

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

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

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Газін Владислав Віталійович

УДК 631.17

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
УДОСКОНАЛЕННЯ КОМПЛЕКСУ МАШИН ДЛЯ
ВИРОЩУВАННЯ І ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ
ЯЧМЕНЮ З УДОСКОНАЛЕННЯМ ВАЛЬЦЕДЕКОВОГО
ВЕРСТАТА**

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 _____ Газін В.В.

Керівник роботи

Дерев'янка Д.А.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Газін Владислав Віталійович. Удосконалення комплексу машин для вирощування і післязбиральної обробки ячменю з удосконаленням вальцедекового верстата. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

У ході виконання кваліфікаційної роботи встановлено, що впровадження вдосконаленого вальцедекового верстата з регульованим зазором між валками і системою автоматичного контролю тиску забезпечує оптимальне дроблення зерна без надмірної крихкості та втрат компонентів. Така модернізація знижує енергоспоживання обладнання на 10–15 % за рахунок більш раціонального розподілу навантаження між валками та скорочення числа обертів при збереженні високої продуктивності. Покращений дизайн подавального механізму та використання зносостійких матеріалів забезпечують стабільну якість крупи і продовжують термін експлуатації верстата.

Встановлено, що гармонізація роботи всіх ланок комплексу – від оранки й сівби до збору й первинного очищення – дозволяє досягти синергетичного ефекту: зменшення дефектів зерна, кращу схожість насіння, підвищення виходу товарного продукту на 8–12 % у порівнянні з базовою технологією. Координація параметрів роботи сільгоспмашин і вальцедекового верстата у єдиній системі управління створює умови для безперервного моніторингу й оперативної корекції технологічних режимів.

Ключові слова: ячмінь, технологія, вирощування, вальцедековий верстат, комплекс машин.

ANNOTATION

Gazin Vladislav Vitalievich. Improvement of a complex of machines for growing and post-harvest processing of barley with improvement of a roller-deck machine. – 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.

During the qualification work, it was established that the introduction of an improved roller mill with adjustable gap between the rollers and an automatic pressure control system ensures optimal grain crushing without excessive brittleness and loss of components. Such modernization reduces equipment energy consumption by 10–15% due to a more rational distribution of the load between the rollers and a reduction in the number of revolutions while maintaining high productivity. The improved design of the feed mechanism and the use of wear-resistant materials ensure stable grain quality and extend the service life of the machine.

It has been established that the harmonization of all stages of the complex — from plowing and sowing to harvesting and primary cleaning — allows for a synergistic effect: a reduction in grain defects, better seed germination, and an increase in marketable product yield by 8–12% compared to the baseline technology. The coordination of the operating parameters of agricultural machinery and the roller harvester in a single control system creates conditions for continuous monitoring and operational correction of technological modes.

Keywords: barley, technology, cultivation, roller harvester, machine complex.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОЩУВАННЯ ОЗИМОГО ЯЧМЕНЮ.....	8
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ЯЧМЕНЮ.....	23
РОЗДІЛ 3. МОДЕРНІЗАЦІЯ ВАЛЬЦЕДЕКОВОГО ВЕРСТАТА.....	29
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	41

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Актуальність удосконалення комплексу машин для вирощування та післязбиральної обробки ячменю з модернізацією вальцедекового верстата обумовлена зростаючими світовими та внутрішніми запитами на підвищення продуктивності аграрного сектору. Сучасні агропідприємства стикаються з необхідністю забезпечити стабільно високі врожаї за мінімальних витрат ресурсів, тому впровадження точних та адаптивних механізмів дозування насіння й добрив, а також зменшення втрат під час первинної обробки зерна стає надзвичайно важливим. Удосконалені машини дозволяють істотно знизити собівартість вирощування та підвищити якість зерна, а отже – конкурентоспроможність продукції на внутрішньому й експортному ринках.

Одночасно значення має і підвищення енергоефективності технологічних процесів. Сучасні трактори та обприскувачі, укомплектовані GPS-системами й автоматизованими приводами, оптимізують витрати пального й дають змогу мінімізувати шкідливий вплив на ґрунт, запобігаючи його ущільненню. Проте без удосконалення вальцедекового верстата, який відповідає за подрібнення та калібрування зерна після збору, загальна ефективність комплексу залишається недостатньою. Підвищення продуктивності й довговічності цього пристрою відкриває можливості для зменшення енергетичних витрат та збільшення виходу якісного продукту.

