався достатній простір для проходження пожнивних решток. Для прийнятої ширини захвату 4,0 м і кількості робочих органів n = 8 відстань між долотами становить 0,50 м.

Форма стояка впливає не лише на міцність, а й на ймовірність забивання рослинними рештками. Напівкруглий профіль лобової частини є раціональним, оскільки зменшує налипання ґрунту і полегшує зісковзування стеблової маси. У нижній частині стояка встановлюється долото, яке сприймає найбільше абразивне навантаження і забезпечує заглиблення робочого органу.

Для підвищення стійкості ходу по глибині застосовуємо верхню заточку леза долота. Кут заточки і приймаємо i = 20°, що відповідає рекомендованому діапазону 20...22°. Кут різання β_0, який визначає заглиблювальну здатність долота, доцільно приймати в межах 47...52°. Кут кришення α приймаємо 27°,

що забезпечує інтенсивне руйнування ущільненого шару без надмірного збільшення тягового опору.

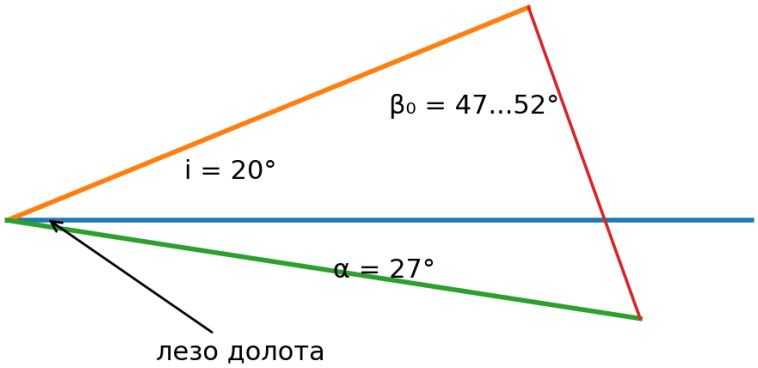


Рис. 3.6. Схема заточки долота робочого органу

Кут нахилу площини сколювання пласта перед лезом ψ залежить від кута тертя ґрунту по сталі φ та кута внутрішнього тертя ρ. Для розрахунку приймаємо φ = 25° і ρ = 40°. Отримані значення використовуються для уточнення геометрії долота та забезпечення стабільного кришення пласта.

3.7 Розрахунок шляху заглиблення робочих органів

Заглиблення начіпного плуга-розпушувача у ґрунт відбувається переважно під дією його власної ваги. Примусове занурення робочих органів небажане, оскільки воно може спричинити надмірне навантаження на раму, стояки і начіпний пристрій трактора. Тому довжина шляху заглиблення є важливим показником якості роботи агрегату на початку проходу.

Плуг-розпушувач працює на значній глибині, а його долота входять в ущільнене середовище. У таких умовах процес заглиблення складніший, ніж у культиваторних лап або поверхневих розпушувачів. Для оцінювання довжини шляху заглиблення розглянемо схему руху робочого органу вздовж похилої траєкторії.

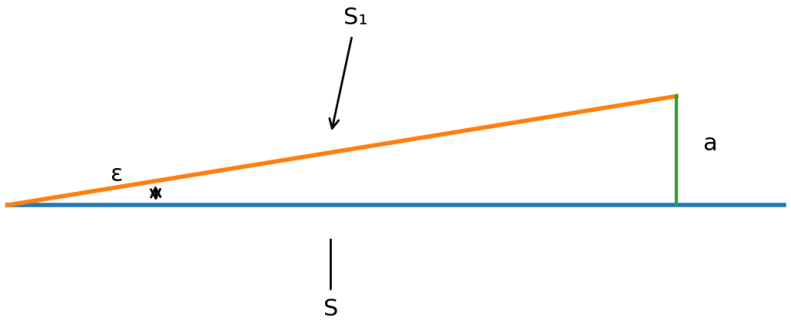


Рис. 3.7. Схема переміщення робочого органу при заглибленні на задану глибину

Складова сили ваги, яка діє вздовж траєкторії заглиблення, визначається залежністю:

$$G_1 = G \cdot \cos(90° - \varepsilon) = G \cdot \sin \varepsilon, \tag{3.9}$$

де G – сила ваги плуга-розпушувача, кН; ε – кут траєкторії заглиблення.

