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

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Семенчук Денис Валентинович

УДК 631.358.44

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Удосконалення комплексу машин для вирощування картоплі з модернізацією збиральної машини

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 _____ Семенчук Д.В.

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

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Семенчук Денис Валентинович. Удосконалення комплексу машин для вирощування картоплі з модернізацією збиральної машини. *– Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

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

Кваліфікаційна робота присвячена удосконаленню комплексу машин для вирощування картоплі з модернізацією збиральної машини. У роботі проаналізовано сучасний стан виробництва картоплі, основні технології її вирощування та рівень механізації технологічних процесів. Обґрунтовано доцільність застосування сучасної високопродуктивної техніки, систем точного землеробства, БПЛА зі штучним інтелектом та роботизованих засобів для догляду за посівами. Розроблено технологію вирощування картоплі в умовах Полісся Житомирської області з урахуванням ґрунтово-кліматичних особливостей регіону. Складено технологічну карту вирощування картоплі на площі 50 га та графік завантаження машинно-тракторного парку. Особливу увагу приділено операції збирання картоплі, яку запропоновано виконувати модернізованою збиральною машиною. У конструктивній частині обґрунтовано вдосконалення робочих органів машини, спрямоване на зменшення пошкодження бульб, покращення сепарації ґрунту та підвищення продуктивності агрегату. Практичне значення роботи полягає у можливості підвищення ефективності механізованого вирощування картоплі, зменшення витрат праці, пального й експлуатаційних витрат та покращення якості зібраної продукції.

Ключові слова: картопля, комплекс машин, технологія вирощування, механізоване збирання, збиральна машина, штучний інтелект.

ANNOTATION

Denis Valentynovych Semenchuk. Improving the range of machinery for potato cultivation, including the modernisation of the harvester. *– 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 is devoted to the improvement of a range of machinery for potato cultivation, including the modernisation of the harvesting machine. The thesis analyses the current state of potato production, the main cultivation technologies and the level of mechanisation of the production processes. The feasibility of using modern high-performance machinery, precision farming systems, UAVs equipped with artificial intelligence, and robotic equipment for crop maintenance is substantiated. A potato cultivation technology has been developed for the Polissya region of Zhytomyr Oblast, taking into account the region’s soil and climatic characteristics. A technological chart for potato cultivation covering an area of 50 ha and a schedule for utilising the machinery and tractor fleet have been drawn up. Particular attention has been paid to the potato harvesting operation, which is proposed to be carried out using a modernised harvester. The design section justifies improvements to the machine’s working parts, aimed at reducing damage to tubers, improving soil separation and increasing the unit’s productivity. The practical significance of this work lies in the potential to enhance the efficiency of mechanised potato cultivation, reduce labour, fuel and operating costs, and improve the quality of the harvested produce.

Keywords: potatoes, machinery complex, cultivation technology, mechanised harvesting, harvester, artificial intelligence.

ЗМІСТ

ВСТУП……6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ КАРТОПЛІ……...8
1.1. Значення картоплі та загальна характеристика технологічного процесу..…..8
1.2. Динаміка посівних площ картоплі в Україні та світі……9
1.3. Рівень механізації технологічного процесу вирощування картоплі……..…11
1.4. Роботизація та використання штучного інтелекту для моніторингу посівів……13
1.5. Напрями вдосконалення технологій вирощування картоплі……..15
Висновки по розділу……..……16
РОЗДІЛ 2.ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ КАРТОПЛІ В УМОВАХ ПОЛІССЯ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ…….…18
2.1. Вихідні умови проєктування технології…….……..18
2.2. Обґрунтування комплексу сучасних машин……..……..19
2.3. Проєктна технологічна карта вирощування картоплі на 50 га……...…21
2.4. Розрахунок потреби в ресурсах і виробничих показників……..23
2.5. Графік завантаження техніки……...……..24
2.6. Використання БПЛА зі штучним інтелектом для моніторингу посівів…...26
2.7. Роботизована боротьба з бур’янами……..28
2.8. Викопування картоплі модернізованою збиральною машиною……29
2.9. Очікувана ефективність і напрями подальшого вдосконалення технології..30
Висновки по розділу…….…31
РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ПІДКОПУВАЛЬНОГО ОРГАНА КАРТОПЛЕЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ……...……33
3.1. Фізико-технологічні властивості бульб картоплі та ґрунтових грудок…….33
3.2. Визначення продуктивності картоплекопача……..…35
3.3. Обґрунтування параметрів робочих органів картоплекопача……37
3.4. Дослідження параметрів зубчастого диска з ґрунтозачепами……...42
3.5. Обґрунтування режимів роботи пасивних дискових елементів підкопувального органа…….……47
3.6. Розрахунок сепарувального елеватора картоплекопача……..51
3.7 Завантаження сепарувальних робочих органів картоплекопача……53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ…….……..55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..57

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Картопля є однією з найважливіших сільськогосподарських культур продовольчого, кормового та технічного призначення. Вона займає важливе місце у структурі харчування населення України, широко використовується у переробній промисловості та має значний економічний потенціал для сільськогосподарських підприємств. В умовах сучасного аграрного виробництва підвищення ефективності вирощування картоплі безпосередньо пов’язане з удосконаленням технологічних процесів, раціональним використанням машинно-тракторного парку, впровадженням енергоощадних технічних засобів, систем точного землеробства, роботизованих комплексів і цифрових технологій моніторингу посівів.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена тим, що вирощування картоплі є достатньо трудомістким і ресурсомістким процесом, який потребує виконання великої кількості технологічних операцій у стислі агротехнічні строки. Особливо відповідальною операцією є збирання врожаю, оскільки саме на цьому етапі виникає значна частина втрат і механічних пошкоджень бульб. Низька якість підкопування, недостатня сепарація ґрунтового вороху, забивання робочих органів рослинними рештками та підвищений тяговий опір збиральних машин призводять до зниження продуктивності агрегату, збільшення витрат пального й погіршення якості зібраної продукції. Тому модернізація картоплезбиральної машини та удосконалення комплексу машин для вирощування картоплі є важливим напрямом підвищення ефективності виробництва.

У зоні Полісся Житомирської області вирощування картоплі має свої особливості, пов’язані з ґрунтово-кліматичними умовами, рівнем зволоження, механічним складом ґрунтів і потребою у своєчасному виконанні польових робіт. Для забезпечення стабільної врожайності необхідно застосовувати науково обґрунтовану технологію вирощування, що передбачає якісний основний і передпосівний обробіток ґрунту, раціональне внесення добрив,

використання високоякісного садивного матеріалу, ефективний захист рослин, моніторинг стану посівів та якісне механізоване збирання. Важливого значення набуває впровадження сучасної техніки, безпілотних літальних апаратів зі штучним інтелектом для контролю стану рослин, а також роботизованих машин для боротьби з бур'янами.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності механізованого вирощування картоплі шляхом удосконалення комплексу машин і модернізації збиральної машини для зменшення втрат, пошкодження бульб та покращення сепарації ґрунтового вороху.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі **завдання:** проаналізувати існуючі технології вирощування картоплі в Україні та світі; оцінити рівень механізації основних технологічних операцій і перспективи використання роботизованих систем та штучного інтелекту; розробити технологію вирощування картоплі в умовах Полісся Житомирської області; скласти технологічну карту вирощування картоплі на площі 50 га; обґрунтувати склад сучасного комплексу машин для виконання технологічних операцій; розробити графік завантаження техніки; проаналізувати конструкцію картоплезбиральної машини та запропонувати напрями її модернізації; виконати розрахунки основних параметрів модернізованих робочих органів.

Об'єктом дослідження є технологічний процес механізованого вирощування та збирання картоплі в умовах Полісся Житомирської області.

Предметом дослідження є комплекс машин для вирощування картоплі та конструктивно-технологічні параметри модернізованої збиральної машини.

Методи дослідження базуються на аналізі існуючих технологій вирощування картоплі, порівнянні сучасних технічних засобів, розрахунку технологічних і конструктивних параметрів машин, узагальненні виробничого досвіду, використанні графічного моделювання, табличного аналізу та інженерних методик визначення продуктивності, завантаження техніки й параметрів робочих органів.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Грабар Іван, Ярмола Олена**, Семенчук Денис.** Перспективи використання БПЛА для підвищення ефективності збирання сільськогосподарських культур Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті : зб. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, 22–23 квітня 2026 року. [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2026.С. 55-58.

2. Дерев'янко Д.А., Давиденко А.В., **Семенчук Д.В.** Стан механізації галузі картоплярства в Україні. VI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі». Запоріжжя: ТДАТУ. URL: https://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/hrudovyj_26.pdf https://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/derevjanko_26-2.pdf (дата звернення 07.06.2026).

Практичне значення роботи полягає в розробленні удосконаленого комплексу машин для вирощування картоплі на площі 50 га та модернізації збиральної машини, що дає змогу підвищити якість підкопування бульбоносного шару, зменшити надходження зайвого ґрунту на сепаруючі робочі органи, покращити очищення картопляного вороху, знизити механічні пошкодження бульб і підвищити продуктивність збирального агрегату. Запропоновані рішення можуть бути використані в сільськогосподарських підприємствах, які спеціалізуються на вирощуванні картоплі, а також під час подальшого вдосконалення картоплезбиральної техніки.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновку та списку використаних джерел з 33 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 60 сторінок комп'ютерного тексту, містить 22 рисунки, 14 таблиць та 3 додатки.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ КАРТОПЛІ

1.1. Значення картоплі та загальна характеристика технологічного процесу

Картопля є однією з основних продовольчих культур помірної зони та має високу універсальність використання: продовольче споживання, кормові потреби, переробка на крохмаль, чипси, напівфабрикати й продукцію тривалого зберігання. За узагальненнями Міжнародного центру картоплі, картопля належить до найважливіших продовольчих культур світу, а її виробництво перевищує 300 млн т на рік [10]. Для України культура має особливе значення, оскільки вона формує продовольчу безпеку домогосподарств, забезпечує сировину для переробки та є традиційною культурою Полісся, Лісостепу і частково Степу.

Технологія вирощування картоплі охоплює взаємопов'язаний комплекс операцій: підготовку ґрунту, внесення органічних і мінеральних добрив, підготовку садивного матеріалу, садіння з формуванням гребенів, міжрядний обробіток, захист від бур'янів, шкідників і хвороб, зрошення за потреби, знищення бадилля, викопування, сепарацію, сортування, транспортування та закладання на зберігання. Найбільш енергоємними і технологічно складними є операції садіння, формування якісного гребеня та збирання, тому саме вони визначають потребу у вдосконаленні комплексу машин.

У сучасному виробництві розрізняють кілька базових технологічних схем: традиційну гребеневу, інтенсивну з використанням високопродуктивних машин, ресурсозберігаючу з мінімізацією проходів техніки, зрошувану технологію для стабільного формування врожаю, а також цифрову технологію, у якій рішення щодо догляду за посівами приймаються на основі даних БПЛА, супутникового моніторингу, сенсорів ґрунту та систем підтримки рішень. Для кваліфікаційної роботи особливе значення має аналіз збирального етапу, оскільки механічні пошкодження бульб, недостатня сепарація ґрунту та втрати

під час викопування прямо впливають на товарність і здатність картоплі до зберігання.

Таблиця 1.1 – Порівняння основних технологій вирощування картоплі

Технологічна схема	Сутність	Переваги	Обмеження
Традиційна гребенева	Оранка, передсадивний обробіток, садіння у гребені, міжрядні культивації, механізоване збирання.	Проста організація, доступна техніка, придатність для більшості ґрунтів.	Багато проходів, ущільнення ґрунту, залежність якості збирання від стану гребеня.
Інтенсивна машинна	Використання саджалок точного висаджування, гребенеутворювачів, бункерних комбайнів і ліній доробки.	Вища продуктивність, менші втрати, стабільна якість товарної продукції.	Висока вартість техніки, потреба у кваліфікованому персоналі та сервісі.
Ресурсозберігаюча	Скорочення кількості проходів, комбіновані агрегати, локальне внесення добрив, мінімізація обробітку.	Зменшення витрат пального, кращий захист структури ґрунту.	Потребує точного агротехнічного планування і якісного садивного матеріалу.
Цифрова/точна	GPS-навігація, карти врожайності, БПЛА, сенсори, диференційоване внесення ресурсів.	Економія добрив і ЗЗР, рання діагностика стресів, контроль продуктивності машин.	Потреба у цифровій інфраструктурі, програмному забезпеченні та даних.

1.2. Динаміка посівних площ картоплі в Україні та світі

Для оцінки тенденцій використано показники FAOSTAT та узагальнення міжнародних статистичних порталів, у яких для міждержавного порівняння застосовується категорія зібраної площі. За методикою FAOSTAT дані щодо рослинництва подаються як площа збирання, обсяг виробництва та врожайність; набір охоплює країни і території з 1961 року до останнього доступного року [1]. Тому в подальшому під динамікою площ розуміється саме зібрана площа, що є найближчим міжнародно порівнюваним аналогом посівної площі.

Світова площа картоплі у довгостроковому періоді має тенденцію до скорочення, але не супроводжується пропорційним зменшенням виробництва. Це пояснюється підвищенням урожайності, концентрацією виробництва у спеціалізованих регіонах, кращим сортовим складом, розвитком зрошення та

механізованих технологій. У 2024 р. світове виробництво картоплі, за оновленими даними FAOSTAT, оцінювалося приблизно у 390,4 млн т, зібрана площа становила 17,08 млн га, а середня врожайність - 22,86 т/га [2]. У 2023 р. площа була близькою до 16,8 млн га, що менше за рівень 2022 р. (18,1 млн га), однак виробництво при цьому зросло завдяки кращій урожайності [3].

Україна зберігає статус одного з найбільших виробників картоплі в Європі. За оцінками FAOSTAT, у 2024 р. виробництво становило близько 21,13 млн т, зібрана площа - близько 1,21 млн га, а середня врожайність - приблизно 17,5 т/га [4]. Водночас національні оцінки посадженої площі можуть відрізнятися: за повідомленням із посиланням на Державну службу статистики України, у 2024 р. картоплю було посаджено приблизно на 1 млн га [5]. Різниця пояснюється методикою обліку, часткою господарств населення та часовими уточненнями даних.

