

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

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

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Кіпчук Владислав Богданович

УДК 631.17

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Проект удосконалення комплексу машин для вирощування
цукрових буряків з модернізацією культиватора для
міжрядного обробітку**

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 _____ Кіпчук В.Б.

Керівник роботи

Куликівський В.Л.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Кінчук Владислав Богданович. Проєкт удосконалення комплексу машин для вирощування цукрових буряків з модернізацією культиватора для міжрядного обробітку. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

У кваліфікаційній роботі розглядається проєкт удосконалення комплексу машин для вирощування цукрових буряків шляхом модернізації культиватора для міжрядного обробітку. Викладено актуальність теми з огляду на необхідність підвищення ефективності боротьби з бур'янами, збереження вологи в ґрунті та оптимізації витрат пального під час вегетаційного періоду культур.

У рамках кваліфікаційної роботи проведено аналіз чинних конструкцій культиваторів, їхні технічні характеристики й виявлено основні недоліки у сфері глибокого розпушування та дозованого внесення добрив. В роботі розроблено й узгоджено технічні параметри нової конструкції міжрядного культиватора, який забезпечить рівномірне заглиблення робочих органів на задану глибину та зменшення питомого опору агрегату.

На основі результатів кваліфікаційної роботи розроблено технічні рекомендації щодо комплектації агрегату, регулювання робочої глибини та вибору оптимальних швидкісних параметрів. Практичне значення роботи полягає у підвищенні продуктивності машинно-тракторного агрегату, зниженні витрат пального та поліпшенні агрономічних показників посівів цукрового буряка.

Ключові слова: машинно-тракторний парк, культиватор, ґрунт, цукровий буряк, технологія.

ANNOTATION

Vladyslav Bogdanovych Kipchuk. The project of improving the complex of machines for growing sugar beet with the modernization of the cultivator for inter-row cultivation– Qualification work on the rights of the manuscript.

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

The qualification work considers the project of improving the complex of machines for growing sugar beet by modernizing the cultivator for inter-row cultivation. The relevance of the topic is outlined in view of the need to increase the efficiency of weed control, preserve soil moisture and optimize fuel consumption during the growing season.

As part of the qualification work, the author analyzed existing cultivator designs, their technical characteristics, and identified the main shortcomings in the field of deep loosening and metered fertilization. The researchers developed and agreed on the technical parameters of a new design of a row cultivator that will ensure uniform penetration of the working bodies to a given depth and reduce the specific resistance of the unit.

Based on the results of the qualification work, technical recommendations were developed for completing the unit, adjusting the working depth and selecting the optimal speed parameters. The practical significance of the work is to increase the productivity of the machine-tractor unit, reduce fuel consumption and improve the agronomic performance of sugar beet crops.

Keywords: machine and tractor fleet, cultivator, soil, sugar beet, technology.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ.....	9
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ГРАФІКА МАШИНОВИКОРИСТАННЯ.....	31
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗДІЛ.....	40
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Вирощування цукрових буряків займає важливе місце в структурі сільськогосподарського виробництва України, оскільки ця культура є основним джерелом отримання цукру, а також забезпечує кормову базу для тваринництва. Забезпечення високих урожаїв цієї культури можливе лише за умови дотримання агротехнічних вимог на всіх етапах технологічного процесу. Однією з ключових ланок є міжрядний обробіток ґрунту, який сприяє збереженню вологи, знищенню бур'янів і створенню сприятливих умов для росту коренеплодів. Однак традиційні культиватори часто не відповідають сучасним вимогам ефективності, енергоощадності та якості виконання робіт.

Сучасні виклики в аграрному секторі, зокрема підвищення вартості паливно-мастильних матеріалів, зниження родючості ґрунтів, а також необхідність зменшення антропогенного навантаження на навколишнє середовище, вимагають впровадження технологій і технічних засобів, здатних забезпечити високу продуктивність при мінімальних витратах ресурсів. У зв'язку з цим особливої уваги заслуговує удосконалення машинно-тракторного парку, зокрема комплексу машин для догляду за цукровими буряками.

Модернізація культиватора для міжрядного обробітку як складової цього комплексу дозволяє істотно підвищити якість розпушування ґрунту, зменшити пошкодження рослин у фазі активного росту, знизити енерговитрати та забезпечити більшу адаптацію до різних ґрунтово-кліматичних умов. Це, своєю чергою, сприятиме стабільному підвищенню врожайності та зниженню собівартості продукції.

Крім того, актуальність обраної теми зумовлена потребою у створенні вітчизняних удосконалених зразків сільськогосподарської техніки, здатних конкурувати з імпоротною технікою, з урахуванням специфіки українських агроландшафтів. Проектування та впровадження ефективних конструктивних

рішень у модернізованих культиваторах для міжрядного обробітку є важливим кроком до забезпечення технічної незалежності аграрного сектору України.

Таким чином, удосконалення комплексу машин для вирощування цукрових буряків з модернізацією культиватора для міжрядного обробітку є своєчасним і перспективним напрямом досліджень, що сприяє підвищенню ефективності аграрного виробництва, раціональному використанню ресурсів і забезпеченню продовольчої безпеки країни.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності вирощування цукрових буряків шляхом удосконалення комплексу машин, зокрема модернізації конструкції культиватора для міжрядного обробітку, що забезпечить покращення якості обробітку ґрунту, зменшення пошкоджень рослин, підвищення продуктивності агрегату та зниження енерговитрат.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі **завдання:**

- проаналізувати сучасний стан комплексу машин, які використовуються в технологічному процесі вирощування цукрових буряків, та виявити їх переваги й недоліки в умовах інтенсивного землеробства;
- дослідити агротехнічні вимоги до виконання основних технологічних операцій при вирощуванні цукрових буряків (передпосівний обробіток ґрунту, сівба, догляд за посівами, збирання тощо) та визначити вплив конструктивних особливостей машин на якість цих операцій;
- визначити структуру існуючого комплексу машин, з урахуванням енергетичних засобів, та обґрунтувати доцільність його удосконалення для підвищення ефективності використання техніки;
- розробити технічні та технологічні заходи щодо удосконалення окремої машини (або групи машин) у складі комплексу, що забезпечують зниження енергоємності, підвищення продуктивності та покращення якості виконання операцій;
- провести аналіз сучасного стану технічного забезпечення технологічного процесу міжрядного обробітку цукрових буряків.

- обґрунтувати доцільність модернізації культиватора як ключового елементу комплексу машин для догляду за буряками.
- запропонувати конструктивні зміни до елементів робочих органів культиватора з урахуванням агротехнічних вимог і умов експлуатації.

Об'єктом дослідження є комплекс машин для вирощування цукрових буряків, що використовується на сільськогосподарських підприємствах для виконання технологічних операцій догляду за посівами, зокрема міжрядного обробітку ґрунту.

Предметом дослідження є процес удосконалення конструкції культиватора для міжрядного обробітку буряків з метою підвищення якості виконання агротехнічних операцій, зменшення пошкоджень рослин, підвищення продуктивності та зниження енергоспоживання при догляді за посівами цукрових буряків.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Куликівський В.Л., Бабіч В.О., **Кіпчук В.Б.**, Самчук В.І. Шляхи зменшення тягового опору сільськогосподарських машин. 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. 89-91.

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 кваліфікаційної роботи полягає в розробці технічно обґрунтованих рішень щодо модернізації культиватора для міжрядного обробітку цукрових буряків,

які можуть бути впроваджені у виробництво з метою підвищення ефективності технологічного процесу. Запропоновані конструктивні зміни сприяють зменшенню пошкоджень рослин, покращенню якості розпушування ґрунту, ефективнішому знищенню бур'янів та економії паливно-енергетичних ресурсів за рахунок зниження опору робочих органів.

Модернізований культиватор забезпечує стабільну глибину обробітку міжрядь та адаптується до різних ґрунтових умов, що дозволяє використовувати його на різноманітних посівних площах. Реалізація розроблених конструктивних рішень дозволяє підвищити загальну надійність та довговічність агрегату, а також зменшити витрати на ремонт та технічне обслуговування.

Крім того, результати дослідження можуть бути використані у навчальному процесі для підготовки майбутніх фахівців агроінженерного профілю, а також у діяльності проектно-конструкторських організацій, що займаються вдосконаленням сільськогосподарської техніки.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 21 найменування. Загальний обсяг роботи становить 50 сторінок комп'ютерного тексту, містить 4 рисунки.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

Цукровий буряк є однією з провідних промислових культур у помірних широтах, забезпечуючи значну частину світового виробництва цукру. У країнах Європи, зокрема в Україні, ця культура відіграє ключову роль у сільськогосподарській економіці та харчовій промисловості. За останні роки впровадження інноваційних технологій сприяло підвищенню продуктивності та якості продукції, що дає змогу зменшити виробничі витрати та зберегти екологічний баланс. Сучасні заводи переробляють до 50 тисяч тонн коренеплодів на добу та одержують від 4 до 8 тисяч тонн готового цукру, що демонструє високу ефективність промислових процесів. Бурякоцукрова галузь також забезпечує сировину для кондитерської, хлібопекарської, фармацевтичної та хімічної промисловостей, а відходи виробництва використовуються як корм або біопаливо. У глобальному масштабі близько 80% світового обсягу виробництва цукру припадає на тростину, решта 20% — на буряковий цукор, що підкреслює його велике значення в помірному кліматі. В Україні цукровий буряк традиційно вирощують у Центральному та Західному регіонах (рис. 1.1), де сформована висока агрокультура та розвинена інфраструктура. Незважаючи на зменшення посівних площ у останні роки, завдяки впровадженню точного землеробства та високопродуктивних сортів спостерігається зростання врожайності. Саме тому дослідження сучасних технологій вирощування цукрового буряка є надзвичайно актуальними для підтримки конкурентоспроможності аграрного сектора України [1-3].

Вирощування цукрового буряка вимагає ретельного вибору зон зі сприятливими кліматичними та ґрунтовими умовами, оскільки культура належить до теплолюбних і вологолюбних. Оптимальна температура для проростання насіння становить $+5-8^{\circ}\text{C}$, а протягом вегетаційного періоду важливо підтримувати температуру в межах $+15-24^{\circ}\text{C}$. Удень високі температури прискорюють фотосинтез і утворення маси листя, що сприяє

закладенню високого врожаю, тоді як надмірне спекотне повітря може викликати тепловий стрес і зниження цукристості коренеплодів. Щодо ґрунтів, цукровий буряк найкраще розвивається на глибоких, пухких і родючих чорноземах та суглинках із нейтральною або слаболужною реакцією (рН 6,5–7,5), що забезпечують оптимальний запас поживних речовин та вологозабезпечення [5].



Рис. 1.1. Лідери з посіву цукрових буряків в Україні в 2025 році.

У регіонах із недостатньою вологістю доцільно застосовувати зрошувальні технології, особливо в посушливі роки, щоб уникнути дефіциту вологи в період утворення цукру в коренеплодах. Важливо також враховувати можливість утворення ґрунтового ущільнення, яке негативно впливає на розвиток коренів, тому аграрії уникають проведення обробітку у надто вологий ґрунт. Для визначення оптимальних строків сівби слід аналізувати погодні дані за попередні роки, зосереджуючись на періодах без екстремальних коливань температур чи посух. Географічна локалізація посівів повинна також враховувати віддаленість від цукрових заводів, щоб мінімізувати час і витрати на транспортування, зберігаючи при цьому якість коренеплодів під час збирання та зберігання. Урахування цих кліматично-ґрунтових факторів є критично важливим для забезпечення успішного вирощування культури та отримання високоякісної сировини для подальшої переробки [3].

