

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

технічної механіки та сільськогосподарських машин

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Підвищення ефективності технологічної операції збирання картоплі
при удосконаленні картоплекопача

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МГс

спеціальності

208 Агроінженерія

(шифр і назва спеціальності)

Білик М.Б.,

Савіцький А.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Сташків М.Я.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет _____ інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра _____ технічної механіки та сільськогосподарських машин
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня _____ **бакалавр**
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю _____ **208 Агроінженерія**
(шифр і назва спеціальності)

студенту _____ **Білику Максиму Богдановичу**
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ **Підвищення ефективності технологічної операції збирання картоплі при удосконаленні картоплекопача**

Керівник роботи _____ **Бабій Андрій Васильович, д.т.н., професор**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «22» 01 2026 року № 4/9-56

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22.06.2026

3. Вихідні дані до роботи: _____

Опір ґрунту: $k = 2 \cdot 10^{-2}$ МПа – легкі; $k = 4,9 \cdot 10^{-2}$ МПа – середні; $k = 7,84 \cdot 10^{-2}$ МПа – важкі;

максимальна глибина підкопування, $h = 25$ см; загальна кількість пальців ротора, $z = 32$.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз технологій збирання картоплі.

2. Рекомендації з покращення технології збирання картоплі

3. Проектна частина.

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Загальні висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Мета і завдання дослідження. Картоплекопач роторного типу КТН-1.6 (базова конструкція).

Кінематична схема приводу. Розрахункові моделі. Загальні висновки.

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет _____ інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра _____ технічної механіки та сільськогосподарських машин
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Бабій А.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня _____ **бакалавр**
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю _____ **208 Агроінженерія**
(шифр і назва спеціальності)

студенту _____ **Савіцькому Анатолію Степановичу**
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ **Підвищення ефективності технологічної операції збирання картоплі при удосконаленні картоплекопача**

Керівник роботи _____ **Бабій Андрій Васильович, д.т.н., професор**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «22» 01 2026 року № 4/9-56

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22.06.2026

3. Вихідні дані до роботи: _____

маса бульб та ґрунту, що відкидається в кг за одну секунду: 45,02 – легкі ґрунти; 54,82 –

середні; 61,82 – важкі; колова швидкість ротора, 4,23 м/с.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз технологій збирання картоплі.

2. Рекомендації з покращення технології збирання картоплі

3. Проектна частина.

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Загальні висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Мета і завдання дослідження. Конструктивно-компоновочна схема.

Деталювання. Функціональна схема машини. Результати розрахунків. Загальні висновки.

Реферат

Кваліфікаційна робота присвячена актуальному завданню підвищення ефективності технологічної операції збирання картоплі шляхом удосконалення конструкції картоплекопача. У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу України підвищення продуктивності та зниження втрат при збиранні сільськогосподарських культур є одним із ключових завдань інженерної науки та практики. Особливо це стосується картоплі як стратегічної культури, яка відіграє важливу роль у забезпеченні продовольчої безпеки держави.

Збирання картоплі є одним із найбільш трудомістких і технологічно складних процесів, у якому формуються кінцеві кількісні та якісні показники врожаю. Значні втрати бульб, що можуть досягати 10–20% і більше, а також їх механічні пошкодження суттєво знижують економічну ефективність виробництва. Основними причинами цих втрат є недосконалість наявних конструкцій картоплекопачів, несприятливі ґрунтово-кліматичні умови та недостатня адаптивність машин до змінних умов експлуатації.

Метою роботи є підвищення ефективності технологічного процесу збирання картоплі шляхом обґрунтування та удосконалення конструктивних параметрів картоплекопача, зокрема його робочих органів. Для досягнення поставленої мети було вирішено комплекс завдань: проведено аналіз сучасних технологій і технічних засобів збирання картоплі, досліджено фізико-механічні властивості ґрунту та бульб як об'єктів взаємодії, виконано теоретичне обґрунтування процесу підкопування бульбоносного пласта, а також розроблено конструктивні рішення щодо вдосконалення картоплекопача.

У роботі встановлено, що ефективність процесу збирання значною мірою залежить від способу виконання технологічних операцій. У сучасній практиці використовуються три основні способи збирання картоплі: з ручним підбором після копачів, напівмеханізований спосіб із перебірними столами та повністю механізований – із застосуванням картоплезбиральних комбайнів. Найбільш перспективним є повністю механізований спосіб, однак його ефективність

значною мірою визначається конструкцією робочих органів машин і якістю процесу сепарації.

Проведений аналіз показав, що існуючі картоплекопачі (простого, роторного та просівного типів) мають ряд недоліків, серед яких значні енергетичні витрати, недостатня якість очищення бульб від ґрунту та високий рівень їх травмування. Особливо складною є операція сепарації вороху, яка ускладнюється подібністю фізико-механічних характеристик бульб і ґрунтових агрегатів.

Важливу роль у процесі підкопування відіграють властивості ґрунту, зокрема його гранулометричний склад, вологість, щільність, структура та параметри внутрішнього тертя. Залежно від цих характеристик змінюється опір підкопуванню, характер руйнування пласта та енергетичні витрати процесу. Оптимальні умови досягаються при такій вологості ґрунту, за якої він має пластичні властивості, що забезпечує ефективне відокремлення бульб із мінімальними пошкодженнями.

Окрім властивостей ґрунту, на ефективність технологічного процесу суттєво впливають фізико-механічні характеристики картоплі. Бульби мають пружно-пластичні властивості та чутливі до ударних навантажень, що вимагає обмеження швидкостей їх переміщення у робочих органах машини. Зокрема, при швидкостях удару понад 10 м/с спостерігається значне руйнування бульб, тоді як при швидкостях менше 3 м/с пошкодження практично відсутні.

На основі проведених досліджень запропоновано удосконалену конструкцію картоплекопача роторного типу, яка включає коритоподібний леміш оптимальної геометрії, механізм регулювання глибини підкопування та модернізований ротор із пружними пальцями, оснащеними гумовими насадками. Така конструкція забезпечує зниження ударних навантажень на бульби, покращення процесу сепарації та зменшення втрат урожаю.

Результати розрахунків показали, що удосконалення конструкції дозволяє зменшити енергетичні витрати на виконання технологічної операції до 10–12%, а також знизити рівень пошкодження бульб на 10–15%. Крім того, оптимізація

геометричних параметрів робочих органів сприяє підвищенню продуктивності агрегату та стабільності його роботи в різних ґрунтово-кліматичних умовах.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованих конструктивних рішень при розробленні нових і модернізації існуючих картоплекопачів. Це дозволить підвищити ефективність збирання картоплі, зменшити втрати врожаю, покращити якість продукції та знизити експлуатаційні витрати.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність удосконалення конструкції картоплекопача як одного з найбільш ефективних шляхів підвищення техніко-економічних показників процесу збирання картоплі. Запропоновані технічні рішення відповідають сучасним вимогам енергоефективності, ресурсозбереження та екологічної безпеки, що робить їх перспективними для впровадження у виробництво.

Ключові слова: картоплекопач, збирання картоплі, сепарація, підкопування, ротор, леміш, енергоефективність, втрати врожаю, механічні пошкодження.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЗБИРАННЯ КАРТОПЛІ	10
1.1 Картопля як стратегічний продукт у продовольчій безпеці держави	10
1.2 Аналіз технологій збирання картоплі	14
1.3 Огляд технічних засобів для збирання картоплі	19
1.4 Властивості ґрунту як об'єкта взаємодії з робочими органами.....	24
1.5 Картопля. Фізико-технологічні властивості матеріалу культури.....	27
2 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБИРАННЯ КАРТОПЛІ ..	31
2.1 Технічні та агротехнічні вимоги до картоплекопача	31
2.2 Обґрунтування конструкції та функціональної схеми удосконаленої машини	34
2.3 Обґрунтування вибору основних параметрів підкопуючого лемеша	38
3 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	48
3.1 Обґрунтування та розрахунок основних геометричних і кінематичних параметрів ротора картоплекопача	48
3.2 Обґрунтування взаємодії пальців викидного колеса з картопляним ворохом.	51
3.3 Визначення втрат потужності на роботу ротора картоплекопача з нахиленими пальцями.....	60
3.4 Розрахунок енергетичних витрат при виконанні процесу підкопування бульбоносного пласта	66
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	75
4.1 Небезпеки, що виникають при виконанні технологічної операції збирання картоплі картоплекопачами викидного типу.....	75
4.2 Заходи охорони праці при виконанні технологічної операції збирання картоплі картоплекопачами викидного типу.....	79
4.3 Підвищення екологічної безпеки при збиранні картоплі.....	83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	87
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	90

ВСТУП

Сільськогосподарське виробництво є стратегічно важливою галуззю економіки України, що забезпечує продовольчу безпеку держави та формує значну частку її експортного потенціалу. Однією з провідних культур у структурі рослинництва є картопля, яка займає важливе місце як у харчуванні населення, так і у кормовій базі та переробній промисловості. Висока поживна цінність, універсальність використання та значні посівні площі зумовлюють необхідність постійного вдосконалення технологій її вирощування та збирання.

Незважаючи на значний розвиток сільськогосподарської техніки, процес збирання картоплі залишається одним із найбільш складних і відповідальних етапів технологічного циклу. Саме на цій стадії виникають значні втрати врожаю, зумовлені як недосконалістю технічних засобів, так і впливом ґрунтово-кліматичних умов. Втрати можуть досягати 10–20% і більше, що негативно позначається на економічній ефективності виробництва. Крім того, значна частина бульб зазнає механічних пошкоджень, що знижує їх товарну якість, придатність до зберігання та реалізації.

Однією з основних причин зазначених проблем є недостатня ефективність роботи картоплезбиральної техніки, зокрема картоплекопачів. Традиційні конструкції часто не забезпечують повноцінного підкопування гребеня, ефективного відокремлення бульб від ґрунтової маси та рослинних залишків, а також мінімізації травмування продукції. Це зумовлює необхідність проведення наукових досліджень і розроблення нових конструктивних рішень, спрямованих на покращення техніко-експлуатаційних показників машин.

В сучасних умовах розвитку аграрного сектору України особливого значення набуває питання підвищення ефективності технологічних операцій за рахунок удосконалення робочих органів машин. Для картоплекопачів це означає оптимізацію геометричних параметрів підкопувальних ножів, решіт, транспортерів, а також вдосконалення процесів просіювання, сепарації та транспортування бульб. Важливим є забезпечення таких умов роботи, за яких

мінімізується опір ґрунту, підвищується ступінь його руйнування та покращується відділення бульб від ґрунтової маси.

Суттєвим фактором, що впливає на ефективність роботи картоплекопача, є фізико-механічні властивості ґрунту, зокрема його щільність, вологість, структура та зчеплення частинок. Залежно від цих параметрів змінюється характер взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем, що, у свою чергу, впливає на енергетичні витрати та якість виконання операції. Тому удосконалення конструкції машин повинно враховувати адаптацію до різних умов експлуатації.

Окрім цього, важливим аспектом є підвищення продуктивності праці та зниження експлуатаційних витрат. Використання більш ефективних конструкцій картоплекопачів дозволяє зменшити витрати пального, підвищити швидкість виконання операцій і забезпечити стабільну роботу агрегатів. Це особливо актуально в умовах обмежених ресурсів та необхідності підвищення конкурентоспроможності аграрного виробництва.

Удосконалення картоплекопача передбачає поглиблене дослідження існуючих технічних рішень, аналіз їхніх переваг і недоліків, а також розроблення нових конструктивних елементів або модернізацію вже наявних. Значна увага приділяється покращенню процесу сепарації, який є одним із ключових у забезпеченні якості збирання. Підвищення ефективності цього процесу дозволяє зменшити втрати бульб, підвищити ступінь очищення та скоротити кількість домішок у вихідному продукті.

Актуальність даної теми полягає в тому, що підвищення ефективності збирання картоплі має безпосередній вплив на економічні результати діяльності сільськогосподарських підприємств. Зменшення втрат урожаю, покращення якості продукції та зниження витрат на виконання технологічних операцій сприяють підвищенню прибутковості виробництва. Крім того, удосконалення технічних засобів відповідає сучасним тенденціям розвитку аграрної інженерії, що базуються на ресурсозбереженні, енергоефективності та екологічній безпеці.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЗБИРАННЯ КАРТОПЛІ

1.1 Картопля як стратегічний продукт у продовольчій безпеці держави

Картопля є однією з найважливіших сільськогосподарських культур у світі і посідає провідне місце серед продовольчих культур в Україні. Вона має стратегічне значення для забезпечення продовольчої безпеки населення завдяки високій урожайності, значній поживній цінності та універсальності використання.

Біологічна цінність картоплі зумовлена її хімічним складом. Бульби містять у середньому 14–22% крохмалю, до 2–3% білка, а також значну кількість вітамінів (С, В1, В2, В6) і мінеральних речовин (калій, фосфор, магній). Завдяки цьому картопля є важливим продуктом харчування людини, забезпечуючи її енергією та необхідними поживними речовинами. Особливістю білків картоплі є їх висока біологічна повноцінність, оскільки вони містять значну частку незамінних амінокислот.

Крім продовольчого значення, картопля має важливе кормове та технічне використання. У тваринництві її використовують як висококалорійний корм для великої рогатої худоби та свиней. У технічній галузі картопля є сировиною для виробництва крохмалю, спирту, глюкози, декстрину та інших продуктів переробки. Це робить її універсальною культурою, яка має значний економічний потенціал.

В умовах України картопля займає значні посівні площі, а її виробництво характеризується стабільністю та відносною незалежністю від зовнішніх факторів. Завдяки високій адаптивності до різних ґрунтово-кліматичних умов вона вирощується практично на всій території країни. Це додатково підкреслює її роль як стратегічного продукту, особливо в умовах нестабільних економічних або соціальних процесів.

Однак, незважаючи на важливість культури, ефективність її виробництва значною мірою залежить від дотримання технологічних вимог, зокрема правильного живлення рослин, вибору попередників і організації збирання врожаю.

Картопля є культурою з високими вимогами до умов живлення, що зумовлено інтенсивним ростом її вегетативної маси та формуванням значної кількості бульб у відносно короткий період вегетації. Для забезпечення високої врожайності необхідне збалансоване постачання елементів живлення – азоту (N), фосфору (P), калію (K), а також мікроелементів.

Азот є важливим елементом, що стимулює ріст надземної маси рослин. Він сприяє формуванню листкового апарату, який бере участь у процесі фотосинтезу. Однак надлишок азоту може призвести до надмірного розвитку бадилля, затримки утворення бульб і зниження їх якості. Тому внесення азотних добрив має бути чітко нормованим.

Фосфор відіграє ключову роль у розвитку кореневої системи та прискоренні формування бульб. Він сприяє підвищенню стійкості рослин до несприятливих умов і покращує їх енергетичний обмін. Недостатнє забезпечення фосфором призводить до затримки росту та зниження врожайності.

Калій є одним із найважливіших елементів для картоплі. Він впливає на процеси накопичення крохмалю, підвищує стійкість рослин до хвороб і покращує лежкість бульб під час зберігання. Калій також регулює водний режим рослин і зменшує негативний вплив посухи.

Серед мікроелементів важливими є бор, марганець, цинк та мідь, які беруть участь у ферментативних процесах і сприяють нормальному розвитку рослин. Їх нестача може призвести до фізіологічних порушень і зниження врожайності.

Органічні добрива (гній, компост) також відіграють важливу роль у живленні картоплі. Вони покращують структуру ґрунту, підвищують його

вологоємність та забезпечують рослини поживними речовинами протягом тривалого періоду.

Таким чином, ефективне вирощування картоплі можливе лише за умов комплексного підходу до живлення рослин, що включає правильне співвідношення макро- та мікроелементів і врахування властивостей ґрунту.

Важливим фактором отримання високих урожаїв картоплі є правильний вибір попередників у сівозміні. Це пов'язано з тим, що різні культури по-різному впливають на фізичний, хімічний і біологічний стан ґрунту, а також на накопичення шкідників і хвороб.

Найкращими попередниками для картоплі є озимі зернові культури (пшениця, жито), зернобобові (горох, квасоля), а також багаторічні трави. Ці культури сприяють покращенню структури ґрунту, збагачують його органічною речовиною та не накопичують специфічних для картоплі шкідників і збудників хвороб.

Бобові культури особливо цінні як попередники, оскільки вони здатні фіксувати атмосферний азот, що підвищує родючість ґрунту та зменшує потребу у внесенні азотних добрив. Крім того, вони покращують структуру ґрунту і сприяють накопиченню гумусу.

Небажаними попередниками для картоплі є культури, що належать до родини пасльонових (томат, перець, баклажан), оскільки вони мають спільних шкідників і хвороби (наприклад, фітофтороз, колорадський жук). Також небажано вирощувати картоплю на одному і тому ж полі кілька років поспіль, оскільки це призводить до виснаження ґрунту та накопичення патогенів.

Раціональна сівозміна дозволяє не лише підвищити врожайність картоплі, але й покращити загальний стан ґрунтів, зменшити потребу в пестицидах і добривах, а також забезпечити екологічну стабільність агроценозів.

Збирання картоплі є завершальним і одним із найвідповідальніших етапів технологічного процесу її вирощування. Від правильності його проведення значною мірою залежить рівень втрат урожаю, якість продукції та її придатність до тривалого зберігання.

Оптимальний час збирання визначається фізіологічною стиглістю бульб, яка настає після завершення вегетації та відмирання бадилля. У цей період шкірка бульб стає міцною і стійкою до механічних пошкоджень. Передчасне збирання призводить до підвищеної травматизації бульб і втрат під час зберігання, тоді як запізнення може спричинити ураження хворобами або проростання.

Важливим фактором є також стан ґрунту під час збирання. Найкращими умовами є помірна вологість ґрунту, за якої він легко руйнується, а бульби добре відокремлюються. Надмірна вологість призводить до залипання ґрунту та погіршення роботи картоплекопачів, тоді як надто сухий ґрунт ускладнює підкопування і може спричинити пошкодження бульб.

Температурні умови також мають значення. Збирання доцільно проводити при температурі повітря не нижче 5–7°C, оскільки за нижчих температур бульби стають більш крихкими і схильними до механічних пошкоджень.

Важливим аспектом є правильний вибір і налаштування збиральної техніки. Картоплекопачі повинні забезпечувати мінімальні втрати, ефективно відокремлення бульб від ґрунту та рослинних решток, а також мінімізацію їх пошкодження. Для цього необхідно правильно регулювати глибину підкопування, швидкість руху агрегату та параметри робочих органів.

Після збирання важливим є дотримання умов транспортування та зберігання. Бульби необхідно захищати від механічних пошкоджень, перегрівання та впливу сонячного світла, яке спричиняє накопичення соланіну.

Отже, дотримання оптимальних умов збирання є ключовою передумовою збереження якості та кількості врожаю. Удосконалення технології збирання, зокрема шляхом модернізації картоплекопачів, дозволяє значно підвищити ефективність цього процесу та зменшити втрати продукції.

1.2 Аналіз технологій збирання картоплі

Технологічний процес збирання картоплі в сучасному аграрному виробництві є одним із найбільш складних і відповідальних етапів усієї технології вирощування цієї культури. Саме на стадії збирання формуються остаточні кількісні та якісні показники врожаю, а тому ефективність виконання цієї операції безпосередньо впливає на економічні результати господарства, собівартість продукції, рівень втрат бульб та їх придатність до тривалого зберігання. У сучасних умовах до збирання картоплі висуваються високі вимоги щодо продуктивності, мінімізації механічних пошкоджень, зменшення енергетичних витрат, а також адаптації техніки до різних ґрунтово-кліматичних умов. У зв'язку з цим питання удосконалення технологій і машин для збирання картоплі набувають особливої актуальності.

Незалежно від того, які засоби механізації використовуються, процес збирання картоплі включає ряд основних технологічних операцій. До них належать підкопування або викопування бульб, відділення бульб від ґрунту, відрив бульб від бадилля, видалення рослинних решток, каміння та інших домішок, а також завантаження продукції в тару чи транспортні засоби. У деяких випадках до технологічного процесу додаються й допоміжні операції, зокрема попереднє видалення бадилля або сортування бульб на фракції. Кожна з цих операцій має важливе значення, а їх узгоджене виконання визначає загальну ефективність збирання. Особливо складною є операція сепарації, оскільки ворох картоплі містить бульби, ґрунтові грудки, каміння, рослинні залишки та інші домішки, які важко повністю відокремити без втрат і пошкоджень.

Важливою складовою підготовки до збирання є видалення бадилля, особливо в умовах інтенсивного розвитку вегетативної маси. Якщо бадилля не видалити вчасно, воно може забивати робочі органи як простих картоплекопачів, так і картоплезбиральних комбайнів, що призводить до зниження продуктивності, порушення технологічного процесу та збільшення

витрат праці. Саме тому на практиці досить часто застосовують попереднє видалення бадилля механічним або хімічним способом. Такий технологічний прийом не лише полегшує роботу машин, а й покращує умови ручного підбору бульб, якщо використовується напівмеханізована технологія збирання. Крім того, видалення бадилля сприяє більш рівномірному підкопуванню рядків і покращує якість сепарації на подальших етапах.