Таблиця 1.2 – Узагальнена динаміка площ і виробництва картоплі

Рік	Світова площа, млн га	Україна: площа, млн га	Україна: виробництво, млн т	Коментар
2010	18.60	1.41	18.70	базовий рівень для порівняння
2015	18.40	1.33	20.80	стабільне зниження площ у Європі
2018	18.00	1.31	22.50	передвоєнний стабільний період
2019	18.00	1.29	20.27	площа близька до рівня 2018 р.
2020	16.50	1.31	20.84	скорочення світової площі
2021	17.20	1.30	21.36	відновлення після 2020 р.
2022	18.10	1.25	20.90	високий світовий показник площ
2023	16.80	1.22	21.36	зменшення площі за зростання виробництва
2024	17.08	1.21	21.13	помірне відновлення світової площі

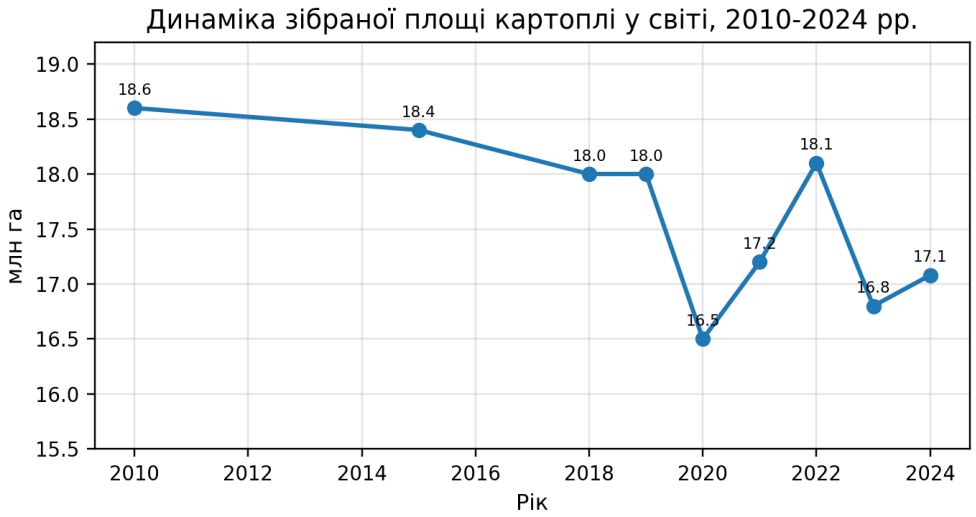


Рис. 1.1. Динаміка зібраної площі картоплі у світі.

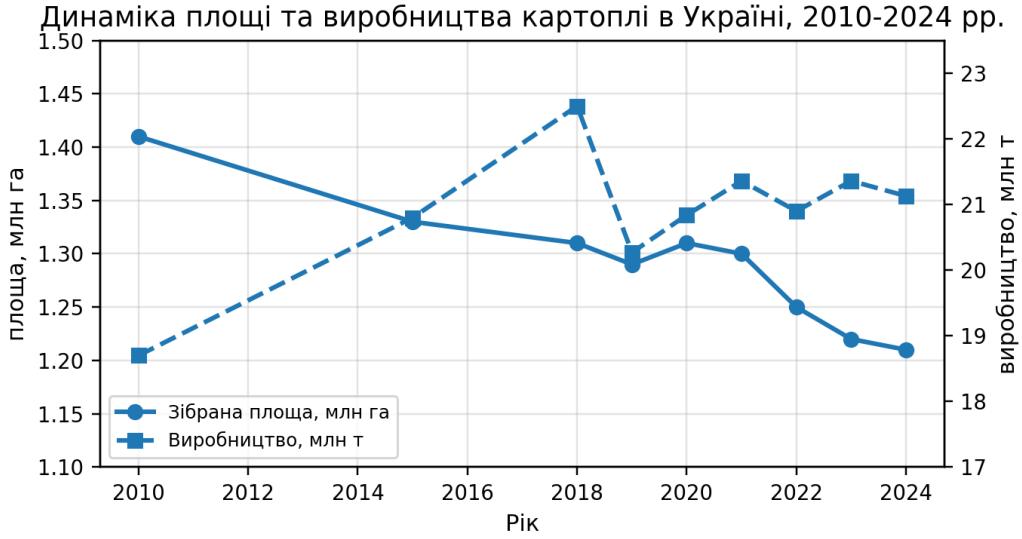


Рис. 1.2. Динаміка площі та виробництва картоплі в Україні.

1.3. Рівень механізації технологічного процесу вирощування картоплі

Рівень механізації картоплярства суттєво залежить від масштабу господарства. У спеціалізованих підприємствах більшість польових операцій виконується машинним способом: основний і передсадивний обробіток ґрунту, садіння, формування гребенів, захист рослин, збирання та післязбиральна доробка. У дрібних господарствах населення частина операцій залишається напівмеханізованою або ручною, особливо сортування, підбір бульб після викопування та завантажувально-розвантажувальні роботи.

Сучасний комплекс машин для картоплі включає глибокорозпушувачі, плуги або чизельні агрегати, фрезерні гребенеутворювачі, автоматичні картоплесаджалки з контролем пропусків, обприскувачі з секційним керуванням, міжрядні культиватори, десиканти або подрібнювачі бадилля, однорядні чи дворядні копачі, причіпні та самохідні картоплезбиральні комбайни, приймальні бункери, транспортери, сортувальні столи, оптичні сортувальники і вентиляційні системи сховищ. Виробники картопляної техніки пропонують повні лінійки машин від садіння до зберігання; наприклад, GRIMME позиціонує портфель понад 150 типів машин для картоплі, буряків, цибулі, моркви та іншої продукції [11].

Найвужчим місцем залишається збирання. Воно відбувається у стислі строки, за різних умов вологості ґрунту, часто з великою кількістю грудок і рослинних решток. Збиральна машина повинна підрізати гребінь, подати ворох на сепаруючі органи, відокремити ґрунт і домішки, мінімізувати удари бульб об металеві поверхні та забезпечити рівномірне завантаження транспортних засобів. Недостатня якість підкопування та сепарації призводить до втрат бульб, їх пошкодження і зростання енерговитрат. Саме тому модернізація підкопувального та сепаруючого вузлів збиральної машини є логічним напрямом удосконалення комплексу машин.

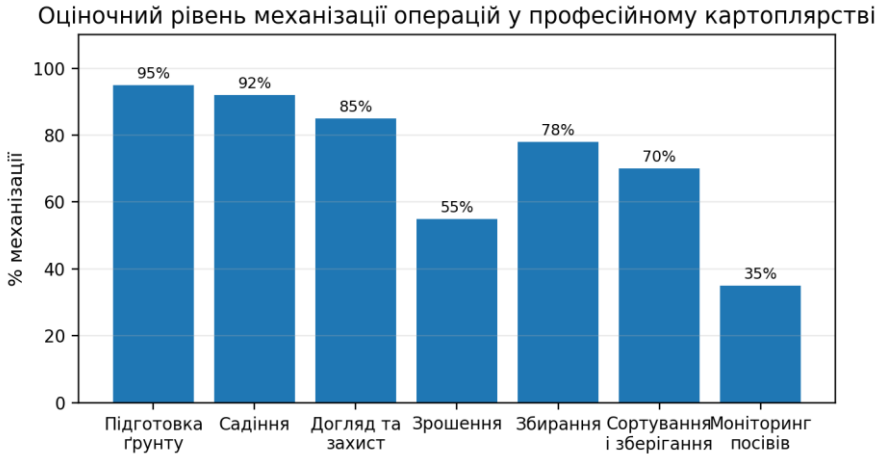


Рис. 1.3. Оціночний рівень механізації операцій у професійному картоплярстві.

Таблиця 1.3 – Операції вирощування картоплі та напрями технічного удосконалення

Операція	Типові машини	Проблема	Напрям удосконалення
Підготовка ґрунту	Плуг, чизель, фреза, гребенеутворювач	Нерівномірна структура гребеня, ущільнення	Комбіновані агрегати, контроль глибини, навігація
Садіння	Автоматична картоплесаджалка	Пропуски, подвійні висаджування, неточна глибина	Датчики насіннєвого потоку, GPS-керування нормою
Догляд	Культиватор, обприскувач, зрошувальна машина	Перевитрата ЗЗР і води, пошкодження рослин	Секційне керування, карти завдань, локальна обробка
Збирання	Копач, причіпний або самохідний комбайн	Втрати, пошкодження, залипання сепараторів	Удосконалення лемеша, сепарації, гумованих робочих поверхонь
Доробка	Приймальний бункер, транспортер, сортувальна лінія	Травмування бульб, ручна праця	Регульовані швидкості, оптичне сортування, м’які перепади висоти

1.4. Роботизація та використання штучного інтелекту для моніторингу посівів.

Роботизація у картоплярстві розвивається у трьох напрямах: автономне збирання та транспортування даних, автоматизований догляд за рослинами і підтримка рішень для оператора. Наукові огляди показують, що польові роботи поєднують робототехніку, сенсори, штучний інтелект і аналітику даних для моніторингу середовища, автономного прийняття рішень та виконання технологічних операцій [6]. Для картоплі найбільш реалістичними у найближчій перспективі є не повністю безоператорні комбайни, а системи асистування: автоматичне водіння, контроль завантаження елеваторів, оцінка забрудненості вороху, визначення пошкоджень і автоматичне регулювання швидкості сепаруючих органів.

БПЛА зі штучним інтелектом можуть виконувати регулярний моніторинг сходів, оцінювати рівномірність розвитку, виявляти осередки бур'янів, ознаки дефіциту вологи, ураження хворобами та пошкодження шкідниками. За оглядами досліджень, системи БПЛА з AI здатні виявляти хвороби культур із

середньою точністю понад 90% у низці досліджень [7]. Для картоплі це особливо важливо через фітофтороз, альтернаріоз, колорадського жука, вірусні хвороби та значну залежність урожаю від водного режиму. AI-моделі також застосовуються для ідентифікації шкідників картоплі; у дослідженні PotatoPestNet повідомлено про точність близько 91% для класифікації шкідників [9].

Перспективним є застосування машинного зору безпосередньо на збиральних машинах. Дослідження з використанням RGB-D камер на діючому картоплезбиральному обладнанні показує можливість високошвидкісної 3D-оцінки форми бульб із часом обробки близько 10 мс на бульбу, що дає підстави для майбутнього контролю врожайності та якості у потоці [8]. Такі рішення можуть бути інтегровані із системою керування комбайном: при зростанні кількості грудок або травмованих бульб система зменшує швидкість руху, змінює режим струшування елеватора чи попереджає оператора.

Таблиця 1.4 – Можливості цифровізації та роботизації картоплярства

Технологія	Дані/сенсори	Завдання	Очікуваний ефект
БПЛА + мультиспектр	NDVI, NDRE, RGB-знімки	Рання діагностика стресу, карта проблемних зон	Скорочення часу огляду поля, адресний догляд
AI-моніторинг хвороб	Фото листків, метеодані, історія обробок	Прогноз ризику фітофторозу і альтернаріозу	Своєчасний захист, менше зайвих обробок
Автономний робот-доглядач	Камери, LIDAR, RTK-навігація	Механічне або точкове видалення бур’янів	Зменшення гербіцидного навантаження
Сенсори на комбайні	RGB-D, вагові датчики, датчики потоку	Оцінка врожайності, забрудненості, пошкоджень	Адаптивне регулювання швидкості та сепарації
Цифрова карта поля	GIS, GPS-треки, агрохімія	Планування норм добрив, садіння і збирання	Краща логістика і рівномірність технології

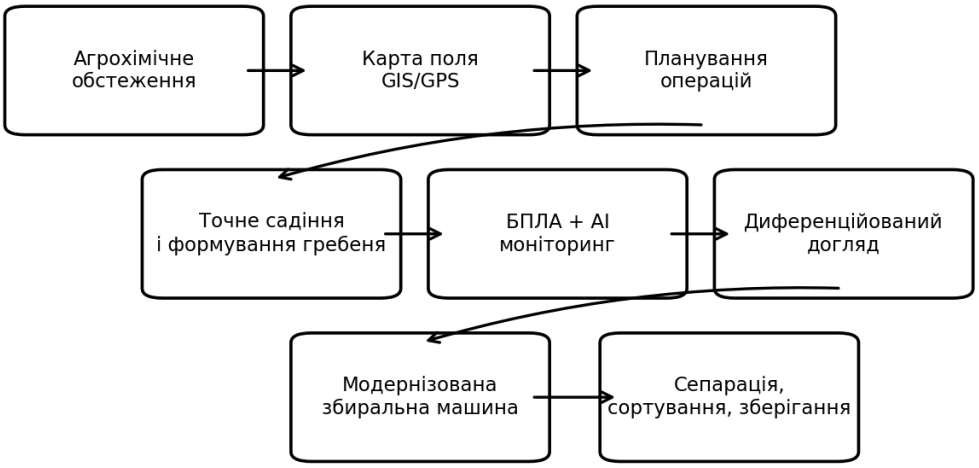


Рис. 1.4. Схема цифрової технології вирощування картоплі.

1.5. Напрями вдосконалення технологій вирощування картоплі

Аналіз існуючих технологій показує, що подальший розвиток картоплярства повинен поєднувати підвищення продуктивності машин, зменшення втрат і цифровий контроль якості. Для України особливо актуальними є технології, які знижують залежність від ручної праці, забезпечують стабільну якість збирання на різних ґрунтах і можуть використовуватися як у середніх, так і у великих господарствах. Враховуючи значну частку картоплі, що виробляється господарствами населення, важливим є також створення технічних рішень, які мають помірну вартість і можуть агрегатуватися з тракторами поширених тягових класів.

Першим напрямом є удосконалення ґрунтообробно-садильного блоку: формування стабільного гребеня, локальне внесення добрив, точне розміщення бульб за глибиною і кроком, зменшення ущільнення ґрунту. Другим напрямом є підвищення точності захисту рослин через БПЛА, системи підтримки рішень і диференційоване внесення препаратів. Третім напрямом є роботизація міжрядного догляду, насамперед для механічного контролю бур'янів і локального обприскування. Четвертим і найбільш пов'язаним із темою роботи напрямом є модернізація збиральної машини.

Збиральна машина має забезпечити якісне підкопування, плавне переміщення вороху, активне руйнування ґрунтових грудок, ефективну сепарацію і мінімальне травмування бульб. Конструктивне удосконалення лемеша, бокових дискових елементів, пруткових елеваторів, гумованих поверхонь і системи регулювання швидкості дає змогу зменшити подачу зайвого ґрунту, знизити тяговий опір, підвищити продуктивність і поліпшити якість продукції. Отже, модернізація збиральної машини є центральною технічною умовою ефективного комплексу машин для вирощування картоплі.



Рис. 1.5. Пріоритети вдосконалення технології вирощування картоплі

Висновки по розділу

Картопля залишається стратегічною продовольчою культурою для світу та України, а ефективність її виробництва визначається не лише площею посадки, а передусім урожайністю, якістю машинного виконання операцій і післязбиральною доробкою. Світова тенденція характеризується скороченням або коливанням площ при зростанні виробництва за рахунок продуктивності. В Україні площі картоплі залишаються значними, але методика обліку ускладнюється великою часткою господарств населення. Найбільш

механізованими є підготовка ґрунту, садіння, захист рослин і професійне збирання, тоді як цифровий моніторинг, автоматичне регулювання машин і сортування мають значний резерв розвитку. Перспективи роботизації пов'язані з БПЛА, AI-аналізом стану посівів, роботами для догляду, сенсорами на збиральних машинах і системами підтримки рішень. Основним напрямом удосконалення комплексу машин у межах цієї роботи доцільно вважати модернізацію збиральної машини, зокрема підкопувального та сепаруючого робочих органів, що безпосередньо впливають на втрати, пошкодження бульб і продуктивність агрегату.

РОЗДІЛ 2
ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ КАРТОПЛІ В УМОВАХ ПОЛІССЯ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ

2.1. Вихідні умови проєктування технології

Полісся Житомирської області є однією з найбільш придатних природно-кліматичних зон України для вирощування картоплі. Для регіону характерні достатнє зволоження, помірні температури вегетаційного періоду, значна частка дерново-підзолистих і сірих лісових ґрунтів, а також підвищена потреба у вапнуванні та систематичному внесенні органічних добрив. Разом з тим технологія вирощування має враховувати ризик переущільнення перезволожених ґрунтів, утворення грудок за пересушування верхнього шару, нерівномірність родючості в межах поля та значний тиск фітофторозу в дощові роки.