Зростаючі вимоги до екологічної безпеки сільського господарства диктують потребу в мінімізації відходів і втрат зерна під час технологічних операцій. Завдяки інтеграції датчиків вологості й автоматичного контролю зазорів між валками, модернізований вальцедековий верстат дає змогу максимально зберегти цілісність зерен та їх поживні властивості. Це, у свою чергу, сприяє зниженню кількості відсіву та маржинальних втрат, що важливо з огляду на обмеженість природно-кліматичних ресурсів і збереження родючості ґрунтів.

Крім того, інноваційна модернізація комплексу машин спрямована на створення єдиного інтегрованого простору управління агротехнологіями, що дозволяє акумулювати й аналізувати великі обсяги даних (Big Data). Автоматизовані рішення, інтегровані з вальцедековим верстатом, забезпечують оперативну корекцію режимів роботи залежно від вологості, маси й структури зерна, а також умов експлуатації техніки. Це створює передумови для реалізації концепції «розумного» господарства з високим рівнем контролю й адаптивності.

Нарешті, враховуючи динаміку розвитку світових технологій і потребу в підвищенні економічної стійкості аграрних підприємств, вдосконалення комплексу машин для вирощування та післязбиральної обробки ячменю набуває стратегічного значення. Інвестування у модернізацію вальцедекового верстата та суміжних агрегатів забезпечить підвищений вихід якісної зернової продукції, знизить експлуатаційні витрати та сприятиме впровадженню циркулярних моделей виробництва із мінімальними відходами. Це дозволить українським аграріям зміцнити свої позиції на світовому ринку та забезпечити продовольчу безпеку.

Метою роботи є розробити й обґрунтувати конструктивно-технологічні рішення для модернізації комплексу машин вирощування й післязбиральної обробки озимого ячменю шляхом удосконалення вальцедекового верстата з метою підвищення продуктивності, якості готової продукції та енергоефективності процесу.

Завдання:

- проаналізувати існуючі конструкції агротехнічного комплексу та вальцедекового верстата, виявити їхні переваги й технічні обмеження;
- визначити вимоги до зернооброблювального процесу з урахуванням характеристик озимого ячменю (вологість, розмір, міцність);
- розробити конструктивні зміни вальцедекового верстата (регулювання зазору, систему подачі, вибір матеріалів), спрямовані на зменшення енергоспоживання й втрат продукту.

Об'єктом дослідження є комплекс машин для вирощування та післязбиральної обробки озимого ячменю із вальцедековим верстатом як його ключовим елементом.

Предметом дослідження є конструктивно-технологічні рішення модернізації вальцедекового верстата (регулювання зазору, система подачі, матеріали робочих органів) та їх інтеграція в загальну систему автоматичного контролю параметрів обробки зерна.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Міненко С., Савченко В., Газін В. Сучасний стан та перспективи розвитку механізації збирання зернових колосових культур. Актуальні аспекти розвитку науки і освіти: збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та молодих науковців, 24 - 25 жовтня 2024 р., Одеса : Одеський державний аграрний університет, 2024. С. 159-161.

2. Газін В.В. Регулювання подачі хлібної маси до зернозбирального комбайна. 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. 298-299.

Практичне значення одержаних результатів. Впровадження модернізованого вальцедекового верстата в складі комплексу машин для вирощування та післязбиральної обробки ячменю дасть змогу знизити технологічні втрати зерна на 8–12 % за рахунок оптимального дроблення та калібрування, що безпосередньо підвищить вихід товарної продукції.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 30 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 43 сторінки комп'ютерного тексту, містить 4 рисунки, 1 таблиця та 3 додатки.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОЩУВАННЯ ОЗИМОГО ЯЧМЕНЮ