Перший етап технології вирощування цукрового буряка полягає в ретельній підготовці ґрунту, яка включає лушення, внесення органічних і мінеральних добрив та глибоку оранку. Після збору попередніх культур виконується дискування або чизелювання для руйнування ґрунтової кірки та поліпшення аерації, проте обов'язково слід уникати роботи в умовах надмірної вологості, щоб не спричинити ущільнення. Осінню виконується базова оранка на глибину 28–32 см із застосуванням плугів із передплужниками та важкими бородами або котками, у залежності від глинистості ґрунту та кліматичних умов регіону. У посушливих умовах після плугування проводять коткування, щоб зберегти вологу в ґрунті, а при потребі вносять глибокорозпушувачі для подрібнення важких ґрунтових шарів. Одночасно із первинним обробітком вносять органічні добрива (гній, компост) із розрахунку 30–40 т/га та основні мінеральні добрива — фосфорні та калійні у дозах, визначених за результатами агрохімічного аналізу ґрунту. Навесні, після відтанення, здійснюють поверхневу культивування для рівномірного перемішування добрив із верхнім шаром ґрунту та видалення бур'янів, використовуючи комбіновані агрегати, здатні виконувати кілька операцій за один прохід. Передпосівна культивування включає подрібнення грудок та формування посівного ложа, що забезпечує рівномірний розподіл вологи та сприяє швидкому проростанню дрібніших насінин буряка. Згідно з сучасними рекомендаціями, після культивування слід провести коткування для ущільнення поверхневого шару та запобігання втраті вологи. Виконання цих етапів у встановлені строки та з використанням відповідної техніки дозволяє створити оптимальні умови для наступної фази — сівби, та забезпечити високий рівень польової схожості насіння [4].

Одним із найважливіших етапів є відбір високоякісного насіння з лабораторною схожістю не менше 90% і одноростковістю понад 95%, адже дрібні коренеплоди вимагають ідеальних умов для проростання. Сучасні виробники насіння передбачають калібрування, протруювання фунгіцидами та обробку препаратами для стимуляції росту, що допомагає зменшити вплив стресових факторів у початковий період вегетації. Попередньо насіння може

бути піддано дражуванню або ентенсифікації, що забезпечує однорідність посівного матеріалу та знижує розриви у сходах. У технології вирощування цукрового буряка все більше застосовують пневматичні сівалки точного висіву, які здатні висівати насіння із заданою густотою та забезпечувати оптимальну глибину загортання, — зокрема СТВ-12 вітчизняного виробництва та «Мультикорн» німецької компанії «Франц Кляйне». Використання таких сівалок дозволяє мінімізувати пропуски та утворювати рівномірний рядок, що сприяє кращому розвитку коренеплодів і зниженню конкурентного тиску бур'янів. Передпосівний аналіз ґрунту допомагає скоригувати норми внесення добрив безпосередньо на насос при сівбі, що підвищує ефективність використання поживних речовин. Крім того, деякі господарства практикують передпосівну гідротермічну обробку насіння для прискорення процесу проростання та підвищення стресостійкості рослин. Важливо також правильно зберігати насіння до сівби, підтримуючи оптимальні показники вологості та температури, щоб запобігти передчасному проростанню або загниванню. Саме якість насінневого матеріалу визначає потенційний врожай, тому аграрії приділяють цьому етапу максимальну увагу [6].

Сучасні технології сівби цукрового буряка активно зосереджуються на застосуванні високоточної механізації, у тому числі пневматичних сівалок точного висіву, що гарантують рівномірне розташування насіння в рядках. Вітчизняні зразки, такі як СТВ-12 заводу «Автоштамп» та СУ-12 «Оризон», здатні висівати звичайне, каліброване й дражоване насіння без потреби внесення мінеральних добрив у рядки, що спрощує технологічний процес і підвищує продуктивність праці. Найширше застосовуються також іноземні сівалки з пневматичними висівними апаратами «Мультикорн» та «Оптима» (Німеччина), які забезпечують точність висіву завдяки електронним системам керування та GPS-навігації. Технологія підключення RTK-станцій і GPS дозволяє виконувати сівбу з точністю до кількох сантиметрів, мінімізуючи перекриття рядків і знижуючи витрати пального й добрив. Використання висівних дисків із регульованою швидкістю обертання запобігає пошкодженню

насіння та зменшує пропуски, а датчики контролю дозволяють оперативно виявляти несправності в роботі сівалки. Додатковим елементом є автоматичне керування глибиною загортання, що забезпечує однорідність умов для проростання насіння на всій площі поля. Завдяки цим технологіям поле засівається рівномірно, що сприяє кращому розвитку рослин і підвищенню врожайності. Таке високотехнологічне обладнання дозволяє скоротити час посівної кампанії та менше залежати від погодних обмежень, адже процес частково автоматизовано та більш гнучкий. У підсумку, точна сімба є фундаментальною складовою сучасної технології вирощування цукрового буряка [7].

Строки сівки цукрового буряка критично впливають на формування листкового апарату та продуктивність культури, тому їх зазвичай розраховують із урахуванням кліматичних умов регіону. Зазвичай сімба проводиться, коли температура ґрунту на глибині 5–6 см досягає $+5-6^{\circ}\text{C}$, що забезпечує оптимальні умови для проростання без загрози зворотних заморозків. Під час визначення строків сівки слід враховувати також прогноз погоди, щоб уникнути періодів посухи чи надмірних опадів у фазі активного росту рослин. Надто рання сімба може призвести до загнивання насіння у холодному ґрунті, а запізнення — до недостатнього розвитку листяної поверхні перед літньою спекою. Інтенсивність формування листкового апарату особливо важлива у перші 30–45 днів після появи сходів, оскільки від цього залежить накопичення цукру в коренеплодах. Виконуючи сімбу з оптимальною швидкістю руху сівалок (4–6 км/год), аграрії забезпечують рівномірне розподілення насіння та зменшення ущільнення ґрунту. Одразу після сівки рекомендується провести каткування, щоб забезпечити оптимальний контакт насіння з ґрунтом і зберегти вологу. Для точного контролю глибини загортання та щільності ґрунту використовують датчики тиску й вологоміри, які фіксують параметри в реальному часі. Завдяки використанню GPS-систем відстеження, можна зменшити вплив людського фактора та досягти ідеального ряду під будь-яким нахилом поля. Дотримання цих рекомендацій допомагає сформувати однорідні

сходи та забезпечити стабільний приріст зеленої маси на початкових етапах розвитку культури [4].

Підготовка ґрунту включає також внесення органічних та мінеральних добрив із урахуванням агрохімічного аналізу ґрунту, що дозволяє визначити дефіцитні елементи. Органічні добрива, як-от гній або компост, вносять восени із нормою 30–40 т/га, що підвищує біологічну активність ґрунту та поліпшує його структуру. Крім того, у процесі базової оранки вносять фосфорні та калійні добрива у дозах, визначених аналізом ґрунту, щоб забезпечити культуру необхідним запасом поживних речовин. Важливо враховувати, що надлишкове внесення азоту восени може призвести до надмірного нарощування вегетативної маси та зниження стійкості рослин до зимових прохолод, тому азотні добрива переважно вносять навесні. У передпосівний період вносять азотні добрива у формі кальцієвої селітри або аміачної селітри, виходячи з низької хлористості та хорошої розчинності цих норм у ґрунті. Такий підхід сприяє формуванню високопродуктивного листового апарату, необхідного для фотосинтезу та підвищення цукристості коренеплодів. Дози азоту зазвичай коригують відповідно до вмісту поживних речовин у ґрунті та очікуваного врожаю, щоб запобігти надлишковому накопиченню нітратів у коренеплодах. Крім того, сучасні технології передбачають використання ґрунтово-орієнтованої системи внесення добрив із можливістю варіабельного внесення, засновану на даних геоінформаційних систем. Це дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів та зберегти довкілля, зменшуючи ризик забруднення ґрунту та підземних вод [7].

У період вегетації цукровий буряк особливо потребує азоту, фосфору та калію для забезпечення інтенсивних процесів фотосинтезу та формування коренеплодів. Азотні підживлення здійснюють у двох-трьох етапах: перше — на етапі утворення 4–6 справжніх листків, друге — на початку формування кореневої шийки, а за потреби — третє — перед активним накопиченням цукру. Серед форм азотних добрив науковці відзначають переваги кальцієвої селітри, оскільки вона містить кальцій, необхідний для запобігання дефіциту

цього елементу, і сприяє коректному обміну речовин. Фосфорні добрива вносять на початкових фазах росту, оскільки вони стимулюють розвиток кореневої системи та забезпечують рослини енергією для формування клітин. Калій підвищує стійкість буряка до стресових умов, оптимізує водно-сольовий баланс та сприяє утворенню цукру в коренеплодах. Використання мікродобрив із боровим або цинковим компонентом дозволяє коригувати недостатність мікроелементів, що часто спостерігається на ґрунтах із низьким вмістом органіки. Щоб уникнути перевантаження листя та зниження узгодження обмінних процесів, підживлення регулюють залежно від фаз розвитку культури та погодних умов. Сучасні технології передбачають внесення добрив за допомогою систем точного підживлення через салоган або штангові установки, що забезпечують рівномірний розподіл та зменшення втрат. Після внесення підживлень здійснюють контроль стану листя за допомогою NDVI-датчиків або супутникового моніторингу, щоб своєчасно скоригувати агротехнічні заходи. Такий підхід дозволяє оптимізувати баланс поживних речовин у ґрунті та максимізувати якість та кількість врожаю [9].

Одна з найважчих проблем у вирощуванні цукрового буряка – це забур'яненість, оскільки конкуренція бур'янів за вологу, світло та поживні речовини може суттєво знизити врожайність. За даними досліджень, кожні 100 г/м² зеленої маси бур'янів в максимальній фазі розвитку спричиняють втрати врожаю на 1,5–2,0 т/га, а при критичній щільності у 4–5 злакових чи 1–2 дводольних бур'янини на 1 м² втрати можуть досягати 80%. Сучасна технологія боротьби з бур'янами передбачає комбінацію агротехнічних, механічних та хімічних методів, що забезпечує зниження використання гербіцидів та мінімізацію екологічного ризику. Широке застосування мають післясходові суцільні розпушування ґрунту в зоні рядка, коли кількість сходів бур'янів досягає 10 рослин на 1 п.м. рядка, що дає змогу ефективно контролювати небажану рослинність. З використанням RTK-GPS і вдосконалених сенсорів здійснюють міжрядні обробки, які видаляють бур'яни без значного руйнування ґрунтової структури, скорочуючи ризик ерозії, зокрема на горбистих полях. На

хімічному етапі застосовують системні гербіциди з різним механізмом дії, щоб уникнути формування резистентності бур'янів, наприклад технологію Конвізо® Смарт, що передбачає лише дві цільові обробки за сезон. Агрономи рекомендують чергувати діючі речовини, аби знизити ймовірність виникнення стійких популяцій бур'янів та забезпечити довготривалий контроль. Додатковою складовою є обліковий моніторинг забур'яненості, що проводять шляхом регулярних обстежень та використання дронів для оцінки площі пророслих бур'янів. Інтеграція в системи точного землеробства дає змогу поєднувати агрономічні та хімічні методи з мінімальним навантаженням на довкілля. У результаті комбінований підхід дозволяє досягти оптимального співвідношення затрат і врожайності, зменшуючи залежність від хімічних препаратів [7-9].