Робота, необхідна для заглиблення робочих органів, дорівнює:

$$W = S_1 \cdot G_1 = S_1 \cdot G \cdot \sin \varepsilon. \tag{3.10}$$

З іншого боку, цю роботу можна визначити через енерговитрати на руйнування площі ґрунту, що обробляється:

$$W = k' \cdot a \cdot b \cdot n, \tag{3.11}$$

де $k' = 15 \cdot 10^3$ Дж/м² – коефіцієнт втрат енергії на одиницю площі; a = 0,30 м – розрахункова глибина заглиблення; b = 0,50 м – ширина захвату одного робочого органу; n = 8 – кількість робочих органів.

Прирівнюючи вирази (3.10) і (3.11), отримаємо:

$$S_1 \cdot G \cdot \sin \varepsilon = k' \cdot a \cdot b \cdot n. \tag{3.12}$$

При G = 12,6 кН та ε = 6° довжина похилої траєкторії заглиблення становить:

$$S_1 = (15 \cdot 10^3 \cdot 0{,}30 \cdot 0{,}50 \cdot 8) / (12600 \cdot \sin 6°) \approx 13{,}7 \text{ м}. \tag{3.13}$$

Горизонтальну проєкцію шляху заглиблення S визначаємо за геометричною залежністю. Для малих кутів траєкторії вона практично

дорівнює 13,6 м. Довжину шляху заглиблення всього плуга визначаємо за останнім робочим органом:

$$L_1 = L + S. \quad (3.14)$$

Відстань між носками лап по ходу знаряддя приймаємо L = 0,7 м. Тоді:

$$L_1 = 0,7 + 13,6 = 14,3 \text{ м}. \quad (3.15)$$

Отримане значення означає, що після входу агрегату в поле повне досягнення заданої глибини всіма робочими органами відбувається приблизно через 14,3 м. Цей показник необхідно враховувати при організації загінки, виборі місця розвороту і контролі якості обробітку на краях поля.

3.8 Розрахунок тягового опору розробленого плуга-розпушувача

Тяговий опір розробленої машини залежить від маси знаряддя, коефіцієнта опору руху, властивостей ґрунту та площі поперечного перерізу зруйнованої частини пласта. Для уточненого розрахунку використаємо залежність:

$$R_n = f \cdot G + K \cdot F_k, \quad (3.16)$$

де f = 0,4 – коефіцієнт опору руху плуга в борозні; G = 12,6 кН – сила ваги плуга-розпушувача; K = 40 кН/м² – коефіцієнт опору ґрунту деформації; F_k – площа поперечного перерізу зрихленої частини пласта, м².

Площа поперечного перерізу зрихленої частини пласта визначається так:

$$F_k = h_k \cdot B_k - F, \quad (3.17)$$

де h_k = 0,35 м – глибина обробітку до критичної глибини різання; B_k = 4,0 м – ширина захвату машини; F – площа поперечного перерізу незруйнованих гребенів.

$$F = (n - 1) \cdot F_t. \quad (3.18)$$

За прийнятою схемою площа одного гребеня трикутної форми становить F_t = 0,06 м². Тоді:

$$F = (8 - 1) \cdot 0,06 = 0,42 \text{ м}^2. \quad (3.19)$$

$$F_k = 0,35 \cdot 4,0 - 0,42 = 0,98 \text{ м}^2. \quad (3.20)$$

Підставивши значення у формулу (3.16), визначаємо тяговий опір розробленого плуга-розпушувача:

$$R_n = 0{,}4 \cdot 12{,}6 + 40 \cdot 0{,}98 \approx 44 \text{ кН}. \quad (3.21)$$

Необхідну тягову потужність визначаємо за формулою:

$$N_n = R_n \cdot V_p, \quad (3.22)$$

де V_p – робоча швидкість руху плуга, м/с. Максимальну робочу швидкість приймаємо V_p = 10 км/год = 2,8 м/с.

$$N_n = 44{,}0 \cdot 2{,}8 \approx 123 \text{ кВт}. \quad (3.23)$$

Отже, для агрегатування розробленого плуга-розпушувача доцільно використовувати трактор відповідного тягового класу, здатний забезпечити потужність на гаку не менше 123 кВт з урахуванням запасу на змінність ґрунтових умов, буксування та нерівномірність навантаження.

