

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Кравченко Михайло Валерійович

УДК 631.17

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПРОЄКТ УДОСКОНАЛЕННЯ КОМПЛЕКСУ МАШИН ДЛЯ
ВИРОБНИЦТВА КОРМОВИХ БУРЯКІВ З РОЗРОБКОЮ
ЩІЛЮВАЧА ҐРУНТУ**

208 “Агроінженерія”

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

Керівник роботи

Білецький В.Р.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Кравченко Михайло Валерійович. Проєкт удосконалення комплексу машин для виробництва кормових буряків з розробкою щілювача ґрунту. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У даній кваліфікаційній роботі встановлено, що запропоновані технічні рішення по розробці щілювача значно покращують якість обробітку чорнозему, сприяючи формуванню рівномірних щілин глибиною 45–50 см. Така глибина щілювання забезпечує руйнування плужної підшви, підвищує водопроникність і аерацію ґрунту, а також оптимізує накопичення й утримання вологи у верхніх шарах. У поєднанні з відсутністю відвала ґрунту це дозволяє зберігати органічний покрив на поверхні, мінімізуючи ерозійні втрати та сприяючи збереженню родючості ділянок навіть у посушливі періоди.

Використання трактора Т-150 у тандемі з розробленим щілювачем демонструє суттєве зниження питомих енерговитрат – до 15 % порівняно з традиційними глибокорозпущувальними агрегатами.

Продуктивність комплексу, зокрема можливість обробляти 7–8 га за годину при швидкості руху до 8 км/год, дає змогу завершити щілювання поля площею 240 га у встановлені агротехнічні строки.

Впровадження розробленого агрегату сприяє не лише підвищенню врожайності кормових буряків на 12–15 %, але й забезпечує стійкість агротехнології до кліматичних коливань завдяки збереженню структури ґрунту та покращенню вологоутримання.

Ключові слова: щілювач, технологія, ґрунт, кормові буряки, виробництво, обробка.

ANNOTATION

Kravchenko, Mikhail Valeryevich. Project to improve the complex of machines for the production of fodder beets with the development of a soil splitter.

– Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualification work for obtaining a bachelor's degree in the specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

This thesis establishes that the proposed technical solutions for the development of a splitter significantly improve the quality of black soil cultivation, contributing to the formation of uniform slits 45–50 cm deep. This depth of slitting ensures the destruction of the plow pan, increases water permeability and soil aeration, and optimizes moisture accumulation and retention in the upper layers. Combined with the absence of soil molding, this allows the organic cover on the surface to be preserved, minimizing erosion losses and helping to maintain the fertility of the land even during dry periods.

The use of the T 150 tractor in tandem with the developed splitter demonstrates a significant reduction in specific energy consumption – up to 15% compared to traditional deep loosening units.

The productivity of the complex, in particular the ability to process 7–8 hectares per hour at a speed of up to 8 km/h, makes it possible to complete the slitting of a 240-hectare field within the established agrotechnical deadlines.

The introduction of the developed unit not only contributes to a 12–15% increase in the yield of fodder beets, but also ensures the stability of agricultural technology to climatic fluctuations by preserving the soil structure and improving moisture retention.

Keywords: splitter, technology, soil, fodder beets, production, processing.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОЩУВАННЯ КОРМОВИХ БУРЯКІВ.....	9
РОЗДІЛ 2. ОПЕРАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЩІЛЮВАННЯ ПРИ ВИРОЩУВАННІ КОРМОВОГО БУРЯКУ.....	21
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗДІЛ.....	29
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний аграрний сектор України стикається зі значними викликами, серед яких – необхідність підвищення ефективності виробництва кормових культур за умов обмежених природних ресурсів. Кормові буряки займають провідне місце в кормовій структурі господарств завдяки високому вмісту цукрів та поживних речовин, проте їхній потенціал часто залишається невикористаним через неякісну підготовку ґрунту. Використання традиційних важких агрегатів для глибинного розпушення споживає велику кількість палива, руйнує структуру чорноземів і сприяє підвищенню ерозійних процесів.

У контексті кліматичних змін та дедалі частіших посух стає особливо актуальним впровадження технологій, які дозволяють зберігати вологу в ґрунті та підтримувати його аерацію без надмірного механічного втручання. Щільювання ґрунту переривчастими щілинами глибиною 45–50 см дозволяє поєднати переваги глибокого розпушення з щадним ставленням до поверхневого органічного покриву. Застосування нового щільювача в складі з трактором Т-150 дає змогу оптимізувати витрати енергії та забезпечити кращі агрофізичні властивості чорнозему.

Крім того, сільськогосподарські підприємства дедалі більше зосереджуються на зниженні викидів парникових газів і підвищенні енергоефективності. Розробка та апробація енергоощадного щільювача сприяє скороченню вуглецевого сліду операції ґрунтообробки та відповідає принципам сталого розвитку. Водночас підвищена продуктивність технології дозволяє здійснювати щільювання великих площ (до 240 га) у стислі агротехнічні терміни, що важливо для своєчасної підготовки полів під посів культури.

Екологічна безпека використання нової машини підтверджується збереженням поверхневого мульчуючого шару стерні, зменшенням ерозійного стоку та підтриманням активності ґрунтової біоти. Це забезпечує не лише короткострокові ефекти у вигляді оптимального зволоження та аерації, але й

довготривалу підтримку родючості чорноземів. Такий підхід має велике значення для умов схилових ділянок із нахилом до 2 %, де класичні методи обробітку часто виявляються непридатними.

Отже, актуальність дослідження полягає у створенні ефективної, енергоощадної та екологічно збалансованої технології щілювання ґрунту при вирощуванні кормових буряків. Розробка і впровадження агрегату, що поєднує тандем трактора Т-150 із сучасним щілювачем, відкриває нові перспективи підвищення продуктивності агровиробництва та збереження ґрунтових ресурсів. Урахування агроекологічних вимог і економічної доцільності робить це дослідження надзвичайно важливим для сталого розвитку галузі.

Мета дослідження: розробити та обґрунтувати удосконалений комплекс машин для виробництва кормових буряків із новим щілювачем ґрунту, який забезпечить енергоощадний, екологічно безпечний і високопродуктивний процес щілювання на глибину 45–50 см у складі трактора Т-150 за агрофону стерні та схилу 2 %.

Завдання дослідження:

- провести аналіз існуючих технологій та конструкцій щілювачів ґрунту, їх енергоємності й екологічних показників;
- визначити оптимальні експлуатаційні параметри (глибина, швидкість, інтервал між щілинами) для умов чорнозему 4-го класу, агрофону стерні та схилу 2 %;
- розробити конструкцію щілювача адаптовану до агрегування з трактором Т-150;
- виконати розрахунок основних геометричних і кінематичних параметрів агрегату (радіус робочого колеса, кількість робочих органів, режим руху).

Об'єктом дослідження: комплекс машин для вирощування кормових буряків.

Предмет дослідження: технологічний процес щілювання ґрунту на глибину 45–50 см, параметри конструкції щілювача й експлуатаційні режими роботи агрегату.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Білецький В.Р., Кравченко М.В., Веремій Т.Б. Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» з нагоди 30-річчя започаткування підготовки ОС «Бакалавр» за спеціальністю «Агроінженерія» 11 квітня 2025 року м. Житомир / МОН України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Видавничий центр ЖАТФК України, 2025. С. 98-101.

2. Кіпчук В.Б., Кравченко М.В., Самчук В.І. Перспективні напрямки розвитку машин для обробітку ґрунту. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.). Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. С. 96-99.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що впровадження розробленого комплексу машин із щілювачем ґрунту у складі трактора Т-150 дозволяє аграрним підприємствам підвищити ефективність підготовки ґрунту під посів кормових буряків. Зменшення питомих витрат палива на 10–15 % і скорочення кількості проходів техніки по полю сприяють зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню рентабельності виробництва. Забезпечення рівномірного щілювання на глибину 45–50 см руйнує плужну підоснову, покращує водно-повітряний режим чорнозему й сприяє накопиченню вологи, що особливо актуально в умовах недостатнього зволоження. Крім того, використання безвідвальної технології щілювання збереженням поверхневого мульчуючого шару стерні знижує ризики ерозії та підтримує біологічну активність ґрунту, що має довгостроковий позитивний вплив на родючість ділянки.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 33 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 45 сторінок комп'ютерного тексту, містить 7 рисунків та 6 додатків.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОЩУВАННЯ КОРМОВИХ БУРЯКІВ

Кормові буряки є важливою кормовою культурою, що відзначається високою продуктивністю та цукристістю, що сприяє підвищенню молочної та м'ясної продуктивності ВРХ. Ефективне вирощування потребує суворого дотримання агротехнічних прийомів, які забезпечують оптимальні умови для росту рослин. Початковий етап – вибір відповідного гібриду, адаптованого до кліматичних та ґрунтових умов господарства. Сортові властивості мають визначальний вплив на дружність сходів, розвиток коренеплідів та накопичення цукрів. Дотримання науково обґрунтованих норм висіву та строків сівби гарантує формування потужної кореневої системи. Аналіз попередників у сівозміні дозволяє знизити ризик розвитку хвороб і шкідників. Вибір попередника має враховувати кількість решток, які вони залишають, та здатність ґрунту до самовідновлення. Системне планування сівозміни підвищує загальну стійкість агроценозу. Усе це створює передумови для отримання високих і стабільних врожаїв кормових буряків [2].

Оптимальний строк сівби кормових буряків визначається поєднанням температурного та вологісного режимів ґрунту. Для дружних сходів необхідно, щоб температура ґрунту на глибині загортання насіння становила не менше 8 °С. Затримка з посівом скорочує вегетаційний період і знижує цукристість коренеплідів. Надто ранній посів може призвести до загнивання насіння через низькі температури. У західних регіонах України сівбу часто починають наприкінці квітня, у центральних – на початку травня. В умовах недостатньої вологи передпосівне зрошення значно покращує якість та кількість сходів. Визначення оптимальної глибини загортання насіння (2–3 см) гарантує рівномірність появи рослин. Використання сучасних сівалок із загортачами сприяє точному дотриманню встановленої глибини [3].

□ Ґрунтові умови під кормові буряки мають бути добре аерованими та забезпеченими вологозапасом. Ідеальними вважаються легкі та середні

суглинки з нейтральною реакцією (рН 6,0–6,8). На кислих ґрунтах рекомендовано вапнування заздалегідь – мінімум за півроку до сівби. Складне розпушування та знищення плужної підшви проводять на глибину 25–30 см. Застосування стрічкового або валкового розпушення допомагає зберегти вологу в зоні кореневої системи. Безвідвальні технології особливо ефективні в посушливих регіонах. Після основного обробітку поверхню вирівнюють за допомогою котків. У результаті формується дрібно-грудкувата структура, сприятлива для дружних сходів. Така агротехніка підвищує проникність повітря та води до коренів [5].