У практиці сільськогосподарського виробництва нині застосовуються три основні способи збирання картоплі. Перший спосіб полягає у викопуванні бульб картоплекопачами з укладанням їх на поверхню поля та подальшим ручним підбором. Цей спосіб є найпростішим і найменш капіталомістким, однак характеризується високою трудомісткістю та значною залежністю від людського фактора. Він може використовуватися в невеликих господарствах, на присадибних ділянках або в умовах, коли застосування складнішої техніки економічно недоцільне. Водночас у сучасному великотоварному виробництві цей спосіб уже не забезпечує необхідного рівня продуктивності та якості збирання.

Другий спосіб передбачає збирання картоплекопачами з причіпними робочими столами, на яких працівники вручну вибирають бульби та пакують їх у тару. Така технологія є певним компромісом між ручним та повністю механізованим збиранням. Вона дозволяє зменшити навантаження на працівників у порівнянні з чисто ручним способом і одночасно забезпечує більш якісне сортування продукції прямо в полі. Проте й у цьому випадку значна частка операцій виконується вручну, що обмежує продуктивність і не відповідає сучасним вимогам до ефективності аграрного виробництва.

Третій спосіб – збирання картоплі комбайнами – є найбільш прогресивним і широко застосовується у великих господарствах. Саме повна механізація збирання дає можливість виконувати основні технологічні операції без використання ручної праці, істотно знижувати трудові витрати та забезпечувати вищу продуктивність. При цьому в межах комбайнового

збирання розрізняють три основні варіанти: пряме комбайнування, роздільне (двофазне) комбайнове збирання та комбінований спосіб.

Пряме комбайнування передбачає виконання всього комплексу операцій за один прохід машини: підкопування, сепарацію, очищення та завантаження бульб у транспортні засоби. Такий спосіб є найбільш ефективним за сприятливих умов, коли ґрунт має оптимальну вологість, поле відносно чисте від каміння та рослинних решток, а врожайність достатньо висока. Пряме комбайнування дозволяє забезпечити високу продуктивність, зменшити кількість проходів техніки по полю та скоротити терміни збирання. Проте за несприятливих умов, особливо при підвищеній вологості ґрунту або значній засміченості, ефективність цього способу знижується, оскільки робочі органи комбайна можуть перевантажуватися ворохом.

Роздільний, або двофазний, спосіб збирання є більш доцільним у складних ґрунтових умовах, зокрема при підвищеній вологості. У такому випадку картоплекопач спочатку викопує бульби та вкладає їх у валки, які можуть формуватися з двох або чотирьох рядків. У валках бульби підсихають, частково очищуються від ґрунту та проходять стадію світлового загартування, що позитивно впливає на їхню лежкість. Після цього картоплезбиральний комбайн, обладнаний підбирачем, підбирає валки, здійснює доочищення бульб і завантажує їх у транспортні засоби. Такий спосіб дозволяє розвантажити сепараційні механізми машини, підвищити якість очищення врожаю та зменшити ризик забивання робочих органів.

Комбінований спосіб збирання використовують переважно на легких ґрунтах, де він дає змогу суттєво підвищити продуктивність картоплезбиральних комбайнів. Його суть полягає в тому, що картоплекопач-валкоукладач викопує два рядки картоплі, частково відділяє бульби від ґрунту та рослинних решток і вкладає їх у валок між двома сусідніми рядками. Після цього комбайн, що рухається слідом, підкопує незбирані рядки та одночасно підбирає валок, розташований між ними. Таким чином, за один прохід машина обробляє бульби з чотирьох рядків, що значно підвищує її продуктивність.

Водночас варто зазначити, що використання комбінованого способу можливе лише за умови, що комбайн задовільно працює при прямому комбайнуванні, оскільки саме ця передумова забезпечує стабільність і ефективність подальшої роботи.

Найскладнішою технологічною задачею при механізованому збиранні картоплі є розділення вороху. Під ворохом розуміють суміш бульб, ґрунтових грудок, каміння, рослинних решток і бур'янів, яка утворюється після підкопування рядків. Основна складність полягає в тому, що серед домішок найбільш важко видаляються великі грудки ґрунту та каміння, оскільки вони мають подібні до бульб розміри, масу та механічні властивості. Саме тому якість сепарації є одним з найважливіших показників роботи картоплезбиральних машин. Якщо сепарація недостатньо ефективна, у бункер потрапляє значна кількість домішок, що ускладнює подальше зберігання та реалізацію продукції.

У сучасних картоплезбиральних машинах широко використовуються різні способи сепарації, засновані на різниці механічних властивостей компонентів вороху. Одним із найпоширеніших є розділення за геометричними розмірами, коли бульби та домішки відокремлюються за довжиною, шириною та товщиною. Інший спосіб ґрунтується на різниці форми та коефіцієнта опору кочення по робочих органах машини. Також застосовується сепарація з урахуванням властивостей поверхні, тобто різниці коефіцієнтів тертя ковзання. Поєднання цих принципів дає змогу створювати ефективні конструкції сепарувальних органів, здатних якісно очищати бульби від ґрунту та домішок.

Під час вибору способу механізації збирання картоплі необхідно враховувати конкретні умови господарства. Визначальними факторами є тип ґрунту, його вологість у період збирання, розмір і конфігурація полів, наявність каміння, загальна площа посівів, урожайність культури та технічна оснащеність господарства. Так, комбайни найбільш доцільно використовувати на полях із легкими та середніми ґрунтами, довгими гонами та високою врожайністю бульб. У цих умовах забезпечується висока продуктивність роботи машини та

ефективне використання її конструктивних можливостей. Натомість на невеликих ділянках, особливо при перезволожених ґрунтах, більш доцільними є картоплекопачі роторного типу, які краще пристосовані до складних умов і дозволяють отримати задовільні результати за меншої капіталомісткості.

Таким чином, сучасні технології збирання картоплі являють собою гнучку систему організації робіт, яка повинна пристосовуватися до умов конкретного господарства. Їх ефективність визначається не лише рівнем технічного оснащення, а й правильним вибором способу збирання, своєчасною підготовкою поля, якісним видаленням бадилля, а також раціональним використанням машин. У сучасному контексті особливого значення набувають питання підвищення продуктивності машин, зменшення механічних пошкоджень бульб, зниження енергетичних витрат, автоматизації окремих операцій та адаптації техніки до різних ґрунтово-кліматичних умов.

Разом із тим, навіть за високого рівня механізації існуючі технології збирання картоплі мають низку недоліків, пов'язаних із втратами врожаю, нерівномірністю сепарації, пошкодженням бульб, складністю роботи в умовах підвищеної вологості та значними енергетичними витратами. Саме тому подальше вдосконалення картоплекопачів і картоплезбиральних комбайнів залишається актуальним напрямком наукових досліджень та інженерних розробок. Підвищення ефективності технологічного процесу збирання картоплі можливе лише за умови комплексного підходу, який поєднує агротехнічні, конструктивні та організаційні рішення. Це дозволить забезпечити зменшення втрат, підвищення якості зібраної продукції та зростання економічної ефективності виробництва картоплі в сучасних умовах.

1.3 Огляд технічних засобів для збирання картоплі

За характером виконання технологічного процесу картоплезбиральні машини поділяються на кілька основних типів, кожен із яких має свої конструктивні особливості, сферу застосування та показники ефективності (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Найпростіші підкопуючі лапи [5]

До найпростіших машин належать картопляні копачі (рис. 1.1), які виконують лише частину технологічного процесу. Вони підкопують рядки картоплі, руйнують зв'язок кореневої системи з ґрунтом і частково виносять бульби на поверхню поля. При цьому значна частина продукції залишається в ґрунті або потребує ручного доочищення. Основним недоліком таких машин є високі витрати ручної праці: на підбір бульб після роботи копачів затрачається приблизно 190–250 люд.-год/га. Крім того, втрати картоплі в ґрунті можуть досягати 25–30 %, що істотно знижує ефективність застосування даного типу машин.

Більш досконалі є картоплекопачі роторного типу (рис. 1.2), які виконують викопування кущів та розсіювання бульб разом із ґрунтом у бік, перпендикулярний напрямку руху агрегату, на відстань до 3,5 м. Як правило,



Рисунок 1.2 – Картоплекопачі роторного типу Wirax [4]

такі машини є однорядними і навішуються на трактор. Принцип їх роботи полягає в тому, що леміш підрізає шар ґрунту, який при сходженні з нього руйнується, а далі розкидається гребінками ротора, що обертається. Після проходження машини утворюється смуга шириною 1–3 м, на поверхні якої розміщується значна частина викопаних бульб. Для їх збору організовується група працівників чисельністю 13–18 осіб, які розподіляються по ділянках довжиною 15–25 м. Водночас слід зазначити, що трудомісткість ручного підбору після роторних копачів на 20–25 % перевищує аналогічний показник для машин просівного типу.

Картоплекопачі просівного типу (рис. 1.3) забезпечують більш високий рівень механізації процесу збирання. Вони підкопують рядки і подають ґрунтову масу разом із бульбами на сепарувальні робочі органи. Найпоширенішими є дві групи таких органів: пруткові елеватори (копачі ТЕК-

2, КТН-2, КТН-2Б, КТН-2ВМ) та грохоти (копачі КГ-2, КВН-2М). У процесі роботи ґрунт просіюється крізь щілини між прутками, тоді як бульби, грудки ґрунту та бадилля сходять із задньої частини машини на поверхню поля. У важчих умовах експлуатації застосовують конструкції з двома або трьома послідовно встановленими елеваторами (наприклад, КСТ-1,4), а також додаткові сепарувальні пристрої – бітери та решітки. Це дозволяє значно покращити якість очищення бульб і зменшити кількість домішок.



Рисунок 1.3 – Картоплекопач КТН-2ВМ Агропромсельмаш [3]

Певним проміжним варіантом є картоплекопачі з причіпними перебірними столами. У таких машинах відбувається додаткове ручне сортування бульб безпосередньо в процесі збирання. Робітники, що знаходяться на перебірному столі, відбирають бульби, очищають їх від домішок і одразу укладають у тару (мішки або кошики). Порівняно зі звичайними копачами, такі машини забезпечують значно кращі умови праці та знижують фізичне навантаження на працівників. У той же час, у порівнянні з комбайнами, вони

спричиняють менше механічних пошкоджень бульб. Найбільш раціонально використовувати такі машини під час збирання насінневої або ранньої картоплі. За сприятливих умов затрати праці можуть бути зменшені на 20–30 % порівняно з ручним підбором картоплі з поверхні поля.

Подальшим етапом розвитку техніки є картоплекопачі-валкоукладачі (рис. 1.4), які поряд із підкопуванням і сепарацією виконують формування валків. Вони оснащуються спеціальними пристроями для видалення бадилля та поперечними транспортерами, що дозволяють укладати бульби в компактні валки, сформовані з двох, чотирьох або навіть шести рядків. Прикладом такої машини є копач УКВ-2. Використання таких агрегатів дає змогу значно підвищити продуктивність праці під час ручного підбору, а також створює передумови для організації двофазного (роздільного) збирання із застосуванням комбайнів. У випадку ручного підбору затрати праці знижуються на 30–50 % у порівнянні зі звичайними копачами, а при подальшому підборі комбайном – на 40–50 % у порівнянні з прямим комбайнуванням.



Рисунок 1.4 – Копач-валкоутворювач УКВ-2 [1]

Найбільш технічно досконалими є картоплезбиральні комбайни (рис. 1.5), які виконують повний комплекс технологічних операцій: підкопування рядків,

сепарацію ґрунту, відділення бульб від бадилля та інших домішок, а також накопичення врожаю в бункері або його завантаження в транспортні засоби. Навіть при наявності невеликої кількості обслуговуючого персоналу (4–6 осіб), зайнятого на перебірному столі, такі машини дозволяють скоротити витрати праці у 3–4 рази порівняно з ручним підбором після картоплекопачів. Це робить комбайни найбільш ефективним засобом механізації збирання картоплі в сучасних умовах.



Рисунок 1.5 – Картоплезбиральний комбайн Grimme DR 1500 [2]

У зарубіжній практиці, зокрема в США, застосовуються також спеціалізовані машини – підбирачі валків, які призначені виключно для підбору бульб, попередньо сформованих у валки картоплекопачами-валкоукладачами. За конструктивними особливостями вони мало відрізняються від комбайнів, однак мають більш вузьке функціональне призначення і не можуть працювати в режимі прямого комбайнування. У зв'язку з цим більш доцільним є оснащення універсальних картоплезбиральних комбайнів додатковими пристроями для підбору валків.

Аналізуючи існуючі типи машин і технологій збирання картоплі, можна зробити висновок про необхідність раціонального вибору технічних засобів залежно від умов господарства. Обрана машина повинна відповідати ряду вимог: мати просту й надійну конструкцію, забезпечувати агрегування з тракторами малого тягового класу, відзначатися хорошою маневреністю (особливо при роботі на невеликих ділянках), а також забезпечувати оптимальне співвідношення між продуктивністю, якістю збирання та затратами праці. У цьому контексті найбільш універсальними є картоплекопачі різних типів – прості, роторні та просівні. Проте остаточний вибір конструкції доцільно здійснювати на основі детального аналізу їх будови, принципу дії та ефективності роботи в конкретних умовах експлуатації.

1.4 Властивості ґрунту як об'єкта взаємодії з робочими органами

У процесі підкопування бульбоносного пласта ґрунту останній розглядається як складна багатокомпонентна дисперсна система, поведінка якої визначається сукупністю фізико-механічних, реологічних та структурних характеристик. Ці властивості формують умови взаємодії робочих органів машин із ґрунтовим середовищем, визначаючи як енерговитрати процесу, так і якість вилучення бульб із мінімальним рівнем їх пошкодження. Науковий підхід до аналізу підкопування передбачає врахування змінного стану ґрунту під дією навантажень, що супроводжується переходом від пружно-пластичних деформацій до руйнування та переміщення масиву.

Однією з фундаментальних характеристик є гранулометричний склад ґрунту, який визначає співвідношення частинок різного розміру та, відповідно, характер міжчастинкових зв'язків. У піщаних ґрунтах з переважанням крупних фракцій спостерігається низький рівень когезії, що обумовлює легкість їх руйнування під дією підкопувальних органів. Таке середовище демонструє переважно крихку поведінку, де руйнування відбувається без значних

пластичних деформацій, а опір різанню є відносно малим. Водночас глинисті та суглинкові ґрунти, багаті на дрібнодисперсні частинки, формують значну когезійну складову опору. У таких умовах зона деформації перед робочим органом збільшується, виникають складні напружено-деформовані стани, а руйнування супроводжується утворенням великих агрегатів, що ускладнює подальшу сепарацію бульб від ґрунтової маси.

Не менш важливим фактором є вологість ґрунту, яка суттєво впливає на його реологічні властивості. Зі зростанням вологості змінюються сили зчеплення між частинками, що визначає перехід ґрунту між твердим, пластичним і текучим станами. У сухому стані ґрунт характеризується підвищеною крихкістю і руйнується з утворенням значної кількості дрібних фракцій, що може сприяти травмуванню бульб внаслідок ударних взаємодій. При досягненні оптимальної вологості, близької до польової вологоємності, ґрунт набуває пластичних властивостей, які забезпечують більш рівномірне деформування та стабільний характер руйнування, що є найбільш сприятливим для процесу підкопування. Однак за умов надлишкової вологості з'являється тенденція до в'язкої текучості, при якому ґрунт налипає на робочі поверхні, різко зростає опір руху агрегату та погіршується процес сепарації.

Щільність складення ґрунту та його пористість формують іншу важливу групу параметрів, що визначають опір проникненню робочого органа в бульбоносний пласт. Щільний ґрунт характеризується зменшеним об'ємом пор та більшою кількістю контактів між частинками, що зумовлює підвищення міцності масиву та збільшення сил опору різанню. У таких умовах підкопування супроводжується значними енергетичними витратами та формуванням глибоких зон ущільнення перед робочим органом. Натомість більш розпушені ґрунти з високою пористістю демонструють менший опір і легше піддаються механічному руйнуванню, що позитивно впливає на продуктивність процесу.

Суттєву роль відіграють міцнісні характеристики ґрунтових агрегатів, які формуються внаслідок взаємодії мінеральних частинок, органічної речовини та

вологи. Міцність агрегатів визначає розміри грудок, що утворюються при руйнуванні пласта. У випадку високої міцності агрегатів процес підкопування супроводжується утворенням великих грудок, які складно піддаються подальшому подрібненню та розділенню. Це призводить до зниження ефективності очищення бульб і збільшення втрат. При нижчій міцності агрегатів ґрунт розпадається на дрібніші частини, що полегшує сепарацію, але водночас може створювати надлишок дрібнодисперсного матеріалу, який ускладнює роботу механізмів очищення.

У контексті механіки ґрунтів важливими параметрами є когезія та кут внутрішнього тертя, які визначають опір ґрунту зсувним деформаціям. Вони входять до класичного критерію міцності Мора–Кулона, що описує граничний стан ґрунтового масиву. Когезія відображає сили зчеплення між частинками, а кут внутрішнього тертя характеризує тертя між ними при переміщенні. Ці параметри визначають форму і розміри призми обвалення перед робочим органом, а також величину сили, необхідної для підкопування пласта. Зі збільшенням когезії та кута внутрішнього тертя зона пластичних деформацій розширюється, що призводить до збільшення опору руху.

Особливе значення має адгезія ґрунту до поверхонь робочих органів, яка проявляється у вигляді налипання частинок. Це явище особливо виражене у вологих глинистих ґрунтах і призводить до зміни геометрії робочих поверхонь, збільшення їх маси та погіршення умов переміщення матеріалу. Налипання також порушує нормальний процес відокремлення бульб від ґрунтової маси, що може спричинити їх додаткове травмування.

Інтегральною характеристикою, що узагальнює вплив усіх перелічених властивостей, є опір ґрунту підкопуванню. Цей показник залежить від комплексу факторів, серед яких гранулометричний склад, вологість, щільність, структура та швидкість взаємодії. Опір визначає величину тягового зусилля, необхідного для роботи агрегату, а також впливає на вибір конструктивних параметрів робочих органів. У наукових моделях він часто описується через

питомі коефіцієнти опору, які враховують як фізичні властивості ґрунту, так і геометрію взаємодії.

Структурний стан ґрунту є ще одним ключовим фактором, що визначає перебіг процесу підкопування. Добре структурований ґрунт, що складається зі стабільних агрегатів оптимального розміру, забезпечує рівномірне руйнування і сприяє ефективному відокремленню бульб. Водночас деградовані або безструктурні ґрунти демонструють або надмірну розпорошеність, або утворення великих монолітних мас, що істотно погіршує технологічні показники процесу.

Таким чином, підкопування бульбоносного пласта ґрунту є складним багатофакторним процесом, у якому ґрунт виступає як нелінійне деформівне середовище з властивостями, що змінюються в залежності від зовнішніх умов і стану. Оптимізація цього процесу можлива лише за умови глибокого врахування фізико-механічних характеристик ґрунту та їх взаємозв'язку, що дозволяє забезпечити мінімальні енергетичні витрати, високу якість сепарації та збереження біологічної цілісності бульб.

1.5 Картопля. Фізико-технологічні властивості матеріалу культури

Характеристика культури картоплі та її властивостей у контексті механізованого підкопування бульбоносного пласта ґрунту є важливим науково-технічним завданням, оскільки саме біологічні, морфологічні та фізико-механічні параметри рослини визначають конструкцію, режими роботи та кінематичні параметри підкопувальних і сепаруючих машин. Картопля як об'єкт механізованого збирання характеризується значною варіабельністю властивостей, що зумовлено генетичними особливостями сорту, агротехнічними умовами вирощування, типом ґрунту, рівнем зволоження та ступенем стиглості культури.

Розміщення бульб у ґрунті формує початкові геометричні умови взаємодії робочих органів із бульбоносним пластом. У типовій технології вирощування картоплі з міжряддям 70 см і відстанню між кущами в рядку близько 30 см формується густина стояння близько 50 тис. кущів на гектар. Бульби при цьому розташовуються у вигляді компактних скупчень – кущів, геометричні параметри яких визначають необхідну глибину ходу підкопувальних органів, ширину їх захвату та форму робочої поверхні. Глибина залягання верхньої та нижньої бульб, а також ширина куща в поздовжньому і поперечному напрямках формують просторову конфігурацію бульбоносного шару. За експериментальними даними, середня глибина залягання верхніх бульб становить близько 4–5 см, тоді як нижні бульби можуть розміщуватися на глибині до 18–21 см, а іноді досягати 23–24 см залежно від сорту і умов вирощування. Ширина куща може змінюватися у досить широких межах: від 15 до понад 30 см, що обумовлює необхідність забезпечення достатньої ширини захвату підкопувального органа для повного охоплення бульб без їх втрат.