У проєкті приймається площа виробничого масиву 50 га. Поле призначене для продовольчої картоплі середньостиглої групи стиглості з плановою врожайністю 30 т/га. Система вирощування передбачає гребеневу технологію з міжряддям 75 см, точне садіння відкаліброваним насіннєвим матеріалом, локальне внесення добрив, цифровий моніторинг посівів та механізоване збирання модернізованою коренебульбозбиральною машиною. Основна ідея розділу полягає у поєднанні традиційно ефективних для Полісся прийомів з сучасними засобами точного землеробства, роботизації та удосконаленої збиральної техніки.

Особливістю проєктної технології є зниження кількості непродуктивних проходів техніки, збереження структури гребеня та підвищення якості збирання. Для цього у технологічну карту включено БПЛА DJI Mavic 3M з RGB-камерою 20 МП і мультиспектральною камерою з каналами G, R, Red Edge та NIR, що дає змогу формувати індекси NDVI, GNDVI і NDRE для оцінювання стану рослин [3]. Для механізованої боротьби з бур’янами передбачено роботизовану платформу FarmDroid FD20, яка використовує

високоточну RTK-навігацію і може виконувати міжрядне та внутрішньорядне прополювання в рядкових культурах [4].

Таблиця 2.1 – Вихідні параметри проєктної технології вирощування картоплі

Показник	Прийняте значення	Технологічне значення
Площа проєктного поля	50 га	єдиний масив або 2 суміжні поля по 25 га
Попередник	озима пшениця або жито	дає змогу провести лущення стерні та ранню оранку
Тип ґрунту	дерново-підзолистий супіщаний / легкосуглинковий	потребує органіки, калію і контролю кислотності
pH сольовий	5,2-5,8	за потреби проводять вапнування за 1-2 роки до картоплі
Планова урожайність	30 т/га	валовий збір 1500 т
Схема садіння	75×30 см	44-45 тис. рослин/га
Насіннєвий матеріал	фракція 35-55 мм	орієнтовно 3,0 т/га, всього 150 т
Спосіб збирання	механізований, потоковий	модернізована збиральна машина з поліпшеним підкопувальним вузлом

Схема проєктної технології вирощування картоплі на 50 га

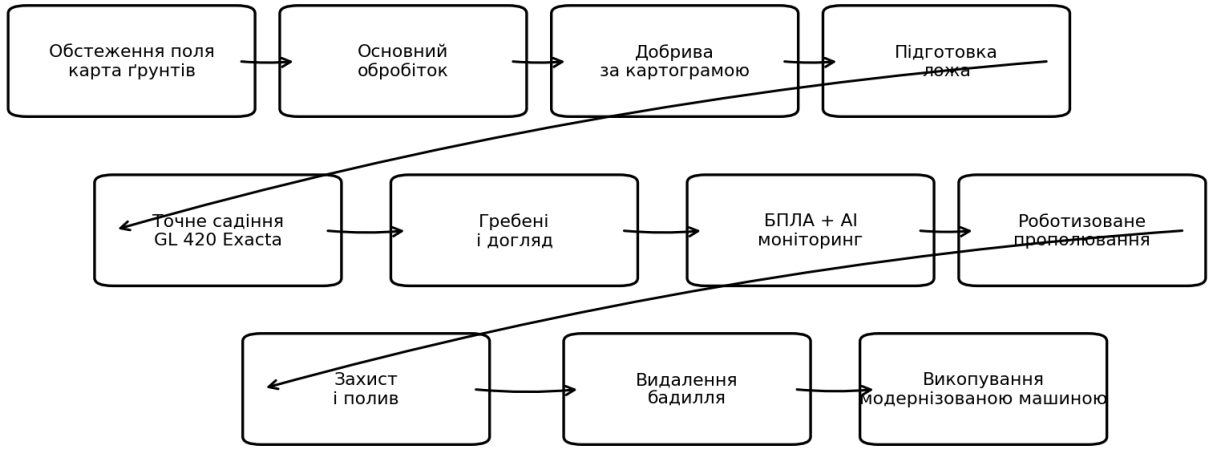


Рис. 2.1. Схема проєктної технології вирощування картоплі на площі 50 га

2.2. Обґрунтування комплексу сучасних машин

Комплекс машин для картоплярства має забезпечувати виконання операцій у стислі агротехнічні строки, високу якість формування гребеня, мінімальне пошкодження бульб і достатню продуктивність на площі 50 га. Для польових робіт доцільно використовувати два енергетичні засоби різної потужності: John Deere 6R 185 як універсальний трактор для садіння, обприскування, внесення

добрив і транспортування, та Fendt 724 Vario як потужніший трактор для енергоємних операцій оранки, фрезерування, подрібнення бадилля і агрегатування збиральної машини. John Deere 6R 185 має 185 к.с. номінальної потужності та до 40 додаткових кінських сил з IPM, що достатньо для більшості агрегатів технологічної карти [5].

Садіння запропоновано виконувати чотирирядною саджалкою GRIMME GL 420 Exacta. Виробник позиціонує GL 420 як машину з чотирма садильними елементами, бункером 2000 кг, регульованим струшувачем і дисками для закривання борозни діаметром 510 мм [1]. Для умов Полісся важливо, що така машина може працювати у поєднанні з ґрунтообробною фрезою або формувачем гребенів, завдяки чому скорочується кількість проходів техніки і зменшується ризик пересихання підготовленого шару.

Для внесення мінеральних добрив обрано Amazone ZA-TS 4200 Profis Hydro, який забезпечує високоточне розкидання з робочою шириною до 54 м і місткістю бункера до 4200 л у відповідній комплектації [6]. Захист посівів виконується причіпним обприскувачем John Deere M732i з баком 3200 л, штангою 18-30 м і продуктивним насосом 280 л/хв [7]. Збирання проводиться модернізованою коренебульбозбиральною машиною, яка в конструктивному розділі роботи оснащується циліндроїдальним лемешем, зубчастими дисками з ґрунтозачепами та прутковою сепаруючою поверхнею. Таке рішення спрямоване на зменшення надходження зайвого ґрунту на сепаратор, рівномірне розподілення вороху і зниження механічних пошкоджень бульб.

Таблиця 2.2 - Склад сучасного комплексу машин для проєктної технології

Група техніки	Марка / модель	Основні ознаки	Використання у технології
Трактор універсальний	John Deere 6R 185	185 к.с.; IPM до +40 к.с.; ISOBUS; GPS-навігація	садіння, добрива, захист, транспорт
Трактор енергонасичений	Fendt 724 Vario Gen7	близько 240 к.с.; безступенева трансмісія Vario; ISOBUS	оранка, фрезерування, збирання
Розкидач добрив	Amazone ZA-TS 4200 Profis Hydro	до 4200 л; ширина до 54 м; секційне керування	мінеральне живлення за картограмою

Продовження таблиці 2.2.

Картоплесаджалка	GRIMME GL 420 Exacta	4 рядки; 75 см; бункер 2000 кг; точне розміщення бульб	садіння і формування гребеня
Обприскувач	John Deere M732i	бак 3200 л; штанга 18-30 м; насос 280 л/хв	захист від хвороб і шкідників
БПЛА	DJI Mavic 3M	RGB 20 МП; 4 мультиспектральні канали; RTK	AI-моніторинг посівів
Робот для бур'янів	FarmDroid FD20	RTK; ширина до 3,0-3,5 м; міжряддя 22,5-75/90 см	механічне прополювання
Збиральна машина	модернізована коренебульбозбиральна машина	циліндроїдальний леміш; диски з ґрунтозачепами; прутковий сепаратор	викопування і первинна сепарація

2.3. Проєктна технологічна карта вирощування картоплі на 50 га

Технологічна карта розроблена для інтенсивної гребеневої технології, орієнтованої на отримання товарної картоплі з мінімальним пошкодженням під час збирання. Норми витрат пального та продуктивність агрегатів прийнято як розрахунково-орієнтовні для господарства з сучасним парком машин. Фактичні показники можуть змінюватися залежно від довжини гонів, вологості ґрунту, рельєфу, кваліфікації механізаторів та наявності простоїв. Водночас наведені значення достатні для визначення сезонного завантаження техніки і потреби в ресурсах.

Система удобрення передбачає внесення 30 т/га органічних добрив під основний обробіток, а також мінеральних добрив у нормі N90P90K120 з уточненням за агрохімічними картограмами. За садіння локально вносять стартове добриво у борозну, що підвищує доступність фосфору в ранній період росту. Особлива увага приділяється калійному живленню, оскільки воно впливає на вміст сухих речовин, лежкість і стійкість бульб до механічних пошкоджень.

Таблиця 2.3 – Технологічна карта вирощування картоплі на площі 50 га

№	Операція	Строк виконання	Агрегат	Обсяг	Продук-тивність	Потрібно, год	Пальне, л	Примітка
1	Агрохімічне обстеження, відбір проб ґрунту, створення електронної карти поля	березень, III декада	UTV/пікап + GPS-приймач; лабораторний аналіз	50	12.00	4.2	20	визначення pH, гумусу, NPK, зон неоднорідності
2	Дискування стерні попередника	серпень-вересень	John Deere 6R 185 + Lemken Rubin 10/400 KUA	50	3.20	15.6	400	заробка решток, провокація сходів бур’янів
3	Внесення органічних добрив	вересень	Fendt 724 Vario + Bergmann TSW 6240 S	1500	1.20	1250.0	500	норма 30 т/га, підвищення вмісту органічної речовини
4	Основний обробіток ґрунту - оранка	вересень-жовтень	Fendt 724 Vario + Lemken Juwel 8 M V	50	1.45	34.5	1000	глибина 25-27 см, вирівнювання поля після оранки
5	Весняне закриття вологи і вирівнювання	квітень, I декада	John Deere 6R 185 + Vaderstad NZ Aggressive 500	50	4.80	10.4	250	робота за фізичної стиглості ґрунту
6	Внесення мінеральних добрив за картограмою	квітень, II декада	John Deere 6R 185 + Amazone ZA-TS 4200 Profis Hydro	50	18.00	2.8	125	N90P90K120 з корекцією за аналізом ґрунту
7	Передпосадкове фрезерування і підготовка гребеневого ложа	квітень, II декада	Fendt 724 Vario + GRIMME GF 400 / активна фреза	50	1.90	26.3	700	подрібнення грудок, формування пухкого шару
8	Садіння картоплі з локальним внесенням стартового добрива та протруйника	квітень, III декада	John Deere 6R 185 + GRIMME GL 420 Exacta, 4 рядки	50	1.15	43.5	650	75×30 см, орієнтовно 44-45 тис. рослин/га
9	Досходове формування гребенів	травень, I декада	Fendt 724 Vario + GRIMME GH 4 / гребенеутворювач	50	2.20	22.7	450	ущільнення боків гребеня, зменшення зеленіння бульб
10	БПЛА-моніторинг сходів, густоти та стресу рослин	травень-червень	DJI Mavic 3M + AI-сервіс класифікації знімків	150	55.00	2.7	0	3 обльоти: сходи, змикання рядків, бутонізація
11	Роботизоване механічне прополювання міжрядь	травень-червень	FarmDroid FD20 / роботизований міжрядний культиватор	100	0.45	222.2	0	2 проходи, навігація RTK, мінімізація гербіцидного навантаження
12	Міжрядний обробіток і підгортання	червень, I декада	John Deere 6R 185 + AVR Speedridger / міжрядний культиватор	50	2.00	25.0	350	аерація гребеня, руйнування ґрунтової кірки
13	Захист від фітофторозу, альтернаріозу та колорадського жука	червень-серпень	John Deere 6R 185 + John Deere M732i, 18-30 м	250	15.00	16.7	90	5 обробок за прогнозом хвороб і даними БПЛА
14	Локальне дощування за дефіциту вологи	червень-липень	Bauer Rainstar E51 або аналог, насосна станція	50	1.00	50.0	200	норма за потреби 250-300 м3/га
15	Подрібнення бадилля перед збиранням	вересень, I декада	Fendt 724 Vario + GRIMME KS 75-4	50	3.00	16.7	300	підготовка до сепарації та зменшення домішок
16	Викопування картоплі модернізованою збиральною машиною	вересень, II-III декада	Fendt 724 Vario + модернізована коренебульбозбиральна машина	50	0.72	69.4	850	циліндроїдальний леміш, зубчасті диски з ґрунтозачепами
17	Транспортування бульб від комбайна до сховища	вересень	John Deere 6R 185 + Fliegl ASW 271 / тракторні причепи	1500	35.00	42.9	150	урожайність прийнято 30 т/га, загальний вал 1500 т
18	Первинне сортування, лікувальний період і закладання на зберігання	вересень-жовтень	Miedema ML / GRIMME RH + вентильоване сховище	1500	25.00	60.0	75	температурне вирівнювання, видалення пошкоджених бульб

2.4. Розрахунок потреби в ресурсах і виробничих показників

За схеми садіння 75×30 см густота стояння становить приблизно 44,4 тис. рослин на гектар. Для площі 50 га потрібно близько 2,22 млн посадкових місць. За середньої норми садивного матеріалу 3,0 т/га загальна потреба у насіннєвій картоплі становить 150 т. За планової врожайності 30 т/га валовий збір становитиме 1500 т, з яких товарна частка після сортування за правильної технології може становити 85-90 %.

Ресурсна частина технології повинна забезпечити не лише формування високого врожаю, а й підготовку продукції до тривалого зберігання. Тому разом з основним удобренням у технології передбачено обов’язковий лікувальний період після збирання, вентиляцію, видалення пошкоджених бульб, поступове зниження температури та окреме зберігання насіннєвої фракції. Основні виробничі показники проєктної технології наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Баланс основних ресурсів та виробничих показників

Показник	Значення	Пояснення
Площа посадки	50 га	прийнято за завданням
Схема садіння	75×30 см	4 рядки саджалкою GRIMME GL 420 Exacta
Густота стояння	44,4 тис. рослин/га	орієнтовно 2,22 млн рослин на 50 га
Насіннєва картопля	3,0 т/га; 150 т всього	фракція 35-55 мм, передсадивне сортування
Органічні добрива	30 т/га; 1500 т всього	під основний обробіток
Мінеральні добрива	N90P90K120	коригування за картограмою поля
Планова урожайність	30 т/га	валовий збір 1500 т
Орієнтовне пальне	6110 л	122.2 л/га
Період збирання	8-10 діб	залежить від вологості ґрунту і готовності сховища

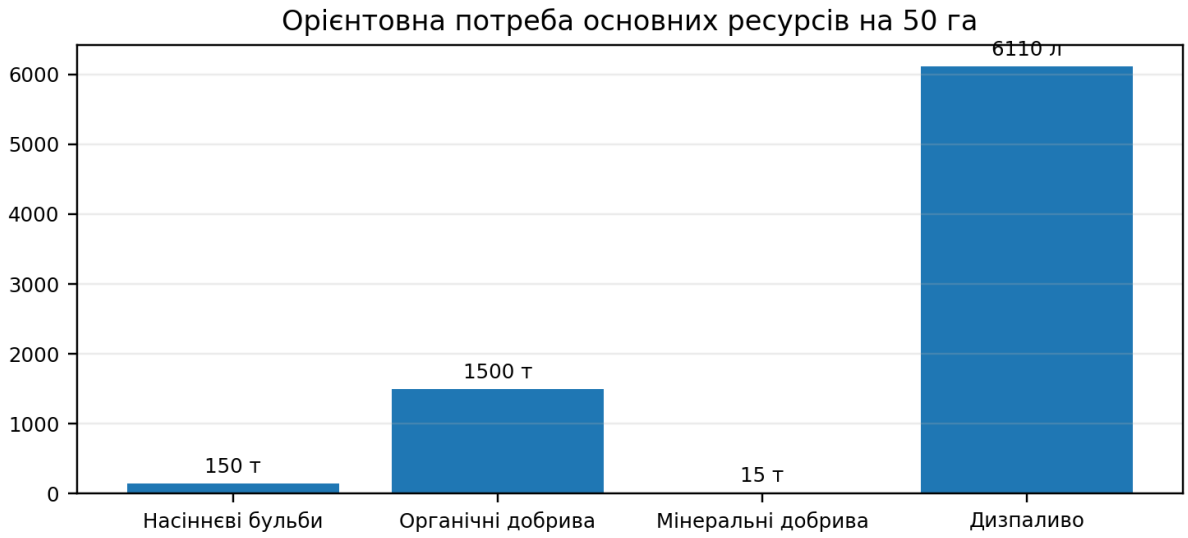


Рис. 2.2. Орієнтовна потреба основних ресурсів для площі 50 га.