Таблиця 3.6 – Підсумкові результати тягового розрахунку

Показник	Позначення	Значення
Вага плуга-розпушувача	G	12,6 кН
Коефіцієнт опору руху	f	0,4
Коефіцієнт опору ґрунту деформації	K	40 кН/м²
Площа зрихленої частини пласта	F_k	0,98 м²
Тяговий опір	R_n	≈ 44 кН
Робоча швидкість	V_p	2,8 м/с
Необхідна тягова потужність	N_n	≈ 123 кВт

3.9 Визначення висоти стояка та конструктивні рекомендації

Висота стояка робочого органу повинна забезпечувати роботу на максимальній глибині та вільний прохід рослинних решток під рамою. Якщо просвіт буде недостатнім, агрегат забиватиметься стеблами кукурудзи, що призведе до погіршення якості розпушування і вимушених зупинок. Надмірна висота стояка, навпаки, збільшує згинальний момент і масу машини.

Висоту стояка при максимальній глибині ходу визначаємо за залежністю:

$$Hc = h_1 + h_2 + a, \quad (3.24)$$

де h_1 – мінімальна відстань від рами до поверхні розпушеного ґрунту; h_2 – додаткова висота, пов’язана з розміщенням робочого органу; а – максимальна глибина обробітку.

Для забезпечення вільного проходження рослинних решток приймаємо h_1 = 0,30 м. За конструктивною схемою h_2 = 0,088 м, а максимальна глибина обробітку становить а = 0,35 м. Тоді:

$$Hc = 0,30 + 0,088 + 0,35 \approx 0,74 \text{ м}. \quad (3.25)$$

Прийнята висота стояка 0,74 м забезпечує необхідний просвіт під рамою та можливість роботи в умовах наявності значної кількості пожнивних решток кукурудзи. Для підвищення довговічності долото слід виконувати змінним, зносостійким і доступним для швидкої заміни. Стояки доцільно виготовляти з якісної конструкційної сталі з термічним зміцненням у зоні найбільших напружень.

Опорно-регулювальні колеса мають забезпечувати точне встановлення робочої глибини і зменшувати вертикальні коливання агрегату. Кронштейни кріплення робочих органів повинні дозволяти регулювання міждолотної відстані та швидке демонтування стояків для ремонту або зміни схеми обробітку. Така конструкція підвищує універсальність машини в різних ґрунтово-кліматичних умовах.

Висновки по розділу

У розділі обґрунтовано доцільність удосконалення комплексу машин для вирощування кукурудзи на зерно шляхом розробки машини для основного безполицевого обробітку ґрунту. Встановлено, що головним недоліком традиційної системи оранки є можливість утворення плужної підошви, збільшення тягового опору та погіршення умов розвитку кореневої системи кукурудзи.

Запропоновано конструкцію плуга-розпушувача з похилими стояками, долотами, дисковими ножами та опорно-регулювальними колесами. Прийнята

ширина захвату становить 4,0 м, кількість робочих органів – 8 шт., міждолотна відстань – 0,50 м, робоча глибина – 0,30...0,35 м.

Порівняння енергетичних показників показало, що плуг-розпушувач має нижчий темп зростання тягового опору зі збільшенням швидкості, ніж полицевий плуг. Це пояснюється відсутністю складової опору, пов’язаної з переміщенням і відкиданням скиби.

Розрахунковий тяговий опір розробленого плуга-розпушувача становить приблизно 44 кН, а необхідна тягова потужність при швидкості 2,8 м/с – близько 123 кВт. Висота стояка робочого органу прийнята 0,74 м, що забезпечує роботу на максимальній глибині та проходження рослинних решток під рамою.