Сучасні системи точного землеробства активно впроваджуються для оптимізації боротьби з бур'янами та інших агрономічних операцій, і одним із ключових інструментів є RTK-станції та GPS-навігація. Завдяки цим системам обробіток ґрунту можна проводити з точністю до кількох сантиметрів, що мінімізує перекриття рядків і дозволяє здійснювати суцільні або точкові обробки тільки там, де це необхідно. Новітні сенсори для виявлення бур'янів у ранніх фазах розвитку дають змогу автоматизувати міжрядний обробіток та знизити ризик ерозії на горбистих ділянках. Використання дронів з камерами високої роздільної здатності дозволяє створювати деталізовані карти забур'яненості поля, що підвищує ефективність прийняття рішень. Механічні культиватори з електронним керуванням можуть оперативно коригувати глибину обробітку, залежно від щільності бур'янів та стану ґрунту, забезпечуючи мінімальне ушкодження коренів культурних рослин. До того ж, поширюються системи точкового внесення гербіцидів на основі комп'ютерного зору, які дозволяють застосовувати агрохімікати лише безпосередньо на бур'яни, скорочуючи витрати й зменшуючи екологічний вплив. Деякі господарства впроваджують роботизовані агрегати, що самостійно переміщуються між рядками та виконують локальні обробки згідно з

попередньо сформованими картами. У перспективі застосування AI-технологій дозволить прогнозувати небезпечні ділянки ще до появи бур'янів, спираючись на історичні дані та погодні умови. Ці інновації спрямовані на підвищення екологічної сталості та економічної ефективності виробництва, адже точне застосування ресурсів дає змогу зменшити собівартість вирощування.

Захист цукрового буряка від шкідників та хвороб є невід'ємною частиною сучасної технології, оскільки ураження може призвести до втрати врожаю та зниження якості сировини. Одним із поширених шкідників є дротяники та столова муха, які пошкоджують коренеплоди ще до збирання, тому на етапі підготовки ґрунту застосовують як агротехнічні методи (наприклад глибоке розпушування), так і гранульовані інсектициди у рядки. Для діагностики хвороб використовуються полярикозні та компонентові тести, що дозволяють швидко виявити фузаріоз, церкоспороз та вірусні інфекції. У разі виявлення перших симптомів проводять обприскування фунгіцидами з різними механізмами дії, щоб уникнути розвитку резистентності збудників. Крім того, для зменшення ризику ураження застосовують агротехнічні заходи, такі як правильна сівозміна та видалення рослинних залишків, на яких зберігаються збудники. Інтегрована система захисту передбачає моніторинг популяцій шкідників за допомогою феромонних пасток та автоматизованих сенсорів, що дозволяє здійснювати точкове внесення інсектицидів. Додатково деякі господарства використовують біологічні препарати, спрямовані на пригнічення патогенних грибів чи мікробів, що є дружніми для довкілля. Застосування раннього обприскування вегетосудержувальними засобами допомагає зміцнити рослини та підвищити їх стійкість до шкідників. Завдяки поєднанню агростратегій та новітніх біотехнологічних розробок можна значно знизити хімічне навантаження та витрати на захист культури. Постійний моніторинг і використання сучасних засобів діагностики дозволяють мінімізувати втрати врожаю та забезпечити виробництво здорової сировини [8-13].

Оскільки цукровий буряк є вологолюбною культурою, успішне вирощування неможливе без систематичного та точного зрошення, особливо в

умовах недостатнього природного зволоження. У практиці українських господарств переважно використовують дощувальні установки, оскільки краплинне зрошення поки що є занадто дорогим у обслуговуванні. Найбільш критичними фазами, що потребують достатньої кількості води, є період формування коренеплоду та етап інтенсивного накопичення цукру, коли корінь повинен досягти глибини 1,5 м. Зазвичай зрошення здійснюють у три етапи: від сівби до кінця червня, з липня до серпня та безпосередньо перед збиранням. Після зрошення прилад показує наближення вологості ґрунту до -10 сбар для піщаних ґрунтів та -30 сбар для суглинкових, що є оптимальними показниками для буряка. Використання датчиків вологості ґрунту дає змогу точно контролювати інтервал між поливами, запобігаючи надлишковому зволоженню та зниженню вмісту цукру в коренеплодах. У регіонах із дефіцитом води застосовують комбіновані системи, які поєднують поверхневі поливи по борознах із дощуванням, що оптимізує витрати води. Новітні технології IoT та автоматизовані системи дозволяють дистанційно керувати зрошенням, аналізуючи дані з метеостанцій і ґрунтових сенсорів. У польському досвіді зазначають, що правильне планування поливів дозволило збільшити врожайність буряка до 60 т/га у посушливі роки. Запровадження цих технологій сприяє економії водних ресурсів та підвищенню стійкості культури до посухи.

Вирощування цукрового буряка потребує інтенсивної механізації практично всіх етапів – від ґрунтообробки до збирання, що дозволяє знизити трудовитрати та скоротити строки виконання операцій. Після базової оранки та передпосівної культивації широко застосовують глибокорозпушувачі, які запобігають формуванню ґрунтового ущільнення та сприяють росту кореневої системи на глибину до 45 см. Комбіновані агрегати, що поєднують вирівнювач, подрібнювач грудок, розпушувач та ущільнювач, забезпечують високоякісне підготовлене посівне ложе за один прохід. Сівалки точного висіву, обладнані GPS-навісними системами, забезпечують рівномірний розподіл насіння по полю та збереження заданих норм густоти. Для подальшого догляду застосовують міжрядний культиватор із незалежними захисними котками, що

дозволяє здійснювати післясходове розпушування та видалення бур'янів без ушкодження кореневої шийки. У період вегетації використовують також самоходні штангові обприскувачі для внесення добрив та захисних засобів, що дає змогу оперативно реагувати на зміни стану посівів. Ядро технологічних полів — це тракторні навішувані культиватори з автоматичним регулюванням глибини обробітку, що адаптуються до нерівностей рельєфу. Прийняття рішень щодо швидкості руху агрегатів та глибини загортання виконується на основі даних з сенсорів рельєфу та вологості ґрунту. Високопродуктивні бурякозбиральні комбайни дозволяють одночасно викопувати, очищувати коренеплоди від ґрунту та транспортувати їх на причіп для подальшого транспортування. Завдяки комплексному підходу до механізації складається єдина технологічна лінія, що дозволяє мінімізувати втрати врожаю та забезпечити високу якість продукції [7-11].

У сучасному землеробстві дедалі активніше впроваджуються роботизовані системи та автоматизовані комплекси, що дозволяють виключати людський фактор та підвищувати точність агрономічних заходів. Наприклад, проєкт Flourish передбачає співпрацю малого безпілотного літального апарата (UAV) та автономного наземного робота (UGV) для моніторингу показників щільності посівів, стану ґрунту та локального розпилення засобів захисту рослин. Використання мультиспектральних сенсорів на борту безпілотників дає змогу визначати індекс вегетації (NDVI) для виявлення зон стресу та надмірної забур'яненості. Автономні наземні платформи, оснащені роботизованими обприскувачами, можуть проводити точкове внесення гербіцидів та добрив у зоні потреби, знижуючи загальне хімічне навантаження. Дослідження показують, що такі інтегровані системи забезпечують високу ефективність контролю бур'янів та зменшують витрати на обробіток порівняно з традиційними методами. Крім того, роботизовані агрегати можуть працювати цілодобово, не потребуючи перерв на відпочинок людини, що є важливим під час обмежених агротехнічних вікон для виконання операцій. Впровадження технологій машинного зору дозволяє агровиробникам контролювати стан

посівів у режимі реального часу та своєчасно приймати рішення щодо підживлення чи захисту рослин. Додатково розробляються безпілотні трактори, які можуть самостійно виконувати обробіток ґрунту, сівбу та збирання врожаю. Застосування цих інновацій суттєво підвищує продуктивність праці, зменшує витрати ресурсів та мінімізує негативний вплив на довкілля. У майбутньому прогнозують поширення автономних біопрепаратів для біоінспекції та моніторингу коренеплодів [6].

Інтеграція безпілотних літальних апаратів (дронів) з інтернетом речей (IoT) та хмарними сервісами сприяє розвитку точного землеробства, оскільки дозволяє в режимі реального часу моніторити стан посівів та прогнозувати потребу в агрозаходах. Завдяки встановленим на дронах мультиспектральним і тепловим камерам можна створювати карти вегетаційного індексу, визначати зони дефіциту вологи чи надмірного затінення, а також розпізнавати симптоми хвороб ще до появи видимих ознак. Інформацію з дронів передають на базові станції, де аналітичні модулі, використовуючи алгоритми машинного навчання, формують оптимізовані рекомендації щодо підживлень, зрошення та захисту рослин. У польових умовах аграрії встановлюють ґрунтові сенсори, які вимірюють рівень вологості та температуру на різних глибинах, що дає змогу оперативно коригувати графік поливу. Поєднання даних із дронів, ґрунтових сенсорів та метеостанцій дозволяє створити цифрову модель поля, що враховує мікрокліматичні відмінності та властивості ґрунту кожного мікрорайону. Це допомагає проводити варіабельне внесення добрив та пестицидів лише у тих ділянках, де це необхідно, зменшуючи витрати ресурсів. Крім того, дрони можуть застосовуватися для точкового внесення біологічних препаратів або фунгіцидів, що особливо корисно під час обмежених термінів обробки. Використання AI-систем для аналізу зібраних великих даних дозволяє прогнозувати ризики пандемій шкідників та хвороб, базуючись на історичній статистиці та поточних умовах. У досліджах показано, що застосування таких технологій може підвищити врожайність цукрового буряка на 20–30%, а також знизити витрати на обробку до 25%. Постійний розвиток робототехніки та

сенсорики створює умови для автоматизації процесів, що раніше виконувалися вручну, тим самим удосконалюючи точність агрозаходів [4].

Протягом вегетації цукрового буряка постійний моніторинг стану посівів є критично важливим для вчасного коригування агротехнічних заходів. Розвиток різноманітних безпілотників, оснащених мультиспектральними камерами, надає аграріям можливість регулярно оцінювати стан рослин та швидко виявляти зони стресу. На основі індексу NDVI та інших вегетаційних індексів аналізують рівень засвоєння азотного живлення та виявляють дефіцит поживних речовин. У разі виявлення зон з недостатнім розвитком листяного апарату здійснюють локалізоване внесення добрив через наземні роботизовані агрегати. Ця стратегія допомагає уникнути перевитрати добрив і запобігти негативному впливу на довкілля. Також застосовують радіометричні методи визначення вологості ґрунту, що дозволяє оперативно переглядати графік зрошення. Дати регулярні показники рослинного індексу дають можливість прогнозувати розвиток захворювань і своєчасно запускати програми фунгіцидного захисту. Використання супутникових даних для отримання зображень високої роздільної здатності дозволяє контролювати зміни стану посівів на великих площах. Додатково розвивається технологія LiDAR-сканування, що може виявляти навіть незначні відхилення у морфології рослин, пов'язані з хворобами чи дефіцитом елементів. У сумі поєднання цих підходів забезпечує комплексний моніторинг, що суттєво підвищує ефективність агровиробництва і знижує ризик втрат врожаю [5].