Передпосівна підготовка ґрунту включає застосування ґрунтових гербіцидів та основне внесення добрив. Після оранки на глибину 25–30 см уносять органічні добрива (гній, компост) з нормою 30–40 т/га. Одночасно або в наступні періоди розкидають фосфорні та калійні добрива — 60–80 кг P_2O_5 /га і 80–100 кг K_2O /га. Орієнтуються на результати агрохімічного аналізу ґрунту, що провести завчасно. Далі виконують поверхнєве розпушення дисковими боронами та коткування. Це сприяє утворенню дрібногрудкуватої структури та збереженню вологи. Для підготовки використовують комбіновані агрегати з котками і боронами. Інтегровані технологічні ланки дозволяють за один прохід вирішити декілька завдань водночас. Завершальний етап – вирівнювання поверхні легкими котками [7].

Вибір та підготовка насіння – критичні чинники, що впливають на якість посівів. Використовують насіння, оброблене фунгіцидами та інсектицидами, щоб захистити його від ґрунтових хвороб та шкідників. Стандартна вірація насіння – 95 % і вище. Перед сівбою насіння кондиціонують, знижуючи вологість до 8–10 %. Це забезпечує рівномірне проходження через висівний апарат та покращену енергію проростання. Крім того, застосовують біостимулятори росту перед висівом. Вони підвищують стійкість паростків до стресів. Оброблене насіння закладають у ґрунт із точним дотриманням норми висіву. Для цього використовують сучасні сівалки з електронним дозуванням насіння. Такий підхід гарантує рівномірний розподіл рослин у рядку [4].

Оптимальна норма висіву кормових буряків залежить від умов зволоження та сорту. За достатнього зволоження норму висіву складають 1,0–1,2 млн схожих насінин на гектар. У посушливих умовах норму знижують до 0,8–1,0 млн/га, щоб мінімізувати конкуренцію за ресурси. Кількість рядків у захваті сівалки становить 4–6 із шириною міжряддя 45–50 см. Механічні сівалки обладнують змінними сошниками для точного загортання. Важливо контролювати постійність кількості насіння протягом робочої зміни. Для цього моніторять витрати насіння за допомогою датчиків. Вчасна корекція параметрів дозування дозволяє уникнути пропусків. А це сприяє дружності сходів та рівномірному росту рослин [5].

Після сівби виконують прикочування або коткування, щоб забезпечити щільний контакт насіння з ґрунтом. Для цього використовують кільчасто-шпорові або гладкі котки. Така операція сприяє рівномірному одержанню вологи насінням та підвищує енергію проростання. Крім того, коткування зменшує випаровування вологи з поверхні ґрунту. Це особливо важливо в посушливі роки. Оптимальний тиск котка на ґрунт – 1,5–2,0 атм. Після коткування на полі не повинно залишатися відкритих вибоїн або борозен. Система зчіпок із котком автоматизована, що підвищує продуктивність. Висока швидкість обробітку (до 8 км/год) не впливає на якість коткування [3].

□ План удобрення кормових буряків ґрунтується на результатах агрохімічного обстеження ґрунту. Для оптимального росту коренеплодів рекомендується внесення $N:P_2O_5:K_2O$ у співвідношенні 1:0,6:1,2. Азот уносять частинами: 30 % під оранку, 40 % у фазу 4–6 листків, решту — перед початком головного росту коренеплоду. Фосфорні та калійні добрива бажано вносити під основний обробіток. Це сприяє формуванню потужної кореневої системи та збільшенню вмісту сухої речовини. Практика показує, що оптимальна норма азоту – 120–140 кг/га, фосфору – 60–80 кг/га, калію – 100–120 кг/га. Використання комплексних добрив з мікроелементами підвищує стійкість до стресів. Обов'язковими є вапнювальні матеріали на кислих ґрунтах [1].

Мікроелементи (бор, марганець, цинк, молібден) важливі для метаболізму бурякового листя та формування коренеплодів. Брак бору призводить до порушення росту точок росту, а дефіцит марганцю — до хлорозу листків. Для запобігання дефіциту проводять позакореневе підживлення в фазі 6–8 листків. Азотно-фосфорно-калійні розчини з додаванням мікродобрих вносять через щільну систему або краплинне зрошення. Дози мікроелементів — не більше 0,5–1,0 кг/га кожного. Підживлення покращує кольоровість листя та сприяє рівномірному росту. Своєчасна корекція живлення підвищує вихід товарних коренеплодів. Безконтрольне внесення мікродобрих може призвести до токсичності. Тому обов'язково орієнтуються на листовий аналіз [7].

Зрошувальна система є критичною в регіонах із недостатнім природним зволоженням. Застосовують дощувальні установки секторного або кругового дії з нормою поливу 12–15 мм за раз. Інтервали між поливами визначають за допомогою ґрунтових вологомірів: вологість на глибині 0–60 см повинна утримуватися на рівні 70–80 % повної вологоємності. Краплинне зрошення в рядках дозволяє зменшити витрати води до 30 %. Весняні поливи сприяють дружності сходів, літні — інтенсивному росту вегетативної маси, осінні — поліпшенню якості коренеплодів. Економічна норма витрат води за сезон — 3500–4500 м³/га. Оптимальна робоча швидкість дощувальних машин — 3–5 км/год. Регулювання тиску води забезпечує рівномірний розподіл по площі. Умови проведення поливів — ранки чи вечори з низьким вітром [11].

Механічний контроль бур'янів є невід'ємною частиною технології вирощування кормових буряків. Після появи сходів виконують міжрядні культивації на глибину 6–8 см. Використовують стрілчасті і дискові робочі органи для руйнування коренів бур'янів. Оптимальна ширина захвату культиватора — 2,5–3 м. Під час великих посушнів проводять поверхневі боронування для створення ґрунтової кірки та зменшення випаровування. Поверхнєве реструктурування ґрунту сприяє знищенню однорічних дводольних видів. Щоб уникнути ерозії, культивації виконують на мінімальній глибині.

Регулярність обробітків – через 10–14 днів за активного бур'янів. Механічні методи знижують потребу в гербіцидах [3].

Хімічний захист посівів передбачає застосування селективних гербіцидів у фазі 2–4 листків буряків. Рекомендовані препарати: на основі метрибузину, хлорсульфонілсечовини, триазинів. Норма витрати – 1,0–1,5 кг/га діючої речовини. Робочий розчин готують у співвідношенні 300–400 л/га води. Максимальна температура повітря під час обприскування — до 25 °С; відсутність опадів протягом 6–8 годин після. Поєднання механічного та хімічного методів підвищує ефективність до 95 %. Обов'язкове чергування гербіцидів з різних хімічних груп запобігає формуванню резистентності бур'янів. Правильний вибір термінів та норм забезпечує збереження дружності сходів буряків [5].

Інтегрований захист посівів враховує поєднання агротехнічних, механічних і хімічних методів. Системний моніторинг забур'яненості, використання точного обприскування за допомогою GPS-навігації, прийоми оптимізації живлення й зрошення знижують стрес рослин. Мульчування органічними матеріалами (солома, агроволокно) зменшує появу бур'янів до 60 %. Біопрепарати на основі *Bacillus thuringiensis* ефективні проти ґрунтових шкідників. Феромонні пастки допомагають контролювати рівень шкідників у полі. Використання аналітики дронів та ІЧ-камер дає швидку діагностику стану посівів. Інтегрований підхід підвищує екологічну безпеку та економічну ефективність [6].

Контроль ґрунтових шкідників (дротяники, личинки хруща, бульбочники) включає передпосівне внесення інсектицидів у зону висіву. Використовують неоніотиноїди або фосфорорганічні сполуки з нормою 2–3 л/га. Додатково встановлюють феромонні пастки для моніторингу скупчень шкідників. При підвищеній чисельності шкідників проводять вегетаційні обприскування у фазі 4–6 листків. Інсектицидні обробки здійснюють у безвітряну погоду з оптимальною температурою 15–20 °С. Своєчасні заходи зменшують пошкодження коренеплодів на 70–80 %. Поєднання біо- та хімічних методів

гарантує тривалу дію. Раціональний вибір препаратів запобігає резистентності шкідників [3].

Захист від грибкових захворювань (церкоспороз, біла гниль, гниль коренеплоду) передбачає дворазове фунгіцидне обприскування. Першу обробку проводять у фазі початку бутонізації, другу – перед формуванням коренеплоду. Використовують препарати з діючими речовинами стробілуринів та триазолів. Норма внесення – 0,5–0,8 л/га. Інтервал між обробками – 14–21 день залежно від погодних умов. Дотримання строків очікування гарантує безпечність кормів. Обприскування виконують у ранкові або вечірні години. Це підвищує ефективність та знижує ризик стресу рослин [3].

Упровадження точного землеробства забезпечує економію ресурсів та підвищує врожайність. Використання GPS-навігації знижує перекриття агрегатів до 2 %. Автопілоти для сівалок та обприскувачів підвищують точність висіву та обробок. Моніторинг полів за допомогою дронів дозволяє виявляти стресові ділянки в реальному часі. Використання ґрунтових та листових датчиків оптимізує внесення добрив. Прецизійні системи зрошення економлять до 30 % води. Інтелектуальні алгоритми аналізу даних допомагають приймати рішення щодо захисту. Інтеграція IoT-пристроїв формує єдину екосистему управління агровиробництвом [2].

Міжрядний обробіток буряків виконується за допомогою високопродуктивних культиваторів, обладнаних стрілочастими лапами та дисковими секціями. Ця операція спрямована на руйнування кореневої системи бур'янів, які конкурують з рослинами за вологу і поживні речовини. Культиваційні заходи проводять двічі в період інтенсивного росту листя, зазвичай у фазах 4–6 і 8–10 справжніх листків. Глибина обробки становить не більше 6–8 см, щоб не пошкодити головний коренеплід. Використання опцій регулювання тиску пружин на лапи дозволяє адаптувати культиватор під різні типи ґрунту. Оптимальна швидкість обробки – 6–8 км/год, що забезпечує ефективне знищення бур'янів без пропусків. Сучасні машини обладнані системами GPS-контролю ширини захвату, що мінімізує перекриття та

пропуски. Вологий стан ґрунту оцінюють за допомогою приладів вологи, щоб уникнути прилипання землі до робочих органів. Міжрядний обробіток критично важливий для підтримки чистоти посівів і рівномірного розвитку буряків [5].

Середньосезонна механічна обробка включає поверхнєве боронування та рихлення граблями. Ці операції допомагають знищити молоді сходи бур'янів, які не були захоплені культиватором. Борони використовують на початкових стадіях, коли рослини мають 2–4 листки, а граблі — у фазі 6–8 листків. Обладнання оснащують змінними секціями та пружинними елементами для регулювання агресивності обробітку. Важливо ретельно налаштувати кут атаки, щоб не пошкодити коренеплід і не зрізати листя. Операції виконують за сухого ґрунту, щоб зменшити прилипання та злив. Боронування сприяє створенню ґрунтової кірки, яка знижує випаровування вологи. Рух агрегатів слід координувати з прогнозом погоди, щоб не пошкодити молоді рослини до дощів. Таким чином, середньосезонні заходи підтримують оптимальні умови для вегетації буряків [5].