Отримані конструктивні параметри можуть бути використані для подальшого розроблення робочих креслень, вибору матеріалів, розрахунку міцності основних деталей і оцінювання техніко-економічної ефективності впровадження машини у технології вирощування кукурудзи на зерно.

РОЗДІЛ 4
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ

4.1. Мета та вихідні умови розрахунку

Метою розділу є визначення економічної доцільності впровадження удосконаленого комплексу машин для вирощування кукурудзи на зерно в умовах Житомирської області. У проєктному варіанті основний обробіток ґрунту виконується агрегатом Fendt 900 Vario з розробленим 8-корпусним плугом-розпушувачем, а післясходова боротьба з бур’янами частково роботизується за допомогою FarmDroid FD20. Порівняння виконано з базовою технологією, у якій застосовується традиційний основний обробіток і переважно хімічний контроль бур’янів.

Економічна оцінка проведена для умовного господарства з площею кукурудзи 300 га. Така площа забезпечує достатнє сезонне завантаження високопотужного трактора, розробленого знаряддя та автономного робота. У розрахунках прийнято, що трактор Fendt 900 Vario уже є в машинно-тракторному парку господарства або залучається як енергетичний засіб, тому до додаткових інвестицій включено лише плуг-розпушувач, роботизований комплекс і витрати на їх введення в експлуатацію.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунків

Показник	Значення	Пояснення
Площа кукурудзи на зерно	300 га	Розрахункова площа річного використання техніки
Базова врожайність	8,0 т/га	Середній рівень інтенсивної технології
Проєктна врожайність	8,4 т/га	Очікуваний приріст від кращого обробітку і догляду
Ціна зерна кукурудзи	9598 грн/т	Орієнтир за ціною EXW елеваторів України
Курс євро	51,8352 грн/євро	Курс НБУ на дату розрахунку
Ціна дизельного пального	60 грн/л	Планово-нормативне значення

4.2. Вплив проєктних рішень на витрати виробництва

Запропонований плуг-розпушувач забезпечує глибоке розпушування без інтенсивного обертання скиби, що зменшує енергомісткість основного

обробітку порівняно з полицевою оранкою. Руйнування ущільненої підорної зони покращує інфільтрацію опадів, аерацію та розвиток кореневої системи кукурудзи. У результаті зменшуються витрати пального на гектар, скорочується тривалість виконання робіт і підвищується стійкість рослин до короткочасної посухи.

Робот FarmDroid FD20 застосовується для післясходового механічного догляду за посівами. Він працює з високоточною RTK-навігацією, може виконувати обробіток міжрядь і в зоні рядка, а також зменшує потребу в суцільному застосуванні гербіцидів. У розрахунку передбачено не повну відмову від хімічного захисту, а скорочення його обсягу завдяки точному механічному прополюванню та можливості локального втручання.

Економічний ефект проєкту формується за рахунок трьох складових: прямої економії витрат на пальне, оплату праці та засоби захисту рослин; підвищення врожайності внаслідок кращого фізичного стану ґрунту і своєчасного контролю бур'янів; зменшення ризику ущільнення ґрунту завдяки використанню легкого автономного робота замість повторних проходів важких агрегатів.

4.3. Розрахунок додаткових капітальних вкладень

Додаткові капітальні вкладення включають виготовлення розробленого 8-корпусного плуга-розпушувача, придбання FarmDroid FD20, доставку, навчання персоналу, підключення RTK-сервісу та пусконалагоджувальні роботи. Вартість робота прийнято як орієнтовну, оскільки остаточна ціна залежить від комплектації, логістики та умов сервісного супроводу.