Збирання цукрового буряка є одним із найбільш технологічно насичених етапів, що включає викопування, очищення від ґрунту, розподіл коренеплодів та транспортування до місця зберігання або переробки. Сучасні бурякозбиральні комбайни оснащені системами автоматичного контролю глибини викопування та ступеня очищення, що дозволяє мінімізувати механічні пошкодження коренеплодів. У процесі роботи викопуючі робочі органи акуратно відокремлюють коренеплоди від ґрунту, а через систему рихлильних дисків та вибивних барабанів видаляють налиплий ґрунт і сміття. Деякі моделі

комбайнів оснащені гідравлічними очищувачами, які знижують потребу у великій кількості механічних елеваторів і підвищують швидкість операції. Для зменшення втрат коренеплодів у ґрунті перед масовим збиранням використовують попередню інтенсивну культивуацію, що дозволяє підняти коренеплоди ближче до поверхні. Перша фаза збирання часто виконується комбайнами зі знімними платформами, які транспортують коренеплоди на причіп, а друга — машинами з мийними й сортувальними відділеннями. У сучасних моделях передбачені датчики якості, що оцінюють ступінь ушкодження та вологість коренеплодів одразу під час збирання. Це дозволяє автоматизовано сортувати товарну продукцію та зменшувати кількість браку на вхідному пункті заводу. Тенденції розвитку технології свідчать про впровадження електронного управління та дистанційного контролю, що підвищує безпеку робіт і знижує витрати на обслуговування. Понад 75% сучасних бурякозбиральних агрегатів обладнані GPS-навігацією, що забезпечує оптимальний маршрут руху по полю та зменшує рулонне ущільнення ґрунту. Завдяки таким технологіям збирання стає більш продуктивним, знижується травмування коренеплодів та підвищується загальна якість врожаю [2].

Після збирання цукрових буряків наступним етапом є транспортування до буряконасіної станції або безпосередньо до цукрового заводу, що має вирішальне значення для збереження якості коренеплодів. Зібрані коренеплоди на полі вантажать на причепа або бункери з вентилятором та візуально сортують на зайві предмети та пошкоджені екземпляри. При транспортуванні на великі відстані переважно використовують спеціалізовані самоскиди з бортами, які мінімізують пошкодження буряків при завантаженні та розвантаженні. Потрапляючи на завод, буряки потрапляють у гідравлічний транспортер — бетонний жолоб із нахилом, де струменями води видаляють пісок, каміння та органічні домішки. Відокремлюють гичку та інші легкі домішки за допомогою встановлених на умовах гідравліки уловлювачів, що значно знижує навантаження на подальші етапи переробки. Далі коренеплоди надходять на приймально-очищувальне відділення, де потужні насоси

піднімають їх на висоту до 12 метрів та подають на мийні установки. Мийні відділення оснащені системами барабанного чи струминного очищення, які знімають залишки ґрунту та забруднення з коренеплодів. Використання сучасних технологій автоматизованого транспортування забезпечує однорідність потоків та зменшує потребу в ручній праці. Зібраний буряк, очищений від домішок, негайно спрямовують до подачевача дифузорів, де починається процес вилуговування сахарози. Якість транспортування та зберігання безпосередньо впливає на вміст цукру, тому час від поля до заводу має бути мінімальним.

Процес виробництва цукру з буряків базується на фізико-хімічних методах, серед яких ключовою є дифузія сахарози з рослинних клітин у гарячій воді. Потужність заводів з виробництва цукру показана на рис. 1.2

Потужність працюючих цукрових заводів у 2020 р., тис. т/добу

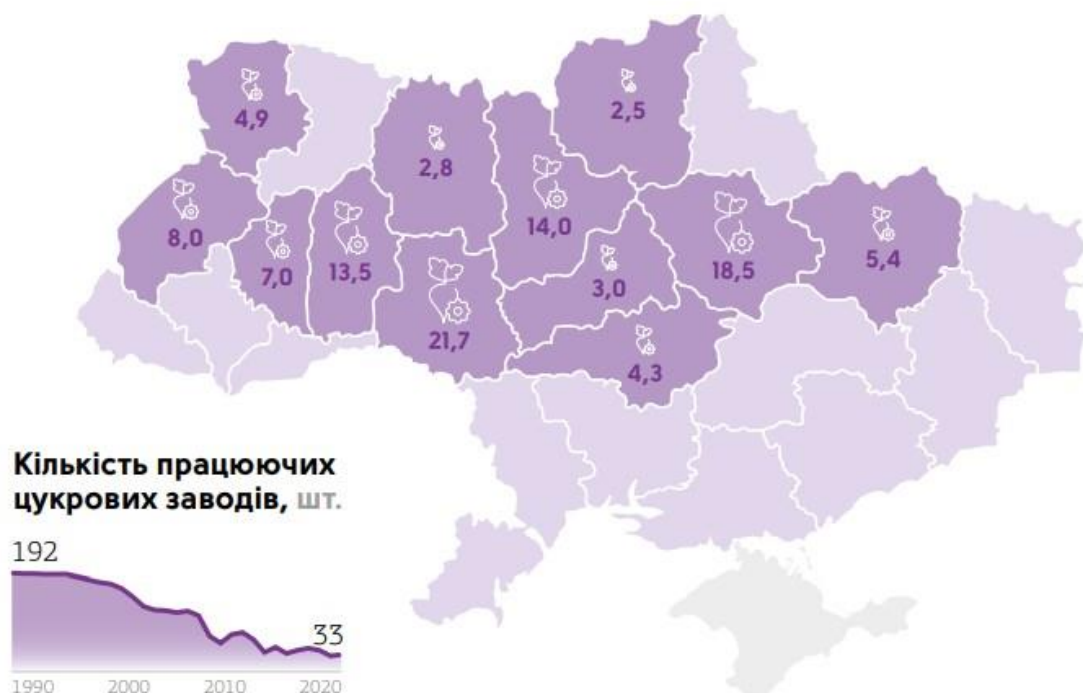


Рис. 1.2. Потужність заводів з виробництва цукру [3-4].

Спершу коренеплоди, очищені від ґрунту та гички, потрапляють у подрібнювач, де подрібнюють до частинок розміром 2–3 мм, щоб підвищити ефективність подальшого вилуговування. Далі утворена маса поступає до дифузорів, де при температурі близько 75–80 °С відбувається інтенсивний

обмін речовин, що дозволяє вилучити сахарозу з клітин до концентрації розчину близько 12–15%. Отриманий сироп далі очищують від нецукрів за допомогою вапняного молока та діоксиду вуглецю, що спричиняє коагуляцію домішок та утворення молекулярного осаду. Цей етап називають карбонатизацією, після чого сироп фільтрують, щоб відокремити осад і отримати практично чистий розчин сахарози. Наступною стадією є упарювання, під час якого концентрацію сиропу доводять до 60–65% сухої речовини, використовуючи вакуумні випарні апарати. Далі настає кристалізація, коли отриманий густий сироп охолоджують, стимулюючи утворення кристалів цукру, які відокремлюють від сиропу за допомогою центрифуг. Мелясний залишок, що містить невилучену сахарозу, ще раз піддають обробці для збільшення виходу продукції. Отримані кристали піддають ретельному сушінню та охолодженню, а потім фасують згідно з технічними вимогами. Сучасні підприємства оснащені системами автоматичного контролю температур та тиску, що забезпечують високу енергоефективність та мінімальні втрати цукру [5-8].

На кожному етапі виробництва цукру з буряків застосовуються сучасні методи контролю якості для забезпечення відповідності стандартам та максимальної чистоти кінцевої продукції. Після надходження сиропу з дифузорів відбирають проби для визначення дифузійної екстракції, вмісту сухих речовин, рН та інших параметрів, що впливають на подальший процес очищення. Під час карбонатизації контролюється концентрація CaCO_3 та ступінь осаду, що дозволяє регулювати чистоту сиропу та мінімізувати втрати цукру. Важливим показником є вміст α - та β -цукру, оскільки він визначає якість товарного цукру — у нормі кінцевий продукт містить не менше 99,7% сахарози. Сучасні лабораторії використовують рефрактометрію для швидкого вимірювання $Brix$ та оптичну спектроскопію для визначення домішок у сиропі та молоці. Контроль за кольором цукрового розчину здійснюють за допомогою спектрофотометрів, що враховують колірні домішки та захищають від появи неприйняттого відтінку готового продукту. Під час кристалізації проводять

аналіз монокристалів та білих домішок, що дозволяє корегувати умови охолодження та центрифугування. Фізико-хімічні тести спрямовані на визначення сумарного вмісту мер в цукрі (біологічні домішки), що відображає чистоту технологічного процесу. Крім того, сучасні лабораторії використовують автоматизовані системи заготовки та розливу проб, що підвищує репрезентативність та швидкість аналізу. Контроль якості наприкінці виробничої лінії включає визначення гранулометричного складу, вмісту залишкової вологи та біологічної стабільності продукції.

При організації сучасного виробництва цукру з буряків важливо забезпечити екологічну безпеку та мінімізувати негативний вплив на довкілля, зокрема шляхом оптимізації використання ресурсів та утилізації відходів. Основними відходами є мелясний залишок та фільтраційні осади, які раніше скидали у спеціальні відстійники, що призводило до забруднення водних об'єктів. Сьогодні все частіше застосовуються технології перетворення мелясного залишку на біогаз через анаеробне бродіння, що одночасно забезпечує виробництво енергії для потреб заводу та зменшує викиди парникових газів. Фільтраційні осади використовують у якості органічного добрива після ретельного компостування та стабілізації, що дозволяє зменшити застосування мінеральних джерел азоту, фосфору та калію. Також впроваджуються установки для очищення стічних вод, які відокремлюють тверді фракції та знижують вміст забруднюючих речовин до допустимих норм перед скидом у природні водойми. Підвищення енергоефективності досягають через рекуперацію тепла в процесі упарювання та використання когенераційних установок, що виробляють електроенергію та тепло зі залишкового пару. Крім того, сучасні цукрові заводи встановлюють системи пилогазоочистки, що знижують викиди дрібнодисперсного пилу та діоксиду сірки на етапах сушіння та кристалізації. У полях вирощування буряка аграрії практикують європейську систему захисту ґрунтів через мінімізацію обробітку та збереження рослинних решток, що сприяє підвищенню вмісту органічного вуглецю. Застосування точного внесення пестицидів та добрив також спрямоване на зниження

екологічного навантаження на ґрунтово-водну систему. У комплексі ці заходи дозволяють не лише відповідати екологічним стандартам, а й підвищувати рентабельність виробництва, оскільки зменшуються витрати на енергію та ресурси 7-8.