Морфологічні властивості бульб мають принципове значення для процесу сепарації та транспортування. Форма бульб варіює від округлої до видовженої й бочкоподібної, причому для механізованого збирання найбільш сприятливою є округла форма, яка забезпечує кращі умови перекочування та зменшує ймовірність заклинювання у робочих органах. Розміри бульб, їх маса та кількість у кущі взаємопов'язані: при більшій кількості бульб їх середній розмір зменшується. За даними агрофізичних досліджень, маса бульб одного куща може змінюватися від 600 до понад 1000 г, а кількість бульб – від 15 до 20 і більше. Середня маса окремої бульби зазвичай становить 30–50 г, однак цей показник значною мірою залежить від сорту та врожайності.

Фізико-механічні властивості бульб картоплі є визначальними з точки зору їх збереження під час збирання. Бульба являє собою біологічне тіло з пружно-пластичними властивостями, чутливе до механічних навантажень як статичного, так і динамічного характеру. Міцність бульб зростає в процесі дозрівання, що пов'язано зі зниженням їх вологості та зміцненням клітинних

структур. При цьому механічна поведінка бульб залежить від швидкості прикладення навантаження: при ударних взаємодіях критичним параметром є швидкість співудару. Встановлено, що при швидкостях понад 10 м/с відбувається повне руйнування бульб із утворенням тріщин, тоді як у діапазоні 3–10 м/с виникають часткові пошкодження різного ступеня. За швидкостей менше 3 м/с пошкодження, як правило, не спостерігаються. Ці закономірності мають безпосереднє значення для обґрунтування кінематичних параметрів сепаруючих органів, зокрема швидкості руху транспортерів і висоти падіння бульб.

Окрім розмірів і механічної міцності, важливим показником є поверхнева структура бульб, включаючи товщину та міцність шкірки. У молодих бульб шкірка тонка і легко пошкоджується, тоді як у стиглих – більш міцна та стійка до стирання. Це обумовлює необхідність врахування ступеня стиглості культури при виборі строків збирання та налаштуванні машин.

Бадилля картоплі також істотно впливає на процес підкопування і сепарації, оскільки воно бере участь у формуванні загальної маси, що подається на робочі органи. Кількість стебел у куці може змінюватися в межах від 1 до 10 і більше, при цьому їх довжина зазвичай становить 60–90 см, а в окремих випадках досягає 2 м. Діаметр стебел біля основи коливається від 4 до 20 мм. Фізико-механічні властивості бадилля істотно змінюються залежно від стадії розвитку рослини: зелене, недозріле бадилля має меншу міцність і більшу гнучкість, тоді як стигле – більш жорстке і ламке. Об'ємна маса бадилля в ущільненому стані становить близько $0,133 \text{ т/м}^3$, що є важливим параметром при розрахунку пропускної здатності машин та енергетичних витрат.

Взаємозв'язок між властивостями бульб, бадилля та умовами їх залягання формує складну систему факторів, що впливають на ефективність механізованого збирання. Наприклад, глибше залягання бульб потребує збільшення глибини підкопування, що призводить до зростання опору ґрунту і енерговитрат, тоді як ширші куці вимагають більшої ширини захвату робочих органів. Аналогічно, підвищена кількість дрібних бульб у куці ускладнює їх

відділення від ґрунту, тоді як великі бульби легше сепаруються, але більш чутливі до механічних пошкоджень при падінні.

Таким чином, культура картоплі як об'єкт механізованого підкопування характеризується складним комплексом змінних морфологічних та фізико-механічних властивостей. Для ефективного функціонування підкопувальних і сепаруючих машин необхідно забезпечити узгодження їх конструктивних і кінематичних параметрів із цими властивостями, що дозволяє мінімізувати втрати продукції, зменшити енергетичні витрати та забезпечити збереження якості бульб. Комплексний облік особливостей культури є ключовою умовою підвищення ефективності сучасних технологій збирання картоплі.

2 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБИРАННЯ КАРТОПЛІ

2.1 Технічні та агротехнічні вимоги до картоплекопача

Технічні вимоги до картоплекопача формуються з урахуванням його функціонального призначення, умов експлуатації, а також агротехнічних вимог до процесу підкопування і відокремлення бульб. Роторний однорядний картоплекопач призначається для підкопування рядків картоплі, часткового відділення бульб від ґрунту та їх укладання збоку на викопане поле з подальшим ручним підбиранням. Така машина орієнтована на використання в усіх зонах вирощування картоплі, переважно на невеликих площах індивідуальних господарств, що накладає додаткові вимоги до її універсальності, компактності та зручності експлуатації.

Конструктивно картоплекопач повинен являти собою цілісну функціональну систему, основу якої становить рама як несуча металоконструкція. Вона забезпечує розміщення і фіксацію всіх основних та допоміжних вузлів машини. До неї приєднується підкопувальний робочий орган – леміш, який виконує безпосереднє відокремлення бульбоносного пласта від ґрунтового масиву. Важливою складовою є пристрій для копіювання поверхні поля та регулювання глибини підкопування, що забезпечує стабільність роботи при нерівностях рельєфу. Подальший технологічний процес реалізується ротором, який здійснює часткове очищення бульб від ґрунту і переміщення їх у бік від рядка. Привід ротора повинен здійснюватися від вала відбору потужності трактора, що забезпечує достатню енергетичну незалежність і надійність функціонування. Обов'язковим елементом конструкції є захисний пристрій, який запобігає пошкодженню робочих органів у разі перевантажень або наїзду на перешкоди.

Картоплекопач виконується у начіпному варіанті і переводиться з транспортного в робоче положення і навпаки за допомогою гідравлічної

навісної системи трактора. При цьому конструкція повинна забезпечувати можливість регулювання глибини ходу підкопувальних органів без використання спеціальних інструментів, що значно підвищує експлуатаційну зручність. Доступ до вузлів і деталей має бути вільним і безпечним для виконання профілактичних та ремонтних робіт. Робочі органи повинні легко від'єднуватися від рами, що спрощує їх заміну у випадку зносу або пошкодження.

Усі кріпильні елементи, включаючи болти, гвинти, шпильки, гайки, шайби, шплінти, а також осі і пружини повинні мати антикорозійне металеве покриття. Лакофарбові покриття машини мають відповідати вимогам щодо зовнішнього вигляду, який повинен відповідати 5 класу, а також щодо їх фізико-хімічних властивостей. Покриття повинно бути стійким до дії мастил і миючих засобів, що використовуються під час експлуатації. Місця змащування виділяються фарбою, яка контрастує із загальним кольором машини. У комплект поставки повинні входити запасні частини, інструмент, технічний опис, інструкція з експлуатації та паспорт виробу.

З точки зору агротехнічних вимог картоплекопач повинен забезпечувати продуктивність не менше 0,35 га за годину основного часу при робочій швидкості 6–6,5 км/год і транспортній до 20 км/год. Робоча ширина захвату може становити 0,6; 0,7 або 0,9 м залежно від ширини міжрядь, але мінімальна ширина міжрядь повинна бути не меншою за 0,6 м. Ширина підкопування рядка лемешем має бути не меншою за 0,4 м, що гарантує повне охоплення бульбоносного шару. Машина повинна забезпечувати підкопування бульб на глибину до 25 см при дорожньому просвіті не менше 300 мм і мінімальному радіусі повороту 3,2 м.

Технологічна ефективність копача визначається показниками якості виконання процесу. Повнота підкопування бульб повинна становити не менше 97%, тоді як кількість засипаних ґрунтом бульб не має перевищувати 3%. Загальні втрати після підкопування і підбирання повинні бути не більшими за 5%, а після додаткового очищення поля від бадилля і повторного підбирання –

не більше 3%, причому бульби масою менше 20 г до втрат не враховуються. Картоплекопач повинен відповідати кліматичному виконанню 5 і категорії розміщення 1 за ДСТУ.

Конструктивна маса машини не повинна перевищувати 180 кг, а її габаритні розміри в робочому і транспортному положенні залишаються однаковими: довжина до 1295 мм разом із карданним валом і до 720 мм без нього, ширина до 1100 мм і висота до 900 мм. Важливими є також показники надійності: коефіцієнт використання експлуатаційного та змінного часу має становити 0,65, коефіцієнт надійності технологічного процесу – 0,95, термін служби машини – 7 років, гарантійний строк – 2 роки, а середній наробіток на відмову – не менше 10 годин без урахування відмов, що усуваються на місці. Коефіцієнт готовності повинен забезпечувати безперебійну роботу в умовах виробництва.

З естетичної та ергономічної точки зору зовнішній вигляд машини повинен відповідати сучасним вимогам формоутворення і фарбування, а також стандартам ДСТУ ISO 6385:2018 та ISO 9241. Конструкція повинна забезпечувати простоту регулювання робочих органів і мінімальні витрати фізичних зусиль оператора.

Щодо вимог до складових частин і матеріалів, усі покупні вироби повинні відповідати кресленням і технічним умовам та бути прийнятими відділом технічного контролю виробника. Матеріали, що використовуються для виготовлення машини, мають відповідати вимогам сільськогосподарського машинобудування і чинним стандартам, а кількість видів паливо-мастильних матеріалів повинна бути мінімальною і обґрунтованою на стадії проектування.

Умови експлуатації картоплекопача охоплюють широкий діапазон ґрунтово-кліматичних факторів. Машина повинна забезпечувати роботу на ґрунтах із твердістю до 1,4 МПа і вологістю від 8 до 30%, при температурі ґрунту не нижче 10 °С і повітря не нижче +8 °С. Вона має ефективно працювати при врожайності до 6 т/га як із попередньо зібраним, так і з незібраним бадиллям, при цьому засміченість бур'янами допускається до 1,5 т/га, а

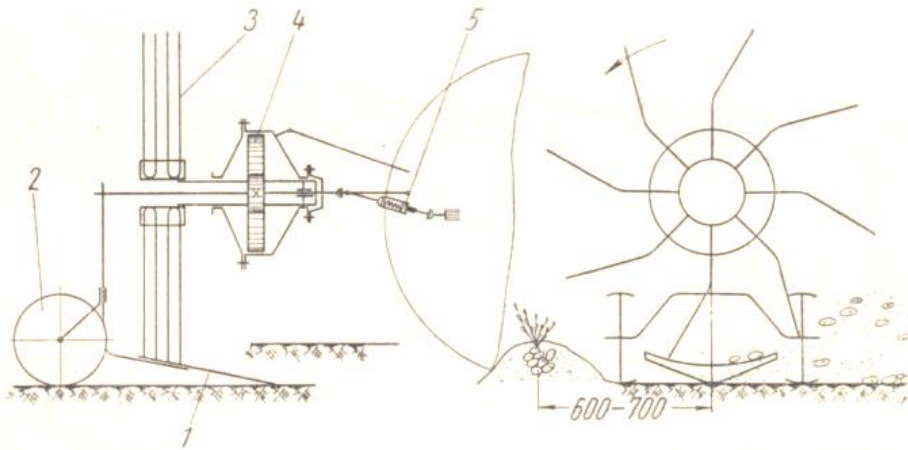
наявність каміння розміром до 50 мм – до 8 т/га. Глибина залягання нижніх бульб має становити до 20 см, поперечний нахил поля допускається до 6°, а довжина гонів може бути від нуля і більше.

Картоплекопач повинен агрегатуватися з трактором класу тяги 0,6 і обслуговуватися одним трактористом, тоді як кількість робітників для підбирання бульб залежить від умов і може становити від 15 до 25 осіб. Трудомісткість монтажу машини на місці використання не повинна перевищувати 1 людино-години, щозмінного технічного обслуговування – 0,5 людино-години, періодичного – 1,5 людино-години, а післясезонного разом із підготовкою до зберігання – 10 людино-годин. Орієнтовний обсяг робіт за сезон складає 100 га.

У сукупності ці вимоги формують цілісну систему критеріїв, що забезпечують ефективність, надійність і економічну доцільність використання картоплекопача в умовах сучасного сільськогосподарського виробництва.

2.2 Обґрунтування конструкції та функціональної схеми удосконаленої машини

Картоплекопачі викидного типу здійснюють викопування рослин із подальшим відкиданням суміші ґрунту та бульб убік від рядка. Підкопаний ворох за допомогою лемеша подається до викидного колеса, яке розкидає його на відстань до 3,5 м.



1 – леміш; 2 – опорне колесо; 3 – викидне колесо;
4 – редуктор; 5 – карданна передача
Рисунок 2.1– Схема роботи картоплекопача викидного типу

Конструкція базової машин включає леміш, опорне колесо, викидний ротор, редуктор і карданну передачу. Вони виготовляються як однорядними для використання з кінною тягою, так і одно- або дворядними для агрегування з тракторами. Найбільш доцільним є їх застосування в умовах підвищеної вологості ґрунту, де робота машин із просіювальними робочими органами є утрудненою.

Якщо узагальнити, то картоплекопачі викидного типу мають істотні недоліки, серед яких значні втрати врожаю, що можуть досягати 20–25% через повторне засипання бульб ґрунтом, підвищений рівень механічних пошкоджень, особливо за умов сухого ґрунту, а також необхідність одночасного ручного підбирання бульб. Залежно від конструкції викидного колеса розрізняють машини з жорстко закріпленими вилами та з шарнірними напрямними вилами. Удосконалені моделі, що випускаються зарубіжними виробниками, можуть комплектуватися додатковими просіювальними елементами, які забезпечують формування валка з бульб.

Удосконалення конструкції картоплекопача роторного типу, розробленого на основі базової машини КТН-1,6, зумовлене необхідністю підвищення ефективності процесу підкопування бульбоносного пласта, зменшення енергоємності роботи, зниження травмування бульб та спрощення

конструкції з одночасним підвищенням її надійності. В основу формування конструктивної та функціональної схеми покладено аналіз взаємодії робочих органів із ґрунто-бульбовою сумішшю, а також оцінку недоліків існуючих аналогів.

Удосконалена машина являє собою начіпний картоплекопач роторного типу, конструктивно сформований як сукупність взаємопов'язаних вузлів, кожен з яких виконує чітко визначену технологічну функцію у загальному процесі підкопування, руйнування та сепарації ґрунту і бульб. Основою конструкції є рама, яка виконує функцію несучого елемента і забезпечує просторову жорсткість машини. Саме на рамній конструкції монтуються всі робочі та допоміжні органи, і від її геометричної точності та міцності залежить стабільність роботи машини в умовах змінного навантаження.

Ключовим елементом, який визначає енергетичні та технологічні показники роботи копача, є підкопувальний робочий орган – леміш коритоподібної форми. Застосування саме такої геометрії має принципове обґрунтування. На відміну від традиційних плоских або клиноподібних лемешів, коритоподібна форма забезпечує не лише підрізання шару ґрунту, але й його спрямоване переміщення до зони дії ротора. При цьому відбувається зменшення розсіювання ґрунтової маси та зниження втрат бульб за рахунок кращої локалізації потоку. Крім того, оптимізація кута входження лемеша у ґрунт і раціональний вибір його кривизни дозволяє зменшити силу опору різанню, що прямо впливає на тягові характеристики агрегату та витрати енергії.

Важливою складовою конструкції є пристрій регулювання глибини підкопування, виконаний у вигляді гвинтового механізму, що забезпечує переміщення копіювального колеса відносно рами. Таке рішення дозволяє плавно змінювати глибину ходу лемеша відповідно до фактичного розміщення бульб у ґрунті. Завдяки цьому досягається повнота підкопування без зайвого заглиблення, що знижує енерговитрати та зменшує захоплення надлишкових мас ґрунту. Копіювальне колесо також виконує функцію стабілізації положення

машини відносно поверхні поля, що особливо важливо при роботі на нерівних ділянках.

Основним сепаруючим і транспортуючим елементом машини є ротор, конструкція якого зазнала суттєвого удосконалення. Ротор виконує функцію руйнування ґрунтових агрегатів, відокремлення бульб та їх відкидання в бік викопаного рядка. Він складається з барабана, на якому закріплено вісім кидальних гребінок. Кожна гребінка сформована чотирма сталевими пальцями, які мають вигнуту форму та спіральний виток біля основи. Така конструкція надає пальцям пружних властивостей, що дозволяє їм відхилятися при зустрічі з перешкодами або бульбами, зменшуючи жорсткість ударної взаємодії.

Принципово важливим удосконаленням є розміщення пальців не паралельно до напрямку руху машини, а під кутом та застосування гумових насадок на кінцях пальців. Це конструктивне рішення спрямоване на зниження механічного травмування бульб, оскільки саме ударна дія металевих елементів є основною причиною пошкоджень. Введення еластичного елемента змінює характер контакту з ударного на пружно-поглинаючий, що дозволяє значно зменшити пікові напруження у поверхневому шарі бульби. Таким чином, забезпечується збереження товарної якості продукції без істотного погіршення процесу сепарації.

Привід ротора реалізується від вала відбору потужності трактора через карданний вал, на якому встановлена запобіжна муфта. Її функціональне призначення полягає у захисті механізмів від перевантаження у випадку заклинювання ротора або раптового збільшення опору. Це підвищує надійність машини та зменшує ймовірність аварійних ситуацій.

Суттєвим напрямом удосконалення стала заміна редукторної передачі як на рис. 2.1 на ланцюгову. У базовій конструкції редуктор забезпечував стабільну передачу крутного моменту, однак мав значну масу та потребував постійного контролю рівня мастила, що ускладнювало експлуатацію. Крім того, існувала потенційна небезпека витоку оливи, яка могла призводити до забруднення навколишнього середовища. Використання ланцюгової передачі

дозволяє зменшити масу машини, спростити конструкцію та підвищити ремонтпридатність. Закрите виконання передачі забезпечує її захист від пилу та вологи, зберігаючи працездатність у складних польових умовах. Одночасно ланцюгова передача дозволяє варіювати передаточне число, що дає можливість регулювати частоту обертання ротора залежно від умов роботи.

Загальна концепція удосконалення спрямована на досягнення балансу між технологічною ефективністю, енергоощадністю та простотою конструкції. Зменшення маси машини дозволяє знизити навантаження на трактор і ґрунт, а спрощення вузлів – підвищити їх надійність і доступність для обслуговування. Одночасно оптимізація форми робочих органів і введення еластичних елементів сприяють зменшенню пошкоджень бульб і підвищенню якості кінцевого продукту.

Таким чином, функціональна схема удосконаленого картоплекопача забезпечує послідовне виконання технологічних операцій: підкопування бульбоносного пласта, його транспортування до зони дії ротора, руйнування ґрунтових агрегатів, відокремлення бульб та їх вивантаження на поверхню поля. Комплекс запропонованих конструктивних змін дозволяє підвищити ефективність роботи машини, зменшити енерговитрати, покращити умови обробки бульб і забезпечити більш раціональне використання матеріальних ресурсів, що в цілому відповідає сучасним вимогам до сільськогосподарської техніки.

2.3 Обґрунтування вибору основних параметрів підкопуючого лемеша

Технологічний процес роботи удосконаленого картоплекопача реалізується як послідовна взаємодія підкопувального та сепаруючого робочих органів із бульбоносним шаром ґрунту. У загальному вигляді він полягає в тому, що коритоподібний леміш, рухаючись у ґрунті на заданій глибині,

здійснює підрізання шару, в якому розміщені бульби разом із ґрунтовими агрегатами. Завдяки своїй просторово вигнутій формі леміш не лише відокремлює шар від основного масиву, але й спрямовано переміщує його вздовж своєї поверхні до зони дії ротора. Такий характер руху забезпечує зменшення втрат бульб і формування впорядкованого потоку ґрунто-бульбової суміші.

Подальший етап процесу відбувається в зоні роботи ротора, де шар ґрунту піддається інтенсивній механічній дії пальців. Пальці ротора, рухаючись по коловій траєкторії та орієнтуючись переважно перпендикулярно напрямку переміщення ґрунтової маси, здійснюють її розпушування та руйнування грудок. У результаті цього ґрунт розпадається на дрібніші фракції, які під дією відцентрових сил та гравітації відділяються від бульб. Одночасно бульби, маючи більшу масу та цілісність, підхоплюються пальцями і виносяться із загального потоку з подальшим викиданням на поверхню поля. Дальність розкидання зазвичай становить 1,5–3,5 м і залежить від кінематичних параметрів ротора та фізико-механічних властивостей середовища.

Ефективність перебігу технологічного процесу визначається сукупністю взаємопов'язаних параметрів, які мають бути обґрунтовані з урахуванням агротехнічних вимог, властивостей ґрунту та біологічних характеристик культури. Одним із ключових параметрів є робоча швидкість агрегату. Вона встановлюється на рівні близько 6,5 км/год, що забезпечує оптимальне співвідношення між продуктивністю та якістю виконання операції. При зменшенні швидкості погіршується продуктивність і може виникати надмірне накопичення ґрунтової маси перед робочими органами, тоді як її підвищення призводить до збільшення динамічних навантажень і зростання ймовірності пошкодження бульб.