Таблиця 4.2 – Орієнтовні додаткові капітальні вкладення

Стаття витрат	Одиниця	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Виготовлення 8-корпусного плуга-розпушувача	компл.	1	1 050 000	1 050 000
Адаптація агрегату та пусконалагодження	компл.	1	120 000	120 000
Робот FarmDroid FD20	компл.	1	4 665 000	4 665 000
Доставка, навчання, RTK-сервіс	компл.	1	350 000	350 000
Разом додаткові інвестиції	-	-	-	6 185 000

Вартість FarmDroid FD20 у таблиці 4.2 перерахована за курсом 51,8352 грн/євро при умовній ціні 90 тис. євро. Для кваліфікаційної роботи цього достатньо, оскільки розрахунок спрямований на визначення порядку економічного ефекту. За фактичного впровадження проєкту ціну необхідно уточнювати за комерційною пропозицією постачальника.

4.4. Розрахунок експлуатаційних витрат

Порівняння експлуатаційних витрат виконано на 1 га посіву кукурудзи. У базовій технології більша частка витрат припадає на гербіциди, пальне та експлуатацію традиційних ґрунтообробних і обприскувальних агрегатів. У проєктному варіанті витрати на амортизацію та обслуговування дещо зростають через появу роботизованого комплексу, але це компенсується зменшенням витрат на хімічний захист, пальне і оплату праці.

Таблиця 4.3 – Порівняння виробничих витрат на 1 га

Стаття витрат	Базова, грн/га	Проєктна, грн/га	Зміна, грн/га
Насіння гібридів кукурудзи	5 800	5 800	0
Мінеральні добрива та внесення	10 200	10 200	0
Засоби захисту рослин	4 400	2 900	-1 500
Пальне і мастильні матеріали	4 800	4 200	-600
Оплата праці з нарахуваннями	2 200	1 850	-350
Амортизація, ремонт, обслуговування	5 950	6 180	+230
Інші виробничі витрати	3 200	3 200	0
Разом виробничі витрати	36 550	34 330	-2 220

Отже, проєктна технологія зменшує виробничі витрати на 2220 грн/га. Найбільше зниження забезпечується у статті засобів захисту рослин, оскільки частина післясходової боротьби з бур’янами виконується механічно. Додаткова економія формується за рахунок меншої кількості проходів важкої техніки і нижчих витрат дизельного пального.

4.5. Визначення економічної ефективності

Виручка від реалізації зерна визначається за формулою:

$$В = У \cdot Ц, \qquad (4.1)$$

де В – виручка, грн/га; У – урожайність, т/га; Ц – ціна реалізації, грн/т. Прибуток з 1 га визначається як різниця між виручкою і виробничими витратами:

$$П = В – З. \quad (4.1)$$

Рівень рентабельності виробництва визначається за формулою:

$$Р = (П / З) \cdot 100\ \%. \quad (4.3)$$

Таблиця 4.4 – Економічні показники вирощування кукурудзи на зерно

Показник	Базова технологія	Проєктна технологія	Відхилення
Урожайність, т/га	8,0	8,4	+0,4
Ціна реалізації, грн/т	9 598	9 598	0
Виручка, грн/га	76 784	80 623	+3 839
Виробничі витрати, грн/га	36 550	34 330	-2 220
Прибуток, грн/га	40 234	46 293	+6 059
Собівартість 1 т зерна, грн/т	4 569	4 087	-482
Рентабельність, %	110,1	134,8	+24,7 в. п.

За результатами розрахунку прибуток у базовому варіанті становить 40234 грн/га, а у проєктному – 46293 грн/га. Додатковий економічний результат дорівнює 6059 грн/га. Для площі 300 га річний приріст прибутку становитиме:

$$Е_р = 6059{,}2 \cdot 300 = 1\ 817\ 760 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень визначається за формулою:

$$Т_{ок} = К_д / Ер = 6\ 185\ 000 / 1\ 817\ 760 = 3{,}4 \text{ року.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності додаткових інвестицій становить 0,294, або 29,4 % на рік. Для машин, які використовуються протягом багатьох сезонів і мають залишкову вартість, строк окупності 3–4 роки є прийнятним, особливо за умови використання FarmDroid FD20 також на інших просапних культурах або під час надання послуг іншим виробникам.