Озимий ячмінь є цінною зерновою культурою не лише для внутрішнього ринку України, але й для експорту, оскільки використовується як фуражна культура, сировина для виробництва круп та борошна. Він вирізняється коротким вегетаційним періодом і здатністю краще використовувати зимову вологу порівняно з яровими культурами. За вирощування в оптимальні строки культура формує потужну кореневу систему, що сприяє підвищенню зимостійкості та накопиченню продуктивної вологи. У південних регіонах України, де осінь м'яка, озимий ячмінь демонструє найвищу врожайність, проте культура поширена і в центральних регіонах за умови правильного вибору строків сівби та агротехнології. Попит на озимий ячмінь зростає через його універсальність у виробництві пивоварних та фуражних сортів. Сучасні сорти мають підвищений рівень шкідливих патогенів та кращу морозостійкість. Також варто зазначити, що культура добре реагує на інтенсивні технології, включаючи точне землеробство. Завдяки короткому періоду до збирання, виробники можуть краще планувати сівозміни. Економічна віддача від інвестицій у якісне насіння і технології вирощування озимого ячменю є доволі високою порівняно з іншими озимими культурами [2].

Біологічні особливості ячменю передбачають слабо розвинену кореневу систему, яка чутлива до ґрунтової структури. За відсутності достатньої структурованості ґрунту його корені не можуть глибоко проникнути, що призводить до швидкої втрати вологи та зниження кількості бічних пагонів під час посухи. Тому під озимий ячмінь поле слід готувати ретельно, уникаючи ущільнення верхнього шару. Культура менш вимоглива до температури, ніж озима пшениця, проте потребує своєчасного формування вузла кущіння до настання холодів. У фазі кущіння озимий ячмінь інтенсивно споживає поживні речовини та вологу, що важливо врахувати при весняному підживленні. Розвиток кореневої системи тісно пов'язаний із станом ґрунту і рівнем гумусу,

тому важливо контролювати їх через регулярний аналіз. Сучасні методи включають застосування біопрепаратів для поліпшення кореневого живлення. Інтенсивна технологія передбачає додавання антистресових агентів під час посухи. Високі врожаї можливі лише за поєднання оптимальної агрономії та генетичного потенціалу сорту. Усе це разом визначає стійкість культури до несприятливих умов [6].

Оптимальні кліматичні умови для розвитку озимого ячменю характеризуються середньостатистичною середньодобовою температурою $+5...+10^{\circ}\text{C}$ під час осіннього вегетативного періоду. При ранньому посіві, коли температура повітря залишається в межах $+12^{\circ}\text{C}$, насіння швидко проростає, що забезпечує ще до настання заморозків формування 2–3 пагонів. Водночас надмірно ранні посіви можуть призвести до розвитку надмірної вегетативної маси, яка за відсутності снігового покриву вночі пошкоджується морозами. Для кожного регіону України оптимальні строки сівби варіюють від середини вересня до середини жовтня. Сучасні прогнози погоди та моделі кліматичних змін допомагають аграріям точніше визначати ці терміни. Також варто враховувати ризики аномальних температурних коливань у період адаптації. У випадку пізнього осіннього потепління рекомендується коригувати дату посіву. Кліматичні аномалії останніх років підштовхують фермерів до практики партнерських прогнозів із науковими установами. Тож адаптивна агротехнологія стає необхідністю [2].

Ґрунтові вимоги до озимого ячменю передбачають вибір суглинків або легких суглинків із рН 6,0–7,5, оптимальною структурою та достатнім вмістом гумусу. Тяжкі, засолені, підтоплювані ґрунти, кислі та безструктурні піщані мало придатні для вирощування цієї культури. Глибина оранки за інтенсивної технології становить 25–27 см, що забезпечує хороший запас вологи та проникання кореневої системи. За технології no-till допускається вирощування лише після сидеральних попередників, які поліпшують структуру ґрунту, виконуючи «роль плуга». До того ж, сидеральні попередники можуть зменшувати ерозійні процеси на схилах. Контроль ущільнення верхнього шару

грунту є ключовим — застосовують прикочування та коткування. Аграрії також використовують глибоке рихлення на важких ґрунтах. Незважаючи на доцільність технології no-till, в умовах високої кислотності слід застосовувати вапнування. Баланс поживних речовин і структура ґрунту визначають потенційну врожайність культури [2].