Не менш важливими є геометричні параметри підкопувального робочого органа – лемеша. Його довжина L визначає тривалість взаємодії ґрунтового шару з робочою поверхнею і впливає на плавність переходу від підрізання до транспортування. Ширина B повинна забезпечувати повне охоплення куща

бульб із врахуванням їх поперечного розташування у ґрунті. Кут загострення лемеша впливає на інтенсивність проникнення в ґрунт і величину опору різанню: менші значення кута сприяють полегшенню входження, але можуть знижувати міцність робочого органа. Кут підрізання α визначає напрямок відокремлення шару та умови його подальшого переміщення, впливаючи на формування потоку матеріалу та навантаження на ротор.

Суттєвим параметром технологічного процесу є також частота обертання ротора, яка визначає інтенсивність руйнування ґрунтових агрегатів і дальність викидання бульб. Цей параметр має узгоджуватися з робочою швидкістю руху машини, оскільки надмірно висока частота обертання може спричинити надлишкову ударну дію на бульби, тоді як недостатня – призвести до неповного відокремлення ґрунту. Потужність, що передається на ротор, залежить від типу та стану ґрунту: у важких і вологих ґрунтах вона повинна бути більшою через підвищений опір і сильніші зв'язки між частинками.

Таким чином, технологічний процес підкопування і сепарації бульб картоплі слід розглядати як складну динамічну систему, в якій взаємодіють кінематичні параметри машини, геометричні характеристики робочих органів і фізико-механічні властивості середовища. Раціональний вибір цих параметрів дозволяє забезпечити стабільність процесу, мінімізувати енерговитрати та зменшити пошкодження бульб, що є визначальним для досягнення високої агротехнічної ефективності роботи машини.

Призначення лемеша картоплезбиральної машини полягає у забезпеченні ефективного підкопування бульбоносного шару ґрунту, в якому розміщуються бульби картоплі, з його частковим або повним руйнуванням та подальшою передачею сформованої ґрунто-бульбової маси на наступні робочі органи машини. Водночас конструкція лемеша повинна відповідати ряду суперечливих вимог: з одного боку – забезпечувати мінімальний опір руху та захват ґрунту, а з іншого – гарантувати повне підкопування бульб без їх пошкодження і втрат. Це обумовлює необхідність раціонального вибору геометрії, розмірів і просторової форми робочого органа.

Пошук оптимальної конструкції лемеша базується на комплексному аналізі умов його роботи, які визначаються фізико-механічними властивостями ґрунту, глибиною і характером залягання бульб, а також кінематикою руху машини. Удосконалення цього робочого органа доцільно здійснювати з урахуванням забезпечення стабільного підрізання шару при мінімальних енергетичних витратах. У запропонованій конструкції реалізовано принцип пасивного впливу лемеша на ґрунт, при якому руйнування шару відбувається переважно за рахунок геометрії робочої поверхні та дії сил різання, без використання додаткових активних елементів.

Конструктивною основою підкопувального органа є двогранний клин, що здійснює лобове підрізання ґрунтового шару. Така форма дозволяє забезпечити рівномірне розподілення напружень у зоні різання та сприяє формуванню спрямованого потоку ґрунто-бульбової маси. Важливим конструктивним принципом є узгодження форми леза лемеша з конфігурацією поперечного перерізу куща бульб. Це дозволяє забезпечити максимальне охоплення зони розміщення бульб і одночасно уникнути надлишкового заглиблення та захоплення зайвих об'ємів ґрунту, що позитивно впливає на енергетичні показники та якість сепарації.

Механіка взаємодії клина з ґрунтом визначається параметрами його геометрії, серед яких ключове значення має кут різання α . Саме цей кут визначає характер деформації ґрунтового масиву перед робочим органом: при малих значеннях кута відбувається більш плавне розсування і підрізання шару, тоді як при великих значеннях переважає інтенсивне руйнування з утворенням великих грудок і підвищеним опором. З теоретичної точки зору, для зменшення сили різання доцільно прагнути до мінімальних значень кута α , оскільки це забезпечує зниження напружень у зоні контакту та відповідно зменшення тягового опору машини.

Разом із тим, реалізація лише малих значень кута різання не забезпечує необхідного піднімання та транспортування ґрунтового шару. Саме тому важливим напрямом удосконалення є застосування лемешів змінної геометрії, у

яких кут α змінюється вздовж довжини робочої поверхні. На початковій ділянці лемеша використовується малий кут різання для полегшення входження у ґрунт і зменшення опору, тоді як на наступних ділянках кут поступово збільшується, що сприяє підніманню шару на необхідну висоту H і створенню оптимальних умов для його подальшої передачі до сепаруючих органів. Такий підхід дозволяє поєднати низькі енерговитрати з високою ефективністю технологічного процесу.

Довжина лемеша L також відіграє важливу роль у формуванні процесу підкопування. Збільшення довжини забезпечує більш плавний перехід від підрізання до піднімання шару, зменшуючи ймовірність руйнування бульб і покращуючи стабільність потоку матеріалу. Водночас надмірне збільшення довжини може призводити до зростання сил тертя і загального опору, тому цей параметр повинен обиратися на основі компромісу між енергетичними і технологічними вимогами.

Таким чином, раціональна конструкція лемеша повинна враховувати не лише геометричні параметри, але й закономірності деформації ґрунту при різанні, просторове розміщення бульб та необхідність забезпечення їх цілісності. Використання двогранного клина зі змінним кутом різання дозволяє суттєво підвищити ефективність підкопування, зменшити тяговий опір і створити сприятливі умови для подальшої сепарації бульб, що є визначальним для підвищення загальної ефективності картоплезбиральної машини.

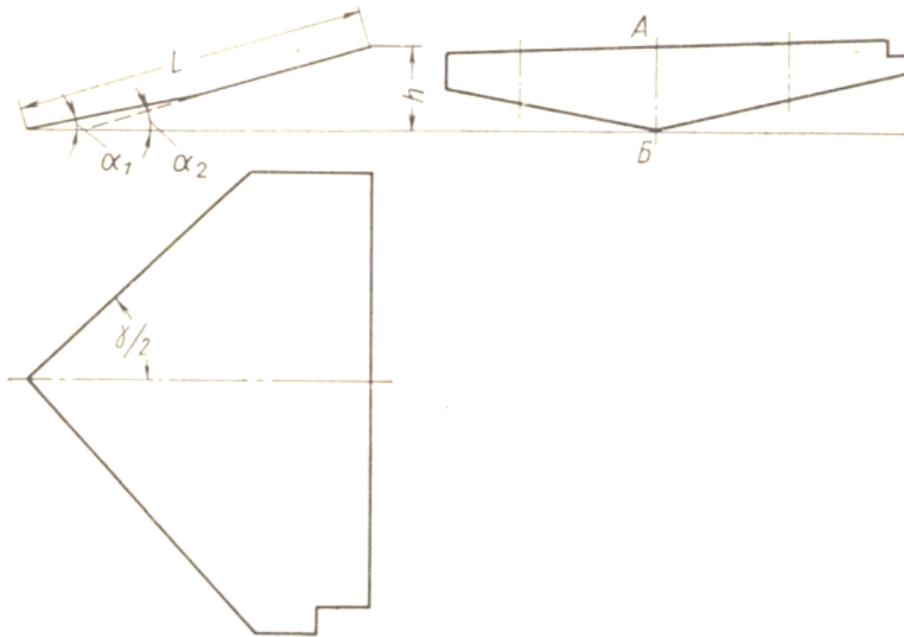


Рисунок 2.1 – Схема визначення раціональної геометричної форми лемеша

Кут α у даному випадку виконує не лише функцію кута різання, але й одночасно є кутом кришення ґрунту, тобто параметром, що визначає інтенсивність руйнування підкопаного шару. При русі ґрунто-бульбової маси вздовж робочої поверхні звичайного лемеша з постійним кутом α характер взаємодії залишається практично незмінним, унаслідок чого додаткове кришення ґрунту є обмеженим. Це пояснюється тим, що силовий вплив клина на матеріал відбувається лише на початковій стадії підрізання, після чого шар переважно ковзає вздовж поверхні без активного руйнування.

Очевидно, що для підвищення ефективності процесу необхідно створити умови для повторного або безперервного впливу на піднятий шар. Один із шляхів реалізації цього полягає у використанні послідовності клинів із поступовим збільшенням кута кришення. Такий підхід дозволяє активізувати процес руйнування ґрунтових агрегатів на різних стадіях їх переміщення, проте конструктивно є складнішим і не завжди доцільним.

Більш раціональним рішенням є формування робочої поверхні лемеша у вигляді плавної криволінійної поверхні зі змінним кутом нахилу. Зокрема,

використання профілю, наближеного до ділянки параболи, забезпечує поступове зростання кута α уздовж довжини лемеша. Це створює умови для безперервного розвитку кришильного ефекту: на початковій ділянці відбувається м'яке підрізання із мінімальним опором, а далі – поступове наростання деформацій, що сприяє інтенсивнішому руйнуванню ґрунту.

Крім того, така геометрія робочої поверхні сприяє запобіганню налипанню ґрунту на леміш. Плавна зміна кривизни забезпечує стабільний рух ґрунтової маси без її затримки та накопичення, що особливо важливо при роботі у вологих ґрунтових умовах. У результаті досягається більш рівномірний потік матеріалу, покращується передача його до наступних робочих органів і зменшуються енергетичні витрати процесу.

Таким чином, застосування криволінійної поверхні лемеша зі змінним кутом кришення є обґрунтованим з точки зору підвищення ефективності руйнування ґрунтового шару, покращення умов транспортування бульб та зниження тягового опору машини в цілому.

Виконаємо обґрунтування кута розхилу лемеша.

Наведемо спрощену схему пасивного лемеша, рис. 2.1

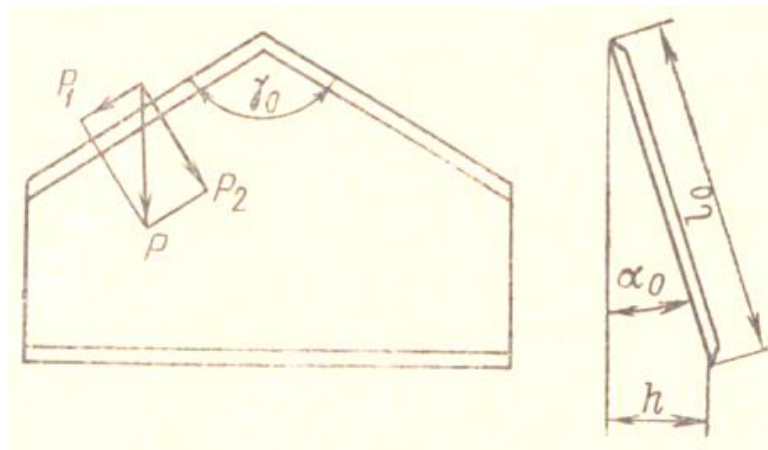


Рисунок 2.2 – Схема пасивного лемеша

Пасивний леміш конструктивно являє собою клиноподібний робочий орган плоскої форми, який встановлюється під кутом α відносно горизонтальної площини. Величина цього кута повинна бути мінімально

можливою, оскільки зменшення кута сприяє зниженню тягового опору та запобігає надмірному накопиченню ґрунтового пласта перед лемешем. Водночас параметр α пов'язаний з геометричними характеристиками конструкції, а саме з висотою заднього обрізу h та довжиною робочої поверхні лемеша l_0 .

$$l_0 = \frac{h}{\sin \alpha_0}. \quad (2.1)$$

Експериментальні дослідження показують, що зі збільшенням кута нахилу відбувається покращення умов самоочищення робочої поверхні: рослинні рештки (бадилля) та частинки ґрунту менш інтенсивно налипають на лезо. У сучасних конструкціях значення кута α зазвичай знаходиться в межах 15–20°, що є компромісом між енергетичною ефективністю та якістю очищення.

Особливою проблемою в роботі лемеша є наявність рослинних решток, які обвивають ріжучу кромку та ускладнюють переміщення ґрунтового пласта. З метою забезпечення самоочищення вводиться параметр кута розходження лез γ , який повинен забезпечувати можливість самовільного сходження бадилля та бур'янів з поверхні лемеша.

Для аналізу умов руху рослинності розглянемо силу P , що діє на лезо. Цю силу розкладають на дві складові:

$$P_1 = P \cos \frac{\gamma_0}{2}; \quad (2.2)$$

$$P_2 = P \sin \frac{\gamma_0}{2}; \quad (2.3)$$

де P_1 – складова, що сприяє переміщенню рослинності вздовж леза;

P_2 – нормальна складова, яка викликає притискання до поверхні.

Унаслідок дії нормальної компоненти виникає сила тертя F спрямована протилежно руху.

Для того щоб рослинність могла переміщуватись по поверхні лемеша, необхідно виконання нерівності

$$P_1 \geq F. \quad (2.4)$$

або

$$P \cos \frac{\gamma_0}{2} > P f \sin \frac{\gamma_0}{2}. \quad (2.5)$$

Тоді кут розхилу по відношенню до коефіцієнта тертя повинен лежати в межах

$$f < \operatorname{ctg} \frac{\gamma_0}{2}. \quad (2.6)$$

Оскільки коефіцієнт тертя визначається через кут тертя φ

$$f = \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.7)$$

Тоді відповідно буде

$$\operatorname{tg} \varphi < \operatorname{ctg} \frac{\gamma_0}{2}. \quad (2.8)$$

Відомо, що для взаємодії бадилля з сталеву поверхнею кут тертя становить приблизно $\varphi \approx 57^\circ$. Підставляючи це значення у нерівність, отримуємо

$$57^\circ < 90^\circ - \frac{\gamma_0}{2}. \quad (2.9)$$

Звідки

$$\gamma_0 < 66^\circ.$$

Отже, з точки зору забезпечення самостійного сходження рослинності оптимальні значення кута γ повинні бути меншими за 33° . Проте в реальних конструкціях картоплезбиральних машин часто застосовуються значення $\gamma_0 \geq 80^\circ$, що погіршує умови самоочищення, але обумовлюється конструктивними обмеженнями та іншими технологічними факторами.

Слід зазначити, що зменшення кута γ призводить до збільшення довжини лемеша l_0 , що, у свою чергу, ускладнює сходження ґрунтового пласта по його поверхні та може негативно впливати на загальну ефективність процесу підкопування.

Таким чином, при проектуванні пасивного лемеша необхідно враховувати суперечливий вплив параметрів геометрії: з одного боку – вимоги до енергетичної ефективності та самоочищення, а з іншого – забезпечення стійкого транспортування ґрунтового пласта до наступних робочих органів машини.

3 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

3.1 Обґрунтування та розрахунок основних геометричних і кінематичних параметрів ротора картоплекопача

Призначення пальців ротора полягає у руйнуванні ґрунтового пласта, в якому знаходяться бульби картоплі, їх відокремленні від ґрунту, транспортуванні та розсіюванні на поверхні поля. У процесі взаємодії робочих органів із бульбами виникає проблема їх механічного пошкодження, зумовлена жорсткими контактними умовами, оскільки традиційно пальці виготовляються зі сталі та мають підвищену твердість.

Для зниження рівня травмування бульб доцільним є застосування матеріалів із кращими амортизаційними властивостями, які здатні пом'якшувати ударні навантаження. Одним із варіантів є використання гумотканинних матеріалів. Такий матеріал являє собою композицію еластомеру (гуми) з армувальними тканинними шарами, що забезпечує поєднання еластичності та достатньої міцності.

Водночас повне покриття пальця гумовим шаром є недоцільним з конструктивних і технологічних міркувань. Раціональним є локальне прогумування лише тієї частини робочого органа, яка безпосередньо взаємодіє з бульбами, тобто занурюється у ґрунтовий шар. Як показує аналіз умов роботи, довжина цієї ділянки має становити орієнтовно 0,25 м, що дозволяє суттєво знизити пошкоджуваність продукції без погіршення ефективності руйнування ґрунту.

Частота обертання ротора є одним із визначальних параметрів, що впливають як на ефективність розпушування та прочісування ґрунтового шару, в якому залягають бульби, так і на рівень їх механічного пошкодження. Вона має бути достатньою для забезпечення повного вилучення бульб із ґрунту та недопущення їх технологічних втрат, які можливі при заниженій швидкості обертання. Водночас надмірне збільшення частоти призводить до

інтенсифікації ударної взаємодії, що спричиняє пошкодження бульб і їх надлишкове розкидання по поверхні поля. Отже, раціональне значення цього параметра повинно забезпечувати компроміс між повнотою видобування та мінімізацією травмування продукції.

Відповідно до агротехнічних вимог, робоча швидкість агрегату, а отже і швидкість переміщення ґрунтового шару, що надходить у зону дії пальців ротора, знаходиться в межах 6,0–6,5 км/год. Для подальших розрахунків приймемо граничне значення швидкості 6,5 км/год, що відповідає приблизно 1,8 м/с. За такої швидкості переміщення ґрунтова маса проходить ділянку ширини проєкції пальців ротора (рис. 3.1) довжиною 175 мм протягом приблизно 0,097 с, що необхідно враховувати при визначенні кінематичних параметрів ротора.

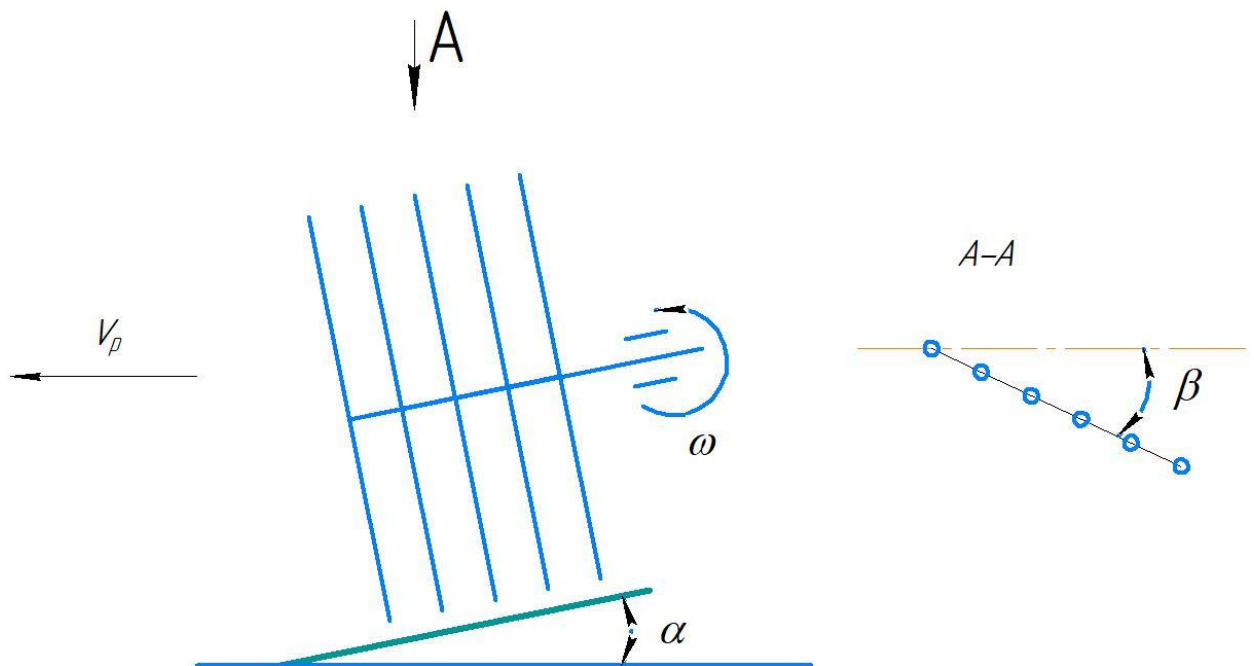


Рисунок 3.1 – Модифікований ротор

З метою ефективного вилучення бульб із ґрунтового шару та запобігання їх втратам необхідно забезпечити періодичне входження гребінок у ґрунт із інтервалом, що не перевищує 0,097 с. Це гарантує безперервність процесу обробітку та виключає «пропуски» необроблених ділянок.

Беручи до уваги, що ротор конструктивно оснащений вісьмома гребінками, рівномірно розміщеними по колу з кутовим кроком 45° , можна визначити необхідну колову швидкість ротора, виходячи з умови забезпечення заданої періодичності їх занурення у ґрунтовий шар. Таким чином, значення колової швидкості ротора визначається з урахуванням часу між послідовними контактами гребінок із ґрунтом.

$$\omega = \frac{\pi/2}{0,097} = 8,1 \text{ рад/с.} \quad (3.1)$$

Щоб визначити частоту обертання ротора використовуємо залежність

$$n_n = \frac{\omega_n \cdot 30}{\pi} \quad (3.2)$$

Підставляємо значення

$$n_n = \frac{8,1 \cdot 30}{\pi} = 77,4 \text{ об/хв.}$$

З метою підвищення надійності та стабільності технологічного процесу доцільно передбачити збільшення розрахункової частоти обертання ротора на 25 %. Такий запас дозволяє компенсувати можливі коливання умов роботи та забезпечити безперервність взаємодії робочих органів із ґрунтовим шаром.