4.6. Аналіз чутливості результатів

Економічний результат залежить від ціни зерна, фактичної врожайності, вартості пального та площі річного завантаження техніки. Тому виконано сценарну оцінку. У песимістичному сценарії прийнято зниження ціни зерна на 10 %, приріст урожайності 0,25 т/га і економію 1800 грн/га. У розрахунковому сценарії використано основні дані таблиці 5.4. В оптимістичному сценарії

прийнято зростання ціни на 10 %, приріст урожайності 0,5 т/га і економію 2600 грн/га.

Таблиця 4.5 – Чутливість строку окупності

Сценарій	Ефект, грн/га	Річний ефект, грн	Окупність, років
Песимістичний	3 960	1 187 865	5,2
Розрахунковий	6 059	1 817 760	3,4
Оптимістичний	7 879	2 363 670	2,6

Навіть за песимістичного сценарію проєкт зберігає економічну доцільність, хоча строк окупності збільшується до 5,2 року. Найбільш чутливим чинником є завантаження робота: чим більша площа його використання протягом сезону, тим нижчі питомі амортизаційні витрати на 1 га. Для зниження ризиків господарству доцільно передбачити навчання персоналу, резервний план захисту рослин, контроль якості основного обробітку і регулярне сервісне обслуговування навігаційного обладнання.

4.7. Організаційні умови реалізації економічного ефекту

Розрахований економічний ефект може бути досягнутий лише за умови правильної організації машиновикористання. Основний обробіток плугом-розпушувачем доцільно виконувати у період фізичної стиглості ґрунту, коли робочі органи якісно руйнують ущільнений шар і не утворюють надмірних брил. Запізнення з цією операцією або робота по перезволоженому полю зменшує технічний результат і може призвести до збільшення витрат пального. Тому планування строків виконання обробітку є не менш важливим, ніж вибір самого агрегату.

Для роботи FarmDroid FD20 потрібні підготовлена карта поля, точне встановлення міжряддя, стабільний RTK-сигнал і попереднє навчання персоналу. Робот має виходити в поле в ранні фази розвитку бур’янів, коли механічне прополювання є найбільш ефективним. Якщо пропустити оптимальний строк, бур’яни стають стійкішими до механічного впливу, і господарству доведеться застосовувати додатковий хімічний захист. Отже,

роботизація не скасовує агрономічного контролю, а потребує більш чіткого планування операцій.

Таблиця 4.6 – Заходи для забезпечення очікуваного економічного ефекту

Напрям	Зміст заходу	Очікуваний результат
Планування робіт	Виконувати глибоке розпушування за фізичної стиглості ґрунту	Зниження тягового опору та якісне руйнування ущільненого шару
Навігація	Підтримувати RTK-сигнал і точні межі поля	Стабільна робота робота та точне прополювання
Персонал	Навчити механізатора й агронома роботі з цифровими картами	Скорочення простоїв і помилок налаштування
Технічне обслуговування	Регулярно перевіряти долота, стояки, датчики і робочі органи робота	Зменшення аварійних зупинок у сезон
Агрономічний контроль	Оцінювати забур’яненість і стан посівів після кожного проходу	Своєчасне коригування технології захисту

Додатковим резервом підвищення ефективності є використання техніки не лише на кукурудзі, а й на інших просапних культурах господарства. Плуг-розпушувач може застосовуватися під соняшник, сою або цукрові буряки на полях із ознаками ущільнення, а FarmDroid FD20 може виконувати механічне прополювання культур з відповідною шириною міжрядь. Таке розширення річного завантаження зменшує питомі постійні витрати й скорочує строк окупності інвестицій.

Висновки по розділу

Проведене техніко-економічне обґрунтування підтверджує доцільність удосконалення комплексу машин для вирощування кукурудзи на зерно. Проєктна технологія із застосуванням агрегату Fendt 900 Vario + 8-корпусний плуг-розпушувач та робота FarmDroid FD20 забезпечує зниження виробничих витрат на 2220 грн/га, збільшення прибутку на 6059 грн/га і зменшення собівартості 1 т зерна з 4569 до 4087 грн.