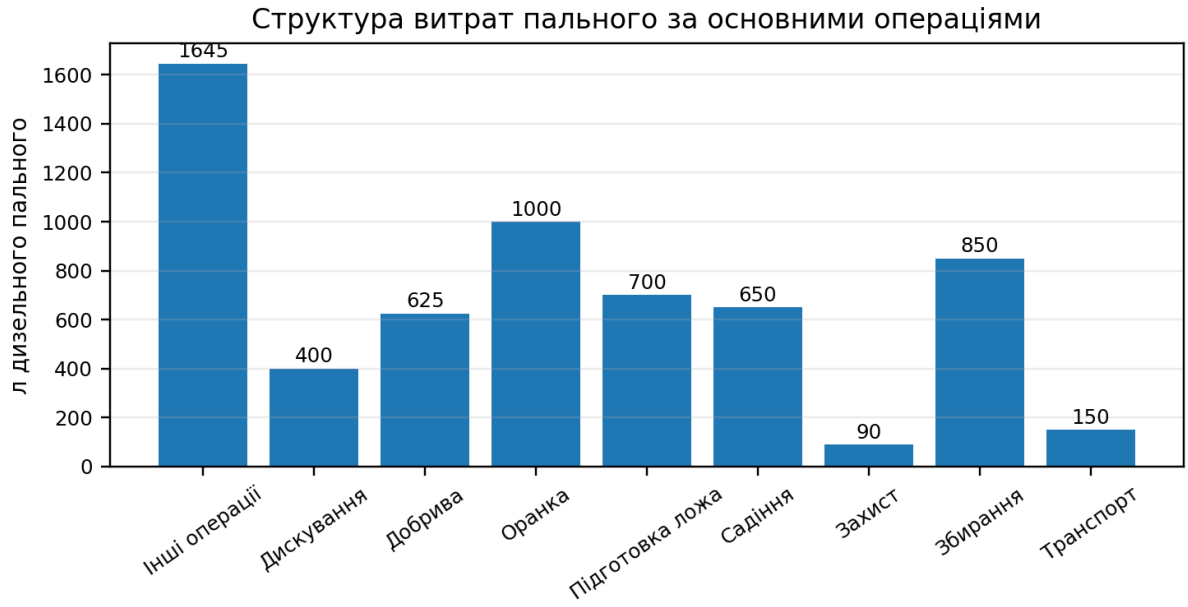


Рис. 2.3 Структура витрат пального за основними операціями технології

2.5. Графік завантаження техніки

Для площі 50 га найбільш напруженими періодами є квітень, коли виконуються внесення добрив, передпосадкова підготовка і садіння, а також вересень, коли відбуваються подрібнення бадилля, викопування, транспортування і сортування. Завантаження тракторів у квітні може бути зменшене завдяки поєднанню операцій садіння з локальним внесенням добрив і остаточним формуванням гребенів. У вересні головним обмежувальним

фактором стає продуктивність збиральної машини та здатність сортувально-зберігальної лінії приймати ворох без накопичення черг транспорту.

Роботизоване прополювання має іншу логіку завантаження порівняно з тракторними агрегатами: робот працює повільніше, але може виконувати роботу тривалий час з мінімальною участю оператора. Тому його роботу доцільно планувати як фонову операцію в період масового проростання бур'янів. БПЛА не створює значного годинного навантаження, але його дані є критичними для своєчасного прийняття рішень щодо захисту, поливу та локального механічного прополювання.

Таблиця 2.5 – Сезонне завантаження ключових технічних засобів

Технічний засіб	Завантаження, год	Основний період	Оцінка забезпеченості
John Deere 6R 185	156.8	березень-вересень	достатньо 1 одиниці
Fendt 724 Vario	1419.6	березень-вересень	потребує довгого робочого дня або 2 змін
БПЛА DJI Mavic 3M	2.7	травень-червень	достатньо 1 одиниці
FarmDroid FD20	222.2	травень-червень	потребує довгого робочого дня або 2 змін
Обприскувач M732i	16.7	вересень	достатньо 1 одиниці
Збиральна машина	69.4	вересень	достатньо 1 одиниці
Сортувальна лінія	60.0	вересень	достатньо 1 одиниці



Рис. 2.4. Діаграма завантаження ключової техніки за сезон

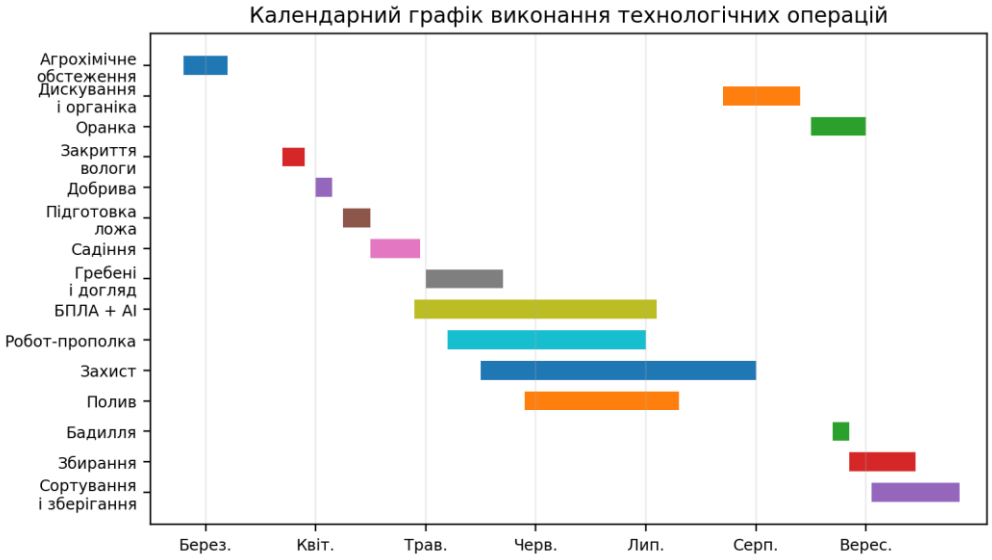


Рис. 2.5. Календарний графік виконання технологічних операцій

2.6. Використання БПЛА зі штучним інтелектом для моніторингу посівів

У проєктній технології БПЛА використовується не як допоміжний засіб візуального огляду, а як елемент цифрового контуру керування посівами. Перший обліт виконують після появи сходів для контролю рівномірності рядків, виявлення пропусків, зон перезволоження і місць пошкодження гребенів. Другий обліт доцільний у фазі активного росту бадилля, коли за мультиспектральними індексами можна визначити ділянки з азотним дефіцитом, пригніченням рослин або раннім розвитком хвороб. Третій обліт

проводять у період бутонізації - цвітіння для оцінювання потенціалу врожаю, потреби у захисті та коригування поливу.

Штучний інтелект застосовується для автоматичної класифікації знімків: розпізнавання бур'янів у міжряддях, пошуку плям фітофторозу, виділення ослаблених рослин, оцінювання зімкнення рядків і побудови карт-завдань. Важливо, що рішення не повинно обмежуватися лише створенням красивої карти. Результатом моніторингу має бути конкретна дія: запуск робота на певну ділянку, локальне коригування обприскування, додатковий огляд агрономом або зміна графіка поливу.



Рис. 2.6. Цифровий контур моніторингу та керування доглядом за картоплею

Таблиця 2.6 – Завдання БПЛА-моніторингу впродовж вегетації

Етап	Дані	Що виявляється	Управлінське рішення
Після сходів	RGB-ортофото, карта рядків	пропуски, зрідження, пошкодження гребенів	підсадка на малих ділянках, коригування догляду
Змикання рядків	NDVI, GNDVI, карта бур'янів	стрес рослин, забур'янення, нерівномірність живлення	завдання для робота, локальний міжрядний обробіток
Бутонізація - цвітіння	NDRE, термічні/візуальні ознаки	дефіцит N, водний стрес, осередки фітофторозу	диференційований захист, коригування поливу
Перед збиранням	RGB-карта бадилля і гребенів	нерівномірне дозрівання, полеглі ділянки	план маршруту збиральної машини і транспорту

2.7. Роботизована боротьба з бур’янами

Забур’яненість картопляного поля є одним із головних факторів зниження врожайності, особливо в перший період після садіння, коли рядки ще не зімкнулися і бур’яни швидко використовують доступне світло та вологу. Традиційна система боротьби базується на поєднанні досходового гербіциду, міжрядного обробітку та ручного виполювання локальних осередків. У проєктній технології ручну працю частково замінює роботизований агрегат FarmDroid FD20, який використовує точну навігацію і механічні робочі органи для роботи між рядками.

Виробник FarmDroid FD20 вказує, що робот працює на сонячній енергії, використовує високоточне GPS/RTK-позиціювання, має робочу ширину до 3 м, може працювати з 4-12 активними рядками та забезпечує добову продуктивність до 6,5 га залежно від умов [4]. Для картоплі робот доцільно застосовувати переважно у режимі міжрядного прополювання по RTK-навігації та за картами, створеними БПЛА. Це дає змогу скоротити кількість суцільних хімічних обробок, зменшити ущільнення ґрунту і підвищити екологічність технології.



Рис. 2.7. Робот FarmDroid FD20 для механічного контролю бур’янів у рядкових культурах

Порівняно з тракторним міжрядним культиватором робот має нижчу миттєву продуктивність, однак може працювати автономно протягом довгого світлового дня, не потребує постійного перебування механізатора в кабіні та точніше повторює траєкторію рядків. Його доцільно використовувати на ранніх фазах росту, коли робочі органи не пошкоджують бадилля, а бур’яни перебувають у фазі білої ниточки або сім’ядоль. За сильного забур’янення робот не повністю замінює класичний міжрядний обробіток, але істотно зменшує трудомісткість догляду і може працювати у вікна між дощами, коли важка техніка небажана.

2.8. Викопування картоплі модернізованою збиральною машиною

Операція викопування є ключовою для теми кваліфікаційної роботи, оскільки саме на цьому етапі формується значна частина втрат і механічних пошкоджень бульб. У традиційних картоплезбиральних машинах основні проблеми пов’язані з надмірним захопленням ґрунту, залипанням робочих органів у вологих умовах Полісся, недостатнім руйнуванням грудок, накопиченням бадилля на підкопувальних елементах і нерівномірним подаванням вороху на сепаратори. Це призводить до перевантаження елеваторів, погіршення очищення бульб, росту тягового опору та збільшення витрат пального.

У проєкті операцію викопування передбачено виконувати модернізованою коренебульбозбиральною машиною, розробленою у конструктивному розділі. Її робочий орган включає циліндроїдальний леміш, який поступово підрізає і деформує бульбоносний пласт, а також пасивні зубчасті диски з ґрунтозачепами для бокового відрізання пласта і перерізання рослинних залишків. Після проходження лемеша ворох надходить на пруткову сепаруючу поверхню, де відбувається первинне руйнування та рівномірний розподіл матеріалу перед основним елеватором.

Для умов Полісся така модернізація є доцільною з трьох причин. По-перше, зменшується маса зайвого ґрунту, що потрапляє в машину, а отже

підвищується пропускна здатність сепаруючих органів. По-друге, бокове відрізання пласта зменшує розривання гребеня і сприяє більш стабільній подачі вороху. По-третє, пруткова поверхня підкопувального органу починає сепарацію ще до основного елеватора, що знижує навантаження на наступні робочі органи і зменшує ймовірність пошкодження бульб.

Таблиця 2.7 – Розрахункові параметри роботи модернізованої збиральної машини

Показник	Значення	Пояснення
Кількість рядків, що збираються	2 рядки	дворядний режим роботи
Міжряддя	0,75 м	відповідає схемі садіння
Робоча ширина	1,50 м	2×0,75 м
Робоча швидкість	4,5-5,0 км/год	у вологих умовах зменшується до 3,5-4,0 км/год
Коефіцієнт використання часу	0,65	повороти, вивантаження, регулювання
Розрахункова продуктивність	0,65-0,75 га/год	прийнято 0,72 га/год у технологічній карті
Потрібний час на 50 га	69-77 год	планується 8-10 робочих діб
Витрата пального	17 л/га	враховано тяговий опір і роботу ВВП

2.9. Очікувана ефективність і напрями подальшого вдосконалення технології.

Проєктна технологія поєднує сучасний машинний комплекс, цифровий моніторинг і модернізовану збиральну машину. Її очікувана ефективність проявляється у більш точному дотриманні строків операцій, зменшенні втрат під час збирання, покращенні якості бульб, зниженні частки ручної праці та можливості оперативного реагування на стресові фактори. Найбільший

технологічний резерв знаходиться у трьох операціях: формуванні якісного гребеня, догляді за посівами у фазі раннього росту та викопуванні з мінімальним пошкодженням бульб.

Напрями подальшого вдосконалення технології вирощування картоплі в умовах Полісся Житомирської області доцільно сформулювати так: впровадження зонального удобрення за агрохімічними картами; автоматичне водіння тракторів по RTK-лініях; регулярний БПЛА-моніторинг із AI-розпізнаванням бур'янів, хвороб і зрідженості; використання роботів для міжрядного догляду; оптимізація режимів сепарації картоплезбиральної машини залежно від вологості ґрунту; обладнання сховища системами автоматичного контролю температури, вологості і вентиляції. У межах цієї роботи пріоритетним є саме удосконалення збиральної машини, оскільки воно безпосередньо впливає на втрати, товарність і лежкість картоплі.

Таблиця 2.8 – Узагальнена оцінка запропонованої технології

Напрям оцінювання	Очікуваний результат
Технологічний строк	операції рознесені за декадами, критичні роботи мають резерв 2-4 доби
Ресурсозбереження	поєднання операцій садіння, локальне внесення добрив, роботизоване прополювання
Якість продукції	менше пошкоджень при збиранні, контроль бадилля, швидке сортування
Цифровізація	БПЛА, AI-аналітика, карти-завдання, RTK-навігація
Екологічність	менше суцільних обробок, точніше застосування ресурсів, менше ущільнення ґрунту
Перспектива	адаптивне керування швидкістю елеваторів і підкопувального вузла за потоком вороху

Висновки по розділу

У другому розділі розроблено проєктну технологію вирощування картоплі для умов Полісся Житомирської області на площі 50 га. Прийнята технологія передбачає гребеневе вирощування з міжряддям 75 см, використання відкаліброваного садивного матеріалу, органо-мінеральну систему удобрення,

цифровий моніторинг посівів і механізоване збирання модернізованою збиральною машиною.