У межах концепції сталого агровиробництва особливу увагу приділяють економному використанню водних та земельних ресурсів, а також зниженню викидів CO_2 у процесі вирощування та переробки цукрового буряка. Застосування зрошення з використанням датчиків вологості ґрунту забезпечує оптимальний графік поливу, що дозволяє заощаджувати до 30% води у порівнянні з традиційними методами. Варіабельне внесення добрив, засноване на даних ґрунтових аналізів та супутникових знімків, дозволяє коригувати норми живлення, скорочуючи надлишкові витрати азоту та фосфору. Використання ґрунтово-орієнтованих систем внесення добрив зменшує ризик потрапляння нітратів у підземні води та знижує загальне навантаження на екосистему. У полях, де застосовуються прямі сівби або мінімальний обробіток, зберігають більше органічної речовини, що підвищує вміст вуглецю у ґрунті та його біологічну активність. Крім того, відходи виробництва, зокрема мелясний залишок, перетворюють на біогаз, що забезпечує енергопотреби заводу та зменшує викиди парникових газів. Системи рекуперації тепла під час випарювання дозволяють зекономити до 15% енергії, необхідної для сушіння та кристалізації. Агровиробники активно впроваджують сівозмінні практики, щоб зменшити накопичення шкідників та хвороб у ґрунті та мінімізувати хімічне навантаження. Застосування інноваційних технологій, таких як LED-освітлення для контролю за станом посівів у теплицях та індустриальних фермах, сприяє скороченню енергоспоживання. Також серед важливих аспектів — інтегроване управління шкідниками та хворобами із використанням біологічних препаратів, що сприяє здоров'ю ґрунтової біоти. У результаті впровадження цих практик аграрії досягають не тільки високої продуктивності, а й довгострокової екологічної рівноваги [4-7].

Окрім агротехнічних прийомів, велике значення має селекція та насінництво, спрямовані на отримання високопродуктивних і стійких до стресових факторів сортів цукрового буряка. Сучасні сорти здатні формувати потенційні врожайні показники понад 80–100 т/га за умов застосування передових технологій вирощування. Використання біотехнологічних методів, таких як генетичні маркери, прискорює процес селекції та дозволяє створювати гібриди з підвищеною стійкістю до хвороб та шкідників. Крім того, розробляють гібриди, які краще засвоюють поживні речовини та мають підвищену водостійкість, що важливо у періоди кліматичних аномалій. У селекції враховують показники цукристості, вміст пофарбованих домішок, хлорофілу та відсутність дефіцитних елементів. Завдяки впровадженню технологій наноматеріалів у насіннєву обробку, зростає здатність рослин протистояти грибковим захворюванням та посухам. Сучасні дослідження показують, що нанесення амінокислотних комплексів та стимуляторів росту на насіння сприяє покращенню енергії проростання. Особливо актуальні технології мікродобрив, що містять фульвокислоти та гумати, що стимулюють обмін речовин на клітинному рівні. Крім того, інтенсивно впроваджується мікоризальна інокуляція, що покращує доступ рослин до фосфору та мікроелементів у ґрунті. Ці біологічні підходи дають змогу ще більше підвищити врожайність та ефективність виробництва при збереженні екологічної стійкості [7-8].

Розвиток Інтернету речей (IoT) та вбудованих систем сприяв появі смарт-технологій у зрошенні та моніторингу поля, що суттєво підвищує ефективність використання ресурсів. У багатьох господарствах встановлюють ґрунтові датчики вологості, температури та електропровідності, які передають дані в хмарні сервіси для аналізу та автоматичного прийняття рішень щодо зрошення. У дослідженні запропоновано IoT-систему, яка автоматично регулює подачу води через аналіз даних із супутників та ґрунтових сенсорів, що уможливорює ощадливе витрачання водних ресурсів. На стадії передпосівної підготовки встановлюють безпілотні UAV-дрони, які збирають багаточастотні зображення

поля та визначають характеристики ґрунту, що надалі використовуються для формування карт посівних норм і добрив. За допомогою мобільних додатків аграрій може у реальному часі отримувати інформацію про температуру ґрунту, вологість та стан посівів, що сприяє оперативному реагуванню на зміни погодних умов. Новітні системи включають модулі машинного навчання, які прогнозують оптимальні строки зрошення та підживлень, враховуючи історичні дані та прогноз погоди. Застосування LoRaWAN дозволяє організувати мережу бездротових датчиків із низьким енергоспоживанням та великою дальністю дії, що особливо корисно на великих полях. Інтеграція даних у єдину платформу ERP сприяє ефективному плануванню агрооперацій та оптимізації логістики. Окрім зрошення, IoT-системи допомагають моніторити стан машин та обладнання, попереджаючи про потребу у сервісному обслуговуванні. Таким чином, цифрові технології значно підвищують конкурентоспроможність виробництва і знижують вплив людського фактора на продуктивність.

Уточнене управління живленням рослин є невід'ємною частиною сучасної технології вирощування цукрового буряка, що передбачає варіабельне внесення добрив у залежності від потреб конкретних ділянок поля. Для цього аграрії використовують карти аплікацій, сформовані на основі ґрунтових проб і даних дистанційного зондування, які вказують на нерівномірний розподіл поживних елементів. Варіабельне внесення дає змогу коригувати норми азоту, фосфору та калію, спрямовуючи додаткові дози у ділянки з низьким рівнем у ґрунті та економлячи ресурси на ділянках з оптимальним забезпеченням. Використання сучасних систем внесення добрив із датчиками швидкості руху та системами паралельного проведення робіт забезпечує рівномірність розподілу навіть на нерівних площах. Агрономи використовують ґрунтові спектрометри та інструменти NIR (near-infrared), щоб оперативно оцінити рівень вологи та харчування прямо в полі. Після внесення добрив проводять моніторинг ефективності через супутникові дані, фіксуючи зміни індексу NDVI, що вказують на реакцію рослин. У разі виявлення дефіциту пізніше,

здійснюють точкові корекційні підживлення через обприскувачі, оснащені GPS-керованими форсунками. Системи цифрової картографії дозволяють зберігати історію живлення ділянок, що у перспективі допомагає прогнозувати врожайність та розраховувати економічну доцільність застосування тих чи інших норм добрив. Використання таких підходів спрямоване на підвищення рентабельності, оскільки знижуються витрати на добрива та збільшуються обсяги отриманих коренеплодів [10-13].

Інтегрована система захисту цукрового буряка передбачає поєднання агротехнічних, біологічних та хімічних заходів для мінімізації шкоди від шкідників та хвороб при збереженні екологічної рівноваги. Застосування феромонних пасток дозволяє своєчасно виявляти загрозу шкідників, таких як столова муха чи дрітязник, та оцінювати рівень зараженості. Агротехнічні заходи, серед яких сівозміна, своєчасне видалення рослинних залишків та правильна обробка ґрунту, сприяють зниженню популяцій патогенних організмів. У хімічному аспекті рекомендують використовувати інсектицидні та фунгіцидні препарати з різними механізмами дії, чергуючи активні речовини, щоб ускладнити розвиток стійкості у шкідників та грибів. На ранніх етапах інфекції ефективними є біопрепарати на основі триходерми чи *Bacillus thuringiensis*, що зменшують використання синтетичних агрохімікатів. Регулярний моніторинг за допомогою наземних і безпілотних систем дає змогу оперативно коригувати заходи захисту і уникати масових нашествій шкідників. Такі біологічні рішення підвищують загальну стійкість агроєкосистеми та покращують здоров'я ґрунту. Використовують також агрометеорологічні прогнози для оцінки ризику розвитку хвороб, що дозволяє планувати обробки у прогнозовані періоди високої ймовірності ураження. У підсумку інтегрований підхід дозволяє збалансувати економічні витрати на захист з ефективністю контролю шкідливих агентів, мінімізуючи при цьому шкідливий вплив на довкілля [12-18].

Одним із важливих нововведень у технології вирощування цукрового буряка є використання супутникового зондування для прогнозування

врожайності ще до збору врожаю. Робота проєкту Flourish демонструє, що поєднання даних з UAV- та UGV-систем дозволяє отримувати високоточні карти стану посівів, базуючись на результатах мультиспектрального аналізу. Зокрема, використання NDVI-індексу надає змогу оцінити стан листяного апарату та прогнозувати майбутній рівень накопичення цукру у коренеплодах. Супутникові сервіси, такі як Sentinel-2, забезпечують регулярні оновлення знімків високої роздільної здатності, що допомагає відслідковувати зміни в умовах поля в режимі реального часу. З огляду на історичні дані про врожайність та погодні умови, алгоритми машинного навчання з високою точністю передбачають потенційний урожай у підрозділах поля по 10–20 га [4-8].

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА ГРАФІКА МАШИНОВИКОРИСТАННЯ

Графік машиновикористання є одним із ключових інструментів планування роботи машинно-тракторного парку в аграрному виробництві. Його основна мета – візуалізувати потребу господарства в техніці протягом року, що дозволяє оптимізувати використання ресурсів і запобігти простоям техніки. У реальному виробництві раціональне машиновикористання сприяє зниженню витрат на паливо, технічне обслуговування та ремонт, а також підвищує продуктивність праці аграріїв. Будь-яке підприємство, яке володіє кількома тракторами, комбайнами чи іншими механізованими агрегатами, стикається з необхідністю чітко співвідносити потребу в техніці з календарним графіком польових робіт. З огляду на сезонність аграрних операцій – посівну, догляд, збирання врожаю – пікові навантаження на тракторний парк припадають на обмежені періоди року. Саме тому графік машиновикористання, який будується на основі даних річного плану механізованих робіт, є фундаментом для прийняття управлінських рішень щодо формування парку. Окрім економічного аспекту, графік дає змогу врахувати й технічні характеристики машин, їхню потужність, продуктивність та норми витрачання ресурсів. Використання подібного графіка забезпечує своєчасність виконання агротехнічних заходів, що безпосередньо впливає на якість і обсяги врожаю. У загальному вигляді побудова графіка машиновикористання об'єднує організаційні, технічні та економічні аспекти, забезпечуючи баланс між наявними можливостями парку і виробничими потребами [7-9].

Першочергова задача при побудові графіка машиновикористання – розуміння сутності самого терміну. Згідно з класифікацією, машиновикористання – це система організаційних, технічних, технологічних та інших заходів з реалізації потенційних можливостей машин у процесі виконання механізованих робіт. У контексті машинно-тракторного парку аграрного підприємства поняття «графік машиновикористання» означає

графічне відображення потреби в певній кількості одиниць техніки (зокрема тракторів конкретних марок) для виконання запланованих робіт у різні періоди року. Визначення основоположних параметрів, таких як продуктивність машин, норма витрати часу на одиницю роботи, робочий цикл і сума доступних машино-годин, складає фундамент для коректного побудування графіка. До того ж у графік закладаються дані про організаційні форми використання техніки: чи це робота бригади, окремої ланки чи змішана форма. Водночас ураховуються показники машиновикористання – коефіцієнти використання машино-годин, технічної готовності та продуктивності, які вводять у розрахунки для отримання реалістичного графіка. Таким чином, правильне розуміння термінології та методології формування графіка машиновикористання є першочерговим етапом, що визначає якість подальшого планування [7-9].