Для площі 300 га річний економічний ефект становить 1817760 грн, а строк окупності додаткових капітальних вкладень – 3,4 року. Крім прямого фінансового результату, проєкт має технологічні переваги: покращення

структури ґрунту, зменшення гербіцидного навантаження, скорочення проходів важкої техніки, підвищення точності операцій і створення передумов для подальшого розвитку точного та роботизованого землеробства в умовах Житомирської області.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання удосконалення комплексу машин для вирощування кукурудзи на зерно з розробкою машини для основного обробітку ґрунту. У процесі виконання роботи встановлено, що кукурудза є однією з найважливіших зернових культур, а ефективність її виробництва залежить від правильного вибору технології, своєчасного виконання польових операцій, раціонального використання техніки та збереження родючості ґрунту.

У першому розділі проаналізовано сучасні технології вирощування кукурудзи на зерно, світові тенденції розвитку галузі та перспективи підвищення продуктивності. Визначено, що основними напрямами вдосконалення є застосування ресурсозберігаючих систем обробітку ґрунту, точного землеробства, автоматизованого керування агрегатами, диференційованого внесення матеріалів і роботизованого догляду за посівами. Окремо розглянуто можливість використання роботів для боротьби з бур’янами, моніторингу стану рослин і зменшення хімічного навантаження.

У другому розділі обґрунтовано технологію вирощування кукурудзи на зерно в умовах Житомирської області. Розроблена технологічна карта передбачає виконання основного обробітку ґрунту агрегатом Fendt 900 Vario з розробленим 8-корпусним плугом-розпушувачем, що забезпечує глибоке розпушування, руйнування ущільнених шарів і поліпшення водно-повітряного режиму ґрунту. Для післясходового контролю бур’янів запропоновано використання робота FarmDroid FD20, що відповідає вимогам екологізації польових процесів.

У конструктивній частині обґрунтовано доцільність застосування плуга-розпушувача замість традиційного полицевого плуга. Розроблена машина дає змогу зменшити перевертання пласта, знизити негативний вплив на структуру ґрунту та забезпечити якісне розпушування на задану глибину. Виконані розрахунки параметрів знаряддя, тягового опору, потужності та

конструктивних елементів підтвердили можливість його агрегатування з трактором Fendt 900 Vario.

Техніко-економічне обґрунтування показало, що впровадження запропонованих рішень є доцільним, оскільки забезпечує підвищення продуктивності праці, зменшення експлуатаційних витрат, економію пального, скорочення потреби в ручній праці та зростання ефективності виробництва зерна кукурудзи. Отже, удосконалений комплекс машин із застосуванням глибокорозпушувального знаряддя та роботизованого догляду за посівами є перспективним напрямом механізованої технології вирощування кукурудзи на зерно для Житомирської області.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Borak, K. V., Kulykivskyi V. L. Borovskyi V. M. Rudenko V. G., Dobranskiy S. S. Increasing the wear resistance of the working bodies of tillage machines by electrical discharge machining. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Випуск 3 (48) 2025. Технічні науки. С.149-160.

7. K. V. Borak, V. L. Kulykivskyi; D. I. Rudnik. Impact of the preliminary corrosion on the intensity of the abrasive wear of the working tools of the tillage machine. Scientific Works of VNTU, 2023, № 2. DOI: https://doi.org/10.31649/2307-5392-2023-2-33-42.

8. Борак К. В. Вплив попередньої корозії на інтенсивність абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Наукові праці ВНТУ, 2023, № 2. [Електронний ресурс]. Режим доступу URL: https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/686/653/.

9. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. Р. Сільськогосподарські та меліоративні машини : підручник. Київ : Вища освіта, 2004. 544 с.

10. Булгаков В. М., Адамчук В. В., Черниш О. М. Теорія сільськогосподарських машин : навч. посіб. Київ : Аграрна наука, 2018. 578 с.

11. Лихочвор В. В. Рослинництво. Технології вирощування сільськогосподарських культур : навч. посіб. Львів : НВФ «Українські технології», 2002. 800 с.

12. Паламарчук В. Д., Колісник О. М. Сучасна технологія вирощування кукурудзи для енергетичних цілей : монографія. Вінниця : ВНАУ, 2022. URL: https://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/31508.pdf (дата звернення: 3.06.2026).