Складено технологічну карту, за якою орієнтовна сезонна трудомісткість машинних операцій становить близько 1915.6 маш.-год, а потреба в дизельному пальному - близько 6110 л. Найбільше навантаження припадає на весняний період садіння і вересневий період збирання, тому саме ці операції потребують чіткої організації та резервування техніки.

Для моніторингу посівів запропоновано використання DJI Mavic 3M із AI-аналізом мультиспектральних даних, а для контролю бур’янів - роботизованої платформи FarmDroid FD20. Операцію викопування передбачено виконувати модернізованою коренебульбозбиральною машиною з циліндроїдальним лемешем і зубчастими дисками з ґрунтозачепами, що має підвищити якість сепарації вороху і зменшити пошкодження бульб.

РОЗДІЛ 3
ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ПІДКОПУВАЛЬНОГО ОРГАНА КАРТОПЛЕЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ

3.1. Фізико-технологічні властивості бульб картоплі та ґрунтових грудок

Під час машинного збирання картоплі ключовою операцією є відокремлення бульб від ґрунтової маси без істотного травмування продукції. Робочі органи картоплезбиральних машин здійснюють поділ вороху, використовуючи відмінності у розмірах, формі та фрикційних характеристиках бульб і ґрунтових грудок.

Фізико-механічні показники бульб змінюються залежно від сорту, умов формування врожаю, агрофону та ґрунтово-кліматичних особливостей зони вирощування.

Розміри і маса бульб безпосередньо пов'язані з рівнем урожайності: за вищої продуктивності насаджень, як правило, формується більша частка крупних бульб.

Зв'язок між об'ємом і основними розмірами бульби описується залежністю, запропонованою В. П. Горячкіним [17]

$$V_б = \varepsilon_к abc, \tag{3.1}$$

де $V_б$ – об'єм бульби; a,b,c – відповідно довжина, ширина і товщина бульби;

ε_0 – коефіцієнт (для еліпсоїда ε_0=4/3π).

Масу однієї бульби визначають за залежністю

$$Q = \varepsilon_к abc, \tag{3.2}$$

де $\varepsilon_к$ – коефіцієнт, рівний 0,56…0,65.

Під час переміщення бульб у робочій зоні машини проявляються три основні види тертя: ковзання, кочення та перекидання. Останнє відрізняється тим, що бульба під дією прикладеної сили переміщується вздовж своєї

найбільшої осі. Орієнтовні значення коефіцієнтів тертя для різних поверхонь подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. – Значення коефіцієнтів тертя бульб картоплі

Матеріал поверхні	Коефіцієнт тертя		
	кочення	перекидання	ковзання
Гума	0,35…0,37	0,43…0,53	0,70…0,75
Стальний лист	0,32…0,36	0,37…0,45	0,58…0,60
Прогумована стрічка	0,37…0,40	0,50…0,54	0,60…0,78
Поліетилен	–	–	0,40…0,42
Ґрунт	–	–	0,98…1,03

Для контакту бульба-бульба коефіцієнт тертя кочення зазвичай становить 0,5...0,6, тоді як коефіцієнт тертя ковзання наближається до 0,8.

Стійкість бульб до статичного стискання визначається сортовими властивостями та напрямом прикладання навантаження відносно довжини, ширини або товщини. Середнє зусилля руйнування знаходиться в межах 511...987 Н.

За ударних навантажень ступінь пошкодження залежить від матеріалу контактної поверхні та швидкості співудару. Граничні швидкості становлять: при ударі об металеві решета – 1,4...1,7 м/с, а при контакті із супіщаним ґрунтом – близько 6,2 м/с [13].

Стан ґрунту істотно визначає ефективність роботи сепарувальних пристроїв. Якість сепарації залежить від механічного складу та вологості ґрунту, а також від пов’язаних з ними властивостей: пластичності, липкості, міцності грудок тощо.

Ґрунти навіть у межах однієї природно-кліматичної зони можуть суттєво відрізнятися за гранулометричним складом і механічними властивостями, що ускладнює вибір універсальних режимів роботи збиральної машини.

Надмірне зволоження спричиняє підвищення пластичності та липкості ґрунту. У таких умовах робочі поверхні сепараторів забиваються і залипають, а їх пропускна здатність та якість очищення різко зменшуються.

За недостатньої вологості грудки ґрунту стають міцнішими, тому їх руйнування та подальше просіювання через сепарувальні робочі органи ускладнюються.

Міцність ґрунтових грудок зростає зі збільшенням їх розмірів. Дрібні грудки розміром 21...30 мм руйнуються при навантаженні 40...50 Н, тоді як для грудок 71...80 мм потрібне зусилля 120...200 Н.

У середньому бульби є міцнішими за грудки суглинкового ґрунту, однак діапазони мінімальної міцності бульб і максимальної міцності грудок частково накладаються.

Опір ґрунтових грудок згинанню значно менший, ніж опір стисканню. Цю особливість доцільно враховувати під час вибору форми та режимів роботи сепарувальних органів картоплезбиральних машин.

Середнє значення коефіцієнта тертя кочення окремих грудок по гумі дорівнює приблизно 0,51, а при груповому переміщенні змінюється в межах 0,4...0,62. Для кочення ґрунтових грудок по сталі цей показник становить близько 0,5 [13, 14].

3.2. Визначення продуктивності картоплекопача

Годинну продуктивність картоплекопача за чистий час роботи розраховують за формулою [13]:

$$F_0 = 0{,}1 \cdot i \cdot m \cdot \delta_m \qquad (3.3)$$

де i – кількість рядків, які одночасно збирає машина;

m – ширина міжряддя, м;

δ_m – швидкість агрегату, км/год.

Робочу швидкість агрегату приймають з урахуванням тягово-швидкісних можливостей трактора та умов агрегатування з картоплекопачем. Для суглинкових ґрунтів оптимальної вологості доцільною є швидкість 5,5 км/год. δ_m

$$F_0 = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 0{,}7 \cdot 5{,}5 = 0{,}335 \text{ га/год.}$$

У процесі роботи на підкопувальні та сепарувальні органи надходить неоднорідний потік, до складу якого входять ґрунт, бульби, залишки бадилля, а в окремих випадках також каміння.

Сумарна маса вороху, що подається до картоплекопача, формується з таких складових [13]:

$$Q = Q_n + Q_{кл} + Q_б, \tag{3.4}$$

де Q_n – кількість ґрунту, що підкопується;

$Q_{кл}$ – кількість бульб;

$Q_б$ – кількість бадилля.

Середню секундну подачу ґрунту до картоплекопача без урахування маси бульб визначають за залежністю [13]:

$$Q_{кл} = Q + Q_{кл} = S \cdot \delta_m \cdot q, \tag{3.5}$$

де S – площа січення пласта, що підкопується, S = 0,09 м^2;

q – об’ємна вага ґрунту, q = 1400 кг/м^3.

$$Q_{кл} = 0{,}09 \cdot 1{,}52 \cdot 1400 = 191{,}5 \text{ кг/сек.}$$

Кількість бульб, що надходить у машину за одиницю часу, розраховується за формулою [13]:

$$Q_{кл} = 0{,}1 \cdot i \cdot m \cdot G_{кл} \cdot \delta_m, \tag{3.6}$$

де i – кількість рядків;

m – ширина міжряддя, m = 0,7м;

$G_{кл}$ – врожайність бульб, $G_{кл}$ = 25 т/га.

$$Q_{кл} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 0{,}7 \cdot 25 \cdot 1{,}5 = 2{,}6 \text{ кг/сек.}$$

У підкопаному пласті частка бульб за масою становить лише 1–2 %. Крім ґрунту і бульб, у машину потрапляє бадилля, секундну масу якого можна визначити за наведеною нижче формулою: $Q_б$

$$Q_б = 0{,}1 \cdot i \cdot m \cdot G_б \cdot \delta_m, \tag{3.7}$$

де $G_б$ – врожай бадилля, $G_б$ = 10 т/га.

$$Q_б = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 0{,}7 \cdot 10 \cdot 1{,}5 = 1{,}05 \text{ кг/сек.}$$

Отже, сумарна масова подача вороху в картоплекопач становить 195,15 кг/с. $Q =$

Частку окремих компонентів у загальній масі вороху визначають у відсотках [13]

$$P_n = \frac{Q_n}{Q} \cdot 100\% . \qquad (3.8)$$

Відсоткова частка ґрунту у загальній масі вороху

$$P_n = \frac{191{,}5}{195{,}15} \cdot 100\% = 98{,}1\%$$

Відсоткова частка бульб у загальній масі вороху:

$$P_k = \frac{2{,}6}{195{,}15} \cdot 100\% = 1{,}3\%$$

Відсоткова частка бадилля у загальній масі вороху:

$$P_б = \frac{1{,}05}{195{,}15} \cdot 100\% = 0{,}6\%$$

3.3. Обґрунтування параметрів робочих органів картоплекопача

Леміш картоплекопача призначений для підрізання бульбоносного шару, його часткового руйнування та спрямування вороху до наступних робочих органів машини.

Раціональна конструкція лемеша має забезпечувати повне підкопування гнізда з мінімальним захопленням зайвого ґрунту та без пошкодження бульб. У сучасних картоплезбиральних машинах лемеші здебільшого виконують у вигляді двогранного клина; для розрахункової схеми використано рішення, що відповідає патенту на корисну модель № 99259 (рис. 3.1).

Модернізація передбачає заміну традиційного плоского лемеша на циліндроїдальний, закріплений на підкопувачі. На першій ділянці його корпус

має увігнуту форму, орієнтовану до бульбоносного шару, що зменшує надходження зайвого ґрунту: при гребеневому садінні на 25–30 %, а при гладкому – на 50–60 %. Друга ділянка виконана плоскою, а кінцева частина має випуклу форму з напрямними ребрами. Таке поєднання забезпечує руйнування пласта і рівномірніше розподілення вороху по сепарувальній поверхні.

Ширина захвату В передньої підкопувальної частини лемеша (рис. 3.2) приймається рівною ширині гнізда bгн з урахуванням поперечного зміщення рядка від осьової лінії на величину 2δ. Ширина вихідної частини лемеша узгоджується з шириною сепарувального робочого органа.

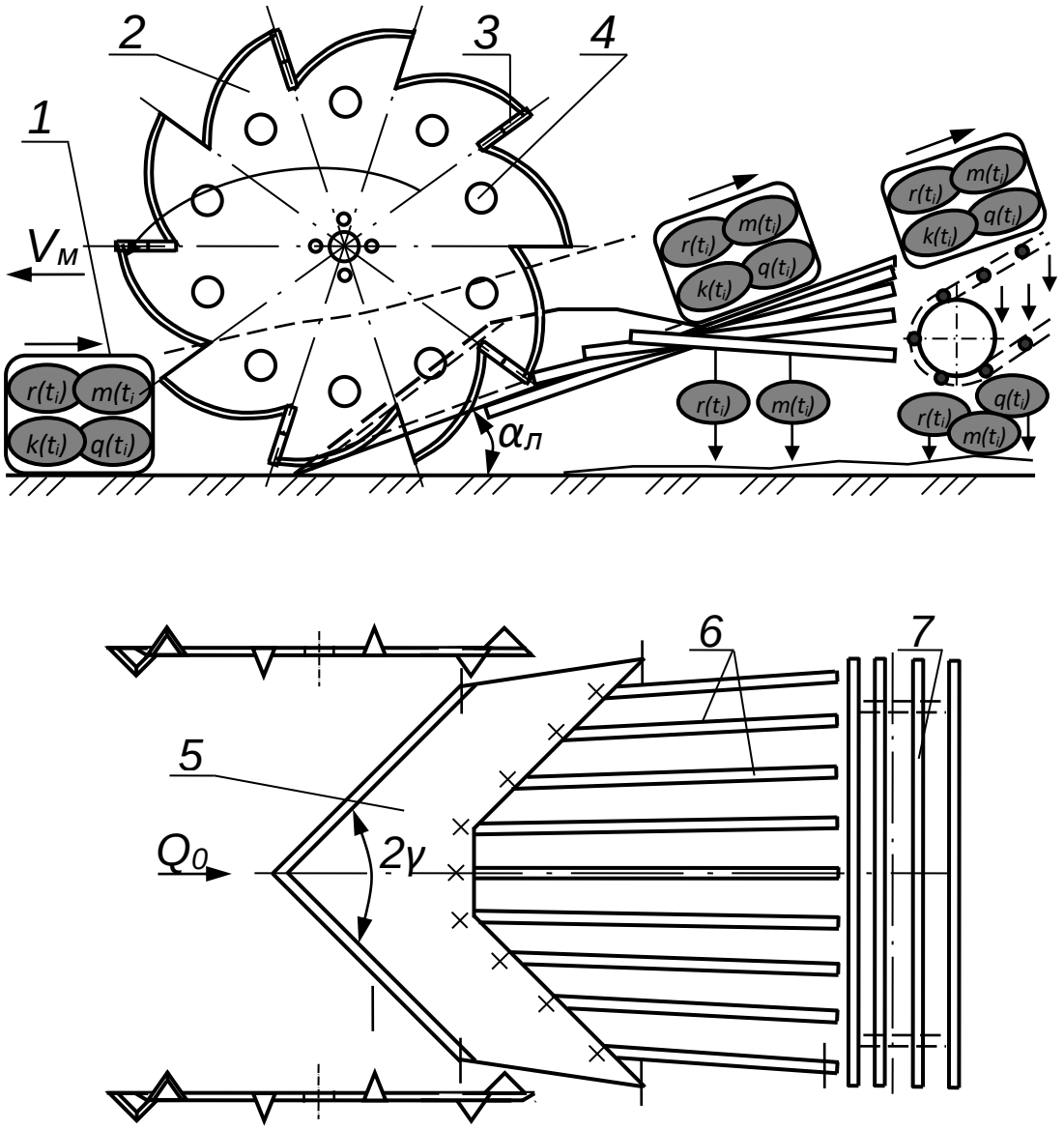


Рис. 3.1. Схема технологічної роботи підкопувального органа картоплезбиральної машини

Технологічний процес підкопування (рис. 3.1) реалізується таким чином: по обидва боки картопляного вороху 1 встановлено вертикальні зубчасті диски 2 з ґрунтозачепами 3. У дисках передбачено отвори 4, центри яких розміщені концентрично осі обертання. Відстань від зовнішньої кромки зуба до осі отвору становить 140…250 мм, а діаметр отворів може бути 30…37 мм. Підкопаний ворох переміщується по циліндроїдальному лемешу 5, де змінює форму, частково деформується на прутках 6 у поздовжньо-вертикальній площині та надходить на сепаратор 7 для подальшого очищення.