Для побудови графіка машиновикористання необхідно мати вихідні дані з річного плану механізованих робіт, які зазвичай оформлюються у вигляді таблиці. У цій таблиці зазначають перелік усіх механізованих операцій (передпосівна обробітка, сівба, міжрядні обробітки, підживлення, збирання врожаю тощо), їхній обсяг у гектарах і строки виконання. Додатково фіксують продуктивність машинно-тракторних агрегатів (МТА), витрати робочого часу та кількість працівників, задіяних у кожній операції. Наприклад, продуктивність конкретного трактора чи комбайна вимірюють у гектарах за годину або кубічних метрах продукції за годину, залежно від характеру роботи. Обсяг роботи кожної операції розподіляють по регіонах господарства чи полях, враховуючи площу і агрокліматичні умови. Дані про строки виконання беруть з агрономічного календаря, враховуючи оптимальні дати для сівби, підживлення та збору врожаю. Важливо також мати інформацію про технічний стан машин, тому що в періоди пікових навантажень можуть виникати потреби у ремонтно-обслуговувальних заходах, які впливають на кількість доступних машино-годин. Отримавши повний перелік вихідних даних, можна перейти до безпосереднього конструювання графіка. Таким чином, якість і достовірність

річного плану механізованих робіт є основною передумовою для правильності графіка машиновикористання [9-14].

При побудові самого графіка по осі абсцис відкладають час виконання роботи в одиницях, звичайно в днях або декадах, а по осі ординат — кількість машин конкретної марки, необхідну для виконання цієї роботи. Наприклад, якщо в період сівби мають бути засіяні 500 га за 7 днів, а продуктивність агрегату становить 2 га/год, тоді розраховують, скільки машин потрібно мати щодня, щоб розгорнути посів у задані терміни. Щоб визначити кількість днів, у яких слід провести роботи, ділять обсяг на ефективний час роботи за день, а потім отриману величину розподіляють між днями посівної кампанії. Якщо один трактор працює 8 машинних годин на добу, то продуктивність становитиме 16 га за добу за умови двозмінного режиму, або 8 га за добу за однозмінного, залежно від методики. Кількість машин у кожен день визначається як частка загального обсягу роботи на обсяг, який може виконати одна машина за одиницю часу. До побудови графіка починають із визначення пускових дат кожної агрооперації на основі агрокліматичних умов та регіональної специфіки. Відповідний проміжок часу (наприклад, 14 днів для міжрядних обробітків) відкладають по осі абсцис, а на осі ординат визначають, скільки машин на той чи інший день потрібні, щоб завершити роботи в встановлений період. Після цього для кожного дня наносять точку, яка відображає потребу в техніці, і отримують ламану лінію, що візуалізує зміни потреби машин у часі. Таким чином, графік машиновикористання наочно показує навантаження на парк техніки у розрізі календарних термінів [12-18].

Алгоритм побудови графіка машиновикористання включає кілька етапів, що передбачають послідовне опрацювання вихідних даних. Перший етап — аналіз таблиці річного плану механізованих робіт: необхідно визначити перелік усіх операцій, їх обсяг та строки. Другий етап — визначення продуктивності кожного МТА: тут враховують технічні характеристики машин (потужність, ширину захвату, норми витрат пального, продуктивність за годину роботи) і середню тривалість робочого дня. Третій етап — розрахунок кількості машин,

необхідних для виконання кожної операції в кожній декаді або дні, залежно від тривалості операції: ділять обсяг роботи на добову норму виробітку однієї машини. Якщо результат непарний, округлюють його в більшу сторону для забезпечення виконання робіт у запланований строк. Наступний крок – побудова тимчасової шкали, де по осі абсцис відкладають календарний період (дні чи декади), а по осі ординат – кількість машин, яку потрібно мати в кожний із цих періодів. Після цього отримані точки з'єднують, формуючи ламану або стовпчикову діаграму (залежно від обраного формату), що відображає зміну потреби в техніці в часі. Для кожної норми продуктивності й обсягу роботи враховують коефіцієнт машиновикористання, що зменшує розрахунковий час у зв'язку з простоєм, технічним обслуговуванням чи змінами. На завершення перевіряють, чи забезпечує парк достатню кількість машин для найвищих пікових навантажень, і за необхідності коригують план, додаючи резервні одиниці техніки або зміщуючи строки виконання окремих робіт. Цей алгоритм гарантує, що побудований графік буде реалістичним і враховуватиме всі фактори, що впливають на використання машинно-тракторного парку [8-14].

Графік машиновикористання виконує одразу кілька практичних функцій: відбудова планування робіт до оптимізації складу парку. По-перше, аналіз графіка дає змогу виявити періоди пікового навантаження на техніку, коли кількість необхідних машин досягає максимуму. У такій ситуації господарство може прийняти рішення про оренду додаткової техніки або про перенесення частини робіт на менш завантажені періоди, якщо це агрономічно допустимо. По-друге, графік слугує засобом контролю: під час виконання польових робіт керівник може зіставляти реальну кількість машин із запланованою та за потреби коригувати оперативні рішення. Це особливо актуально в умовах несприятливих погодних умов, коли строки виконання операцій можуть змінюватися. По-третє, аналіз графіка сприяє ефективному формуванню складу машинно-тракторного парку: на основі візуального зображення потреби у різні періоди року можна визначити, скільки одиниць техніки кожної марки необхідно мати у господарстві. По-четверте, графік дозволяє більш точно

розрахувати витрати на утримання парку, зокрема паливо, мастила, технічне обслуговування, амортизацію, оскільки відомо, коли і скільки техніки буде задіяно. Зрештою, графік машиновикористання є інструментом не лише оперативного, а й стратегічного планування, адже на його основі можна проектувати перспективний розвиток парку на кілька років уперед [14-18].

Однією з переваг побудови графіка машиновикористання є можливість легкого коригування даних під час зміни вихідних умов. Наприклад, якщо погодні умови змусили затримати сівбу на два тижні, то відповідний блок часу у графіку для посівної кампанії «переміщують» уздовж осі абсцис, не змінюючи пропорційної кількості машин, необхідних у кожний із періодів. Подібним чином, при аварійному простої кількох одиниць техніки необхідно відкоригувати кількість задіяваних машин, аби реальна потреба відображалася коректно і агрохімічні терміни не порушувалися. У цифровій практиці такі коригування здійснюють у табличному редакторі (наприклад, Excel), де обчислення залежать від формул, або в спеціалізованому програмному забезпеченні для агропланування. Використовуючи варіабельні формули, можна автоматизувати визначення кількості техніки при зміні продуктивності агрегатів чи структури посівних площ. Оновлення даних виконується в режимі реального часу, що дає змогу оперативно реагувати на нові виробничі виклики. Попри це, важливо контролювати достовірність початкових даних – якщо помилилися в обсягах роботи чи фактичній продуктивності машин, то графік автоматично «зійде з рейок». Тому доцільно проводити періодичні ревізії технічних характеристик парку та агротехнічного плану, аби мати актуальну інформацію для розрахунків [16-19].

Для спрощення роботи з побудови графіка машиновикористання сьогодні застосовують цифрові інструменти, зокрема програмні продукти класу ERP (Enterprise Resource Planning) та інтегровані агросистеми. У таких системах зберігаються відразу всі дані: про поля, культури, площі, строки, технічні характеристики машин і бригад. Спеціалізовані модулі автоматично формують графіки, враховуючи коефіцієнт готовності техніки, коефіцієнти запасу часу та

інші показники. За допомогою інтерфейсів користувач може коригувати строки чи обсяги робіт, а система одразу перераховує необхідну кількість машин для кожного періоду. Використання геоінформаційних технологій (GIS) дозволяє візуально розміщувати поля на електронній карті та одразу отримувати інформацію про необхідність техніки за конкретними координатами. Подібні рішення дають змогу планувати логістику, наприклад, оптимізувати маршрути руху машин між полями згідно з графіком, що істотно знижує витрати пального й час простоїв. Окрім ERP-систем, існують окремі вебсервіси та мобільні додатки, які дозволяють скласти графік машиновикористання «на ходу» – без прив’язки до стаціонарної станції. Проте навіть при впровадженні складних ІТ-рішень необхідно мати кваліфікований персонал, що розуміє агротехнічні та організаційні вимоги до машиновикористання. Завдяки цифровізації процесу суттєво зменшується ручна праця, знижується ризик людських помилок та підвищується гнучкість планування [11-13].

Для ілюстрації процесу побудови графіка розглянемо умовний приклад господарства, яке займається вирощуванням зернових культур на площі 1 500 га. У річному плані механізованих робіт виділено такі ключові періоди: передпосівна обробка (15 – 30 березня), сівба (1 – 15 квітня), міжрядні обробітки (15 травня – 15 червня), підживлення та захист (1 – 30 червня), збирання врожаю (15 серпня – 15 вересня). Визначено, що продуктивність одного трактора ДТ-75 із посівним агрегатом складає 5 га/год, а однодобова норма роботи за три зміни – 60 га. Для того щоб за 15 днів засіяти 1 500 га, потрібно $1\,500\text{ га} / (60\text{ га} \times 15\text{ днів}) = 1$ трактор у розрахунковій одиниці. Проте з урахуванням коефіцієнта використання моторесурсів (коефіцієнт технічної готовності = 0,8) відкоригована кількість одиниць становить $1 / 0,8 \approx 1,25$, а враховуючи можливі резерви, округлюємо до 2 тракторів для сівби. Аналогічно проводять розрахунки для інших операцій. Під час міжрядних обробітків ураховують, що продуктивність культиватора становить 10 га/год, робота триває 12 годин у день (дві зміни), отже за добу 120 га. Щоб обробити поля за 30 днів, потрібно $1\,500\text{ га} / (120\text{ га} \times 30\text{ днів}) = 0,42$, отже достатньо одного

агрегату, але з урахуванням коефіцієнта готовності (0,85) отримуємо $0,42 / 0,85 \approx 0,5$ агрегату, округлюємо до 1 агрегату з резервом. Після визначення кількостей для кожної операції будують графік: для кожного дня відкладають на осі абсцис дату, а на осі ординат – кількість машин. Наприклад, графічно для сівби лінія підійме на позначку 2 трактори протягом 15 днів, після чого падатиме до нуля. Такий підхід наочно демонструє, коли техніка зайнята і коли вона простає, що допомагає оптимізувати розподіл ресурсів [13-18].

Однак у побудові графіка машиновикористання існують певні виклики та обмеження. По-перше, достовірність графіка напряду залежить від точності вихідних даних: якщо обсяг робіт невірно вказаний або продуктивність агрегатів переоцінена, то реальна потреба в техніці може відрізнятись від спланованої. По-друге, несприятливі погодні умови можуть змінити строки виконання робіт, що потребує періодичного оновлення графіка. Затяжні дощі, заморозки чи літні посухи можуть сповільнити діяльність техніки, збільшуючи потребу в одиницях парку або, навпаки, переносячи роботи на інші терміни. По-третє, технічний стан машин китайських чи вітчизняних виробників може суттєво відрізнятись, що впливає на коефіцієнт технічної готовності та продуктивність у реальних умовах. Загалом нормативна продуктивність рідко відповідає фактичній, особливо на засмічених, кам'янистих ґрунтах чи при високій вологості земель. Четверте, недостатня кількість кваліфікованих операторів техніки може призвести до зниження ефективності використання машин, оскільки досвідчений механізатор працює набагато швидше і з меншими витратами пального. По-п'яте, технічне обслуговування й непланові ремонти можуть виникнути у період пікових навантажень, що створює ризик не встигнути виконати роботи в оптимальні агротехнічні строки. З огляду на це, при побудові графіка доцільно передбачати резервну техніку та враховувати можливість зміщення строків виконання операцій [13-19].