13. Григорів Я. Я., Турак Ю. О. Особливості вирощування кукурудзи в сучасних умовах. Таврійський науковий вісник. 2024. № 137. С. 70–76. URL: https://tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/137_2024/11.pdf (дата звернення: 3.06.2026).

14. Заєць М. Л., Куликівський В. Л. Вплив параметрів дискових сошників на здатність прорізання рослинних решток у системі NO-TILL. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2025. № 3 (130). С. 107–112..

15. Заєць М. Л. Переваги технології вертикального обробітку ґрунту/ М. Л. Заєць, К. В. Гусаров // Наукові читання–2021: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 20 травня 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021. С. 52-55.

16. Технологія вирощування кукурудзи на зерно в умовах ФСГ. Вінниця : ВНАУ. URL: https://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/18266.pdf (дата звернення: 3.06.2026).

17. Технологія вирощування кукурудзи. Syngenta Україна. URL: https://www.syngenta.ua/en/news/kukurudza/tehnologiya-viroshchuvannya-kukurudzi (дата звернення: 3.06.2026).

18. Технологія вирощування кукурудзи. Ерідон. URL: https://www.eridon.ua/tehnologiya-viroschuvannya-kukurudzi (дата звернення: 3.06.2026).

19. Обробіток ґрунту під кукурудзу. Агробізнес сьогодні. URL: https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/656-obrobitok-gruntu-pid-kukurudzu.html (дата звернення: 3.06.2026).

20. Вирощування кукурудзи: різним зонам України — своя кукурудза. Пропозиція. URL: https://propozitsiya.com/articles/tekhnolohiyi-vyroshchuvannya/vyroshchuvannya-kukurudzy-riznym-zonam-ukrayiny-svoya (дата звернення: 3.06.2026).

21. Fendt tractors. The Fendt 900 Vario at a glance. Fendt. URL: https://www.fendt.com/int/agricultural-machinery/tractors/fendt-900-vario (дата звернення: 3.06.2026).

22. FarmDroid FD20. Autonomous Farming Robot for Integrated Seeding and Weed Control. FarmDroid. URL: https://farmdroid.com/products/farmdroid-fd20/ (дата звернення: 3.06.2026).

23. FarmDroid FD20 Product Sheet. FarmDroid. URL: https://farmdroid.com/product-sheet/ (дата звернення: 3.06.2026).

24. OECD-FAO Agricultural Outlook 2025–2034. Paris : OECD Publishing ; Rome : FAO, 2025. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/07/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034_3eb15914/601276cd-en.pdf (дата звернення: 3.06.2026).

25. Grain and Feed Quarterly. Ukraine. USDA Foreign Agricultural Service. Kyiv, 2025. URL: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Grain+and+Feed+Quarterly_Kyiv_Ukraine_UP2025-0033.pdf (дата звернення: 3.06.2026).

26. Agricultural Markets in Russia and Ukraine. USDA Economic Research Service. URL: https://www.ers.usda.gov/newsroom/trending-topics/agricultural-markets-in-russia-and-ukraine (дата звернення: 3.06.2026).

27. Overview of soil conditions of arable land in Ukraine. FAO. Rome, 2020. URL: https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca7761en (дата звернення: 3.06.2026).

28. FAO, World Bank Quantify Benefits of No-till Agriculture in Ukraine. International Institute for Sustainable Development. URL: https://sdg.iisd.org/news/fao-world-bank-quantify-benefits-of-no-till-agriculture-in-ukraine/ (дата звернення: 3.06.2026).

29. Національний банк України. Офіційний курс гривні щодо іноземних валют. URL: https://bank.gov.ua/ua/markets/exchangerates (дата звернення: 3.06.2026).

30. Українська зернова асоціація. Ukraine’s corn harvest may reach 34 million tons in 2025/26 — FAS USDA. URL: https://uga.ua/en/news/ukraine-s-corn-harvest-may-reach-34-million-tons-in-2025-26-fas-usda/ (дата звернення: 3.06.2026).