Отже, уточнене значення частоти обертання ротора визначається з урахуванням коригувального коефіцієнта і становить

$$n = n_n \cdot 1,25 = 77,4 \cdot 1,25 = 97 \text{ об/хв.}$$

Отже, з урахуванням прийнятих припущень і коригувального коефіцієнта, раціональна частота обертання ротора повинна становить приблизно 97-100 об/хв, що забезпечує ефективне функціонування робочого органа та відповідність агротехнічним вимогам щодо якості викопування і мінімізації пошкодження бульб.

3.2 Обґрунтування взаємодії пальців викидного колеса з картопляним ворохом

У класичні конструкції площина пальців викидного колеса паралельна осі поздовжнього руху картоплекопача. картопля з ґрунтом відкидається перпендикулярно до напрямку руху, а тому відкидається на значні відстані в сторону. Для модифікованої конструкції викидного колеса вважаємо, що площина пальців є під кутом до напрямку руху. І тоді при взаємодії з картоплею (ґрунтом) траєкторії її польоту буде не перпендикулярною до напрямку руху машини, а під кутом β до поздовжньої осі машини, тобто картоплини будуть відкидатися з певним кутом в сторону і назад, що зменшить при одній і тій же дальності польоту величину розсіювання картоплі по полю.

Опишемо ці взаємодії.

У картоплекопачах викидного типу процес сепарації та переміщення вороху реалізується за рахунок взаємодії обертового викидного колеса з підкопаним шаром ґрунту та бульбами. У традиційних конструкціях площина розміщення пальців розташована паралельно напрямку руху агрегату, внаслідок чого швидкість точки контакту пальця з ворохом має переважно поперечну складову. Це зумовлює формування траєкторії польоту бульб, близької до перпендикулярної до напрямку руху машини, що призводить до значного бокового розсіювання матеріалу та підвищених втрат.

Запропоноване конструктивне рішення передбачає встановлення пальців викидного колеса під кутом β до напрямку руху машини. Така зміна геометрії

призводить до трансформації кінематичної структури процесу: швидкість точки контакту отримує не лише поперечну, але й поздовжню складову, яка спрямована протилежно руху агрегату або співнапрямлено з ним залежно від орієнтації кута. У результаті траєкторія руху бульб набуває просторового характеру, що змінює характер розсіювання вороху.

Рух пальця можна розглядати як поєднання обертального руху з кутовою швидкістю ω і поступального руху агрегату зі швидкістю V_a . Абсолютна швидкість точки на пальці визначається як

$$\vec{V} = \vec{V}_\omega + \vec{V}_a. \quad (3.3)$$

При введенні кута нахилу β вектор обертальної швидкості \vec{V}_ω розкладається:

$$\begin{aligned} V_x &= V_\omega \sin \beta - V_a, \\ V_y &= V_\omega \cos \beta. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Таким чином, з'являється додаткова поздовжня складова швидкості, яка принципово змінює динаміку взаємодії з ворохом.

На етапі контакту між пальцем і ворохом формується імпульсна взаємодія. У класичному випадку основна дія має характер удару з домінуючою нормальною складовою сили. У разі нахиленого положення пальців вектор сили взаємодії орієнтований під кутом до поверхні вороху, що призводить до більш плавного розгону бульби.

Сила дії пальця на частинку маси m визначається через зміну імпульсу

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{V})}{dt}. \quad (3.5)$$

Нормальна складова сили, яка визначає ступінь травмування бульб, зменшується

$$F_n = F \cos \beta . \quad (3.6)$$

Це означає, що зі збільшенням β ударна складова знижується, а контакт набуває більш характеру ковзання. Одночасно зростає тангенціальна складова, що сприяє направленому переміщенню вороху.

Після втрати контакту бульба рухається за законами балістики. Початкова швидкість визначається компонентами:

$$\begin{aligned} V_{0x} &= V_\omega \sin \beta - V_a , \\ V_{0y} &= V_\omega \cos \beta , \\ V_{0z} &= V_\omega \sin \alpha . \end{aligned} \quad (3.7)$$

Траєкторія описується:

$$\begin{aligned} x &= V_{0x}t , \\ y &= V_{0y}t , \\ z &= V_{0z}t - \frac{gt^2}{2} . \end{aligned} \quad (3.8)$$

Максимальна дальність у поперечному напрямі

$$L_y = \frac{2V_{0z}V_{0y}}{g} . \quad (3.9)$$

Поздовжнє зміщення

$$L_x = \frac{2V_{0z}V_{0x}}{g} . \quad (3.10)$$

У класичній схемі $L_x \approx 0$, тоді як у запропонованій конструкції бульби зміщуються назад, що приводить до звуження зони розсіювання.

Кінетична енергія, яка передається бульбам

$$E = \frac{mV^2}{2} . \quad (3.11)$$

У разі нахилоного розташування пальців енергія розподіляється:

$$E_y = \frac{mV^2 \cos^2 \beta}{2} , \quad (3.12)$$

$$E_x = \frac{mV^2 \sin^2 \beta}{2} . \quad (3.13)$$

Зменшення поперечної складової означає, що енергія, яка витрачається на небажаний боковий розкид, зменшується. Частина енергії спрямовується в поздовжній напрям і не призводить до втрат.

Одним із визначальних критеріїв є максимальне контактне навантаження. Для оцінки введемо поняття критичного прискорення

$$a = \frac{V^2}{R} . \quad (3.14)$$

Тоді контактна сила

$$F = ma . \quad (3.15)$$

Враховуючи нахил пальців

$$F_n = ma \cos \beta \quad (3.16)$$

Звідси випливає, що збільшення кута β прямо знижує ударні навантаження. Це є ключовою перевагою конструкції, оскільки механічні пошкодження бульб прямо пов'язані саме з нормальною складовою сили.

Виконаємо числовий аналіз процесу при таких вихідних даних:

$$V_w = 4 \text{ м/с} , V_a = 1.5 \text{ м/с} , \alpha = 25^\circ , \beta = 20^\circ .$$

Тут будемо мати:

$$V_{0x} = 4 \sin 20^\circ - 1.5 \approx 1.37 - 1.5 = -0.13 \text{ м/с} ;$$

$$V_{0y} = 4 \cos 20^\circ \approx 3.76 \text{ м/с} ;$$

$$V_{0z} = 4 \sin 25^\circ \approx 1.69 \text{ м/с} .$$

Дальність польоту частинки:

$$L_y \approx \frac{2 \cdot 1.69 \cdot 3.76}{9.81} \approx 1.29 \text{ м} ,$$

$$L_x \approx \frac{2 \cdot 1.69 \cdot (-0.13)}{9.81} \approx -0.045 \text{ м} .$$

Отже, бульба зміщується назад приблизно на 4–5 см, що призводить до концентрації вороху ближче до агрегату, рис.

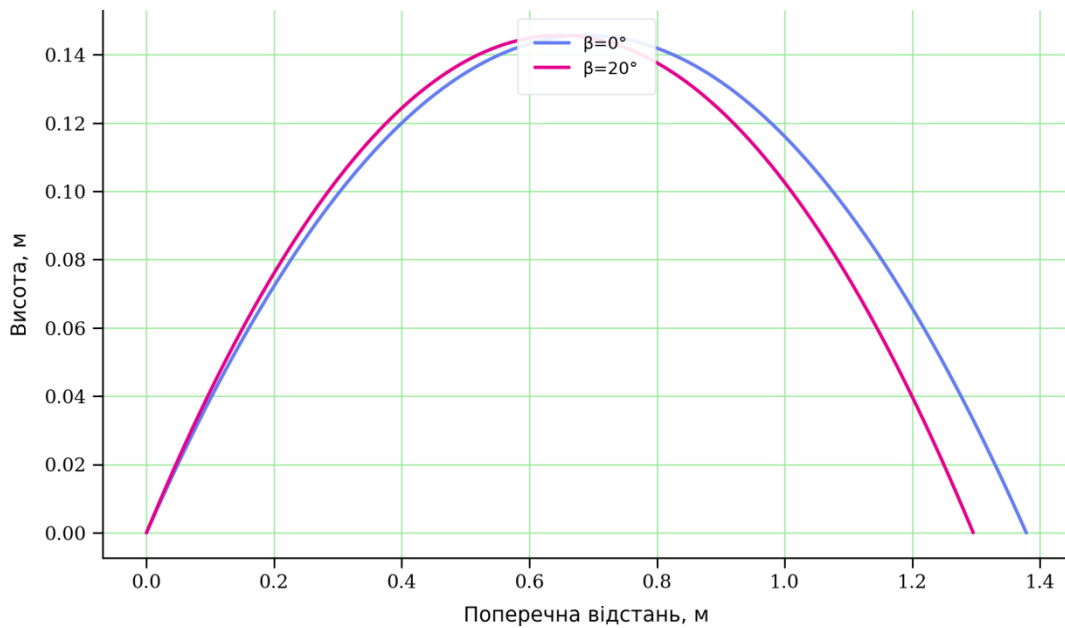


Рисунок 3.2 – Графік траєкторій польоту частинки при вибраних конструкторно-кінематичних параметрах

Аналіз показує, що встановлення пальців під кутом змінює характер руху вороху з плоского на просторовий, що дозволяє перерозподілити енергію процесу і зменшити втрати. Відбувається зниження поперечного розсіювання, покращується локалізація бульб і зменшується їх травмування. Однак ефективність залежить від вибору кута β , який повинен визначатися як компроміс між умовами сепарації, енергетичними витратами та допустимим рівнем пошкоджень.

З іншого боку, введення кута β призводить до принципово нового ефекту – перехід від плоскої (2D) моделі процесу до просторової (3D). У класичних машинах рух бульби можна описати в площині $y-z$, тоді як у модифікованій конструкції необхідно враховувати всі три координати, рис. 3.3.

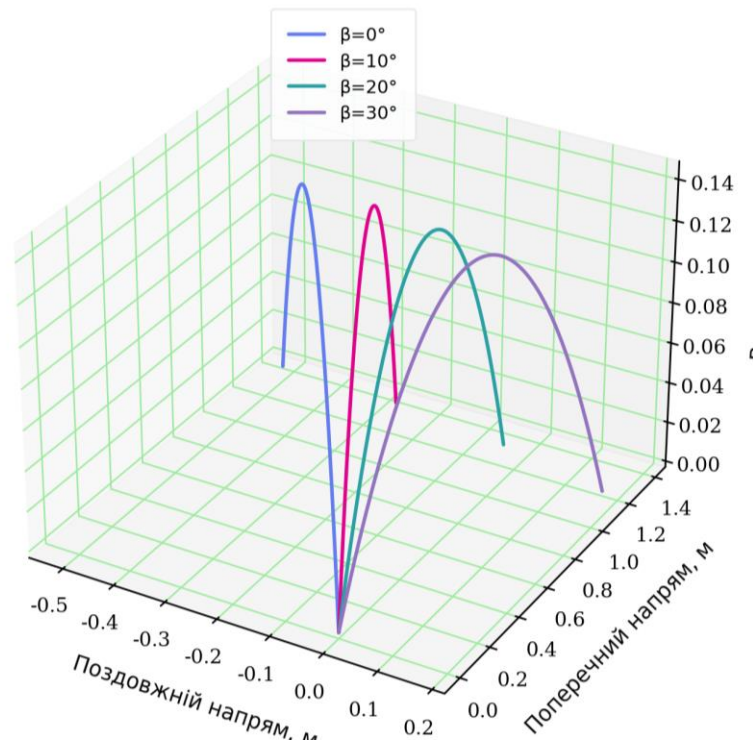


Рисунок 3.3 – 3-D траєкторії польоту при різних кутах нахилу пальців викидного колеса

Це означає, що в кожен момент часу швидкість частинки має вигляд

$$\vec{V}(t) = \begin{bmatrix} V_{0x} \\ V_{0y} \\ V_{0z} - gt \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Така форма руху приводить до того, що траєкторія бульби в просторі являє собою не просто параболу, а просторову криву, проєкція якої на поверхню поля має вигляд похилої траєкторії (еліптичного розсіювання).

Вище наведено графік (рис. 3.2) порівняння траєкторій польоту бульб для двох випадків: класична схема ($\beta=0$) і удосконалена схема ($\beta=20^\circ$).

З графіка видно, що для $\beta=0$ траєкторія більш “розлога”, бульба набирає значну поперечну швидкість; для $\beta=20^\circ$ крива стає нижчою і більш сконцентрованою; максимальна висота польоту практично не змінюється, але горизонтальна складова змінюється суттєво.

Виведемо залежність дальності польоту від кута β :

$$L_y(\beta) = \frac{2V_\omega^2 \sin \alpha \cos \beta}{g}, \quad (3.18)$$

$$L_x(\beta) = \frac{2V_\omega(V_\omega \sin \beta - V_a) \sin \alpha}{g}. \quad (3.19)$$

Характер залежностей: L_y – монотонно зменшується при збільшенні β ; L_x – переходить через нуль і можна підібрати такий кут, при якому бульби будуть попадати у визначений слід (колію), який зробив енергетичний засіб.

Траєкторія у плані (розсіювання вороху).

Проекція траєкторії на площину x – y :

$$x = V_{0x}t, \quad y = V_{0y}t. \quad (3.20)$$

Звідки.

$$y = \frac{V_{0y}}{V_{0x}}x. \quad (3.21)$$

Це рівняння прямої, тобто бульби розсіюються не симетрично, а під кутом.

За формою розсіювання: для класичної конструкції – широка смуга майже прямокутної форми; для нової – нахилений еліпс.

Для певного аналізу можна наступні графічні залежності, рис. 3.4.

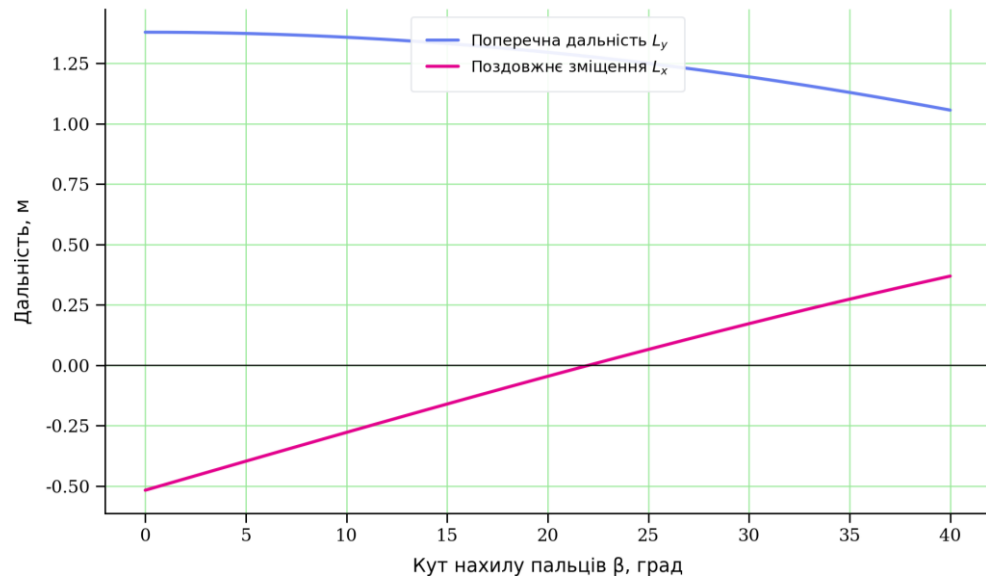


Рисунок 3.4 – Залежність дальності польоту бульби від кута β

Тепер виконаємо енергетичний аналіз з урахуванням розкладу швидкості.

При цьому вираз кінетичної енергії матиме вигляд

$$E = \frac{m}{2} (V_{0x}^2 + V_{0y}^2 + V_{0z}^2) . \quad (3.22)$$

Якщо розглядати у напрямках, то поперечна складова

$$E_y = \frac{mV_\omega^2 \cos^2 \beta}{2} . \quad (3.23)$$

При $\beta = 20^\circ$, тобто

$$\cos^2 20^\circ \approx 0.88 .$$

Звідси випливає, що втрати енергії на розкид знижуються на 12%.

Вплив взаємодії робочого органу на пошкодження картоплі.

Розглянемо максимальне ударне навантаження.

У класичному випадку

$$F_{max} \sim \frac{mV_w^2}{R} . \quad (3.24)$$

Відмінний ефект нової конструктивної схеми

$$F_n = F_{max} \cos \beta . \quad (3.25)$$

При $\beta=20^\circ$:

$$\cos 20^\circ \approx 0.94 .$$

Тобто, зменшення сили удару $\sim 6\%$. А з урахуванням контакту з ковзанням маємо менш різке співударення і реальне зменшення пошкоджень може бути 10–15%.

Проведений теоретичний аналіз показав, що встановлення пальців викидного колеса під кутом до поздовжньої осі машини є доцільним конструктивним рішенням, оскільки забезпечує перенаправлення частини кінетичної енергії вороху в поздовжній напрям, зменшує ширину бокового розсіювання, покращує умови непошкодження бульб і підвищує технологічну керованість процесу викидання. Таким чином, дана схема може бути рекомендована як основа для подальшого конструкторського та експериментального дослідження оптимального кута β .

3.3 Визначення втрат потужності на роботу ротора картоплекопача з нахиленими пальцями

Потужність, необхідна для приводу ротора картоплекопача, формується внаслідок виконання двох взаємопов'язаних енергетичних процесів. Перший із них пов'язаний з руйнуванням та деформацією ґрунтового пласта під дією пальців ротора, другий – з наданням кінетичної енергії бульбам і частинкам

грунту, які захоплюються робочими органами та викидаються в процесі їх подальшого переміщення. Саме тому сумарна потужність приводу є інтегральним показником, що відображає як фізико-механічні властивості ґрунту, так і геометрію та кінематику робочого органа.

У традиційних конструкціях викидних ротора чи колеса напрям пальців є, як правило, узгодженим із поздовжньою геометрією машини. У запропонованому варіанті пальці встановлюються під кутом $\beta = 20^\circ$ до поздовжньої осі руху агрегату. Така зміна орієнтації робочих елементів змінює не лише траєкторію руху вороху, а й структуру енергетичних витрат, оскільки частина енергії, яка в класичній схемі витрачається на поперечний розкид, у новій схемі перерозподіляється в поздовжній напрям. Це приводить до зменшення небажаних витрат та підвищення технологічної керованості процесу.

Загальну потужність, яка витрачається на роботу ротора, доцільно представити у вигляді суми двох складових: потужності на деформацію ґрунту та потужності на відкидання бульб і ґрунту. Такий підхід дає можливість окремо оцінити енергетичну доцільність кожного із процесів і надалі визначити, яким чином кут нахилу пальців впливає на сумарний енергетичний баланс.

$$N = N_d + N_v, \quad (3.26)$$

де N_d – потужність на деформацію ґрунту,

N_v – потужність на відкидання вороху.

Під час входження пальця в ґрунтовий пласт відбувається його локальне руйнування, розкриття та часткове зміщення. У класичному випадку для оцінювання цієї складової використовують питомий опір деформації, площу контакту, глибину обробки, кількість пальців та частоту їх обертання. Однак за наявності кута β сила, що створює руйнівну дію, уже не є повністю нормальною до поверхні пласта. Її ефективна складова зменшується пропорційно $\cos\beta$, тому реальна потужність на деформацію виявляється меншою, ніж у базовій конструкції.

$$F_{\text{еф}} = F \cos \beta. \quad (3.27)$$

У першому наближенні можна записати

$$N_{\text{д}} = N_{\text{д0}} \cdot \cos \beta. \quad (3.28)$$

де $N_{\text{д0}}$ – потужність на деформацію для класичної схеми. Для кута $\beta = 20^\circ$ маємо $\cos 20^\circ \approx 0.94$, тобто енергетичні витрати на деформацію зменшуються приблизно на 6 %. Фізично це означає, що частина зусилля пальця не йде на пряме руйнування ґрунту, а реалізується як зсувна дія, що є менш енергоємною.

Найбільш відчутний вплив кут нахилу пальців має на енергію відкидання бульб і ґрунту. У традиційній схемі кінетична енергія, що надається вороху, орієнтується переважно в поперечному напрямку, через що бульби розкидаються по значній ширині поля. У новій схемі ця енергія розкладається на дві складові: поперечну та поздовжню. Саме поперечна складова визначає ширину розсіювання, а отже, і частину непродуктивних енергетичних втрат.

Якщо швидкість викидання позначити через V , то поперечна складова швидкості становитиме

$$V_y = V \cos \beta. \quad (3.29)$$

Звідси потужність на відкидання можна подати як

$$N_{\text{в}} = N_{\text{в0}} \cdot \cos^2 \beta. \quad (3.30)$$

де $N_{\text{в0}}$ – потужність на відкидання для базової схеми. Для $\beta = 20^\circ$ маємо $\cos^2 20^\circ \approx 0.88$, тобто витрати енергії на відкидання зменшуються приблизно на 12 %. Це пояснюється тим, що частина кінетичної енергії спрямовується вздовж руху

агрегату, зменшуючи поперечне розсіювання вороху та покращуючи компактність його укладання.