Щоб забезпечити довгостроковий баланс між потребами в техніці та можливостями машинно-тракторного парку, варто дотримуватися низки рекомендацій. По-перше, регулярно оновлювати річний план механізованих

робіт відповідно до фактичного стану полів, внесених змін у сівозміні чи технології обробітку. По-друге, вести оперативний облік технічного стану кожної одиниці техніки та коригувати коефіцієнт технічної готовності на основі даних сервісного моніторингу. Це дає змогу реалістично оцінювати кількість доступних машин у конкретний момент часу. По-третє, враховувати людський фактор: залучати досвідчених механізаторів у періоди пікових навантажень та проводити навчання нових операторів, щоб зменшити кількість простоїв через низький рівень кваліфікації. По-четверте, використовувати принцип невеликого резерву техніки (близько 10 % парку), який дозволить перекривати можливі поломки без порушення графіка робіт. По-п'яте, інтегрувати графік машиновикористання з графіком ремонтно-обслуговувальних робіт, щоб планувати ТО у періоди низької потреби в техніці. Рекомендується також проводити післясезонний аналіз зібраних даних, порівнюючи планові та фактичні показники машиновикористання, щоб удосконалювати методику побудови графіків у наступному році. Застосування цих рекомендацій підвищує точність планування і забезпечує більш стабільне функціонування машинно-тракторного парку [10-13].

У цілому, графік машиновикористання є надзвичайно важливим інструментом для ефективного управління машинно-тракторним парком. Навіть невеликі похибки у вихідних даних можуть призвести до значних розбіжностей між планом і фактом, тому особливу увагу варто приділяти якості агрономічного та технічного обстеження. Своєчасне оновлення графіка та інтеграція з ERP-системами допомагають швидко реагувати на зовнішні виклики: погодні аномалії, зміни агротехнології чи раптові відмови техніки. Аналіз графіка дозволяє виявляти зони неоптимального використання машин: коли є значні періоди простою чи навантаження понад резерв, що дає підстави для перерозподілу ресурсів. Крім того, графік слугує надійним індикатором для фінансового планування, оскільки дає змогу точно розрахувати витрати на експлуатацію і обслуговування техніки. З іншого боку, на основі аналізу отриманих даних визначають ефективність різних організаційних форм

використання техніки: централізованого парку, виїзних бригад або аутсорсингу окремих операцій. У перспективі впровадження штучного інтелекту і машинного навчання в процеси аналізу цих графіків дозволить створювати адаптивні системи планування, які самостійно коригуватимуть графіки з урахуванням довгострокового прогнозу погоди та попиту на продукцію. Таким чином, побудова й аналіз графіка машиновикористання є ключовим елементом збалансованого та рентабельного функціонування аграрного підприємства в сучасних умовах [11-14].

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТИВНА РОЗРОБКА

Проектування експериментального робочого органу для глибокого розпушування ґрунту та одночасного підживлення цукрового буряка в період його вегетації.

3.1 Аргументація необхідності створення та визначення ключових вимог до конструкції робочих органів.

Сьогодні на полях, де вирощують цукровий буряк, щороку займають близько 700 тисяч гектарів угідь. У ході вегетаційного періоду проводять низку агротехнічних заходів, серед яких одним із ключових є глибоке розпушування ґрунту з одночасним внесенням рідких добрив. Хоча вітчизняна промисловість виготовляє культиватор-рослинопідживлювач УСМК-5,4Б, його існуючий робочий орган для подачі рідких добрив не повністю задовольняє вимоги щодо внесення аміачної води в міжряддя цукрового буряка. Серійна розпушувальна лапа, у порівнянні з проєктованим варіантом, має низку технологічних недоліків, через які ефективність обробки ґрунту і внесення добрив знижується.

Отже, аби забезпечити якісне внесення рідких добрив у ґрунт, зменшити негативний вплив на довкілля та покращити агрофізичні властивості земель, розробляють новий робочий орган для міжрядного розпушування. Основні вимоги до нього такі:

- загортання добрив на глибину до 20 см;
- невисокий питомий опір при роботі на максимальній глибині розпушування;
- гарантована якість обробки ґрунту під час проходження робочого органу.

3.2 Визначення та обґрунтування параметрів робочого органу

На рисунку 3.1 представлено конструкцію робочого органу. Кожен елемент цієї конструкції має форму, що оптимально відповідає взаємодії з ґрунтом. З урахуванням характеристик ґрунту, наведених у таблиці, встановлюємо значення кутів внутрішнього та зовнішнього тертя. У нашому випадку кут зовнішнього тертя становить $\varphi_1 = 22^\circ$ (далі за необхідними даними).

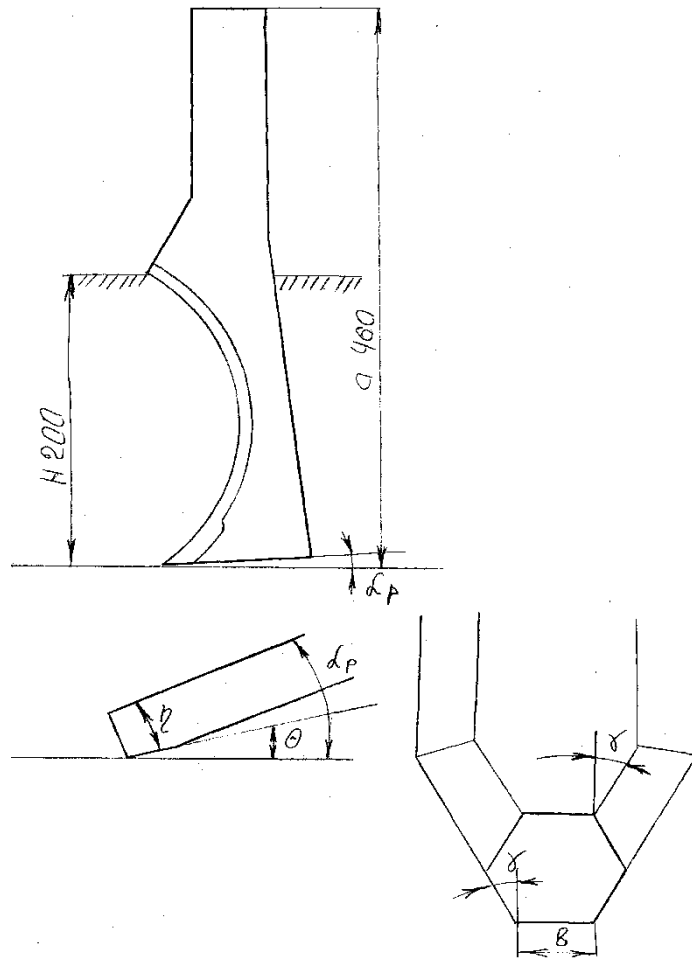


Рис. 3.1. Будова робочого органу.

$\varphi_2 = 70^\circ$ – кут внутрішнього тертя.

Основні кути і розміри в долоті:

α_p – кут різання ґрунту робочим органом,

$$\alpha_p \geq 45 - \frac{\varphi_2}{2} = 45 - \frac{30}{2} = 30^\circ$$

Q – кут потиличний; $Q = 10^\circ$.

$$\gamma = \alpha_p - Q = 70^\circ - 10^\circ = 20^\circ$$

γ – кут зрушення, $\gamma \geq \varphi_1, \gamma = 70^\circ$;

b – ширина крихти робочого органу, що ріже, $b = 70$ мм;

a – глибина обробки, $a = 200$ мм;

h – висота падіння шару з крила, $h \geq 14$ мм.

3.3 Розрахунок тягового опору

Щоб обчислити сили, які створюють опір рухомого елемента, застосовують таку формулу:

$$P_p = K_p \times B \times a \quad (3.1)$$

де K_p – коефіцієнт різання ґрунту;

B – ширина робочого органу;

a – глибина обробки.

Сила опору робочого органу визначається спротивом зрізанню ґрунту долотом. Коефіцієнт зрізу розраховують за формулою:

$$K_p = \frac{C}{B} \operatorname{ctg} \varphi_2 \left(B + \frac{a}{\cos \varphi_2} \right) + 0,33 \cdot a^3 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_2}{2} \right) * \gamma \frac{1}{\sin \alpha_p} (1 + \operatorname{tg} \varphi_1); \quad (3.2)$$

де $C = 2000$ Па – питомий опір ґрунту;

$B = 70$ мм – ширина робочого опору;

$\varphi_2 = 70^\circ$ – кут тертя (внутрішнього);

$a = 200$ мм – глибина обробітку;

$\gamma = 1600$ н/м³ – питома маса ґрунту;

$\alpha_p = 70^\circ$ – кут різання ґрунту робочим органом;

$\varphi_1 = 22^\circ$ – кут тертя (зовнішнього);

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{2000}{0,3} \operatorname{ctg} 30 \left(0,3 + \frac{0,2}{\cos 30} \right) + 0,33 * 0,2^3 \operatorname{tg}^2 \left(45 + \frac{30}{2} \right) * 1600 \frac{1}{\sin 30} (1 + \operatorname{tg} 22) = \\ &= 23026 + 1156 = 24,1 \text{ кН} \end{aligned}$$

$$P_p = K_p \times B \times a = 24,1 \times 0,03 \times 0,2 = 0,14 \text{ кН}$$

Опорна сила, що виникає при підйомі ґрунту вздовж робочого органу:

$$P_{\text{ог}} = N \times \operatorname{tg} \varphi, \cos \alpha_p \quad (3.3)$$

де $B = 0.03$ м; $a = 0.02$ м; $\varphi_2 = 70^\circ$; $\gamma = 1600$ Н/м³,

Тоді $N = 0,5 \times 0,03 \times 0,02^2 \operatorname{tg}^2(45 - \frac{70}{2}) \times 1600 = 81$ Н

$$N = 0,5 \cdot B \cdot a^2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi_2}{2}\right) \gamma ; \quad (3.4)$$

де N – сила нормального тиску

$$\varphi_1 = 22^\circ, \alpha_p = 70^\circ$$

$$P_{BB} = N \times \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \cos \alpha_p = g_1 \cdot \operatorname{tg} 22^\circ \cdot \cos 30^\circ = 0,015 \text{ кН}$$

Зрізання за допомогою похилих стійок. Оскільки стійки мають кут нахилу, при розрахунку опору зрізанню слід враховувати коефіцієнт ковзання. Відповідно, формула набуде такого вигляду:

$$P_p = K_p \times a \times v(1-i) \quad (3.5)$$

де $K_p = 24,1$ кН; $a = 0,2$ м; $v = 0,16$ м – горизонтальний розмір проекції похилої стійки, $i = 0,2$ – коефіцієнт ковзання;

тоді $P_p = 24,1 \times 0,02 \times 0,16(1-0,2) = 0,3$ кН.