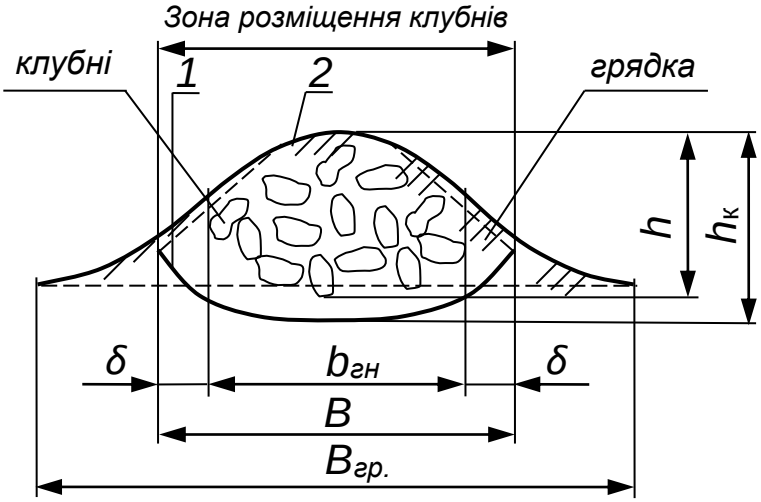


Рис. 3.2. Схема передньої ділянки підкопувальної частини лемеша.

Підкопувальний орган працює під час руху машини вздовж картопляних рядків. За рахунок тягового зусилля трактора леміш заглиблюється у ворох і підрізає пласт знизу. Зубчасті диски, взаємодіючи з ґрунтом через сили тертя та ґрунтозачепи, обертаються на своїх осях і одночасно відрізають пласт з боків. Рослинні рештки перерізаються як робочою крайкою диска, так і різальними кромками ґрунтозачепів. Затиснутий між дисками та циліндроїдальним лемешем пласт подається спочатку по увігнутій, потім по плоскій прутковій ділянці, а на виході переходить на випуклу прутково-сепарувальну поверхню. Унаслідок цього ворох частково подрібнюється, попередньо очищується і більш рівномірно надходить на сепаратор 7. Поліпшення відділення бульб від ґрунту забезпечується за рахунок:

а) бокового відрізання картопляного пласта зубчастими дисками та різальними кромками ґрунтозачепів із його частковим руйнуванням;

б) зменшення обсягу вороху, що надходить на машину, під час руху пласта по циліндроїдальному лемешу;

в) поперечної деформації та попередньої сепарації пласта на середній плоскій прутковій полиці;

г) додаткової деформації й часткового просіювання вороху на випуклій прутковій поверхні вихідної частини;

д) рівномірного розподілення маси вороху перед подаванням на основну сепарувальну поверхню.

Використання зубчастих дисків із різальними кромками ґрунтозачепів, а також перехід від плоского підкопувального органа до циліндроїдальної та прутково-сепарувальної форми дає змогу зменшити подачу вороху на сепаратор. Це підвищує інтенсивність руйнування пласта, полегшує сепарацію, збільшує експлуатаційну продуктивність і технологічну надійність робочого органа, знижує тяговий опір та зменшує потребу в додаткових грудкоруйнівних пристроях, одночасно обмежуючи механічне травмування бульб.

Запропоноване компонування підкопувального органа зменшує масу ґрунту, що надходить на сепарувальні органи, і покращує відокремлення бульб. Завдяки цьому знижуються механічні пошкодження картоплі, підвищується її лежкість під час зберігання, скорочується кількість необхідних сепарувальних вузлів і зростає продуктивність агрегату.

Таке конструктивне рішення може застосовуватися не лише для картоплі, а й для збирання столового буряка, цибулі, ріпи та інших коренебульбоплодів подібної форми.

До основних параметрів пасивного лемеша, крім кута скосу, який приймають у межах 40–50°, належать: α

- кут нахилу робочої грані до горизонтальної площини; $\alpha_л$
- довжина лемеша L;
- ширина лемеша B;
- висота розташування задньої кромки лемеша H.

Зазначені параметри пов’язані між собою такою залежністю

$$L = \frac{H}{\sin \alpha_л}. \qquad (3.9)$$

Експериментальні дослідження показують: зі збільшенням цього кута поліпшується самоочищення леза від бадилля та налиплого ґрунту, однак одночасно зростає тяговий опір через накопичення ґрунтової маси перед лемешем [13, 19]. $\alpha_л$

У практичних конструкціях лемешів приймають значення 15–20°. Висоту задньої кромки добирають так, щоб забезпечити плавне передавання шару ґрунту з лемеша на сусідній робочий орган елеваторної решітки; рекомендоване значення становить 80–90 мм. $\alpha_л$ H H

Ширину плоского лемеша визначають за виразом [13]:

$$B = в + 2\delta + 2(h - h_k)ctg\varphi_0 \ , \qquad (3.10)$$

де $в$ – ширина залягання бульб у гнізді (240-300м.);

δ – зміщення осі рядка відносно осі лемеша через відхилення центра гнізда кущів від середньої лінії рядка та неточності водіння збирального агрегату по рядках (30-50мм.);

h – глибина підкопування (170-220мм. при збиранні підгорнутих рядків та 130-170мм. при не підгорнутих рядках);

h_k – глибина залягання крайніх по ширині гнізда бульб (60-100мм.);

φ_0 – кут природного укосу ґрунту (46-50 º).

Підставляючи вихідні дані у формулу (3.9), одержуємо

$$L = \frac{0{,}085}{\sin 17°} = 0{,}29 \text{ м.}$$

Ширину плоского лемеша розраховуємо за формулою (3.10)

$$B = 0{,}25 + 2 \cdot 0{,}04 + 2(0{,}2 - 0{,}07) \cdot ctg\,48° = 0{,}56 \text{ м.}$$

Під час поступального руху леміш долає опір різання ґрунту, а також опір переміщенню маси, що знаходиться на його робочій поверхні, зумовлений тертям і деформацією вороху. $P_р$ $P_м$

Повний тяговий опір визначається за залежністю [13]

$$P = P_p + P_м. \tag{3.11}$$

3.4. Дослідження параметрів зубчастого диска з ґрунтозачепами

Для вибору раціональної форми та геометрії різальної крайки було розглянуто кілька варіантів ґрунтозачепів і порівняно їх за такими критеріями:

а – металоємність конструкції диска з ґрунтозачепами;

б – величина тягового опору диска з ґрунтозачепами;

в – здатність перерізати засмічені рослинні рештки та бадилля.

Ключовим елементом запропонованого диска є зуб, різальна кромка якого сформована за логарифмічною кривою. Для розрахунку використано таке рівняння логарифмічної кривої (рис. 3.3):

$$r = \frac{1}{2} r_0 (1 + e^{\psi ctg\tau}), \tag{3.12}$$

де r – поточне значення радіус-вектора, м;

r_0 – початкове значення радіус-вектора, м;

rд – кінцеве значення радіус-вектора, м;

ψ – кут обхвату леза, рад.;

τ – кут ковзання, рад.

У прийнятій розрахунковій схемі τ вважається сталою величиною.

Відповідно до схеми, наведеної на рис. 3.3:

$$r_k - r_0 = h_3 = \frac{1}{2} r_0 (e^{\psi ctg\,\tau} - 1). \tag{3.13}$$

Тоді довжину різальної кромки зуба визначають за залежністю [86]:

$$c = \frac{r_0}{2\sin\tau} \int_0^{\psi} \sqrt{\sin^2\tau + 2\cdot\sin\tau\cdot e^{\psi ctg\,\psi} + e^{2\psi ctg\,\tau}} \cdot d\psi = \frac{1}{2} r_0 \left(\psi + \frac{e^{\psi ctg\,\tau}}{\cos\tau} \right). \tag{3.14}$$

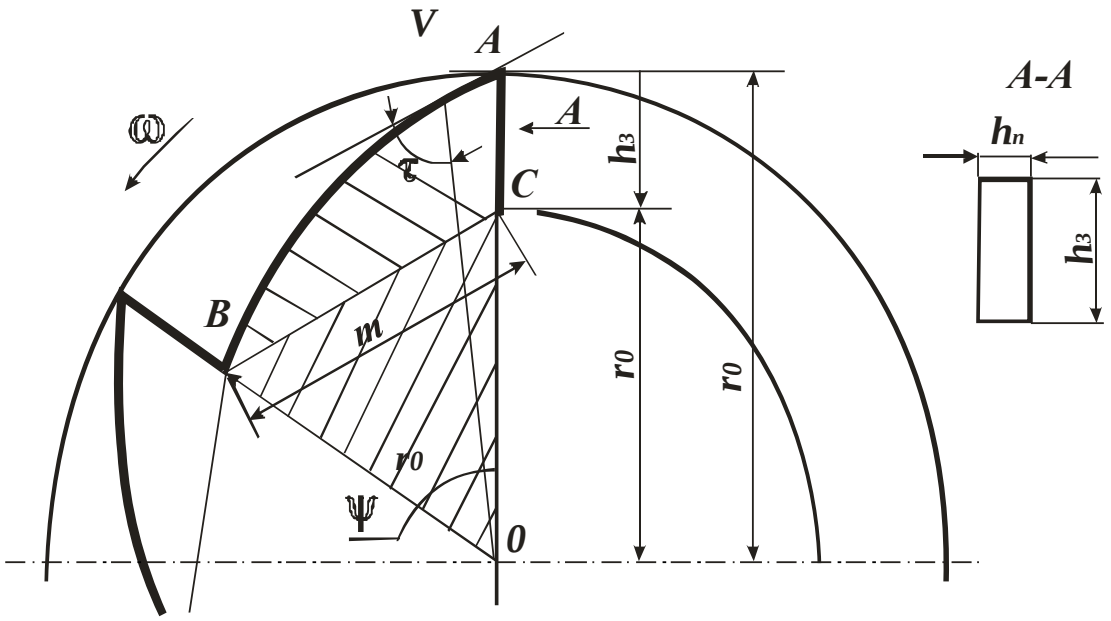


Рис. 3.3. Схема для оцінювання металоємності зубчастого диска з ґрунтозачепами, різальна кромка яких виконана за логарифмічною кривою.

Площу диска із зубчастою різальною крайкою визначаємо за формулою:

$$S_{заг.} = (S_{зуба} + S_n) \cdot Z \tag{3.15}$$

де S_n – площа ґрунтозачепа, м2;

$S_{зуба}$ – площа зуба, обмежена радіусами r0 у западинах, м2;

Z – кількість зубів, шт.

Площу одного зуба знаходимо так:

$$S_{зуба} = S_{OAB}, \tag{3.16}$$

$$S_{OAB} = \frac{S_{заг.}}{Z}, \tag{3.17}$$

Узагальнений запис має вигляд:

$$S_{OAB} = \frac{1}{2}\int_{\psi 1}^{\psi 2} r_0^2 d\psi; \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned} S_{OAB} &= \frac{1}{2}\int_0^{\psi} (\frac{1}{2}r_0 + \frac{1}{2}r_0 \cdot e^{\psi ctg\,\tau})^2 d\psi = \\ &= \frac{1}{2}\int_0^{\psi} \frac{1}{4}r_0^2 (1 + e^{\psi ctg\,\tau})^2 d\psi = \frac{r_0^2}{4}\left(\psi + \frac{2e^{\psi ctg\,\tau}}{ctg\,\tau} + \frac{e^{2\psi ctg\,\tau}}{2ctg\,\tau} + \frac{5}{2ctg\,\tau}\right), \end{aligned} \tag{3.19}$$

Площу ґрунтозачепа приймаємо як площу прямокутника:

$$S_n = h_з \cdot k_n \tag{3.20}$$

де $k_п$ – ширина ґрунтозачепа, м.

Після підстановки одержуємо вираз для площі зубчастого диска з ґрунтозачепами прямокутної форми:

$$S_{заг.} = 10 \cdot \left(\frac{r_0^2}{8} \left(\psi + \frac{2 e^{\psi ctg\tau}}{ctg\tau} + \frac{e^{2\psi ctg\tau}}{2ctg\tau} + \frac{5}{2ctg\tau} \right) + h_з \cdot k_n \right), \tag{3.21}$$

$$\begin{aligned} S_{заг.} &= \frac{5}{4} r_0^2 \left(\psi + 2 \cdot e^{\psi ctg\tau} \cdot tg\tau + \frac{1}{2} e^{\psi ctg\tau} \cdot tg\tau + \frac{5}{2} tg\tau \right) + \\ &+ 5 r_0 \left(e^{\psi ctg\tau} - l \right) \cdot k_n = \\ &= \frac{5}{4} r_0^2 \left(\psi + 2 \cdot tg\tau \cdot e^{\psi ctg\tau} + \frac{1}{2} \cdot tg\tau \cdot e^{2\psi ctg\tau} + \frac{5}{2} tg\tau \right) + \\ &+ 5 r_0 \left(e^{\psi ctg\tau} - l \right) \cdot k_n . \end{aligned} \tag{3.22}$$

Сили опору ґрунту, що діють на зубчастий диск із ґрунтозачепами, розглянемо за розрахунковою схемою, поданою на рис. 3.4.

Після математичних перетворень вираз для тягового опору диска з логарифмічною зубчастою різальною кромкою та ґрунтозачепами без урахування сил тертя набуває вигляду:

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{Q_{г.ч.} \left(b_д \cdot H + \sum_{i=Z'} S_n \cdot \cos\beta_i \right)}{\frac{2 \cdot Z \cdot b_д \cdot r_0}{2 \cdot 2\pi} \left(\psi + \frac{2k_n}{r_0} - 1 + e^{\psi ctg\tau} \left[1 + \frac{1}{\cos\tau} \right] \right) \cdot \left(\pi - 2\arcsin\frac{r_д - H}{r_д} \right) + \sum_{i=Z'} S_n \cdot \sin\beta_i} = \\ &= \frac{Q_{г.ч.} \left(b_д \cdot H + \sum_{i=Z'} S_n \cdot \cos\beta_i \right)}{Z \cdot b_д \cdot r_0 \left(\psi + \frac{2k_n}{r_0} - 1 + e^{\psi ctg\tau} \left[1 + \frac{1}{\cos\tau} \right] \right) \cdot \left(\pi - 2\arcsin\left[1 - \frac{2PH}{r_0 \left(1 + e^{\psi ctg\tau} \right)} \right] \right) + \sum_{i=Z'} S_n \cdot \sin\beta_i} . \end{aligned} \tag{3.23}$$

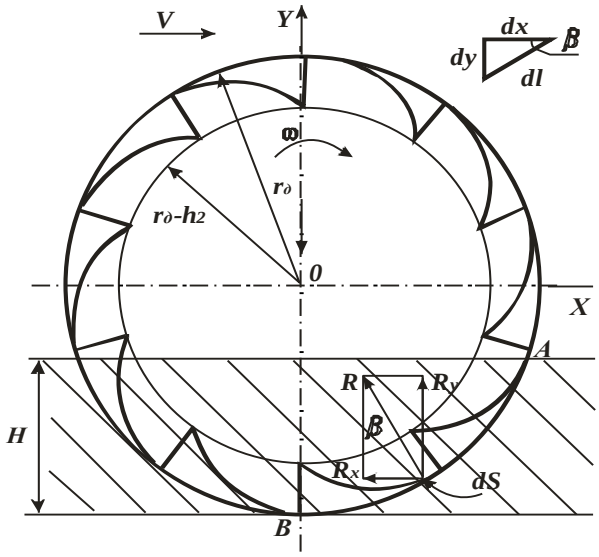


Рис. 3.4 . Схема для визначення тягового опору диска з ґрунтозачепами, зуби якого мають різальну поверхню, виконану за логарифмічною кривою

За результатами розрахунків виконано порівняння кількох варіантів дискових елементів підкопувального органа: диска із зубами за логарифмічною кривою; диска з ґрунтозачепами прямокутної форми; диска з ґрунтозачепами у вигляді прямокутної трапеції; диска з ґрунтозачепами у вигляді прямокутного трикутника (табл. 3.2).