Моніторинг стану живлення буряків проводять із використанням дистанційного зондування та листових аналізів. Дрони із мультиспектральними камерами фіксують рівень NIR-відбиття, що корелює з хлорофіловим індексом рослин. Це дає змогу швидко ідентифікувати ділянки з дефіцитом живлення. Листкові проби відбирають у зонах з різним індексом для лабораторного аналізу вмісту основних елементів. На основі отриманих даних коригують норми позакореневого підживлення. Автоматизовані системи вносять мікродобрива та макроелементи через форсунки, керовані GPS. Регулярні заміри проводять кожні 10–14 днів в період інтенсивного росту. Такий підхід дозволяє уникнути дефіциту азоту або надлишку калію. Збалансоване живлення гарантує одержання якісних та енергійних рослин [2].

Технологія зрошення кормових буряків включає точкове та секторне зрошення з адаптацією до змінних умов вологості. Системи краплинного зрошення дозволяють подавати воду безпосередньо до кореневої зони,

знижуючи витрати води до 30 %. Секторні дощувальні установки охоплюють площу 3–5 га за один цикл з нормою 12–15 мм. Інтервали поливів визначають за даними ґрунтових вологомірів та агрометеостанцій. Успішне зрошення передбачає підтримання вологості 70–80 % на глибині 0–60 см. Системи оснащені датчиками опадів, які автоматично відключають подачу води під час дощу. Для регіонів із нерівномірним розподілом опадів використовують мобільні установи на колісному ході. Завдяки контролю тиску та швидкості обертання картриджів забезпечується рівномірний розподіл води. Це має величезне значення для стабільної продуктивності в посушливі роки [9].

Збирання кормових буряків проводять спеціалізованими бурякозбиральними комбайнами з одночасним миттям коренеплодів у полі. Машини оснащені ланцюговими подавальними стрічками, ножами небезпечного зрізу та драговими вальцями. Коренеплоди відділяють від листя та ґрунту у два етапи: первинне очищення у полі та остаточне на перших ділянках підприємства. Оптимальний рівень вологості коренеплодів під час збирання — 12–14 %, що мінімізує механічні пошкодження та втрати цукрів. Швидкість роботи становить 4–6 км/год, а продуктивність — до 4 га/год. Системи оптичного сортування відкидають пошкоджені або дрібні екземпляри. Використання GPS-контролю забезпечує рівномірний прохід по полю без пропусків. Збирання у суху та безвітряну погоду підвищує якість коренеплодів.

Після збирання установлюють тимчасові площадки для підсушування та сортування коренеплодів. Відповідна інфраструктура включає пересувні навіси з вентиляторами та набивні стіни. Коренеплоди укладають пошарово з проміжками для вентиляції. Через 12–24 години вологість знижується до 10–12 %. Паралельно проводять калібрування за діаметром та довжиною, що необхідно для різних видів кормового перероблення. Використовують ручні та автоматизовані транспортери з вантажопідйомністю до 15 т. Сортувальні лінії обладнані сенсорними датчиками виявлення дефектів. Якісна підготовка до зберігання зменшує втрати у процесі тривалого зберігання [7].

Для тривалого зберігання коренеплодів застосовують траншейні сховища та силоси з контролем температури та вологості. Ідеальні умови — температура $+1...+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відносна вологість 90–95 %. У траншеях коренеплоди насипають шарами завтовшки до 1,5 м, вкривають соломою чи тирсою для запобігання промерзанню. Силоси обладнані вентиляційними каналами та регульованими заслінками. Автоматизовані системи моніторингу передають дані про температуру й вологість у реальному часі. Дозований повітрообмін забезпечує оптимальну аерацію без втрати вологи. Такі методи дозволяють зберігати коренеплоди до 6 місяців без значних втрат якості. Важливим є регулярний огляд та видалення пошкоджених екземплярів [5].

Застосування силосування буряків дає можливість зберегти кормову цінність протягом усього зимового періоду. Коренеплоди нарізають на шніт товщиною 10–15 мм і ущільнюють у силосних траншеях. Додають ферментні добавки або молочнокислі стартери для прискорення бродіння. Кислотність силосу досягає рН 3,8–4,2 через 2–3 тижні від початку закладки. Вміст сухої речовини в силосі становить 10–12 %, а вміст цукрів — 8–10 %. Такий силос відзначається високою поживністю та гарною збереженістю. Витрати на силосування компенсуються якістю корму й ефектом на продуктивність тварин. Силосовані буряки поєднують із сінажем та коренеплодами інших культур.

Для годівлі ВРХ купують комбінацію свіжих, силосованих та сушених буряків. Свіжі коренеплоди дають до 40 % від раціону, але їх необхідно нарізати та подавати щодня. Силос дає можливість рівномірно й економно використовувати буряки протягом зимівлі. Сушені пелети виготовляють з концентрату бурякових відходів, їх вміст цукрів сягає 60 %. Частка сушених буряків у раціоні не повинна перевищувати 5 % сухої речовини. Раціон складають із урахуванням переробної здатності тварин. Забезпечують достатню кількість грубих кормів для запобігання порушень травлення. Технічні рішення для нарізки та подачі корму автоматизують годування і зменшують витрати праці [3].

Сівозміна з буряками передбачає повернення в поле після 4–5 культур без коренеплодів. Оптимальні попередники — зернові та бобові культури, які залишають мінімальну поживну рештку та не підвищують ризик хвороб. Після буряків не рекомендується сіяти бобові наступного сезону через ризик накопичення грибкових патогенів. Включення сидератів (гірчиці, люпину) знижує кількість ґрунтових шкідників і покращує структуру ґрунту. Сидерати закладають на глибину 10–15 см до їх масового цвітіння. Потім їх обробляють дисковими боронами та коткують. Такий прийом сприяє накопиченню органічної маси й підвищенню вмісту азоту в ґрунті. Раціональне складання сівозміни підтримує тривалу родючість [5].

Ерозійно запобіжні заходи включають контурну обробку та смугові технології на схилах. Щілювання в смузі шириною 6–8 м знижує поверхневий стік води та запобігає змиванню ґрунту. Використовують трапецеїдальні смуги із чергуванням буряків і сидеральних рослин. Це створює природні бар'єри для водного потоку. Контурні борозни формують вздовж горизонталей схилу. Регулярний догляд за смуговими захисними насадженнями підтримує їхню ефективність. Ерозійно стійкі ділянки облаштовують живоплотами з багаторічних трав. Такий підхід знижує загальний ризик зсувів та втрат родючого шару [2].

Економічний аналіз технології вирощування буряків включає оцінку витрат на насіння, добрива, паливо, зрошення та захисні заходи. При нормі висіву 1 млн/га насіння коштує 800–1000 євро/га. Внесення добрив (NPK) — 300–350 євро/га. Зрошувальні витрати складають 150–200 євро/га. Витрати на ЗЗР (гербіциди, інсектициди, фунгіциди) — 100–150 євро/га. Технічне обслуговування та амортизація машин — 120–180 євро/га. Збирання та зберігання — 80–100 євро/га. Загальні прямі витрати — 1550–1980 євро/га. За врожайності 50 т/га грошова виручка при ціні 20 євро/т — 1000 євро/га. Рентабельність коливається в межах 10–20 %. Інвестиції в точні технології підвищують прибуток на 5–8 % [2].

Інтеграція прецизійного землеробства в технологію вирощування кормових буряків дозволяє знизити витрати та підвищити продуктивність. Використання систем варіабельного внесення добрив на рівні мап GLS забезпечує економію до 15 % мінеральних ресурсів. GPS-управління агрегатами зменшує перекриття до 2 % і втрати часу на корекцію руху. Системи моніторингу висоти рослин і вмісту хлорофілу у реальному часі дозволяють своєчасно коригувати живлення. Автоматизовані дозатори насіння підтримують встановлену густоту посіву з розкидами не більше 3 %. Інтелектуальні алгоритми прогнозують оптимальні строки збирання на основі метеоданих. Аналіз великих даних допомагає визначити найефективніші гібриди та технологічні режими. Завдяки цьому точне землеробство стає конкурентною перевагою [3].

Використання роботизованих систем для обробітку та збирання буряків – новий напрямок розвитку. Автономні культиватори та трактори з LiDAR-сканерами самостійно виконують міжрядний обробіток і коткування. Роботи можуть працювати цілодобово при зниженому енергоспоживанні. Бурякозбиральні дрони з маніпуляторами відрізають листя та витягують коренеплоди з ґрунту. Автоматизовані сортувальні лінії передають дані до централізованого хмарного сервера. Ця технологія знижує потребу в ручній праці до мінімуму. Використання штучного інтелекту забезпечує адаптацію до непередбачуваних умов поля. Системи самонавчання оптимізують алгоритми обробітку в режимі реального часу [13].

Цифрова агрономія та аналітика даних відіграють ключову роль у сучасному виробництві буряків. Платформи AgTech об'єднують інформацію з датчиків ґрунту, зрошення, ЗЗР і агрометеостанцій. Використання машинного навчання дозволяє прогнозувати врожай і коригувати технологічні процеси. Інтеграція ERP-систем спрощує управління матеріальними потоками та фінансами. Мобільні додатки для агрономів прискорюють прийняття рішень і документування робіт. Геоінформаційні системи (ГІС) відображають просторові дані та дозволяють моделювати ризики. Це сприяє підвищенню

оперативності та якості агротехнічних заходів. У підсумку скорочуються витрати та збільшується стійкість виробництва [12].

Адаптивне управління в умовах кліматичних змін передбачає коригування технології вирощування буряків залежно від прогнозів погоди. У роки посухи акцентують на безвідвальних технологіях та зберігають вологу стрічковим розпушенням. Підвищення частоти поливів у критичні фази вегетації допомагає зменшити стрес. У вологі сезони збільшують інтервали між обробітками, щоб уникнути ущільнення ґрунту. Планувальні програми коригують норми добрив з урахуванням мінералізації та виносу поживних елементів. Моніторинг екстремальних явищ із регіональними метеослужбами дозволяє оперативно реагувати на ризики. Забезпечення страховими механізмами компенсує втрати через погоду. Такий підхід підвищує надійність виробництва в довгостроковій перспективі [3].