Сумарна потужність, яка витрачається на роботу ротора, з урахуванням впливу кута нахилу пальців 20° можна прийняти відносний характер зміни складових у вигляді

$$N = 0.94N_{D0} + 0.88N_{B0}. \quad (3.31)$$

Тобто запропонована конструкція зменшує обидві складові енергетичних витрат, причому зниження потужності на відкидання є більш суттєвим, ніж зменшення потужності на деформацію ґрунту. Така закономірність є цілком логічною, оскільки саме траєкторія польоту бульб найбільш чутливо реагує на зміну орієнтації пальців.

Для базового значення максимальної потужності

$$N_{max} = 3.89 \text{ кВт},$$

орієнтовна оцінка для нової схеми становить

$$N_{new} \approx 3.5 \text{ кВт}.$$

тобто зменшення потужності сягає близько 10 %. Це є суттєвим позитивним ефектом, оскільки знижуються вимоги до приводу, підвищується надійність роботи трансмісії та створюється запас по потужності для роботи в більш важких умовах.

Для визначення потужності, яку необхідно підвести до вала відбору потужності трактора, слід урахувати втрати в елементах приводу. У загальному вигляді

$$N_{ввп} = \frac{N}{\eta_1 \cdot \eta_2}, \quad (3.32)$$

де η_1 – коефіцієнт корисної дії ланцюгової передачі, η_2 – коефіцієнт корисної дії запобіжної муфти. За прийнятих значень $\eta_1 = 0.96$ та $\eta_2 = 0.98$ отримаємо

$$N_{\text{ввп}} = \frac{3.5}{0.96 \cdot 0.98} \approx 3.72 \text{ кВт.}$$

Таким чином, для забезпечення стабільної роботи ротора в запропонованій конструкції достатньо меншої потужності, ніж у класичному варіанті, що підтверджує енергетичну доцільність встановлення пальців під кутом 20° .

На рис. 3.5 наведено залежність відносної потужності ротора від кута нахилу пальців β . Із графіка видно, що зі збільшенням кута зменшується як складова потужності на деформацію, так і складова потужності на відкидання. При цьому спад другої складової відбувається інтенсивніше, оскільки вона містить квадрат косинуса кута. Саме це забезпечує помітний енергетичний виграш для нової конструкції.

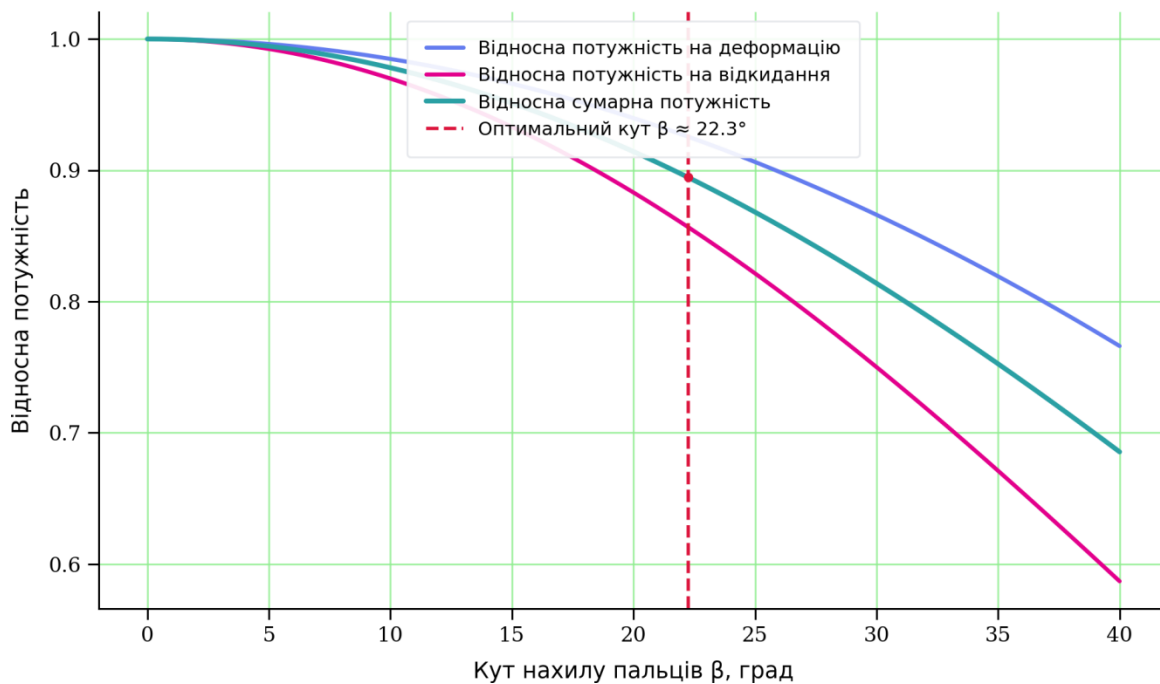


Рисунок 3.5 – Залежність відносної потужності ротора від кута нахилу пальців β

На рис. 3.6 подано залежність відносної ефективності роботи ротора від кута β . Ефективність у даному випадку розуміється як обернена величина до енергетичних витрат: чим менша потужність споживається, тим вища енергетична ефективність. Графік показує, що при збільшенні кута нахилу до певної межі ефективність підвищується, а далі темп покращення знижується. Це означає, що існує раціональна зона значень β , де досягається найкраще співвідношення між енергетичними витратами та якістю транспортування бороху.

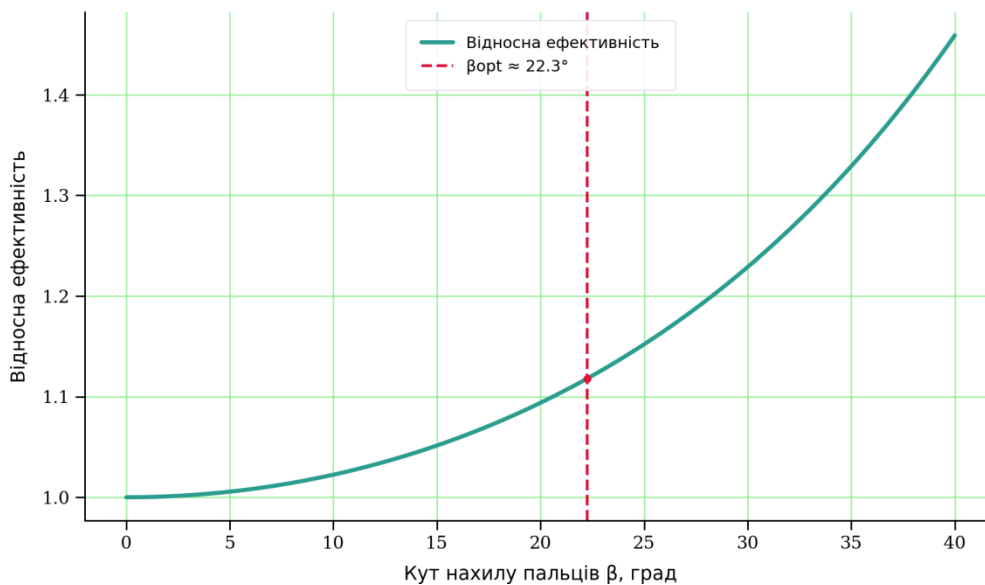


Рисунок 3.6 – Залежність відносної ефективності роботи ротора від кута нахилу пальців β

Проведений аналіз показав, що встановлення пальців ротора під кутом 20° є технічно та енергетично обґрунтованим рішенням. Така конструкція дозволяє зменшити потужність, необхідну для деформації ґрунту, а також значно скоротити втрати енергії на відкидання бульб і ґрунту. У результаті сумарна потужність приводу зменшується приблизно на 10 %, а потужність, необхідна на валу відбору потужності трактора, становить орієнтовно 3,72 кВт. Це створює сприятливі умови для стабільної роботи машини, зменшує навантаження на трансмісію та підвищує загальну експлуатаційну надійність картоплекопача.

3.4 Розрахунок енергетичних витрат при виконанні процесу підкопування бульбоносного пласта

Щоб теоретично оцінити енергетичні затрати, необхідні для здійснення процесу підкопування бульбоносного пласта, доцільно розглянути взаємодію робочого органа машини – лемеша – з ґрунтовим середовищем. На першому етапі аналізу розглядається робочий хід лемеша, тобто його заглиблення та переміщення у непорушений (непідкопаний) пласт ґрунту. Саме цей етап визначає основну частку енергетичних витрат, оскільки супроводжується руйнуванням структури ґрунту, подоланням його опору та переміщенням частинок ґрунтової маси.

Для побудови розрахункової моделі приймається, що леміш взаємодіє з ґрунтом як клиновидне тіло, яке впроваджується у пружнопластичне середовище. При цьому ґрунт розглядається як суцільне середовище з певними механічними характеристиками: питомим опором різанню, коефіцієнтом внутрішнього тертя, зчепленням частинок і щільністю. Переміщення лемеша призводить до утворення зони деформації перед його ріжучою кромкою, де виникають напруження, достатні для порушення зв'язків між частинками ґрунту та відокремлення шару пласта.

У процесі заглиблення лемеша в ґрунт виникає сила опору, яка є результатом сумарної дії декількох складових: опору різанню, сил тертя ґрунту по робочій поверхні лемеша та сил інерції частинок ґрунту, що переміщуються. Розмір цієї сили залежить від геометричних параметрів лемеша (кут встановлення, ширина захвату, форма поверхні), а також від глибини його занурення і фізико-механічних властивостей ґрунту.

Особливістю даного процесу є те, що через наявність нахилених робочих елементів (зокрема пальців колеса в удосконаленій конструкції) змінюється характер взаємодії з ґрунтом. Це призводить до нерівномірного розподілу напружень у зоні різання та формування просторового напруженого стану, що, у свою чергу, впливає на величину енергетичних витрат. Частина енергії

витрачається не лише на відокремлення пласта, але й на його додаткове перемішування та зсув у поперечному напрямку.

У рамках побудованої моделі припускається, що рух лемеша є усталеним, а швидкість його переміщення – сталою. Це дає змогу визначити роботу, яка виконується при переміщенні лемеша на певну відстань у ґрунті, як добуток сили опору на шлях переміщення. Відповідно, потужність, необхідна для виконання процесу підкопування, визначається як добуток сили опору на швидкість руху агрегату.

Таким чином, побудова моделі взаємодії лемеша з ґрунтовим пластом дозволяє перейти до аналітичного визначення сили опору підкопуванню та відповідних енергетичних витрат. Надалі це дає можливість оцінити вплив конструктивних параметрів робочого органа, зокрема кута нахилу його елементів, на загальну енергоємність технологічного процесу та обґрунтувати доцільність прийнятих конструктивних рішень.

Скористаємося методикою, що наведена у роботі [7,8]

Побудуємо модель взаємодії пасивного лемеша ґрунтом, рис. 3.7

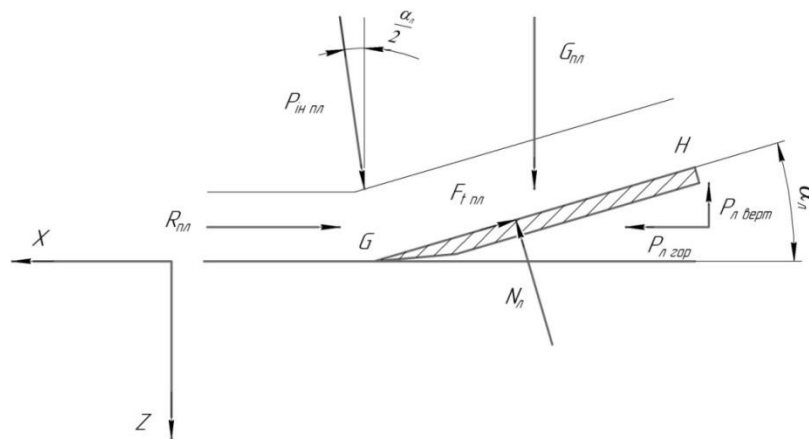


Рисунок 3.7 – Схема взаємодії лемеша з бульбоносним ґрунтом

Математичну модель взаємодії робочого органа з ґрунтовим середовищем будуюмо, виходячи з ряду допущень, які дозволяють спростити реальний процес до розрахункової схеми, придатної для аналітичного опису. Приймається, що непідкопаний бульбоносний пласт ґрунту чинить опір

переміщенню лемеша, причому цей опір направлений уздовж осі X і протидіє поступальному руху робочого органа (рис. 3.7).

Окрім цього враховується сила тертя, що виникає на межі контакту між поверхнею лемеша та ґрунтовим пластом. Ця сила спрямована протилежно напрямку переміщення та залежить від нормального навантаження і фізико-механічних властивостей ґрунту. Важливим чинником у формуванні напруженого стану пласта є також його власна вага G , яка діє у вертикальному напрямку та впливає на величину нормальних реакцій на робочій поверхні лемеша.

Додатково у розрахунковій моделі враховується сила інерції P_i , що виникає внаслідок нерівномірності руху лемеша. При наявності прискорення ця сила може суттєво змінювати загальний характер взаємодії, сприяючи руйнуванню структури ґрунту та зменшенню сил зчеплення між його частинками. Напрямок дії інерційної сили визначається характером руху лемеша і, в загальному випадку, може мати як горизонтальну, так і вертикальну складові.

Таким чином, для опису процесу підкопування вводяться узагальнені складові сили, які забезпечують переміщення лемеша у ґрунтовому середовищі: P_x – горизонтальна складова, що долає опір різанню та переміщенню пласта, і P_z – вертикальна складова, що визначає умови заглиблення та підняття ґрунтової маси.

З метою отримання розрахункових залежностей усі діючі сили проєктуються на координатні осі X (горизонтальну) та Z (вертикальну). Такий підхід дозволяє розкласти складний просторовий напружений стан на дві взаємно перпендикулярні складові та окремо проаналізувати рівновагу системи в кожному напрямку.

У результаті проєктування сил на відповідні осі отримуємо систему рівнянь рівноваги, яка описує взаємодію лемеша з бульбоносним пластом ґрунту та дозволяє визначити необхідні зусилля для здійснення процесу підкопування. Це, у свою чергу, створює можливість перейти до подальшого

визначення енергетичних витрат та оцінки ефективності роботи даного робочого органа з урахуванням його конструктивних особливостей.

Тут позначено:

R_{nl} – опір переміщенню лемеша

F_{tnl} – сила тертя між пластом ґрунту та площиною лемеша;

G_{nl} – вага пласта, що знаходиться на площині лемеша;

P_{innl} – сила інерції пласта

$P_{лгор}$, $P_{лверт}$ – горизонтальна та вертикальна складові сили для переміщення лемеша при підкопуванні пласта

$$-R_{nl} - P_{innl} \sin \frac{\alpha_l}{2} - F_{tnl} \cos \alpha_l + P_{лгор} = 0 ; \quad (3.33)$$

$$P_{innl} \cos \frac{\alpha_l}{2} - F_{tnl} \sin \alpha_l + G_{nl} - P_{лверт} = 0 . \quad (3.34)$$

Для визначення величини зусилля, необхідного для забезпечення переміщення лемеша у процесі підкопування бульбоносного пласта, скористаємося раніше отриманим рівнянням (3.33). Дане рівняння відображає умови рівноваги системи сил, що діють на робочий орган, і дозволяє встановити шукану силову характеристику процесу.

З метою подальшого аналізу виразимо з цього рівняння шукану силу, яку необхідно прикласти для переміщення лемеша в ґрунтовому масиві. Для цього здійснимо відповідні алгебраїчні перетворення, виділивши дану силу як невідому величину.

Після цього, для більш детального дослідження структури рівняння та впливу окремих складових, перепишемо залежність (5.35) у розгорнутому вигляді. Такий підхід дає можливість окремо проаналізувати внесок кожної сили (опору ґрунту, тертя, ваги пласта та інерційних складових) у формування

сумарного зусилля, а також виявити найбільш суттєві фактори, які визначають енергоємність процесу підкопування.

Отриманий розгорнутий вираз надалі використовується для числового розрахунку та оцінки енергетичних витрат із урахуванням конструктивних і кінематичних параметрів робочого органа.

$$P_{л\text{гор}} = R_{нл} + a_G m_{нл} \sin \frac{\alpha_l}{2} + N_l \operatorname{tg} \varphi_{нл} \cos \alpha_l, \quad (3.35)$$

де a_G – прискорення, що передає леміш в т. G пласту ґрунту;

$m_{нл}$ – маса пласта ґрунту, що знаходиться на площині лемеша;

α_l – кут постановки лемеша до горизонту;

$\varphi_{нл}$ – кут тертя;

N_l – нормальна сила, що виникає від тиску пласта на поверхню лемеша

$$N_l = a_G m_{нл} \cos \frac{\alpha_l}{2} + m_{нл} g \cos \alpha_l = m_{нл} \left(a_G \cos \frac{\alpha_l}{2} + g \cos \alpha_l \right). \quad (3.36)$$

Невизначеною складовою у загальному балансі сил залишається опір, який чинить недеформований (непорушений) пласт ґрунту під час проникнення в нього ріжучої кромки лемеша. Саме ця складова є однією з основних, оскільки вона безпосередньо пов'язана з процесом початкового руйнування структури ґрунту та формування зони різання.

Для оцінювання величини зазначеного опору доцільно скористатися аналітичними залежностями, наведеними у фаховій літературі, які описують граничні (максимальні) значення сили опору різанню ґрунту. Такі залежності враховують фізико-механічні властивості ґрунтового середовища, зокрема його зчеплення, щільність, кут внутрішнього тертя, а також геометричні параметри робочого органа і умови його взаємодії з ґрунтом.

Використання саме максимального значення сили опору є обґрунтованим, оскільки дозволяє врахувати найбільш несприятливі умови роботи лемеша та забезпечує необхідний запас надійності при подальших розрахунках енергетичних витрат і міцності елементів конструкції. Отримане значення надалі застосовується при визначенні сумарного зусилля, необхідного для підкопування бульбоносного пласта, а також при оцінці потужності, що повинна розвиватися приводом машини.

$$R_{пл} = h_{пл} b_{пл} \sigma_{ст}, \quad (3.37)$$

де $h_{пл}$, $b_{пл}$ – відповідно розміри поперечного перетину пласта;

$\sigma_{ст}$ – тимчасовий опір ґрунту стиску.

Після отримання аналітичних залежностей (3.36) та (3.37), що описують окремі складові силової взаємодії лемеша з ґрунтовим пластом, виконуємо їх підстановку в основне рівняння рівноваги (3.35). Такий підхід дозволяє звести розрізнені елементи силової моделі до єдиного узагальненого виразу, який характеризує повну картину процесу підкопування.

У результаті підстановки та подальших алгебраїчних перетворень отримуємо розрахункову залежність для визначення горизонтальної складової сили, необхідної для переміщення лемеша у поздовжньо-горизонтальній площині. Саме ця складова є визначальною при оцінюванні тягового опору машини, оскільки вона безпосередньо пов'язана з подоланням опору ґрунту при різанні та переміщенні бульбоносного пласта.

Отриманий вираз дозволяє врахувати вплив основних факторів процесу, зокрема фізико-механічних властивостей ґрунту, геометричних параметрів лемеша, умов контакту та наявності додаткових силових складових (тертя, ваги пласта, інерційних навантажень). Це створює передумови для подальшого числового аналізу та визначення енергетичних витрат, необхідних для реалізації процесу підкопування.

Таким чином, сформована залежність є базовою для оцінки тягового навантаження на робочий орган і виступає вихідною при визначенні потужності приводу та оптимізації конструктивних параметрів машини.

$$P_{л\text{гор}} = h_{нл} b_{нл} \sigma_{ст} + a_G m_{нл} \sin \frac{\alpha_{л}}{2} + m_{нл} \left(a_G \cos \frac{\alpha_{л}}{2} + g \cos \alpha_{л} \right) \operatorname{tg} \varphi_{нл} \cos \alpha_{л}. \quad (3.38)$$

Аналогічний підхід застосовуємо і для визначення вертикальної складової сили, що забезпечує переміщення лемеша у процесі підкопування пласта. Для цього скористаємося рівнянням (3.34), яке описує умови рівноваги сил у вертикальній площині.

Шляхом відповідних перетворень із виразу (3.34) виділяємо шукану вертикальну складову сили, після чого подаємо її у вигляді, придатному для подальшого аналізу. Отримана залежність дає змогу оцінити величину зусилля, необхідного для заглиблення лемеша, підняття та часткового переміщення бульбоносного шару ґрунту у вертикальному напрямку.

Слід зазначити, що вертикальна складова сили визначається впливом ряду факторів, серед яких вагома роль належить вазі ґрунтового пласта, нормальним реакціям з боку ґрунту, а також силам тертя та інерційним навантаженням, що виникають у процесі роботи. У випадку використання вібраційного руху робочого органа ці складові можуть істотно змінюватися, що необхідно враховувати при побудові розрахункової моделі.