Далі проаналізуємо взаємодію робочої кромки ґрунтозачепа з рослинними рештками і бадиллям. Спочатку розглянемо ґрунтозачеп у формі прямокутної трапеції та скористаємося схемою на рис. 3.5.

Таблиця 3.2. – Порівняння дисків з ґрунтозачепами різної геометричної форми

Порівняльні показники	Зубчастий диск без грунтозачепа	Зубчастий диск з грунтозачепами		
		Прямокутна форма	Прямокутна трапеція	Прямокутний трикутник
1. Збільшення металлоємкості,%	0,0	3,4	3,3	1,7
2. Збільшення тягового опору,%	0,0	14,5	11,2	8,7

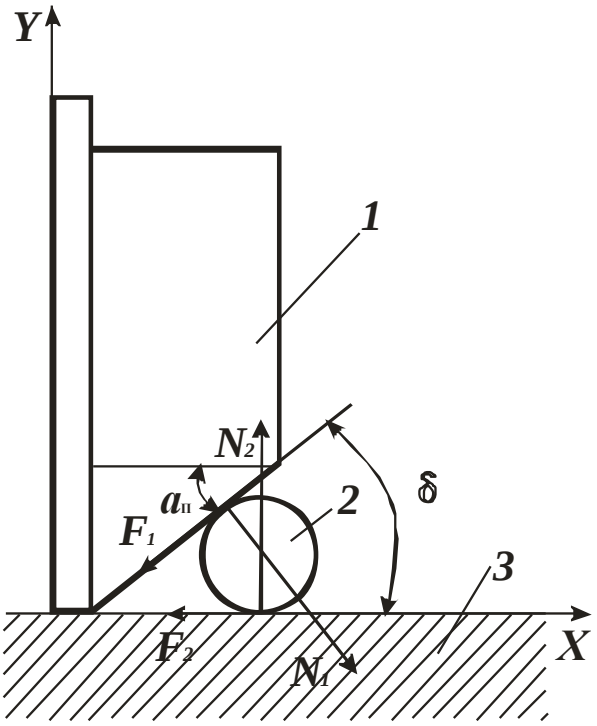


Рис. 3.5. Схема дії робочої кромки ґрунтозачепа на елемент рослини: 1 – ґрунтозачеп диска; 2 – елемент рослини; 3 – поверхня поля.

На елемент рослини діють нормальні реакції N_1 і N_2 відповідно з боку робочої кромки та поверхні ґрунту. Якщо стебло виштовхується із зони між кромкою і ґрунтом, на нього діють сили тертя F1 і F2, значення яких визначають за виразами [89]:

$$F_1 = N_1 \cdot tg\varphi_1, \tag{3.24}$$

$$F_2 = N_2 \cdot tg\varphi_2, \tag{3.25}$$

де tgφ1 і tgφ2 – коефіцієнти тертя елемента рослини відповідно по сталі та по ґрунту.

Щоб рослинні рештки утримувалися у зазначеній зоні, сила F2 має бути не меншою за суму проекцій сил, що діють на стебло вздовж осі OY. Тому повинна виконуватися умова:

$$F_2 \geq N_1 \cdot \sin\delta - F_1 \cdot \cos\delta, H\,. \tag{3.26}$$

У такому разі умова защемлення рослинного елемента робочою кромкою ґрунтозачепа записується так [7]:

$$a_n \le \varphi_1 + \varphi_2. \quad (3.27)$$

Оскільки кути φ1 і φ2 відомі, кут нахилу робочої кромки ґрунтозачепа, який забезпечує перерізання рослинних решток і бадилля, має бути не більшим за 63° [2], тобто:

$$a_n \le 27^o + 36^o = 63^o \quad (3.28)$$

З аналізу виразу (3.28) випливає, що ґрунтозачеп у формі прямокутної трапеції є найбільш доцільним для перерізання рослинних решток. Трикутний ґрунтозачеп для виконання умови защемлення повинен мати ширину не менше 50 мм, що збільшує металоємність і тяговий опір. Прямокутний ґрунтозачеп працює переважно в режимі різання без ковзання (δ = 0), а такий спосіб потребує більших енерговитрат, ніж різання з ковзанням [47].

3.5. Обґрунтування режимів роботи пасивних дискових елементів підкопувального органа

Раціональна робота пасивних дискових елементів забезпечується правильним вибором співвідношення між поступальною швидкістю агрегату і частотою обертання дисків [1, 6]. Ці параметри визначають крутний момент на диску та величину його тягового опору.

Силову взаємодію ґрунту з диском без урахування тертя було розглянуто вище. Для уточненого розрахунку визначимо крутний момент і тяговий опір з урахуванням сил тертя [17], окремо аналізуючи поверхню диска та ґрунтозачепи.

Під час поступального руху і обертання диска на кожну точку А його бокової поверхні з боку ґрунту діє сила тертя F1, спрямована протилежно поступальній швидкості, та сила тертя F2, спрямована проти обертального руху. Їх рівнодійна утворює силу F (рис. 3.6).

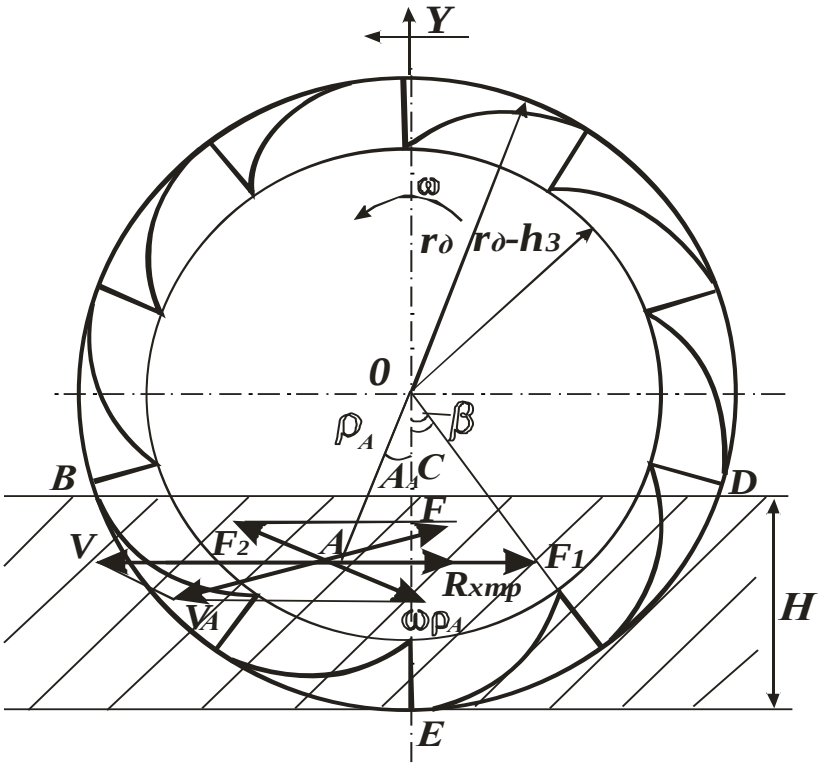


Рис. 3.6. Розрахункова схема сил, що діють на диск у пасивному режимі

Елементарний момент сил тертя в нескінченно малому елементі площі точки А диска визначається так:

$$dM_{дис} = 2 \cdot p \cdot f_{тр} \cdot p_A^2 \cdot dp_A \cdot da_A \frac{V \cdot \cos a_A - \omega \cdot p_A}{\sqrt{\omega \cdot p_A (\omega \cdot p_A \cdot V \cdot \cos a_A) + V^2}}. \quad (4.29)$$

Момент, який створюється ґрунтозачепами, обчислюємо за формулою

$$M_{грт} = \left(r_д \frac{h_n}{2} \right) \cdot N_c \cdot \sum_{i=Z} S_n, \quad (3.29)$$

де $\sum_{i=Z} S_n$ – сумарна площа грунтозачепа, м^2;

$r_д - \frac{h_n}{2}$ – плече дії сили, м;

N_c – питома сила опору, або твердість ґрунту, Н/м^2.

Склавши момент від ґрунтозачепів і момент від самого диска, отримуємо загальний крутний момент:

$$M_{заг} = M_{дис} + M_{грч} = 2 \cdot p \cdot \cdot f_{mp} \int_{a=0}^{\arccos\frac{r-H}{p}} \int_{p=r-H}^{p=r-h/2} \frac{(V \cdot \cos a - \omega \cdot p) \cdot p^2 \cdot dp \cdot da}{\sqrt{\omega \cdot p(\omega \cdot p - 2V \cdot \cos a) + V^2}} + + \left(r_д - \frac{h_n}{2}\right) \cdot N_c \cdot \sum_{i=Z'} S_n. \quad (3.30)$$

Результати інтегрування виразів за умов ρ = 2,3 Н/см2, f = 0,5, Н = 0,2 м, V = 1 м/с наведено на рис. 3.7.

Залежність на рис. 3.7 показує, що в інтервалі кутових швидкостей 0–2,8 рад/с (за λ = 1) крутний момент диска з ґрунтозачепами залишається достатньо великим і менш чутливим до зміни стану ґрунту та частоти обертання. Це сприяє обертанню диска з меншим буксуванням, повнішому перерізанню бадилля гострими кромками зубів і ґрунтозачепів, стабілізації роботи сепарувальних органів, зменшенню втрат картоплі та скороченню технологічних простоїв.

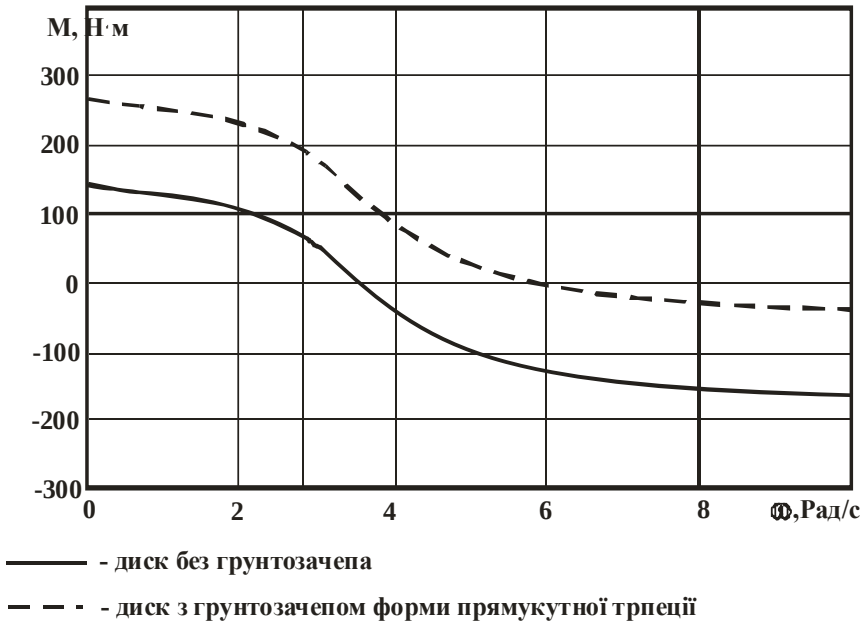


Рис. 3.7. Теоретична залежність крутного моменту зубчастого диска від кутової швидкості при твердості ґрунту в зоні ґрунтозачепа 10 Н/см^2

Тяговий опір диска з ґрунтозачепами доцільно подати як суму двох складових: опору самого зубчастого диска та опору, що створюється ґрунтозачепами.

Опір, зумовлений тертям на боковій поверхні диска, визначаємо за схемою рис. 3.6. Елементарна величина тягового опору від сил тертя dRx.тр дорівнює:

$$dR_{x.mp.} = 2 \cdot p \cdot f_{mp} \cdot p_A \cdot da_A \cdot dp_A \cdot \frac{V - \omega \cdot p_A \cdot \cos a}{\sqrt{V\left(V - 2 \cdot \omega \cdot p_A \cdot \cos a\right) + \omega^2 \cdot p^2}}, \qquad (3.31)$$

Тяговий опір, який виникає внаслідок тертя на поверхні ґрунтозачепів, визначаємо за схемою на рис. 3.8.

Після перетворень загальний вираз для тягового опору записується у вигляді:

$$R_{x.заг} = R_{x.mp} + R_{ч.грч.} = 2 \cdot p \cdot f_{mp} \int_{a=0}^{\arccos \frac{r-h}{p}} \int_{p=r-H}^{p=r\,h/2} \frac{\left(V - \omega \cdot p \cdot \cos a\right) \cdot p \cdot dp \cdot da}{\sqrt{\omega^2 \cdot p^2 + V\left(V - 2\omega \cdot p \cdot \cos a\right)}} + \qquad (3.32)$$

$$+ N_c \cdot f_{mp} \sum_{i=Z'} S_n \cdot \sin \beta_i.$$

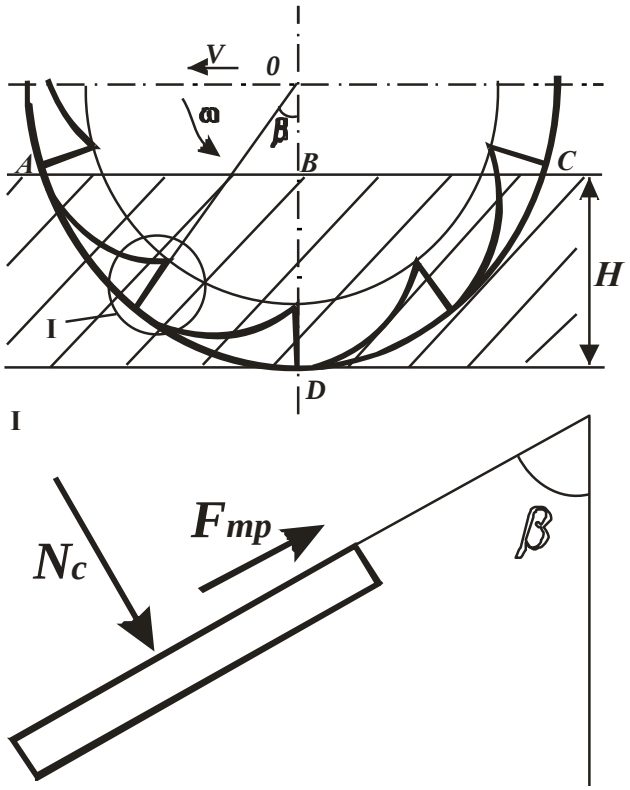


Рис. 3.8. Схема для визначення моменту і тягового опору, створених силою тертя на поверхні ґрунтозачепів.

Результати інтегрування виразу (3.32) на ЕОМ за умов p = 2,3 Н/см2, f = 0,5, Н = 0,2 м наведено на рис. 3.9.

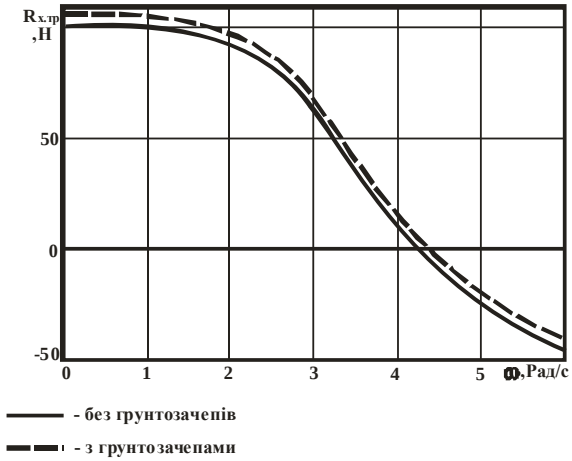


Рис. 3.9. Теоретична залежність тягового опору, спричиненого силами тертя на поверхні зубчастого диска.