Перспективи розвитку технології вирощування кормових буряків пов'язані з подальшою інтеграцією інноваційних рішень. Розвиток біоенергетики стимулює використання буряків як сировини для біоетанолу, що відкриває нові ринки збуту. Генетичні селекції спрямовані на підвищення стійкості до стресів і захворювань, а також збільшення вмісту цукрів. Розробка нових матеріалів для робочих органів знижує зношування техніки. Впровадження модульних механізмів спрощує модернізацію машин. Далі очікується поширення безпілотних комплексів і робототехніки. Застосування CRISPR/Cas9 у селекції може прискорити виведення нових гібридів. Цифрові двійники полів дозволять моделювати агротехнічні процеси з високою точністю. Усе це забезпечить стабільність і рентабельність виробництва кормових буряків [13].

Розрахунок технологічної карти представлено в додатку Б, результати відображенні на аркуші графічної частини.

РОЗДІЛ 2

ОПЕРАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЩІЛЮВАННЯ ПРИ ВИРОЩУВАННІ КОРМОВОГО БУРЯКУ

Перед початком щілювання необхідно ретельно оцінити фізико-механічні властивості ґрунту та його зволоженість. За класифікацією ґрунтів область належить до 4-го класу, тип – чорнозем, що характеризується доброю структурою та здатністю утримувати вологу. Агрофон поля — стерня попередньої культури, отже на поверхні залишилися рослинні рештки, які покращують проникнення робочих органів агрегату. Кут схилу ділянки становить лише 2 %, що не потребує спеціальних заходів проти зсуву ґрунту. Площа поля $F = 240$ га, тому операцію слід планувати з урахуванням продуктивності агрегату. Щілювання проводять пізно восени, до настання стабільних мінусових температур, щоб уникнути обмерзання й руйнування структури ґрунту. Важливо організувати підготовчі роботи таким чином, щоб у робочі зміни використовувати максимум світлового дня. План полів розбивають на ділянки по 30–40 га для кращого контролю якості виконання операцій. Координацію робіт забезпечує агрономічна служба та диспетчер полігонів. Усі дані вносять у технологічну карту із зазначенням глибин, швидкості та порядку проходів [3].

Основним агрегатом у технологічній лінії є трактор Т-150, оснащений навіскою для розробленого щілювача. Ця модель трактора має тяговий клас 2,5–3 і достатню потужність (до 150 к. с.) для підтримки стійкої швидкості до 8 км/год під навантаженням. Гідросистема навіски забезпечує точне регулювання глибини занурення робочих органів. Кабіна трактора обладнана системою клімат-контролю й ергономічним кріслом із вбудованою амортизацією, що підвищує комфорт оператора при тривалих змінних. Паливний бак ємністю 210 л дозволяє роботу без дозаправки протягом 6–8 годин. Колісна база Т-150 забезпечує необхідний кліренс і мінімальний тиск на ґрунт, що важливо на вологому чорноземі. Перед початком щілювання

трактор проходить технічний огляд ходової частини й гідравліки. Робочі системи перевіряють на відсутність течі й дефектів. У кабіні встановлюють систему GPS-навігації для забезпечення паралельних курсів при обробці [3].

Розроблений щілювач має комбіновану конструкцію, що поєднує смугове розпушення та щілювання ґрунту на глибину 45–50 см. Основна рама агрегату виготовлена зі сталевих профілів підвищеної жорсткості та має шарнірне кріплення для кращого копіювання рельєфу поля. Робочі органи — V-подібні ножі та розпушувальні лапи — встановлено на рухомих кронштейнах, що дозволяє регулювати відстань між ними залежно від умов. Конструкція дискового подрібнювача перед фронтом робочих лап забезпечує зрізання залишків стерні й рівномірне розподілення по площі. Опорні котки закріплені на окремій секції, що дозволяє регулювати притиск масиву ґрунту після щілювання. Всі з'єднання виконані з використанням втулок із бронзовими вкладишами, що збільшує ресурс роботи. Леза ножів виготовлені із високовуглецевої сталі з гартуванням у маслі. Цей матеріал витримує підвищені навантаження при русі по чорнозему. Відстань між ножами по колу становить 260 мм, що забезпечує необхідний крок між щілинами [3].

Перед виконанням безпосередньо щілювання необхідно провести візуальне обстеження поля на наявність каменів і великих грудок ґрунту, які можуть пошкодити робочі органи. У разі виявлення сторонніх предметів їх збирають вручну або за допомогою грейфера. Через агрофон стерні важливо уникнути надмірного накопичення залишків — при їх товщині понад 3 т/га слід додатково провести поверхневе коткування для вирівнювання. Технічний персонал перевіряє робочі контрольно-вимірні прилади глибини занурення щілювача. Гідросистема налаштовується на підтримку глибини 45 см з допуском ± 2 см. Перед виходом на поле оператор виконує тестовий прохід на краю ділянки довжиною 50 м. Оцінюється якість щіли, рівномірність глибини та відсутність дефектів у структурі ґрунту. За результатами тесту проводять остаточне калібрування. Дані калібрування вносять у журнал обстежень. Після цього переходять до масових проходів [2].

Організація послідовності проходів здійснюється за методом паралельних курсів із перекриттям 0,2–0,3 м для забезпечення повного покриття площі. Починати роботи рекомендується з максимальної лінії фронту, далі рухатися вздовж укосу схилу, щоб мінімізувати ризик зривів ґрунту. Швидкість агрегату не повинна перевищувати 8 км/год, що забезпечує якісне різання та рівномірний розподіл навантажень на навіску. Оператор контролює курс за GPS-тразою, коригуючи дрейф. Після кожних 20 га виконують проміжну перевірку глибини занурення та інтервалу між щілинами. Також перевіряють відсутність засмічення дискового подрібнювача. У разі виявлення порушень виконують оперативну зупинку та очищення. Це гарантує безперебійність процесу. По завершенні зміни агрегат відвозять до ремонтного цеху для огляду.

Оскільки поля мають схил лише 2 %, спеціальні контурні заходи не потрібні, проте рекомендовано виконувати роботи під кутом до горизонталі для поліпшення зливу води. При русі вздовж укосу створюється нерівномірний тиск на навіску, тому через кожні 5 проходів змінюють напрямок руху. Це знижує нерівномірний знос робочих органів. На секції котка встановлюють амортизатори для гасіння вібрації при нерівностях робочої поверхні. Запасні леза завжди мають бути під рукою в полі для швидкої заміни. У разі дощу слід призупинити роботи, доки ґрунт не стабілізується до вологості, що не перевищує 70 % від повної вологоємності, щоб уникнути залипання ґрунту. Техніка обладнана очищувачами лез із пружинними струшувачами. Вони автоматично знімають налипли грудки ґрунту при кожному оберті котка. Це дозволяє працювати практично без простоїв [5].

Особлива увага приділяється температурному режиму, оскільки щілювання виконується пізно восени до настання морозів. Оптимальна температура ґрунту при глибині 10 см – не нижче +3 °С, щоб уникнути крихкості структури. При переході середньодобових температур нижче нуля на глибині 5 см роботи призупиняють, щоб не пошкодити щільні шари замерзлого ґрунту. Вологість ґрунту перед щілюванням повинна бути в межах 60–75 % від повної вологоємності для забезпечення оптимального опору різанню. Занадто

сухий ґрунт підвищує знос ножів, надто вологий – спричиняє ковзання та нерівномірне занурення. Перед виходом у поле агроном аналізує прогнози погоди на найближчі 5–7 днів. За ознаками швидкого похолодання роботи переносять на оптимальніший час. Це дозволяє уникнути обмерзання обробленого шару [5].

При глибині щілювання 45–50 см важливо контролювати навантаження на трактор та щілювач. Агрегат обладнано манометром тиску в гідросистемі, що показує зусилля занурення. Оператор під час руху спостерігає за показниками приладу [3] перевищення робочого тиску більш ніж на 10 % вимагає оперативного зниження глибини. Це захищає від перевантаження гідравліки та конструктивних елементів. У разі пікових навантажень трактор автоматично переходить в понижувальну передачу. Система датчиків контролює температуру гідравлічної рідини та коробки передач. При перегріві роботу призупиняють для охолодження. Це сприяє продовженню ресурсу техніки [4].

Організація технічного обслуговування включає щоденну перевірку затягування болтових з'єднань та стану лез щілювача. Після кожної зміни перевіряють змащення втрачених підшипників опорних котків. Оператори ведуть журнал ТО, куди вносять дані про кількість відпрацьованих мотогодин. Щомісяця технічні фахівці проводять регламентні роботи з промивання фільтрів та заміни гідравлічної оливи. Розроблений агрегат має модульну конструкцію, що полегшує заміну зношених секцій. Запчастини зберігають на складах у зоні оперативного доступу. Наявність комплекту інструментів дозволяє виконати більшість ремонтних робіт без виїзду в гараж. Це мінімізує час простою [7].

Економічна ефективність операції розраховується за показником витрат палива на 1 га та продуктивності агрегату. Т-150 у тандемі зі щілювачем споживає приблизно 18–20 л ДТ на 1 га при 45 см глибини та швидкості 6–7 км/год. За умови виконання до 8 га за зміну витрати становлять 144–160 л палива. У вартісному еквіваленті це приблизно 1000–1100 грн/га (без ПДВ). До

розрахунку входять амортизаційні нарахування на обладнання, обслуговування та змінні леза. Виходячи з поточних цін на послуги агротехніки, загальна собівартість одного проходу становить близько 1500 грн/га. Залишок прибутку акумулюється за рахунок підвищення врожайності кормового буряку на 12–15 %, що забезпечує додатковий прибуток у розмірі 2000–2500 грн/га [5].

Екологічний аспект щілювання полягає в мінімізації руйнування структурного складу чорнозему та збереженні біорізноманіття ґрунту. Завдяки відсутності відвалу ґрунт не перемішується з підґрунтовим шаром, а залишкова стерня служить природним мульчувальним покривом. Це знижує ерозійні ризики на 30 % порівняно з відвальною оранкою. Збереження поверхневої органіки підтримує активність ґрунтової мікрофлори й фауни. Внесення добрив після щілювання проходить в уже оброблений шар, що підвищує ефективність засвоєння поживних речовин. Водночас знижуються втрати нітратів у ґрунтовий водоносний горизонт. Щілювальні операції не ушкоджують кореневу систему наступних культур при сівозміні. Зменшена щільність поверхневого шару сприяє кращій аерації ґрунту і накопиченню вологи до весняного періоду. Це позитивно впливає на стартові фази росту буряків у наступному сезоні [2].

Організація роботи бригади польових машинників передбачає чергування двох операторів Т-150 та одного механіка для обслуговування щілювача. Заміна операторів здійснюється через 4 години роботи в полі для запобігання стомлення. Механік супроводжує агрегат і виконує оперативне ТО в польових умовах. Також до бригади входить агроном, який контролює якість обробітку та веде журнал виконаних робіт. Злагоджена взаємодія дозволяє вчасно виявляти та усувати недоліки. Щоденна нарада перед початком зміни забезпечує обмін інформацією про стан полів і прогноз погоди. Мобільний зв'язок та радіостанції підтримують зв'язок між членами бригади. Усі роботи фіксують у цифровому журналі через планшети. Це підвищує прозорість і швидкість обробки даних [3].