Отриманий вираз для вертикальної складової сили, разом із горизонтальною складовою, утворює повну систему силових параметрів процесу підкопування. Це дозволяє більш точно оцінити умови роботи лемеша, визначити сумарне навантаження на конструкцію та здійснити обґрунтований розрахунок енергетичних витрат.

$$P_{л\text{верт}} = a_G m_{нл} \cos \frac{\alpha_{л}}{2} - m_{нл} \left(a_G \cos \frac{\alpha_{л}}{2} + g \cos \alpha_{л} \right) \operatorname{tg} \varphi_{нл} \sin \alpha_{л} + m_{нл} g. \quad (3.39)$$

Продемонструємо результати аналітичної моделі на прикладі графічних залежностей, рис. 3.8

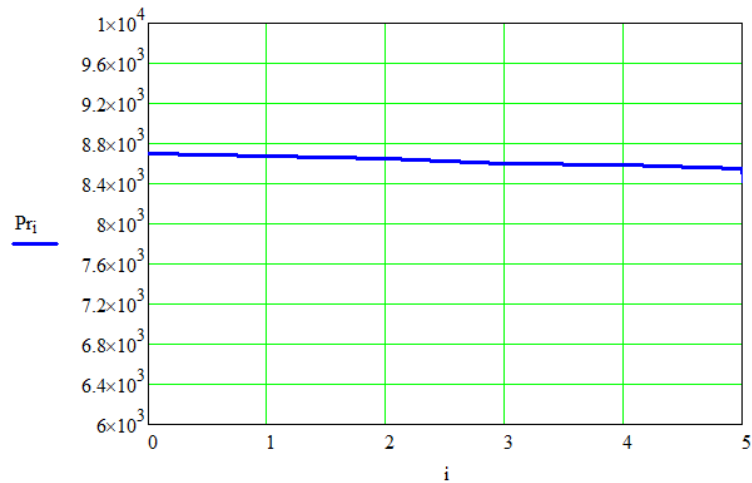


Рисунок 3.8 – Зміна горизонтального опору переміщенню лемеша (Н)

Залежність на рис. 3.8 показує, що опір горизонтальному пересіченню лемеша змінюється в межах 8,7 кН. Що добре корелює з відомими результатами аналогічних досліджень.

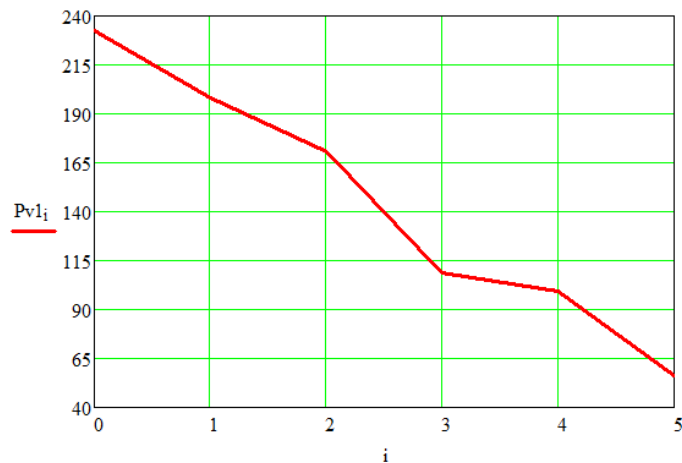


Рисунок 3.9 – Зміна вертикального опору переміщенню лемеша (Н)

На противагу попереднім результатам, вертикальна складова опору переміщенню лемеша є порівняно незначною і максимальне значення складає 2322 Н. Цей максимум спостерігається в момент входження лемеша в пласт ґрунту без його скидання викидним колесом.

Узагальнюючим чинником є віднаходження потужності. Що затрачається

на переміщення лемеша, рис. 3.10.

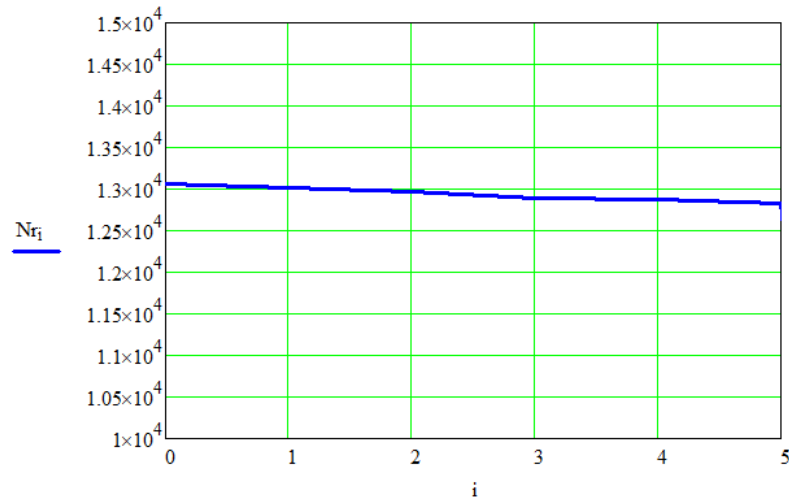


Рисунок 3.10 – Зміна потужності при переміщенні лемеша (Вт)

Отримане значення потужності показане при поступальній швидкості машини 1,5 м/с (5,4 км/год). Значення потужності коливається в межах 13 кВт.

Сумарна потужність для приводу картоплекопача буде складатися з потужності на привод викидного колеса та переміщення машини

$$N_{\text{заг}} = 1,1(N_{\text{кол}} + N_{\text{лем}}), \quad (3.40)$$

де 1,1 – коефіцієнт, що враховує опори на перекочування машини та інші невраховані опори.

У підсумку, матимемо

$$N_{\text{заг}} = 1,1(3,72 + 13) = 18,4 \text{ кВт.}$$

Слід зазначити, що роторні копачі характеризуються підвищеним рівнем енергоспоживання порівняно з традиційними лемішними конструкціями, що зумовлено додатковими витратами енергії на привід ротора, сепарацію ґрунтової маси та переміщення бульб. У середньому їх енерговитрати перевищують базові на 10–25 %, що необхідно враховувати при розрахунках потужності приводу та оцінці енергоефективності машини.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Небезпеки, що виникають при виконанні технологічної операції збирання картоплі картоплекопачами викидного типу

Технологічна операція збирання картоплі картоплекопачами викидного типу належить до робіт підвищеної небезпеки, оскільки поєднує взаємодію працівника з рухомими механізмами, обертовими елементами, навісним обладнанням, а також із ґрунтовим середовищем, що характеризується підвищеним пиловиділенням, вібрацією, нерівністю поверхні та можливістю виникнення аварійних ситуацій. Відповідно до чинних Правил охорони праці у сільськогосподарському виробництві, роботодавець зобов'язаний забезпечити безпечні та нешкідливі умови праці, а обладнання, що використовується під час виконання технологічних операцій, має бути технічно справним, відповідати вимогам безпеки та експлуатуватися згідно з експлуатаційною документацією.

Картоплекопачі викидного типу, на відміну від простих пасивних копачів, мають активні робочі органи або механізми, що забезпечують викидання бульб і ґрунту на поверхню поля або в бік від агрегату. Саме наявність таких елементів суттєво збільшує кількість потенційно небезпечних факторів: рухомі деталі створюють ризик захоплення одягу чи частин тіла працівника, під час викидання ґрунту та бульб виникає небезпека травмування уламками ґрунту або камінням, а при роботі на нерівному полі посилюється загроза втрати стійкості агрегату. Загальні вимоги безпеки до сільськогосподарських машин, встановлені ДСТУ EN ISO 4254-1:2017, передбачають обов'язковий захист рухомих частин, безпечне компонування органів керування, наявність огорожень та виключення доступу працівника до небезпечних зон під час роботи.

Однією з основних небезпек є механічне травмування працівника внаслідок контакту з лемешем, викидним ротором, прутковими або транспортерними елементами, приводними валами, ланцюгами, шківками та

муфтами. Під час роботи картоплекопача ці вузли знаходяться у русі, а отже, здатні створювати зони захоплення, защемлення, порізу або удару. Нормативні документи вимагають, щоб усі небезпечні частини машин були закриті захисними кожухами або іншими огороженнями, а експлуатація машин без захисту рухомих елементів не допускається. Це особливо актуально для копачів викидного типу, оскільки викид бульб і ґрунту пов'язаний з інтенсивним рухом робочих органів і високою ймовірністю потрапляння людини у небезпечну зону під час очистки, огляду або регулювання.

Іншою суттєвою небезпекою є травмування від предметів, що вилітають із зони роботи машини. При підкопуванні та викиданні картоплі разом із ґрунтом можливе відокремлення твердих включень, каміння, грудок ґрунту, часток рослинних решток та металевих елементів, які можуть бути викинуті з великою швидкістю. Саме тому при роботі картоплекопачів викидного типу забороняється перебування людей у небезпечній зоні позаду та збоку агрегату, а також у зоні можливого розльоту ґрунту й сторонніх предметів. Такі вимоги відповідають загальним принципам безпеки сільськогосподарських машин, згідно з якими конструкція повинна виключати доступ до небезпечних зон і зменшувати ризик контактного та дистанційного травмування.

Під час роботи картоплекопача суттєву небезпеку становить і взаємодія з трактором або мотоблоком, до якого агрегується машина. Небезпечними є операції з приєднання та від'єднання навісного обладнання, запуск двигуна, включення валу відбору потужності, регулювання робочої глибини та переведення машини у транспортне положення. НПАОП 01.0-1.02-18 встановлює, що експлуатація сільськогосподарської техніки має здійснюватися з урахуванням експлуатаційної документації, а несправні машини та обладнання не допускаються до роботи. Крім того, трактор і агрегат повинні бути обладнані справними системами захисту, а запуск двигуна при ввімкненій передачі або за відсутності блокувальних пристроїв є неприпустимим.

Під час збирання картоплі небезпека також пов'язана з високим рівнем запиленості робочої зони. Робота в сухому ґрунті, особливо при викиді пласта,

призводить до інтенсивного підняття пилу, що погіршує видимість, підвищує втомлюваність оператора, подразнює органи дихання та очі й може спричиняти загострення хронічних захворювань дихальної системи. У нормативних актах з охорони праці підкреслюється необхідність врахування шкідливих виробничих факторів, пов'язаних із пилом, а також забезпечення працівників засобами індивідуального захисту органів дихання та зору в разі наявності таких факторів.

Не менш значущою є небезпека, пов'язана з шумом і вібрацією. Картоплекопачі викидного типу, особливо ті, що мають активні робочі органи, створюють підвищені динамічні навантаження на раму, привід і агрегатувальний трактор. Вібрація передається на робоче місце оператора, що може спричиняти стомлення, зниження уваги, порушення координації рухів і, в довготривалому вимірі, розвиток професійно зумовлених захворювань. ДСТУ EN ISO 4254-1:2017 окремо регламентує вимоги щодо шуму та вібрації, а також вимагає, щоб органи керування, станція оператора та конструкція машини забезпечували безпечну й ергономічну роботу.

Особливу небезпеку під час збирання картоплі становить можливість перекидання або втрати стійкості агрегату, особливо на схилах, на зволжених ділянках, при наїзді на нерівності чи каміння. Картоплекопач викидного типу має значну масу та працює в умовах нерівномірного опору ґрунту, тому у випадку неправильного агрегування або перевантаження можливе зміщення центру мас системи трактор–машина. У зв'язку з цим нормативні документи вимагають дотримання правил агрегування, справності причіпних та навісних пристроїв, а також застосування машин лише в межах, на які вони розраховані. При цьому особливо небезпечними є пуски, зупинки та повороти агрегату під навантаженням.

До небезпечних факторів слід віднести і ризики, пов'язані з технічним обслуговуванням та очищенням машини під час роботи. У практиці експлуатації сільськогосподарських машин нерідко трапляються травми під час спроби очистити забиті робочі органи, підтягнути ланцюг, перевірити

натяг паса або усунути сторонній предмет без повної зупинки приводу. Нормативні вимоги однозначно забороняють обслуговування, регулювання або очищення небезпечних частин машини при увімкненому приводі, а будь-яке втручання в роботу картоплекопача допускається лише після зупинки двигуна, відключення приводу та забезпечення неможливості випадкового пуску.

Окрему групу становлять ергономічні та організаційні небезпеки. Під час збирання картоплі працівники часто виконують значний обсяг ручних операцій: підчищення бульб, складання їх у тару, переміщення мішків, усунення забур'янених решток, спостереження за якістю викопування. Такі дії супроводжуються статичними й динамічними фізичними навантаженнями, роботою в зігнутому положенні, тривалим перебуванням у вимушеній позі та підвищеною втомлюваністю. У поєднанні з високою температурою повітря, пилом та шумом це зумовлює зниження уваги й підвищує вірогідність помилки оператора. Тому під час організації робіт необхідно встановлювати раціональний режим праці та відпочинку, забезпечувати інструктаж працівників, допуск до робіт лише осіб, які пройшли навчання і медичний огляд, а також використовувати відповідний спецодяг і спецвзуття.

З погляду безпеки життєдіяльності важливими є також природно-кліматичні фактори. Під час збирання картоплі працівники працюють у відкритому полі, тому можуть зазнавати впливу високої або низької температури, сонячного випромінювання, вітру, підвищеної вологості після дощу, слизького ґрунту та погіршення зчеплення з поверхнею. Усі ці чинники підвищують ризик падінь, переохолодження або перегрівання. Нормативна база з охорони праці вимагає врахування умов зовнішнього середовища при організації сільськогосподарських робіт, а також недопущення виконання технологічних операцій у стані, коли метеорологічні умови створюють пряму загрозу безпеці працівників або надійності роботи машин.

Отже, при виконанні технологічної операції збирання картоплі картоплекопачами викидного типу формуються численні небезпечні й шкідливі виробничі фактори: механічні, динамічні, пилові, шумові, вібраційні,

ергономічні та організаційні. Їхнє виникнення зумовлене конструктивними особливостями машини, характером взаємодії з ґрунтом і підвищеною інтенсивністю технологічного процесу. Тому безпечне виконання робіт можливе лише за умови суворого дотримання вимог НПАОП 01.0-1.02-18, загальних вимог ДСТУ EN ISO 4254-1:2017, а також експлуатаційної документації конкретної машини.

Збирання картоплі картоплекопачами викидного типу супроводжується підвищеним рівнем небезпеки через наявність рухомих робочих органів, викид ґрунту та бульб, роботу в запиленому середовищі, дію шуму, вібрації та можливість травмування під час агрегування, регулювання й технічного обслуговування. Найбільш небезпечними є зони біля приводних механізмів, лемеша, викидного елемента, карданної передачі та місця проходження потоку ґрунту й бульб. У зв'язку з цим обов'язковими є огороження небезпечних елементів, використання справної техніки, дотримання правил безпечної експлуатації, проведення інструктажу, забезпечення ЗІЗ та недопущення працівників до небезпечних зон під час роботи машини.

4.2 Заходи охорони праці при виконанні технологічної операції збирання картоплі картоплекопачами викидного типу

Виконання технологічної операції збирання картоплі картоплекопачами викидного типу супроводжується впливом комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що зумовлено наявністю рухомих робочих органів, динамічних навантажень, викиду ґрунтової маси, підвищеної запиленості, шуму та вібрації. Запобігання виникненню травмонебезпечних ситуацій і усунення потенційних небезпек має ґрунтуватися на системному застосуванні організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів відповідно до вимог НПАОП 01.0-1.02-18 «Правила охорони праці у сільськогосподарському

виробництві» та ДСТУ EN ISO 4254-1:2017, які вимагають безпечної конструкції машин і належної організації праці.

Одним із ключових напрямків запобігання небезпекам є правильна організація технологічного процесу та підготовка персоналу. До виконання робіт допускаються лише особи, які пройшли навчання, інструктажі з охороною праці та медичний огляд, що дозволяє знизити ризик помилкових дій оператора. Особливе значення має забезпечення чіткої взаємодії між механізатором і допоміжними працівниками, яка повинна здійснюватися за допомогою узгоджених сигналів і постійного візуального контролю. Не допускається перебування сторонніх осіб у зоні роботи машини, оскільки картоплекопачі викидного типу формують небезпечну зону розльоту ґрунту і твердих включень.

Для запобігання механічному травмуванню першочергове значення мають технічні заходи, спрямовані на усунення доступу до небезпечних елементів машин. Відповідно до вимог стандартів, усі обертові та рухомі частини, такі як карданні вали, ланцюгові передачі, редуктори та роторні робочі органи, повинні бути надійно огорожені кожухами.

Експлуатація машин без захисних огорожень або з їх пошкодженням не допускається, оскільки це створює безпосередню загрозу потрапляння працівника у зону захоплення. Крім того, для зниження ризику аварійних ситуацій машина повинна бути оснащена запобіжними муфтами, які обмежують передання перевантаження, а також засобами аварійного вимкнення приводу.

Важливим заходом є забезпечення належного технічного стану агрегату, що дозволяє попередити виникнення небезпечних ситуацій. Перед початком роботи необхідно проводити технічний огляд машини, перевіряючи надійність з'єднання картоплекопача з трактором, справність гідросистеми, кріплення робочих органів, а також відсутність сторонніх предметів у робочій зоні. Забороняється використання несправної техніки або обладнання з дефектами,

оскільки це може призвести до раптового руйнування вузлів або втрати керованості агрегату.

Значна частина небезпек пов'язана з експлуатаційними режимами роботи машини, тому важливим заходом є дотримання оптимальних технологічних параметрів. Робоча швидкість руху агрегату повинна відповідати технічним характеристикам машини та умовам ґрунту, оскільки перевищення швидкості призводить до зростання динамічних навантажень і неконтрольованого викиду ґрунту. Під час роботи оператор повинен постійно контролювати стан машини, реагуючи на сторонні шуми, вібрацію або зниження якості викопування. У разі виникнення відхилень необхідно негайно зупинити агрегат і усунути несправність.

Особливо важливим заходом є недопущення виконання будь-яких регулювальних або очищувальних робіт під час руху машини. Потенційна небезпека виникає при спробах очистити робочі органи від ґрунту чи рослинних решток без зупинки агрегату. У таких випадках існує високий ризик захоплення одягу або кінцівок рухомими частинами. Тому всі роботи з технічного обслуговування та очищення повинні виконуватися лише після повного вимкнення двигуна, відключення приводу та фіксації агрегату в безпечному положенні.

Найбільш небезпечною зоною у картоплекопачів викидного типу є зона викиду бульб і ґрунту. Для усунення ризику травмування необхідно дотримуватися безпечних відстаней і не допускати присутності людей позаду або збоку машини під час її роботи. Допоміжні операції, такі як підбирання бульб або очищення поля, повинні виконуватися лише після повної зупинки агрегату. Це дозволяє виключити дію факторів, пов'язаних із вилітанням каміння і грудок ґрунту.

З метою запобігання аварійним ситуаціям при агрегуванні картоплекопача з трактором необхідно дотримуватися правил безпечного зчеплення і розчеплення машин. Усі операції з навішування обладнання повинні виконуватися на рівному майданчику, при вимкненому двигуні та

заблокованому русі трактора. Надійність кріплення перевіряється перед початком руху, що дозволяє уникнути самовільного від'єднання машини під час роботи.

Суттєвим фактором ризику є вплив шкідливих виробничих чинників, зокрема пилу, шуму та вібрації. Робота в сухих ґрунтових умовах супроводжується підвищеним пиловиділенням, що негативно впливає на органи дихання і зір працівника. Для усунення цього впливу необхідно застосовувати засоби індивідуального захисту, зокрема респіратори та захисні окуляри. Підвищений рівень шуму і вібрації характерний для машин із активними робочими органами, що може призводити до перевтоми та зниження концентрації уваги. У зв'язку з цим необхідно використовувати засоби захисту слуху, а також дотримуватися раціонального режиму праці і відпочинку.

Важливим заходом є забезпечення працівників засобами індивідуального захисту. Спецодяг повинен щільно прилягати до тіла і не мати вільних елементів, які можуть бути захоплені рухомими частинами машини. Робоче взуття повинно забезпечувати стійкість на нерівній поверхні поля, а рукавиці – захист рук від механічних пошкоджень. Використання засобів індивідуального захисту дозволяє значно зменшити ризик травмування та вплив шкідливих факторів.

Для запобігання пожежонебезпечним ситуаціям необхідно контролювати технічний стан паливної системи, не допускати витоків пального та мастильних матеріалів, а також регулярно очищати машину від рослинних залишків. Наявність вогнегасника на агрегаті є обов'язковою умовою безпечної експлуатації сільськогосподарської техніки.

У разі виникнення аварійної ситуації або нещасного випадку основними заходами є негайна зупинка агрегату, відключення двигуна, усунення джерела небезпеки та надання першої допомоги потерпілим. Подальші дії повинні здійснюватися відповідно до встановленого порядку розслідування нещасних випадків.

Таким чином, запобігання та усунення потенційних небезпек при збиранні картоплі картоплекопачами викидного типу базується на комплексному застосуванні технічних і організаційних заходів, спрямованих на виключення контактів працівника з небезпечними зонами, забезпечення справності машин і дотримання встановлених режимів роботи. Системне виконання зазначених вимог дозволяє значно знизити рівень виробничого травматизму, підвищити надійність роботи техніки та ефективність технологічного процесу в цілому.