3.6. Розрахунок сепарувального елеватора картоплекопача

Сепарувальний елеватор пруткового типу (рис. 3.10) призначений для руйнування підкопаного пласта і відокремлення ґрунту від бульб. До його складу входять ведучі та ведені зірочки, підтримувальні ролики, а також полотно зі сталевих прутків, закріплених на штампованих ланках.

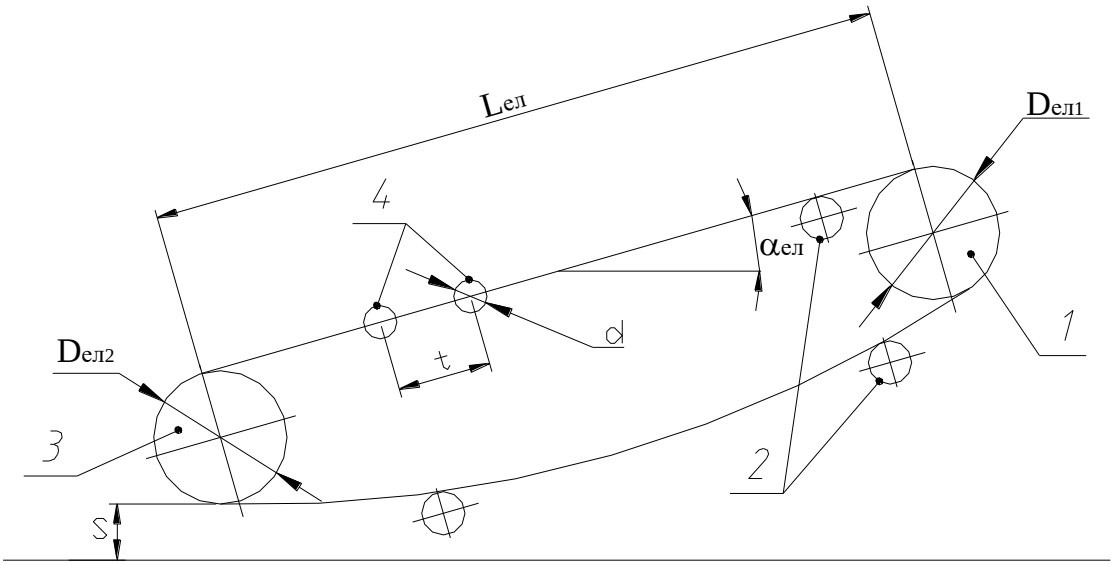


Рис. 3.10. Схема розрахунку пруткового транспортера картоплекопача: 1 – ведуча зірочка; 2 – підтримувальні ролики; 3 – ведена зірочка; 4 – пруток.

Розрахунок виконуємо для двох елеваторів: основного і каскадного. Просвіт між прутками t та їх діаметр d обираємо з умови обмеження втрат бульб не більше 3 % без урахування бульб діаметром менше 25 мм. Приймаємо t = 5…15 см, d = 10…15 см. Для зменшення травмування картоплі доцільно застосувати прогумовані прутки.

Ширину полотна транспортерів визначають за формулою [13]:

$$B_{ЕЛ} = n \cdot B_M , \tag{3.33}$$

де n - кількість рядків, що збирається копачем, $n = 1$.

Тоді,

$$B_{ЕЛ} = 1 \cdot 0{,}7 = 0{,}7 \text{ м}.$$

Швидкість руху полотна визначають за залежністю:

$$V_{ЕЛ} = (1{,}1...2{,}0) \cdot V_M \cdot K_П , \tag{3.34}$$

де V_M – швидкість машини: для легких ґрунтів V_M =1,5...2м/с; для важких ґрунтів V_M =0,5...0,7м/с [26];

КП – коефіцієнт попереднього руйнування гряди опорним котком, КП = 1,2.

Отже,

$$V_{ЕЛ} = (1{,}1...2{,}0) \cdot (0{,}5...1{,}2) \cdot 1{,}2 = 0{,}66...2{,}88 \text{ м/с}.$$

Через широкий діапазон необхідних швидкостей полотна на машині доцільно застосувати гідропривід, який забезпечує плавне регулювання робочого режиму.

Швидкість першого елеватора приймається більшою за швидкість другого, оскільки саме на першому елеваторі відбувається інтенсивніше руйнування і сепарація бульбоносного шару.

Отже,

$$V_{ЕЛ1} = 1{,}2 V_{ЕЛ2} ; \tag{3.35}$$

Довжину основного елеватора задаємо конструктивно, приймаючи її більшою за довжину каскадного [13]:

$$L_{ЕЛ} = (30...50) \cdot t ; \tag{3.36}$$

де t – крок ланцюга, $t = 0{,}038...0{,}041$м.

Тоді,

$$L_{ЕЛ} = (30...50)(0{,}038...0{,}041) = 1{,}14...2{,}05\text{м}.$$

Кут нахилу основного елеватора для переміщення вороху визначають за формулою [13]:

$$tg\alpha_{ЕЛ1} < f\,, \tag{3.37}$$

де f – коефіцієнт тертя ґрунту по металу, f =0,4.

Отже, приймаємо для основного елеватора $\alpha_{ЕЛ1} < 20^0$.

Для каскадного елеватора кут нахилу розраховують за залежністю:

$$tg\alpha_{ЕЛ2} < tg\psi\,, \tag{3.38}$$

де ψ – кут тертя скочування бульб і грудок по поверхні елеватора, ψ=10…15^0 [6];

Тоді, $\alpha_{ЕЛ2}$<10…15^0.

3.7 Завантаження сепарувальних робочих органів картоплекопача

Одним із головних чинників, що визначає якість розділення картопляного вороху, є завантаження сепарувальних органів. Типовий склад вороху, що надходить у машину, становить: ґрунт – 97...98 %, бульби – 1...2 %, бадилля та інші рослинні домішки – 0,5...2,5 %. За такого співвідношення густину вороху можна прийняти близькою до густини ґрунту, тому середнє завантаження Qc, кг/с, визначають за формулою [17]:

$$Q_c = S_n \vartheta_м \gamma\,, \tag{3.39}$$

де S_n – площа поперечного січення пласта, яка рівна для дворядних машин при заглибленні лемеша на 0,18…0,2м. і гребеневої посадці 0,1…0,15м^2, при гладкій посадці – 0,17…0,22м^2;

$\vartheta_м$ – швидкість машини, рівна при роботі на легких ґрунтах 1,2…1,5 м/с, на важких – 0,5…0,7 м/с;

γ – густина ґрунту, яка рівна 1200…1700 кг/м^3.

Надходження бульб Qк, кг/с, на сепарувальні робочі органи визначається за формулою [17]:

$$Q_к = 0{,}001ibm_к\vartheta_м, \tag{3.40}$$

де i – кількість рядків які збираються;

b – ширина міжрядь, м;

$m_к$ – врожайність бульб, т/га.

Найраціональнішим є такий режим завантаження, за якого просівання ґрунту завершується наприкінці сепарувальних органів. Досягти цього та забезпечити високу якість сепарації можна завдяки безперервному автоматичному регулюванню швидкості агрегату і режимів роботи сепарувальних робочих органів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто комплекс питань, пов’язаних із підвищенням ефективності механізованого виробництва картоплі в умовах Полісся Житомирської області. Встановлено, що картопля є важливою продовольчою культурою, а її вирощування потребує застосування раціонально підібраного комплексу машин, дотримання агротехнічних строків, якісного догляду за посівами та ефективного механізованого збирання. Особливо важливим етапом технології є збирання врожаю, оскільки саме під час цієї операції виникають значні втрати, механічні пошкодження бульб і зниження їх товарної якості.

У першому розділі було проаналізовано існуючі технології вирощування картоплі в Україні та світі, визначено основні тенденції розвитку галузі, динаміку посівних площ, рівень механізації виробничих процесів і можливості впровадження сучасних цифрових технологій. Встановлено, що ефективність вирощування картоплі значною мірою залежить від якості підготовки ґрунту, правильного вибору садивного матеріалу, системи удобрення, захисту рослин, догляду за міжряддями та своєчасного збирання. Перспективним напрямом розвитку технологій є використання систем точного землеробства, БПЛА зі штучним інтелектом для моніторингу стану посівів, роботизованих агрегатів для боротьби з бур’янами та автоматизованого контролю виконання технологічних операцій.

У другому розділі розроблено технологію вирощування картоплі на площі 50 га для умов Полісся Житомирської області. Для виконання основних технологічних операцій підібрано сучасну високопродуктивну техніку, яка забезпечує якісний основний і передпосівний обробіток ґрунту, внесення добрив, садіння картоплі, догляд за посівами, захист рослин і збирання врожаю. Складено технологічну карту вирощування картоплі та графік завантаження машинно-тракторного парку, що дає змогу раціонально організувати роботу техніки, зменшити простої агрегатів і забезпечити виконання польових робіт у

встановлені строки. У технології передбачено використання БПЛА зі штучним інтелектом для виявлення проблемних ділянок поля, оцінки стану рослин, контролю забур'яненості та прогнозування потреби в агротехнічних заходах. Для механізованої боротьби з бур'янами запропоновано застосування роботизованого агрегату, що дозволяє зменшити потребу в ручній праці та частково скоротити хімічне навантаження на агроценоз.

У конструктивній частині роботи обґрунтовано модернізацію картоплезбиральної машини, спрямовану на покращення процесу підкопування, зменшення надходження зайвої маси ґрунту на сепаруючі робочі органи та зниження пошкодження бульб. Запропоноване вдосконалення робочих органів дає змогу забезпечити більш рівномірне руйнування бульбоносного шару, поліпшити сепарацію картопляного вороху та підвищити технологічну надійність машини. Використання модернізованої збиральної машини в загальному комплексі техніки дозволяє зменшити втрати врожаю, підвищити якість зібраної продукції та покращити умови її подальшого зберігання.

У результаті виконаної роботи визначено основні напрями вдосконалення технології вирощування картоплі: впровадження сучасних енергоощадних машин, використання цифрового моніторингу посівів, застосування роботизованих засобів догляду за рослинами, оптимізація графіка завантаження техніки та модернізація збиральних машин. Запропоновані рішення мають практичне значення для сільськогосподарських підприємств, які спеціалізуються на вирощуванні картоплі, оскільки вони сприяють підвищенню продуктивності праці, зменшенню експлуатаційних витрат, скороченню втрат урожаю та покращенню якості товарної картоплі. Отже, мету кваліфікаційної роботи досягнуто, а розроблений комплекс технологічних і конструктивних рішень може бути використаний для підвищення ефективності механізованого виробництва картоплі в умовах Полісся.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Чинний від 2016-07-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.

2. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. Р. Сільськогосподарські машини : підручник. 2-ге вид. Київ : Каравела, 2008. 552 с.

3. Кобець А. С., Деркач О. Д., Ролдугін М. І., Яцук В. М., Кухаренко П. М., Пугач А. М. Механізація вирощування сільськогосподарських культур в Україні : навч. посіб. Дніпропетровськ : Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет, 2014. 285 с.

4. Заєць М. Л. Розрахунок транспортуючих пристроїв картоплезбиральних машин. Наукові читання–2021: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. Житомир: Поліський національний університет, 2021. С. 39-42.

5. Сільськогосподарські машини : навч. посіб. / уклад. О. О. Горбенко, В. А. Грубань, В. В. Доценко. Полтава : ПДАУ, 2017. 186 с.

6. Машини для збирання коренебульбоплодів : методичні матеріали до вивчення теми. Луцьк : ЛТК ЛНТУ, 2020. 24 с.

7. Технологія вирощування картоплі // Інститут картоплярства НААН України. URL: https://www.ikar.org.ua/pro-kartoplyu/технологія-вирощування-картоплі (дата звернення: 5.06.2026).

8. Інститут картоплярства НААН України : офіційний сайт. URL: https://www.ikar.org.ua/ (дата звернення: 5.06.2026).

9. Журнал «Картоплярство України» // Інститут картоплярства НААН України. URL: https://www.ikar.org.ua/zhurnal-kartoplyarstvo-ukrayini (дата звернення: 5.06.2026).

10. Державна служба статистики України : офіційний сайт. URL: https://stat.gov.ua/ (дата звернення: 5.06.2026).

11. Сільське господарство України, 2022 : статистичний збірник / Державна служба статистики України. Київ, 2023. 162 с. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/ (дата звернення: 5.06.2026).

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

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Барановський В. М. Концептуальні основи розробки адаптованих транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин : монографія. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. 320 с.

19. Толмачова А. В. Оцінка сучасного стану вирощування картоплі в Україні // Актуальні проблеми розвитку аграрного сектору. Одеса, 2024. С. 119–122. URL: https://dspace.onu.edu.ua/bitstreams/6b9121a4-8439-4dd5-a2b9-d60afb109d67/download (дата звернення: 5.06.2026).

20. FAOSTAT. Crops and livestock products: potatoes // Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (accessed: 5.06.2026).

21. FAO. World Food and Agriculture. Statistical Yearbook 2023. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023. URL: https://www.fao.org/ (accessed: 5.06.2026).

22. International Potato Center. Potato facts and research information // CIP. URL: https://cipotato.org/ (accessed: 5.06.2026).

23. Potato Production // Our World in Data. URL: https://ourworldindata.org/grapher/potato-production (accessed: 25.06.2026).

24. GRIMME GL 420. Mounted 4-row potato planter // GRIMME Products. URL: https://products.grimme.com/en/p/gl-420 (accessed: 25.06.2026).

25. GRIMME EVO 280. Offset trailed potato harvester // GRIMME Products. URL: https://products.grimme.com/en/p/evo-280-gen-ii (accessed: 25.06.2026).

26. AVR Spirit 6200. 2-row trailed bunker harvester // AVR. URL: https://www.avr.be/en/node/36 (accessed: 25.06.2026).

27. John Deere 6R Utility Tractors // John Deere. URL: https://www.deere.com/en/tractors/utility-tractors/6-family-utility-tractors/6r-series-overview/ (accessed: 5.06.2026).

28. AMAZONE Catros compact disc harrows // AMAZONE. URL: https://amazone.net/en/products-digital-solutions/agricultural-technology/cultivation/compact-disc-harrows (accessed: 5.06.2026).

29. DJI Mavic 3 Multispectral Edition. See More, Work Smarter // DJI Agriculture. URL: https://ag.dji.com/mavic-3-m (accessed: 5.06.2026).

30. FarmDroid FD20. Autonomous Farming Robot for Precision Agriculture // FarmDroid. URL: https://farmdroid.com/products/farmdroid-fd20/ (accessed: 5.06.2026).

31. Cunha N., Barros T., Reis M., Marta T., Premebida C., Nunes U. J. Multispectral Image Segmentation in Agriculture: A Comprehensive Study on Fusion Approaches. 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2308.00159 (accessed: 5.06.2026).

32. Patel D., Gandhi M., Shankaranarayanan H., Darji A. D. Design of an Autonomous Agriculture Robot for Real Time Weed Detection using CNN. 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2211.12077 (accessed: 5.06.2026).

33. Ummadi V., Gundlapalle A., Shaik A., Rafi B. S. M. Autonomous Agriculture Robot for Smart Farming. 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2208.01708 (accessed: 5.06.2026).