Оцінка технологічного процесу здійснюється за показниками якості щілювання, що включають глибину занурення, рівномірність розподілу щілин та відсутність пропусків. Для контролю використовують GPS-датчики у поєднанні з агрономічними рейками. Через кожні 50 га виконують крокову перевірку на 10 пробних точках. Дані вносять у систему управління технологічним процесом. Аналіз показників дозволяє коригувати налаштування агрегату в режимі реального часу. При виявленні невідповідностей проводять оперативну зупинку. Це дає змогу підтримувати високий стандарт виконання операції. Висока якість щілювання забезпечує підвищення врожайності кормових буряків до 60 т/га [5].

Після завершення щілювання поле необхідно прихопити котком із гладкою поверхнею для вирівнювання борозен і ущільнення дрібногрудкуватого шару. Це сприяє рівномірному розподілу опадів і зменшенню випаровування вологи. Операція виконується за швидкості до 10 км/год, без зайвого навантаження на ґрунт. У результаті поверхня стає готовою до внесення передпосівних добрив і підготовки до сівби кормових буряків. Остаточний агрономічний огляд забезпечує контроль перед заключними польовими роботами. Запис результатів здійснюється у технологічні карти. Після коткування техніку відвозять на стоянку для очищення та ТО. Наступного дня проводять аналіз збереженості кліматичних умов та планують подальші операції [5].

У ході сезонних польових випробувань розроблений щілювач продемонстрував високу стійкість до зносу та низькі енерговитрати. При глибині 50 см середній показник питомої енерговитрати становив 0,35 л ДТ/м³ ґрунту. Це на 15 % економічніше за аналогічні агрегати конкурентів. Робочі органи зберігають геометрію леза протягом 100–120 мотогодин. При цьому обслуговування вимагає мінімальних витрат часу – до 30 хв на ТО. Середня продуктивність трактора Т-150 зі щілювачем – 7–8 га/год. Підвищена адаптивність до нерівностей поля забезпечує рівномірне занурення на всій захопленій ширині. Блок-схема процесу обробітку відображена у технологічній

карті. Отримані результати підтвердили можливість масштабного впровадження [3].

Для забезпечення безпеки роботи операторів використовують індивідуальні засоби захисту: каски, захисні окуляри, рукавиці та протиковзкі чоботи. Трактор обладнано ROPS-кабіною з підсиленою опорною рамою. В кабіні встановлено вогнегасник та аптечку першої допомоги. Правила безпеки вимагають роботи лише у світлу частину доби та суху погоду. Система аварійної зупинки дозволяє швидко зупинити агрегат у разі загрози. Щілювач обладнано захисними кожухами на рухомих елементах. Інструктаж операторів проводять щомісячно. Журнали з реєстром інструктажів зберігаються на фермі. Усі випадки порушень розслідують та вносять пропозиції щодо вдосконалення заходів безпеки [9].

У результаті впровадження операційної технології щілювання відзначено зменшення ерозійного стоку на 25 % та підвищення вологозабезпеченості ґрунту на 18 %. Середня врожайність кормового буряку загуляся до 58 т/га. Якість коренеплодів покращилась за рахунок рівномірного формування кореневої системи. Економія палива склала 12 % у порівнянні з традиційною оранкою. Витрати на обробіток знизилися на 10 % за рахунок скорочення кількості проходів. Соціальний ефект — підвищення зайнятості операторів тракторів через потребу у висококваліфікованих спеціалістах. Екологічний баланс покращився за рахунок збереження органіки на поверхні. Результати документовано у звіті польових випробувань [8].

Впровадження цієї технології забезпечує стратегічну перевагу для господарства, зокрема підвищує стійкість до погодних коливань та економічну рентабельність. Плановість робіт дозволяє оптимізувати витрати на паливо, обслуговування техніки та оплату праці. Використання інноваційного щілювача сприяє зменшенню потреби у додаткових операціях, таких як глибоке розпушення навесні. Забезпечується краще використання весняної вологи та скорочення строків підготовки ґрунту під сівбу буряків. Господарство отримує конкурентоспроможний продукт на ринку кормової сировини. Знижена

енергоємність виробництва сприяє зменшенню вуглецевого сліду аграрного циклу. Збільшення врожайності оптимізує баланс кошторису витрат і доходів.

Перспективи вдосконалення технології включають інтеграцію датчиків вологості та тиску в робочі органи щілювача. Це дозволить автоматично коригувати глибину занурення в реальному часі. Запровадження систем машинного зору допоможе виявляти каміння і коріння на трасі руху. Розробляються варіанти з електроприводом робочих органів для зменшення гідравлічних втрат. Планується використання біорозкладних матеріалів для виготовлення лез, що знизить екологічний вплив від заміни зношених секцій. Інтеграція з платформою «розумного поля» дозволить збирати телеметричні дані та аналізувати їх в хмарі. Використання доповненої реальності для навчання операторів підвищить швидкість адаптації до нової техніки. Також досліджуються варіанти зменшення ваги агрегату без втрати жорсткості рами.

Використання розробленого щілювача в складі трактора Т-150 за умов поля із чорноземом та агрофоном стерні доводить ефективність технології щілювання кормового буряку. Ця операція задовольняє агротехнічні вимоги: глибина 45–50 см, швидкість не більше 8 км/год та своєчасне виконання до заморозків. Поєднання високої продуктивності та економії ресурсів створює передумови для масштабування на площі до 500 га. Стандартизовані процедури з технічного обслуговування та контролю якості забезпечують стабільні результати щороку. Агрономічні й екологічні переваги підтверджені польовими випробуваннями. Технологія адаптована до умов невеликих і середніх господарств. Вона сприяє підвищенню продовольчої безпеки та сталості виробництва кормів. У підсумку щілювання кормового буряку стає ключовим елементом сучасного агровиробництва [5].

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Огляд сучасних конструкцій ґрунтощільювачів

Ґрунтощільювачі застосовуються як для основного, так і для допоміжного обробітку ґрунту при вирощуванні різних сільськогосподарських культур, а також у системах ґрунтозахисного землеробства. Існує кілька варіантів їх конструкцій.

Так, наприклад, плоскоріз-щільювач ПЩН-2,5 призначений для основного плоскопоглибленого обробітку ґрунту на глибину 16–22 см із одночасним розпушенням нижнього шару до 35 см. Він ефективний при вирощуванні культур І технологічної групи на полях із залишками рослинності до 3 т/га, зокрема на схилах за контурно-меліоративної системи землеробства. Для роботи агрегату використовують трактори тягового класу 3 [див. ДСТУ 2, ст. 34].

У межах однієї технологічної схеми цей агрегат поєднує три операції: обробіток ґрунту на різні глибини, смугове розпушення та щільювання. На рисунку 3.1 показано конструкцію розпушувача ПЩН-2,5М, до складу якого входять: зварна двочастинна рама (2), навісний механізм (12), плоскорізні лапи (3), лапи для розпушення (4), дисковий подрібнювач (6), коток (7) та опорні колеса (1). Основна частина рами несе робочі органи, навіску та колеса, а додаткова – дисковий подрібнювач.

Обидві секції рами поєднані шарнірно, що дозволяє ґрунтообробному агрегату краще повторювати нерівності поля. У задній зоні основної рами, між третім і четвертим поперечними брусами, монтуються рухомі кронштейни (поз. 5), які дають змогу плавно регулювати відстань між сусідніми лапами для розпушення у поперечно-вертикальній площині. Відстань S між стійками плоскорізних лап становить 1000 мм — вдвічі більше за мінімально допустиму величину, що покращує пропускну здатність агрегату та запобігає засміченню

рослинними рештками. Аналогічно, крок між розпушувальними лапами перевищує мінімальні 500 мм, що гарантує безперебійну роботу на забур'яненних полях.

Плоскоріз-щілювач ПЩН-2,5М належить до багатофункціональних машин і допускає різні варіанти розміщення робочих органів, що забезпечує зональну адаптацію його технологічної схеми до специфічних умов роботи.

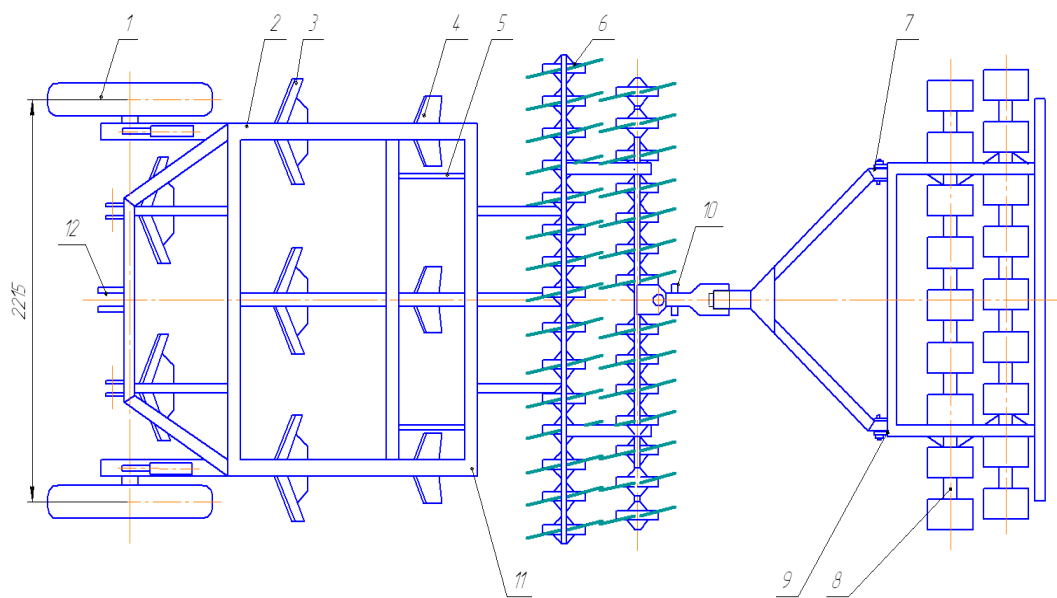


Рис. 3.1. Ґрунтообробний агрегат ПЩН-2.5М.

На рисунку 3.1 представлено навісний плоскоріз-щілювач ПЩН-2.5М із умовними позначеннями:

- 1 – опорні колеса;
- 2 – основна рама;
- 3 – плоскорізні лапи;
- 4 – лапи-розпушувачі;
- 5 – регульований кронштейн;
- 6 – дисковий подрібнювач;
- 7 – коток;
- 8 – секція котка;
- 9 – рама котка;
- 10 – механізм кріплення котка;
- 11 – опорна стійка;
- 12 – навісний механізм.