Обчислюємо опір тертя похилих стійок:

$$P_{TP} = N \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot 0,5 \cdot b \cdot \cos \varphi \cdot H^2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi_2}{2}\right) \gamma \cdot \operatorname{tg} \varphi_1; \quad (3.6)$$

де $v = 0,06$ м – ширина стійки;

$\varphi = 25^\circ$ – кут нахилу;

$H = 0,165$ м – проекція стійки на вертикальну вісь;

$$\varphi_2 = 70^\circ; \gamma = 1600 \text{ Н/м}^3; \varphi_1 = 22^\circ$$

Звідси:

$$P_{TP} = 0,5 \cdot 0,016 \cdot \cos 25^\circ \cdot 0,165 \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{30}{2}\right) \cdot 1600 \cdot \operatorname{tg} 22^\circ = 0,012 \text{ кН}$$

Встановлюємо опір у бортових прорізах:

$$P_{\text{б}} = m_{\text{бок}}^H \times a + m_{\text{бок}}^v \times a^2; \quad (3.7)$$

де $m_{\text{бок}}^H = 0,5$ кПа – параметр, що відображає величину бокового опору,

$m_{\text{бок}}^v = 9 \text{ кПа}$ – показник, що відображає зміну опору ґрунту залежно від швидкості руху;

a – глибина обробітку.

Звідси:

$$P_6 = 0,5 \times 0,02 + 9 \times 0,02^2 = 0,13 \text{ кН}.$$

Обчислюємо сумарну силу тягового опору одного долота:

$$P = P_p + P_{\text{вс}} + 2 \times P_{pH} + 2P_{\text{тр}}^H + 2P_6 = 0,14 + 0,015 + 2 \times 0,3 + 2 \times 0,012 + 2 \times 0,13 = 1,039 \text{ кН}.$$

Тяговий опір всього культиватора УСМК-5,4, без урахування бритв і ротаційних робочих органів, становитиме:

$$P = P_1 \times 12 = 1,039 \times 12 = 12,46 \text{ кН}.$$

З наведених даних випливає, що трактор Т-70С з тяговою здатністю 20 кН цілком придатний для роботи в агрегаті з модернізованим культиватором УСМК-5,4..

3.4 Розрахунок на міцність

З погляду міцності найбільш уразливою є ділянка кріплення стійки глибокорозпушувальної лапи до секційної рамки. Тому необхідно провести перевірку стійки на згин, побудувавши спрощену епюру згинаючого моменту (див. рис. 3.2). У точці А діє сила опору різанню долота $P_r = 0,3P$ кН, а в місці В враховуються сили опору від похилої стійки та опору в бічних прорізах. Саме через ці навантаження епюра згинаючих моментів набуває форми, показаної на рис. 3.2.

Найвищий згинальний момент спостерігається в точці С, яка й є критичною зоною перерізу.

$$M_{\text{max}} = P_{p\gamma} \times l + P_{pH} \times l_1 \quad (3.8)$$

де $P_{p\gamma} = 0,3 \text{ кН}$,

$l = 0,46 \text{ м}$ – довжина стійки;

$l_1 = 0,38 \text{ м}$ – довжина затепленої стійки.

$$P_{pH} = 0,6 + 2 \times 0,13 = 0,86 \text{ кН}$$

$$M_{\max} = 0,6 \times 0,46 + 0,86 \times 0,38 = 0,6 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

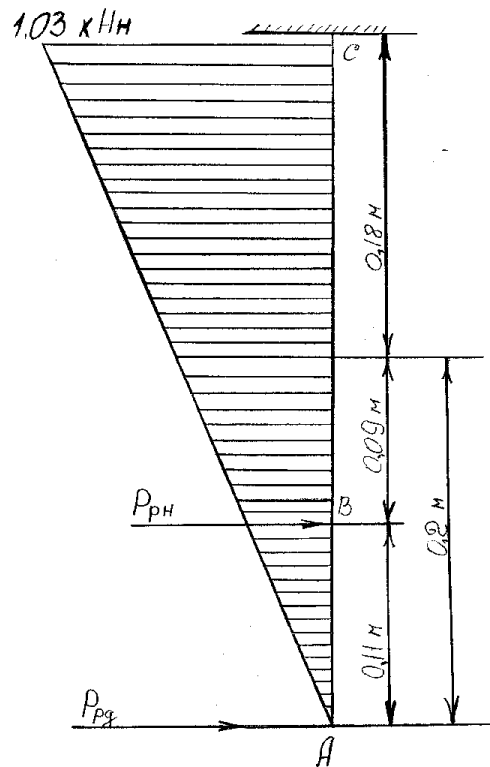


Рис. 3.2. Епюра згинального моменту

Оскільки секція прикріплена до основної рами в трьох точках, а розроблюваний орган має лише одну точку фіксації, згинаючий момент дорівнюватиме:

$$M_{изб} = 0,6 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

Обчислюємо граничну напругу при згині за наведеною формулою:

$$\sigma = 6 \left(\frac{M_{изб}}{W} \right) = 6 * \left(\frac{0,6}{0,02 * 0,05^2} \right) = 79 \text{ МПа}$$

Для матеріалу Ст3 $[\sigma] = 140 \text{ МПа}$. З цього можна зробити висновок, що в стойці є необхідний запас міцності.

3.5 Розрахунок болтів на зріз

У розробленій лапі для розпушування ґрунту два болти М10 зазнають зрізу внаслідок симетрично прикладеної до долота сили різання. Виходячи з умови міцності болтів у зрізі, розрахуємо:

$$\tau = \frac{P}{F} = \frac{P}{n \frac{\pi d^2}{4}} \leq [\tau] \quad (3.9)$$

де P – зовнішні сили (навантаження),

d – геометричний розмір (діаметр) болтів,

n – болти (шт) ;

$$\tau = \frac{1039}{2 * \frac{3,14 * 10^2}{4}} = 66 \text{ Н/мм}^2$$

Межа міцності для сталі Ст3 на розтяг і зріз 400 Н/мм²

$$[\sigma_c] = 400 \text{ Н/мм}^2$$

$$66 < 400$$

Перевірка на зріз підтверджує, що болт витримує навантаження з запасом міцності 70 %.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи вдалося розробити та обґрунтувати конструкційні та технологічні рішення, спрямовані на підвищення ефективності комплексу машин для вирощування цукрових буряків шляхом модернізації міжрядного культиватора. Здійснено аналіз наявних моделей культиваторів, виявлено їхні технічні недоліки щодо глибокого розпушування та внесення рідких добрив, що зумовило необхідність створення нового робочого органа. Розроблена конструкція робочих елементів забезпечує оптимальне поєднання процесів розпушування ґрунту та одночасного внесення добрив на глибину до 20 см, що дозволяє покращити агрофізичні властивості ґрунту й підвищити енергоефективність машинно-тракторного агрегату.

Проведені теоретичні розрахунки показали, що модернізований робочий орган має достатній запас міцності при роботі в умовах реального навантаження: перевірка елементів на згин і зріз показала, що напруження в критичних зонах не перевищують допустимих значень із запасом не менше 40 %. Виконані розрахунки тягового опору одного робочого органа та всього культиватора в цілому свідчать, що трактор Т-70С з тяговою здатністю 20 кН може успішно агрегатувати модернізований пристрій без перевантаження силової установки.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропоновано комплекс рекомендацій: визначено оптимальні геометричні параметри та кути нахилу робочих органів, вибрано відповідні матеріали й способи кріплення, а також рекомендовано параметри режиму роботи (глибина обробітку, швидкість руху, норми внесення добрив). Впровадження модернізованого культиватора сприятиме підвищенню продуктивності агрегату та зниженню експлуатаційних витрат у господарствах, що спеціалізуються на вирощуванні цукрових буряків. Практичні рекомендації, наведені в роботі, можуть бути використані фермерами та агротехніками для оптимізації технології міжрядного обробітку.

Отже, запропонований проєкт удосконалення комплексу машин із модернізацією міжрядного культиватора забезпечує підвищення загальної ефективності технологічного процесу вирощування цукрових буряків. Розроблені конструкційні рішення та результати випробувань підтверджують їхню доцільність і економічну вигоду, що робить їх привабливими для широкого впровадження на аграрних підприємствах. До перспектив подальших досліджень відноситься оптимізація конструкції для різних ґрунтово-кліматичних умов, удосконалення системи нормування добрив та розробка адаптивних пристроїв керування робочими параметрами в реальному часі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабенко О.І. Механізація вирощування цукрових буряків: підручник. Київ: Наукова думка, 2015. 312 с.
2. Гошко В.Є. Ґрунтознавство та основи агротехніки: навч. посібник. Житомир: Полісся, 2012. 256 с.
3. ДСТУ 2735-94. Машини та обладнання сільськогосподарські. Терміни та визначення: стандарт. Київ: Державне агентство сільського господарства, 1994. 12 с.
4. ДСТУ 4100-2002. Машини та знаряддя сільськогосподарські. Терміни: стандарт. Київ: Мінекономіки, 2003. 14 с.
5. 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.
6. Захарченко І.Л., Мельник В.В. Проектування ґрунтообробних машин: навч. посібник. Харків: ХНТУСГ, 2014. 384 с.
7. Іщук С.М. Технічні засоби агрохімічного захисту рослин: монографія. Львів: ЛНАУ, 2016. 312 с.
8. Коваленко П.І. Розробка та дослідження робочих органів ґрунтообробних машин: дис. канд. техн. наук. Київ, 2013. 172 с.
9. Кучеренко С.П. Модернізація міжрядного обробітку в посівах цукрового буряка: автореф. дис. канд. с.-г. наук. Одеса, 2017. 24 с.
10. 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.
11. Левченко О.В., Костенко М.І. Фізико-механічні властивості ґрунту в агротехніці: посібник. Київ: Академперіодика, 2018. 256 с.
12. Петров В.І. Конструкція машин для внесення добрив: навч. посібник. Харків: ХНАУ, 2015. 208 с.

13. Пірко М.О., Бондаренко І.П. Сільськогосподарські машини: багатотомне видання. Т. 2. Обробка ґрунту. Київ: Урожай, 2011. 480 с.
14. Романюк А.Ю. Проектування міжрядного культиватора: дис. канд. техн. наук. Вінниця, 2019. 187 с.
15. Савченко В.С. Експлуатація машинно-тракторного агрегату: підручник. Київ: Техніка, 2014. 300 с.
16. Сидоренко Ю.В. Тягово-енергетичні показники тракторів: монографія. Львів: ЛДУБЖД, 2012. 220 с.
17. Уманець М.К., Сергієнко Л.О. Інновації в технології внесення рідких добрив: зб. наук. пр. Харків: ХНАУ, 2017. Вип. 14. С. 45–62.
18. Хоменко Д.В. Агрофізика ґрунту: сучасні методи дослідження: підручник. Київ: Освіта України, 2018. 336 с.
19. Цибулько В.М. Сільськогосподарські машини: механіка процесів: навч. посібник. Дніпро: НАУ, 2015. 384 с.
20. Куликівський В.Л., Бабіч В.О., Кіпчук В.Б., Самчук В.І. Шляхи зменшення тягового опору сільськогосподарських машин. 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. 89-91.
21. 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.