4.3 Підвищення екологічної безпеки при збиранні картоплі

Технологічна операція збирання картоплі є важливою складовою агровиробництва, проте поряд із забезпеченням урожайності вона супроводжується певним негативним впливом на навколишнє середовище. Основними екологічними проблемами під час збирання є порушення структури ґрунту, підвищення рівня запиленості повітря, деградаційні процеси у ґрунтовому покриві, витоки паливно-мастильних матеріалів, а також шумовий і вібраційний вплив. У зв'язку з цим підвищення екологічної безпеки при використанні картоплекопачів, особливо викидного типу, є актуальним завданням, що потребує комплексного підходу.

Одним із основних напрямків підвищення екологічної безпеки є зменшення негативного впливу на ґрунт. Під час роботи картоплекопачів відбувається інтенсивне механічне руйнування структури ґрунту, що може призводити до його ущільнення, зниження пористості та погіршення водно-повітряного режиму. Особливо це характерно для важких та вологих ґрунтів, де робочі органи машин створюють значні напруження. Для зменшення цих негативних наслідків доцільно застосовувати оптимальні режими роботи машин, зокрема зменшувати глибину обробітку до необхідного мінімуму, а також використовувати робочі органи з удосконаленою геометрією, які забезпечують більш м'який вплив на ґрунтовий пласт. Важливим фактором є

також правильний вибір часу збирання – роботи повинні проводитися за оптимальної вологості ґрунту, що дозволяє уникнути його надмірного ущільнення.

Іншим важливим аспектом є зменшення ерозійних процесів. Під час збирання картоплі, особливо на схилах, відкрита поверхня ґрунту стає вразливою до водної та вітрової ерозії. Для запобігання цьому необхідно дотримуватися напрямку руху агрегату впоперек схилу, а також використовувати технологічні прийоми, які забезпечують збереження частини рослинних решток на поверхні поля. Такі заходи сприяють укріпленню верхнього шару ґрунту та зменшенню його знесення під дією атмосферних факторів.

Суттєве значення для екологічної безпеки має боротьба із запиленістю повітря. Робота картоплекопачів викидного типу супроводжується інтенсивним утворенням пилу, особливо в сухих умовах. Пил негативно впливає не лише на працівників, але й на навколишнє середовище, оскільки забруднює атмосферне повітря та може осідати на рослинності. Для зменшення пиловиділення доцільно застосовувати агротехнічні заходи, такі як зволоження ґрунту перед збиранням або використання машин із удосконаленими сепарувальними робочими органами, що забезпечують більш плавний рух ґрунту. Крім того, важливо обмежувати швидкість руху агрегату, оскільки її зростання прямо впливає на інтенсивність утворення пилу.

Не менш важливою є проблема забруднення довкілля паливно-мастильними матеріалами. У процесі експлуатації сільськогосподарської техніки можуть виникати витoki палива, мастил або гідравлічних рідин, які потрапляють у ґрунт і негативно впливають на його біологічну активність. Для запобігання цьому необхідно забезпечити належний технічний стан машин, регулярно перевіряти герметичність паливних і гідравлічних систем, а також використовувати екологічно безпечні мастильні матеріали. У разі виявлення витоків необхідно негайно усунути несправності та провести очищення забрудненої ділянки.

Важливим напрямком підвищення екологічної безпеки є зниження шумового та вібраційного впливу. Робота картоплекопачів супроводжується значним рівнем шуму, який негативно впливає як на працівників, так і на навколишню екосистему. Постійний шум може порушувати поведінку тварин і птахів, особливо в сільській місцевості. Для зменшення цього впливу доцільно застосовувати сучасні машини з удосконаленими конструкціями приводів, зменшеним рівнем вібрації та шуму, а також проводити своєчасне технічне обслуговування агрегатів, що дозволяє уникнути додаткових шумових ефектів через зношення деталей.

Одним із ключових факторів екологічної безпеки є раціональне використання енергетичних ресурсів. Надлишкове споживання палива не лише збільшує витрати, а й призводить до зростання викидів шкідливих речовин у атмосферу. Для підвищення енергоефективності слід оптимізувати режими роботи агрегату, використовувати трактори з відповідною потужністю, уникати перевантаження машин і забезпечувати їх правильне налаштування. Важливим є також застосування сучасних технологій обробітку, що дозволяють поєднувати кілька операцій за один прохід і тим самим зменшувати загальне навантаження на довкілля.

Особливу увагу слід приділяти збереженню біорізноманіття агроландшафтів. Під час механізованого збирання картоплі відбувається порушення середовища існування ґрунтових організмів, комах і дрібних тварин. Для зменшення негативного впливу необхідно застосовувати технології, що мінімізують глибину і інтенсивність обробітку, а також уникати суцільного руйнування ґрунтового покриву. Важливим є дотримання сівозмін та агротехнічних заходів, які сприяють відновленню родючості ґрунту.

Значну роль у підвищенні екологічної безпеки відіграє впровадження сучасних технічних рішень. До них належать удосконалені конструкції робочих органів картоплекопачів, які забезпечують більш ефективне відокремлення бульб від ґрунту з мінімальним його руйнуванням. Також перспективним є застосування машин із регульованими режимами роботи, що дозволяє

адаптувати технологічний процес до конкретних умов поля. Використання автоматизованих систем контролю дає можливість оптимізувати роботу агрегату і зменшити негативний вплив на довкілля.

Важливим заходом є екологічне обґрунтування технології збирання. Воно передбачає врахування природно-кліматичних умов, типу ґрунту, рівня його вологості, рельєфу місцевості та інших факторів, що впливають на екологічну ситуацію. Раціональне планування робіт дозволяє не лише підвищити ефективність збирання, але й мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Таким чином, підвищення екологічної безпеки при збиранні картоплі картоплекопачами викидного типу досягається шляхом комплексного впровадження організаційних, технічних і агротехнічних заходів. Основними напрямками є зменшення механічного впливу на ґрунт, зниження запиленості, усунення витоків паливно-мастильних матеріалів, зменшення шумового навантаження та раціональне використання енергетичних ресурсів. Реалізація цих заходів сприяє збереженню природного середовища, підвищенню ефективності виробництва та забезпеченню сталого розвитку аграрного сектору.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження технологічного процесу збирання картоплі та обґрунтовано конструктивні рішення щодо удосконалення картоплекопача, що дозволило отримати такі основні науково-технічні та прикладні результати:

Проведений аналіз сучасних технологій збирання картоплі показав, що втрати врожаю при використанні традиційних картоплекопачів можуть досягати 10–20%, а в окремих випадках – до 25–30% через залишення бульб у ґрунті та їх повторне засипання. При цьому трудомісткість ручного підбору становить 190–250 люд.-год/га, що суттєво знижує ефективність виробництва.

Встановлено, що ефективність технологічного процесу значною мірою залежить від способу збирання. Повністю механізоване збирання із застосуванням комбайнів дозволяє знизити витрати праці у 3–4 рази, однак потребує високої якості роботи робочих органів та ефективної сепарації вороху.

Дослідження фізико-механічних властивостей ґрунту показали, що найкращі умови для підкопування забезпечуються при вологості 8–30% та твердості до 1,4 МПа, за яких ґрунт перебуває у пластичному стані та забезпечує мінімальний опір руйнуванню. При цьому горизонтальний опір переміщенню лемеша може досягати 8,7 кН, а вертикальний – 2322 Н, що визначає енергетичні витрати процесу.

Встановлено, що глибина залягання бульб знаходиться в межах 4–24 см, а ширина куща – 15–30 см, що обґрунтовує необхідність забезпечення глибини підкопування до 25 см і ширини захвату не менше 0,4 м для повного вилучення бульб.

Дослідження фізико-механічних властивостей бульб показали, що при швидкостях удару понад 10 м/с відбувається їх руйнування, а при швидкостях менше 3 м/с пошкодження практично відсутні. Це визначає вимоги до кінематичних параметрів робочих органів та обґрунтовує необхідність застосування еластичних елементів у конструкції.

Обґрунтовано раціональні параметри підкопувального робочого органа: кут різання 15–20°, оптимальна криволінійна форма (параболічний профіль) та кут розхилу менше 33°, що дозволяє зменшити опір різанню ґрунту та підвищити стабільність потоку бульбоґрунтової суміші.

Удосконалена конструкція картоплекопача включає:

коритоподібний леміш;

гвинтовий механізм регулювання глибини;

ротор з 8 гребінками (крок 45°);

пальці з гумовими насадками та нахилом $\beta = 20^\circ$.

Таке конструктивне рішення забезпечує покращення процесу сепарації та зменшення травмування бульб.

Теоретичні та розрахункові дослідження показали, що нахил робочих елементів дозволяє зменшити:

втрати потужності на деформацію ґрунту на $\approx 6\%$;

енерговитрати на відкидання вороху до 12%;

загальну потужність приводу ротора на $\approx 10\%$ (до 3,72 кВт).

Встановлено, що потужність, необхідна для підкопування бульбоносного пласта, становить близько 13 кВт при швидкості руху агрегату 1,5 м/с, що відповідає робочій швидкості 6–6,5 км/год.

Визначено, що оптимальна частота обертання ротора становить 97–100 об/хв, що забезпечує ефективне руйнування ґрунтових агрегатів та мінімальне пошкодження бульб.

Запропоновані конструктивні рішення дозволили досягти таких техніко-економічних показників:

продуктивність не менше 0,35 га/год;

повнота підкопування бульб – не менше 97%;

загальні втрати – не більше 5%;

зниження пошкодження бульб на 10–15%;

зменшення енерговитрат на 10–12%.

Встановлено, що використання гумових насадок на пальцях ротора дозволяє змінити характер взаємодії з бульбами з ударного на пружно-поглинаючий, що знижує пікові навантаження та забезпечує збереження товарної якості продукції.

Проведений аналіз умов експлуатації показав, що запропонована конструкція придатна для роботи на ґрунтах із вологістю до 30%, засміченістю до 1,5 т/га та наявністю каміння до 8 т/га, що підтверджує її універсальність.

Удосконалений картоплекопач характеризується підвищеною надійністю та довговічністю: термін служби становить 7 років, гарантійний ресурс – 2 роки, а коефіцієнт надійності технологічного процесу – 0,95.

З урахуванням отриманих результатів доведено, що модернізація конструкції картоплекопача є ефективним шляхом підвищення техніко-економічних показників процесу збирання картоплі, забезпечує зменшення втрат урожаю, підвищення продуктивності та покращення якості продукції.

Таким чином, запропоновані у роботі технічні рішення забезпечують комплексне підвищення ефективності технологічного процесу збирання картоплі, яке виражається у зниженні енерговитрат до 12%, скороченні пошкоджень бульб до 15% та досягненні повноти підкопування 97%, що підтверджує доцільність їх впровадження у виробництво.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Babii A. Important aspects of the experimental research methodology. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, 2020. Vol 97. No 1. P. 77–87.
2. Babii A. Study of the efficiency of working mixture application in chemical crop protection. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, 2020. Vol 98. No 2. P. 99–109.
3. Babii A., Babii M. Impact of oscillation amplitude of boom sprayers load-bearing frame sections. *Scientific Journal of TNTU. Tern. : TNTU*, 2019. Vol. 95, No 3, P. 97–104.
4. Babii A., Blashchak B. Justification of the parameters of the soil preparation module of the potato planting machine. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч.ІІ. С. 165-174.
5. Babii A., Blashchak B. Study of the performance efficiency parameters of a potato planting machine. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol 118, no 2, 2025. Pp. 117–127. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2025.02.117.
6. Babii A., Blashchak B., Valiashek V., Broshchak I., Malevych N. Substantiation of the parameters of a dosing mechanism for granular fertilizer application during potato planting. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol 120, no 4, 2025. Pp. 10–20. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2025.04.010.
7. Babii A., Holovetskyi I. Engineering method of studying the kinematic parameters of the working body of the potato harvesting machine. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2024. Vol. 10(41)_I. P. 200-212. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.200-212](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.200-212).
8. Babii A., Holovetskyi I., Boiko V. (2024) Analysis of the behavior of potato bearing layer particles on the oscillating plane of the potato plant ploughshare. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol 116, no 4, pp. 78–89. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.04.078.
9. Babii A., Levytskyi B. (2024) Research of stress-strain state of tank of small-size self-propelled sprayer. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol 115, no 3, pp. 91–99. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.03.091.

10. Babii A., Levytskyi B., Dovbush T., Babii M., Khomuk N., Dovbush A., Valiashek V. Mathematical model of sprayer tank loading. *Procedia Structural Integrity*, 2024. No 59, 609-616. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.086>.

11. Babii A., Vovk I. Mathematical model of contact interaction between a rotating working body and plant stems for their shredding. *Engineering, Energy, Transport AIC. Scientific journals of Vinnitsa national agrarian university*. Vol. 103, № 3. 2025. P. 99-106. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-3-11 .

12. Babii A.; Aulin V.; Babii M.; Levytskyi B. (2022) Investigation of the working capacity of the operating body suspension functional-transporting machine. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol 105, no 1, pp. 5–12. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.01.005.

13. Oleg Lyashuk, Andrii Diachun, Ihor Tkachenko, Mykola Stashkiv, Andrii Babii, Maria Pankiv, Zhanna Babiak, Alexander Marunych, Oleg Lakh, Artur Starikh. Investigation of the bulk material movement kinematics in conical screw conveyor. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Vol. 74, 2024. No. 3. pp. 732-744.

1. Zao «Agropromselmash» — Production Of Agricultural Machinery : URL : <https://apsm.by/main/>

14. Бабій А., Бабій М. Дослідження міцності елементів конструкції функціонально-транспортуючих мобільних засобів. *Науковий журнал «Інженерія природокористування»*, 2019. №3 (13) С. 87–91.

15. Бабій А., Вовк І., Гладь Ю. Багатофункціональний ротаційний робочий орган. Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Рівне, 9-10 квітня 2025 року. Рівне: НУВГП, 2025. С.6-8.

16. Бабій А.В. Аналіз параметрів штангового обприскувача з метою збільшення його продуктивності. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine, 2019. Vol. 10. No. 4. С. 51–55.

17. Бабій А.В. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Конструкція, розрахунок і виробництво сільськогосподарських машин» для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 133

«Галузеве машинобудування» зі спеціалізацією «Машини сільськогосподарського виробництва» для здобуття освітнього ступеня «бакалавр» / А.В. Бабій. Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. 100 с.

18. Бабій А.В. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Сільськогосподарські машини: конструкції та розрахунок» для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 208 «Агроінженерія» для здобуття освітнього ступеня «Бакалавр». Машини для заготівлі кормів. Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя. 2022. 76 с.

19. Бабій А.В., Бабій М.В. Динамічна модель енергозберігаючого приводного механізму косарки. Вісник ХНТУСГ. Випуск 145. «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва». Харків, 2014. С.112–118.

20. Бабій А.В., Бабій М.В. Організація і технологія механізованих робіт: навчальний посібник до курсового проєктування для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 208 «Агроінженерія» для здобуття освітнього ступеня «Бакалавр». Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя. 2023. 144 с.

21. Бабій А.В., Вовк І.В. Дослідження енергетичних показників при подрібненні рослин більшими робочими органами. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Вип. 14 (45), 2026. С.77-86. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14\(45\).77-86](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).77-86)

22. Бабій А.В., Вовк І.В., Гладько Ю.Б., Валяшек В.Б. Ротаційний робочий орган. Патент на корисну модель 160845, Україна. МПК (2025.01) А01В 33/00. u 2025 00186; заявл. 16.01.2025; опубл. 5.10.2025, Бюл.№ 42.

23. Бабій А.В., Вовк І.В., Бабій В.А. Обґрунтування параметрів вала багатофункціонального ротаційного робочого органу. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції "Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем. Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems", 17-19 квітня 2024 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. С. 9-10.

24. Бабій А.В., Довбуш Т.А., Бабій М.В., Ткаченко О.І., Сташків М.Я. Динаміка машин. Навчальний посібник для студентів денної та заочної форм навчання спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування» та 208 «Агроінженерія» для здобуття освітнього ступеня «Магістр». Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя. 2023. 246 с.

25. Блащак Б.О., Бабій А.В., Вовк І.В. Визначення параметрів взаємодії ґрунтової стружки з направляючим кожухом фрезерного модуля. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIV міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11-12 грудня 2025) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2025. С.52-54.

26. Блащак Б.О., Бабій А.В., Жук Н.В., Бабій В.А. Колесо змінного діаметру. *Актуальні задачі сучасних технологій* : зб. тез доповідей XIII міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів. м. Тернопіль, 11-12 грудня 2024 р. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. С.78-79.

27. Вовк І., Бабій В., Бубняк Р. Переваги використання багатофункціонального ротаційного робочого органу. Матеріали VIII Міжнародної студентської науково - технічної конференції / Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя (м. Тернопіль, 24-25 квітня 2025 р.), 2025. С.28-29.

28. Вовк І.В., Бабій А.В. Обґрунтування доцільності у проектуванні багатофункціонального ротаційного робочого органу. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. С.96-97.

29. Вовк І.В., Бабій А.В., Малевич Н.Ю., Новацький П.І. Обґрунтування частоти обертання вала ротаційного робочого органу. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11-12 грудня 2024) / М-во освіти і

науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. С.80-81.

30. Вовк І.В., Бойко В.В., Бабій А.В., Дем'янчук А.В. Критерії руйнування стебел рослин билом мульчувача при підготовці поля до збирання. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIV міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11-12 грудня 2025) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2025. С.61-63.

31. Гевко Р.Б. Системи доочищення коренеплодів при їх механізованому збиранні : монографія / Р. Б. Гевко, І. Г. Ткаченко, Р. М. Рогатинський, С. В. Синій та ін. Тернопіль : Осадца Ю. В., 2020. 216 с.

32. Довбуш Т.А., Хомик Н.І., Бабій А.В., Цьонь Г.Б., Довбуш А.Д. Опір матеріалів: навчальний посібник до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2022. 220 с.

2. Картоплезбиральний комбайн Grimme DR 1500 : URL : <https://agriline.ua/-/prodazh/kartoplezbiralni-kombayni/Grimme/DR-1500--25101316255594725500>

3. Картоплекопач КТН-2ВМ Агропромсельмаш : URL : <https://hydromarket.com.ua/ua/p1019856470-kartofelekopatel-ktn-2vm.html?srsltid=AfmBOor2YkqxdwH8yuEaww5fiMoZUMiP86XgZ7TDtnzmHSqMhHfHRgIe>.

4. Картоплекопачка роторна Wirax (Вертушка) : URL : https://traktorplus.com.ua/ua/p2301285957-kartofelekopalka-rotornaya-wirax.html?source=merchant_center&gad_source=1&gad_campaignid=21700169651&gbraid=0AAAAApCKewhh5nNh_5eqKqjTRdCE0hxCN&gclid=CjwKCAjwuanRBhBSEiwAY5y6V1mJIBodbeO4SnkqHmF2LKMzo_UYDII4RgN1_Kh9A6aOoVxbzX_pdhoC9NsQAvD_BwE.

33. Керб Л. П. Основи охорони праці: Навч. пос. К.: КНЕУ, 2003. 215с.

5. Огляд картоплекопалок типу «Лапа» : URL : <https://kruchkov.com.ua/stati/obzor-kartofelekopalok-tipa-lapa>.

34. Олексюк В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія». / В.П. Олексюк, А.В. Бабій, М.Я. Сташків, Н.І. Хомик, Т.А. Довбуш, Г.Б. Цьонь, В.В. Мартинюк. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. 93 с.

35. Опір матеріалів. Під заг. ред. акад. АН УРСР Г. С. Писаренко. К.:Вища школа, 1974. 304 с.

36. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин. К.: Вища шк., 1993. 556 с.

37. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку : навч. посіб. / за ред. Д. Г. Войтюка; авт. кол.: / Д.Г. Войтюк, С.С.Яцун, М.Я. Довжик. Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. 543 с.

38. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування: Підруч. для студ. вищ. навч. закл. із спец. «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва» / За ред. М.І. Черновола. Кн. 1: Машини для рільництва / П.В. Сисолін, В.М. Сало, В.М. Кропівний; За ред. М.І. Черновола. К.: Урожай, 2001. 384 с.

39. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування: Підруч. для студ. вищ. навч. закл. із спец. «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва» / За ред. М.І. Черновола. Кн. 3: Машини та обладнання для переробки зерна та насіння / П.В. Сисолін, М.М. Петренко, М.О. Свірень; За ред. М.І. Черновола. К.: Фенікс, 2007. 432 с.

40. Хомик Н. І., Мартинюк В. В., Бабій А. В., Цьонь Г. Б., Довбуш Т. А., Довбуш А. Д. Агрозахист: навчальний посібник за заг. ред. к. т. н., доц. Хомик Н. І. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. 520 с.

41. Хомик Н.І., Олексюк В.П., Сташків М.Я., Бабій А.В., Довбуш Т.А. Методичний посібник до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності Агроінженерія / Н. І. Хомик, В. П. Олексюк, М. Я. Сташків, А. В. Бабій, Т. А. Довбуш. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. 180 с.