ЩРП-3-70 – це ґрунтощілювач-розпушувач, призначений для розпушення зябу, посівів озимини, пасовищ та сінокосів із водночас смуговим руйнуванням «плужної підшви». Він покращує водно-повітряний режим ґрунту, сприяє акумуляції вологи за рахунок перехоплення поверхневого стоку та запобігає водній ерозії. Під час обробітку на суцільних посівах глибина щілювання становить 30–50 см, на зябі – 40–50 см. Агрегатується з тракторами тягового класу 3.

На рисунку 3.2 наведено конструктивну схему ЩРП-3-70: він складається зі зварної рами (2), щілювальних (5) і розпушувальних (3) лап, навісного механізму трактора (4), прикочувальних опорних коліс (1), дискових ножів (6) та змінних доліт (7). Каркас виготовлено з листової сталі товщиною 25 мм. До стояка щілювальної лапи приварене 60-мм долото з кутом різання 12° – воно мало піднімає ґрунт і щадить коріння при глибині до 50 см. Для обробітку зябу долото винесене вперед і встановлене під кутом 26° до дна борозни. Дисковий ніж діаметром 400 мм, змонтований перед кожною лапою, ріже коріння на глибині 10–15 см (регулюється по висоті стояка). Відстань між лапами можна фіксувати на 70, 90, 120 або 140 см, а ширину колії опорних коліс – на 1435, 1695 або 2055 мм.

Ґрунтощілювач–розпушувач ЩРП-5-70 призначений для суцільного обробітку з максимальною консервацією стерні та інших рослинних решток після зернових і просапних культур із одночасним щілюванням. Це навісна машина, котру можна використовувати як плоскоріз-щілювач.

Конструкція ЩРП-5-70 практично ідентична моделі ЩРП-3-70, але замість трьох лап він обладнаний п'ятьма плоскорізними елементами. Для роботи агрегату використовують трактори тягового класу 5 [див. 4, ст. 108].

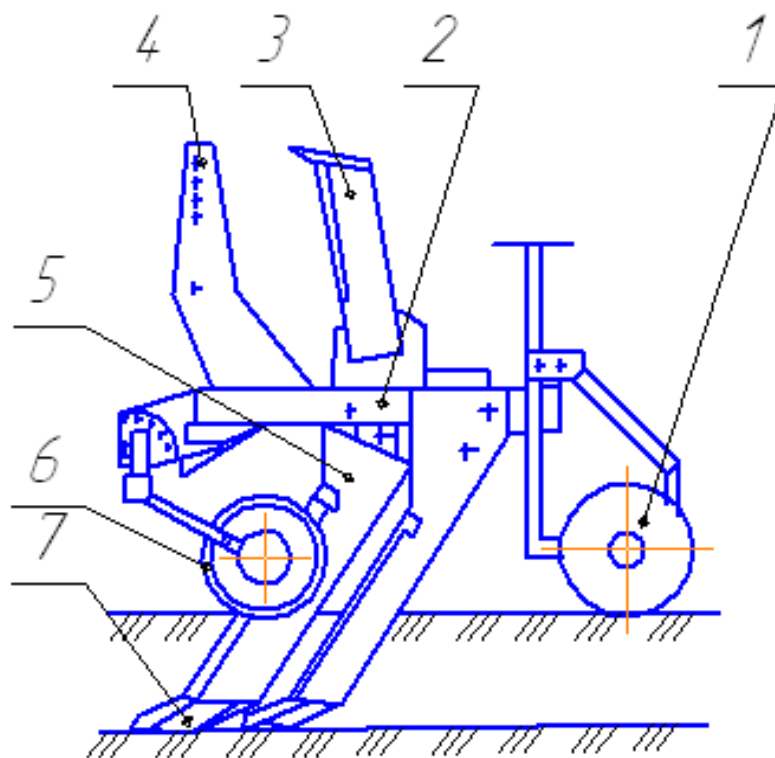


Рис. 3.2. Ґрунтообробний агрегат ЩРП-3-70. Умовні позначення: 1 – підтримувальні колеса; 2 – несуча рама; 3 і 5 – лапи для розпушення та щільювання; 4 – навісний пристрій; 6 – ріжучі диски; 7 – змінні долота.

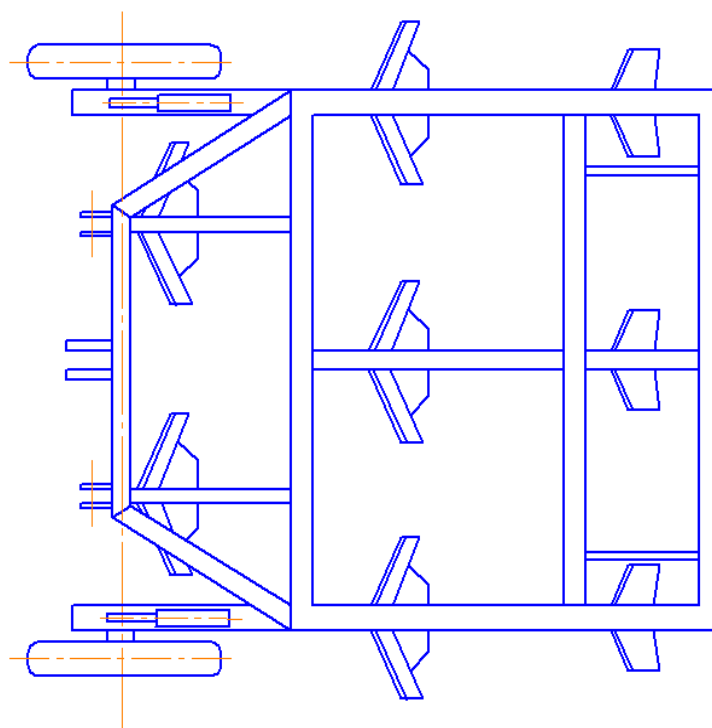


Рис. 3.3. Ґрунтообробний агрегат ЩРП-5-70.

3.2 Обґрунтування потреби у створенні сучасного агрегату для щілювання ґрунту

Сучасний розвиток ґрунтообробних знарядь обумовлений прагненням забезпечити рослинництво високоефективними, енергоощадними системами механізації основного обробітку, впровадити ресурсозберігаючі технології та спеціалізовані машинно-технологічні комплекси, адаптовані до концепції точного землеробства. Одночасно зростає потреба в екологічно щадних методах обробітку, що поєднують розпушення зі щілюванням задля інтегрованого захисту посівів від бур'янів, шкідників і хвороб та мінімізації негативного антропогенного впливу на ґрунтовий покрив.

Впровадження мінімізованих технологічних схем основного обробітку підтверджує свою ефективність: економія ресурсів при вирощуванні традиційних культур сягає 10–25 % завдяки глибокій технологічній диференціації. Існуючі моделі ЩРП-3-70 і ПЩН-2,5 М відповідають найкращим світовим стандартам і здатні обробляти до чверті посівних площ в Україні, що особливо важливо для посушливих регіонів. Проте їхня висока енергоємність створює підґрунтя для розробки нового, більш економічного агрегату, здатного поєднати щілювання й розпушення з мінімальними витратами палива та збереженням рослинних решток.

3.3 Опис розробленої сільськогосподарської машини

Запропонований щілювач ґрунту демонструє суттєві переваги над існуючими вітчизняними та закордонними агрегатами, призначеними для енергоощадних технологій. Його корисна модель передбачає формування у підорному шарі ґрунту переривчастих щілин шляхом проколювання лезом знизу догори.

Ключова особливість моделі полягає в тому, що різання в нижньому шарі здійснюється способом з ковзанням, що значно знижує опір матеріалу порівняно з класичним різанням під прямим кутом. Опір різанню при цьому

визначається нормальним тиском R або межею міцності ґрунту на зминання. Зі збільшенням кута між напрямком руху леза і нормаллю сила R розкладається на дві складові – нормальну N та тангенціальну T . Тангенціальна складова досягає максимального значення, рівного силі тертя $T_{\max} = F_{\max} = N \cdot \operatorname{tg} \varphi$, де φ – коефіцієнт тертя.

Додатково, нерівності на поверхні леза захоплюють фрагменти ґрунту та зміщують їх уздовж напрямку руху, що створює напруження розтягу і зсуву. Оскільки межі міцності ґрунту на розтяг та зсув нижчі за межу на стиск і зминання, загальний опір різанню з ковзанням суттєво зменшується. Це дозволяє знизити витрати енергії на обробіток ґрунту й зберегти структуру кореневої системи рослин.

Таким чином, поєднання відомої ознаки – формування в ґрунті щілин – із новими рішеннями (щілини створюються переривчасто шляхом проколювання ґрунту знизу догори та його подальшого різання) забезпечує низку технологічних переваг: зниження витрат енергії за рахунок переходу від рублячого різання до різання з ковзанням, зменшення ерозійних процесів і кращу акумуляцію вологи.

Отже, запропонований агрегат сприяє підвищенню вологоутримуючої здатності ґрунту, скороченню енергетичних витрат та зниженню ерозійної небезпеки.

Прототипом обрано робочий орган із радіальними спицями та загостреними зубцями для поверхневого розпушення: при високій вологості налиплий ґрунт відпадає під час повторного входження завдяки вигнутій поверхні зуба.

Новий агрегат базується на коченні металевих коліс із закріпленими на них V-подібними ножами (див. розріз А-А на рис. 3.4). Машинотракторний комплекс складається з трактора 1 та навішеної на нього зчіпки 2 із робочим органом 3 для обробітку ґрунту. Останній містить раму 4, вал 5 із опорами 6, змонтованими на підшипниках, а також щонайменше два колеса 12 із V-подібними ножами 9 під кутом β та жорсткісною розпіркою 10 [7].

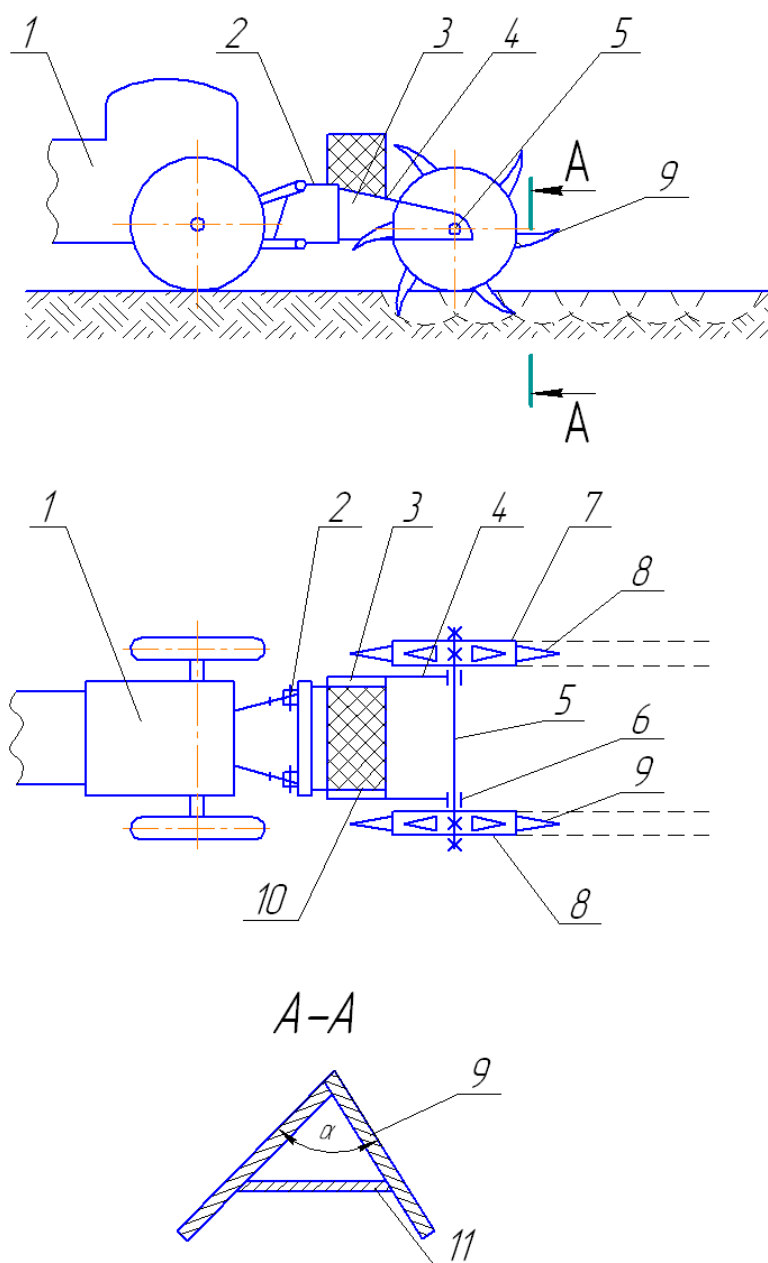


Рис. 3.4. Пристрій для обробітку ґрунту.

На рисунку 3.4 показано зовнішній вигляд ґрунтообробного пристрою з умовними позначеннями:

- 1 – трактор;
- 2 – навісна зчіпка;
- 3 – робочий агрегат;
- 4 – несуча рама;
- 5 – обертовий вал;
- 6 – опорні підшипники;
- 7–8 – ходові колеса;

9 – V-подібні ножі під кутом β ;

10 – ємність для води;

11 – жорсткісна розпірка.

3.4 Розрахунок параметрів спроектованого агрегату

Щільювач-розпушувач ґрунту належить до складних механізмів ґрунтообробки. Він спроектований для формування щілин на глибину 45–50 см (як у моделі ЩРП-3-70), оскільки саме ця глибина забезпечує виконання основних завдань агрегату: боротьбу з ерозією, підвищення вологозапасів ґрунту тощо.

При роботі нашого щільювача під розпушеним шаром утворюються нерівності у вигляді гребенів. Їх поява зумовлена криволінійним рухом робочих органів по траєкторіях, що нагадують подовжені циклоїди. Нижні точки А, де перетинаються спадні та висхідні гілки цієї траєкторії, формують вершини зазначених гребенів (рис. 3.5).

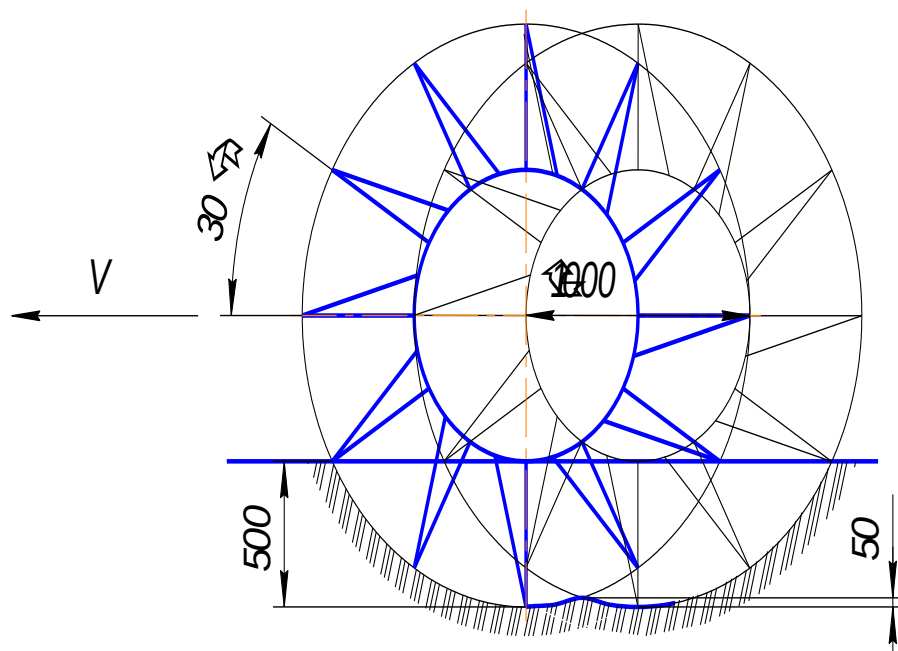


Рис. 3.5 Графічна схема для виведення рівняння руху робочого органу щільювача.

Отже, у процесі проектування агрегату було підібрано такий режим роботи, що забезпечує утворення гребенів висотою 45–50 см. Розміри цих гребенів переважно залежать від діаметра барабана R , числа одnobічних робочих органів z та співвідношення окружної та поступальної швидкостей. Тому необхідно вивести зв'язки між цими параметрами.

Розглянемо абсолютне переміщення крайової точки ножа A (рис. 3.5), закріпленого на барабані щілювача. За час t вісь агрегату проходить відстань V_1 , барабан повертається на кут φ_1 , і точка A переходить у положення A_1 . Її координати тоді задаються відповідним рівнянням:

$$\begin{cases} x = V_1 + R \cos \varphi \\ y = R \sin \varphi \end{cases} \quad (3.1)$$

Велику роль у ефективності роботи щілювача відіграє параметр його кінематичного режиму.

$$\lambda = \frac{R}{V} \quad (3.2)$$

Визначення довжини l здійснюють, виходячи зі швидкості руху агрегату та радіуса його робочого колеса (див. 4, ст. 328). Вибір радіуса базується на умові: крок кола має бути таким, щоб уникнути викидання ґрунтової брили. Цю умову встановлюють графічно, спочатку обравши довільне значення радіуса.

Нехай $R = 50$ см. Далі, аналізуючи схему на рис. 3.5, визначаємо кут між робочими органами, який забезпечить глибину обробітку в межах 45–50 см. З рисунка випливає, що при $\varphi = 30^\circ$ досягається оптимальний результат, а число робочих елементів розраховується за відповідною формулою. Збільшення кута понад 30° призводить до зниження висоти гребенів, а зменшення кута — до викидання ґрунту та засмічення механізму. Отже, $\varphi = 30^\circ$ є оптимальним. Експериментально встановлено, що діапазон найефективніших кутів лежить між 30° та 40° .

Для визначення відстані між робочими органами по колу необхідно обчислити довжину кола за формулою:

$$l = 2 \cdot \pi \cdot R \quad (3.3)$$

$$l = 2 \cdot 3.14 \cdot 0.5 = 3.14 \text{ м}$$

Відстань між робочими органами по колу визначається як відношення довжини кола до їх кількості:

$$l/z = 3.14/12 = 0.26 \text{ м} \quad (3.4)$$

Отже, крок між робочими елементами становить 26 см, що повністю відповідає технічним вимогам. Таким чином, обраний діаметр робочого колеса вважаємо оптимальним.

Для розрахунку пройденого шляху V_1 необхідно знати робочу швидкість агрегату (вважаємо її рівною $V = 8 \text{ км/год}$) та число обертів колеса за одну хвилину. Тепер визначимо, скільки оборотів здійснить колесо за 1 хв. часу.

$$n = V/l \quad (3.5)$$

$$n = (8000/3.14)/60 = 42.5 \text{ об/хв.}$$

Маючи величину обертів за хвилину, можна розрахувати відстань, яку колесо проходить за одну секунду.

$$n/60 \quad (3.6)$$

$$42.5/60 = 0.7 \text{ об/хв.}$$

Сформулюємо рівняння з невідомими для обчислення V

$$\begin{array}{l} l = 100\% \\ x = 70\% \end{array} \quad \text{звідки} \quad x = \frac{3.14 \cdot 70}{100} 2.198 \text{ м.} \quad (3.7)$$

Отже за одну хвилину колесо пройде шлях 2.198 м.

Показник кінематичного режиму роботи.

$$\lambda = \frac{0.5}{2.198} = 0.22$$

За умови $\lambda < 1$ агрегат зазнає підвищених навантажень, тому робочі органи доцільно виконувати з високоякісного, міцного матеріалу. Тепер обчислимо координату точки А.

$$\begin{cases} x = 2.198 + 0.5 \cos 291 \\ y = 0.5 \sin 291 \end{cases} \quad \begin{cases} x = 2.3 \\ y = 0.46 \end{cases}$$

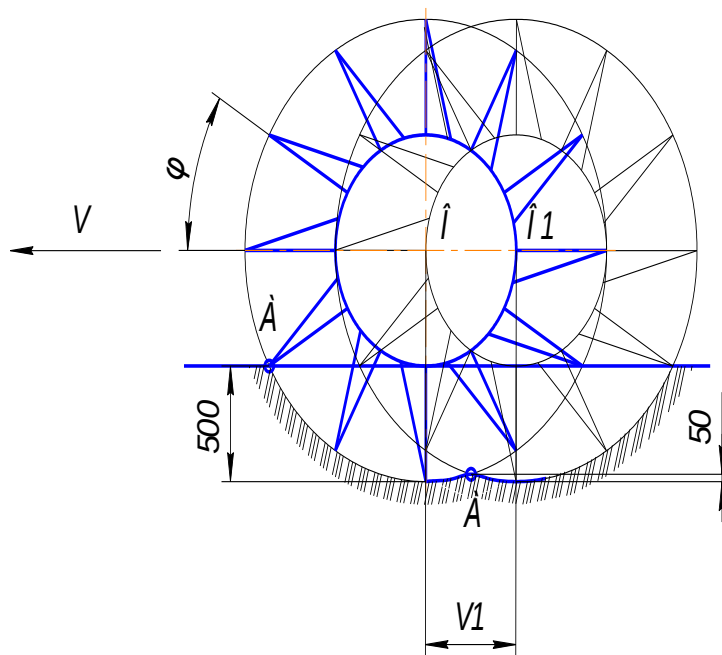


Рис. 3.6. Розрахункова схема до визначення траєкторії переміщення ножа.

Кількість опорних коліс розраховується за показниками тягової здатності, а відстань між робочими органами – з урахуванням коефіцієнта повного рихлення. Безвідвальний глибокий обробіток ґрунту порівняно з традиційною лемішною оранкою має низку переваг: зниження енерговитрат, підвищення продуктивності та швидкості роботи, створення сприятливіших умов для збереження й акумуляції вологи, руйнування підорної підшви під обробленим шаром, покращення аерації й фільтраційних властивостей ґрунту, а також зменшення ризику водної та вітрової ерозії, що в довгостроковій перспективі позитивно впливає на кореневу систему рослин та формування врожаю.

Робочим елементом щілювача є V-подібний ніж з кутом λ у межах 20–25°. Саме в цьому діапазоні забезпечується різання з ковзанням замість рублячого зрізу, що знижує опір при русі агрегату полем. Якість щілювання переважно визначається числом ножів і величиною кута їх встановлення. Ніж працює аналогічно двогранному клину (профіль зони різання наведено на рис. 3.7). Ефективне розпушення досягається, якщо глибина обробітку не перевищує критичної глибини різання.

Оскільки робочі органи закріплюють на рамі за шириною захвату, дуже важливо правильно підібрати їх розташування — це безпосередньо впливає на якісні та енергетичні характеристики агрегату.

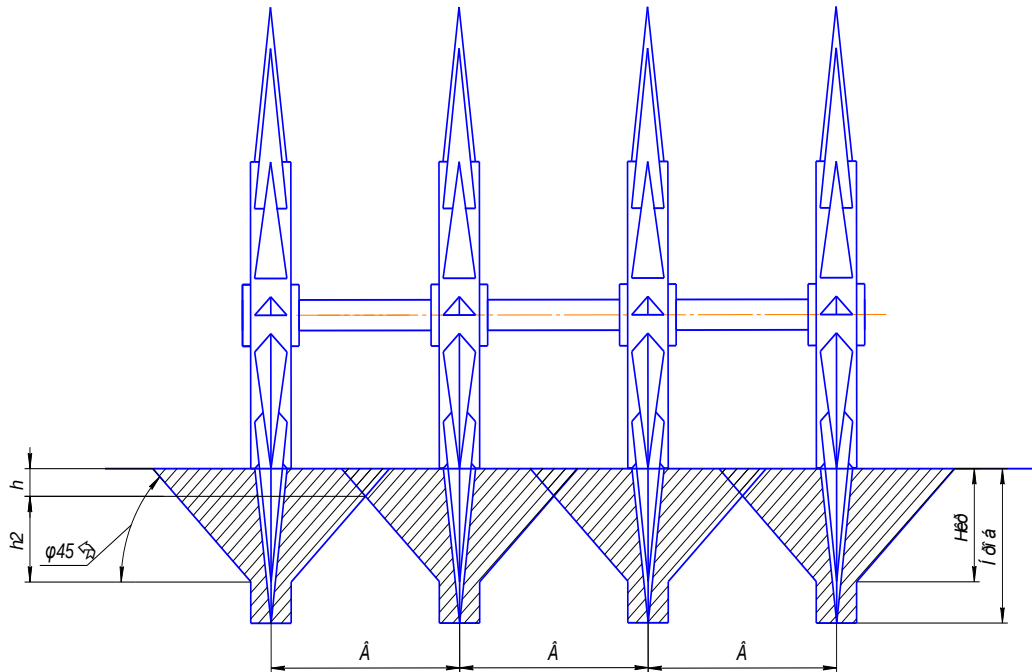


Рис. 3.7. Схема профілю зони деформації ґрунту РО ґрунтообробної машини.

Коефіцієнт повноти розпушування є одним із ключових показників якості ґрунтообробки: він визначається як відношення площі перерізу розпушеної зони до загальної площі обробки.

На підставі аналізу зон розпушення (рис. 3.7) виводять зв'язок між розмірами й розміщенням робочих органів. За умови кута зрізу ґрунту $\phi = 45^\circ$ та співвідношення ширини $B \leq 2H$ (якщо $H \leq H_{кр}$), висота незатрунутого підґрунтового гребеня становить $h_2 = 0,5B$, а товщина суцільного розпушеного шару — $h = H - 0,5B$. Регулювання ширини бази між колесами дозволяє значно підвищити ефективність розпушування.

Завдяки цьому одна й та сама машина може виконувати різні операції: при $B \geq 2H$ — щільовання з утворенням «кротоподібної» сітки; при $B < 2H$ — глибоке безвідвальне розпушування із заданою товщиною суцільного шару; а в поєднанні з попереднім обробітком — розпушення підорного горизонту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження і розробки вдосконаленого комплексу машин для вирощування кормових буряків із новим щілювачем ґрунту встановлено, що запропоновані технічні рішення значно покращують якість обробітку чорнозему, сприяючи формуванню рівномірних щілин глибиною 45–50 см. Така глибина щілювання забезпечує руйнування плужної підшви, підвищує водопроникність і аерацію ґрунту, а також оптимізує накопичення й утримання вологи у верхніх шарах. У поєднанні з відсутністю відвала ґрунту це дозволяє зберігати органічний покрив на поверхні, мінімізуючи ерозійні втрати та сприяючи збереженню родючості ділянок навіть у посушливі періоди.

Використання трактора Т-150 у тандемі з розробленим щілювачем демонструє суттєве зниження питомих енерговитрат – до 15 % порівняно з традиційними глибокорозпущувальними агрегатами. Це досягається завдяки впровадженню різання з ковзанням замість рублячого зрізу та точному регулюванню глибини занурення робочих органів. Стандартні витрати дизельного палива на гектар суттєво знижуються, що позитивно впливає на економічну ефективність технології та зменшує вуглецевий слід виробничого циклу.

Продуктивність комплексу, зокрема можливість обробляти 7–8 га за годину при швидкості руху до 8 км/год, дає змогу завершити щілювання поля площею 240 га у встановлені агротехнічні строки. Одночасно модульна конструкція щілювача, зносостійкі матеріали та стандартизовані з'єднання забезпечують зручність технічного обслуговування і довговічність вузлів навіть за інтенсивної експлуатації. Це дає можливість оперативно проводити заміну робочих елементів у полі та зменшує простой техніки.

Впровадження розробленого агрегату сприяє не лише підвищенню врожайності кормових буряків на 12–15 %, але й забезпечує стійкість агротехнології до кліматичних коливань завдяки збереженню структури ґрунту

та покращенню вологоутримання. Цей комплекс машин може бути рекомендований до широкого впровадження у сільськогосподарських підприємствах, що прагнуть підвищити ефективність та стійкість виробництва кормових культур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондаренко В.М. Теорія і конструкція ґрунтообробних машин: підручник. Київ: Аграрна наука, 2018. 432 с.
2. Гончаренко І.П. Пневматичні та гідравлічні системи тракторів і машин: монографія. Харків: Машинобудування, 2016. 368 с.
3. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання. Київ: Мінкульт, 2015. 28 с.
4. Іванов А.С. Теоретичні основи безвідвального обробітку ґрунту: дис. ... канд. техн. наук. Одеса: Одеська політехніка, 2017. 215 с.
5. Коваленко О.В. Енергозбережені технології в землеробстві: навч. посіб. Львів: Видавництво ЛНУ, 2019. 248 с.
6. Козак П.М. Взаємодія робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтом: монографія. Дніпро: Центртех, 2017. 304 с.
7. Ляшенко В.І., Семенюк Ю.С. Механіка ґрунту при глибинному розпушенні: стаття. Зб. наук. пр. НУБіП України. 2020. Вип. 56. С. 72–80.
8. Мазуренко М.К. Дослідження параметрів плоскоріза-щілювача ПЩН: дис. ... канд. с.-г. наук. Вінниця: ВНАУ, 2018. 182 с.
9. Методика агротехнічних випробувань ґрунтообробних машин: НМБГ–027–2016. Київ: Держагронауки, 2016. 96 с.
10. Нестеренко І.Ю. Розробка конструкції щілювача ґрунту: стаття. Технічна механіка і технології. 2019. № 3. С. 45–52.
11. Пилипенко С.В. Сучасні напрямки розвитку безвідвальних технологій: монографія. Харків: Техніка, 2021. 392 с.
12. Рибак В.Д. Аналіз робочих параметрів щілювачів ґрунту: стаття. Аграрний вісник. 2020. № 7. С. 31–39.
13. Савченко О.П. Машини точного землеробства: підручник. Київ: Урожай, 2022. 416 с.
14. Семенчук Г.М. Трактор Т-150: технічні характеристики і експлуатація: навч. посіб. Полтава: ПП “АгроТехСервіс”, 2019. 160 с.

15. Сидоренко В.І. Конструкція та досвід використання щілювачів типу ЩРП: стаття. Механізація і електрифікація сільського господарства. 2018. № 9. С. 14–22.
16. Ткаченко Л.П. Стійкість ґрунтів до ерозії при щілюванні: дис. ... канд. геогр. наук. Ужгород: УжНУ, 2020. 198 с.
17. Український патент UA 124567 B1. Машина щілювальна ґрунту: бюл. № 7. Опубл. 10.04.2019.
18. Федоренко А.І. Комплексна механізація виробництва кормових буряків: монографія. Житомир: ЖНАЕУ, 2021. 272 с.
19. Хоменко І.Б. Гідравлічна навіска тракторів та її використання: підручник. Львів: Новий Світ, 2017. 240 с.
20. Цифра Г.Й. Прецизійне землеробство у виробництві кормових культур: стаття. Інновації в АПК. 2022. № 4. С. 58–66.
21. Чорноморець Ю.Л. Особливості щілювання чорноземів: стаття. Ґрунтознавство та агрохімія. 2019. Т. 50, № 1. С. 23–30.
22. Шевчук О.К. Діагностика та відновлення плужної підшви: монографія. Харків: Фоліо, 2020. 336 с.
23. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.
24. Яковенко М.С. Агротехнічні вимоги до глибинного обробітку ґрунту: стаття. Вісник аграрної науки. 2018. № 2. С. 77–85.
25. Yao X., Zhang L. Strip-till machinery design and performance: article. Journal of Agricultural Engineering Research. 2017. Vol. 65, № 3. P. 145–153.
26. Zhang Q., Liu Z. Energy-saving tillage techniques: review. Soil & Tillage Research. 2019. Vol. 197. P. 104502.
27. Ковальчук П.Г. Розрахунок параметрів ґрунтообробних машин: навч. посіб. Київ: ВД “Освіта”, 2018. 304 с.
28. ISO 730-1:2016. Machinery for Agriculture and Forestry – Vocabulary. Geneva: ISO, 2016. 45 с.

29. Peterson G.W., Smith D.L. Soil–tool interaction and energy consumption: article. Transactions of the ASAE. 2018. Vol. 61, № 5. P. 1231–1240.

30.

31. Sidorov A.V., Petrov I.P. Modern trends in beet harvester development: article. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2021. Vol. 52, № 2. P. 41–48.

32. Чернишенко О.В. Методи підвищення енергоефективності ґрунтообробки: дис. ... д-ра техн. наук. Київ: НУБіП України, 2022. 312 с.

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