Ротація культур є важливою складовою технології, оскільки попередники впливають на фітосанітарний стан ґрунту та забезпечення поживних ресурсів. Після бобових культур та зернобобових попередників озимий ячмінь формує вищу врожайність завдяки покращеному азотному живленню та зменшенню популяцій ґрунтових шкідників. Недоцільно висівати ячмінь після пшениці чи інших злакових, щоб уникнути накопичення патогенів та обмежити розвиток комплексу рослинних шкідників. Оптимальна черговість — після люпину, гірчиці або соняшнику з відповідною мінеральною підгодівлею. Важливо також враховувати залишки рослинної маси попередника, що можуть стати місцем зимівлі шкідників. Ротація сприяє зменшенню ризику виникнення грибкових захворювань. Наукові дослідження вказують на зростання врожайності на 10–15 % при дотриманні чіткої сівозміни. Застосування культивації сидеральних культур дозволяє одночасно збільшити органічний вміст ґрунту. У комплексі з точним землеробством правильна ротація мінімізує ризики агробіологічного характеру [5].

Підготовка поля до сівби починається з обробітку ґрунту восени та весною. Після збирання попередньої культури необхідно провести стерньовий обробіток дисковими боронами, щоб знищити рослинні рештки та вирівняти поверхню. Дискова оранка на глибину 8–10 см проводиться за два тижні до основного обробітку, що дозволяє зменшити випаровування ґрунтової вологи. Основна оранка — 25–27 см — виконується одразу після збору попередника. Перед сівбою проводять культивацію та коткування для створення оптимального посівного ложа. В умовах підвищеної вологості доцільне застосування фрезерування для покращення дренажу. Сучасні агрегати для мульчування стерні зменшують кількість одного проходу техніки, знижуючи

ущільнення. У весняний період проводять легкий передпосівний культиватор для вирівнювання поверхні. Додатково застосовують повітряні котки для ущільнення на легких ґрунтах. Таким чином досягається рівномірне загортання насіння [3].

Насіння озимого ячменю повинно мати лабораторну схожість не менше 90 % та посівну придатність понад 85 %. Перед посівом зерно протруюють фунгіцидами та інсектицидами, щоб запобігти розвитку коренових гнилей та ураженню шкідниками сходів. Сухе прогрівання насіння при +45 °C протягом 120 хвилин підвищує холодостійкість рослин на ранніх фазах. Для забезпечення рівномірного сходження застосовують комбіновані протруйники, що захищають одночасно від грибкових і бактеріальних хвороб. У разі вирощування пивоварних сортів додатково використовують інокуляцію мікоризою. Також популярні методи передпосівного замочування насіння в біостимуляторах. Це підвищує енергію проростання та імунітет молодих рослин. Нині все частіше застосовують вакуумне оброблення насіння для покращення адгезії протруйників. Біологічні протруйники на основі триходерми та біокуркуми стають альтернативою хімічним засобам. Аграрії все більше уваги приділяють якості насіннєвого матеріалу, адже від цього залежить успіх вирощування [7].

Строки посіву для кожного регіону України вибирають так, щоб перед настанням стійких морозів температура ґрунту на глибині 5 см залишалася +5 °C не менше 10 діб. Як правило, це середина вересня — середина жовтня, з максимальною датою 20 жовтня в північних регіонах. У південних областях строки можуть зсуватися на початок жовтня через тривалу теплу осінь. Запізнілий посів призводить до слабкого розвитку кореневої системи та недостатнього кущіння, що знижує врожайність. Сходи з'являються за 7–10 діб після сівби за оптимальної вологості ґрунту. Сучасні ґрунтові термометри та IoT-датчики допомагають аграріям контролювати температуру й вологість на глибині загортання. Використання точних карт ґрунтового покриття дозволяє враховувати мікрокліматичні зони на полі. Локальні ірригаційні системи

можуть продовжити строк оптимальної посівної кампанії. В комплексі ці заходи забезпечують дружні та рівномірні сходи. Інколи застосовують ультразвукове розпушення ґрунту без підвищення вологості [8].

Методи сівби включають класичний (суцільні рядки), перехресний та вузькорядний. Класичні рядки з шириною міжрядь 15 см забезпечують добрий доступ техніки для подальшого догляду. Перехресний метод дозволяє покращити використання площі та знизити ерозійні процеси. Вузькорядний спосіб із міжряддям 12 см сприяє швидшому покриттю поверхні ґрунту, зменшуючи втрати вологи. Вибір способу залежить від застосовуваної техніки та агротехнологічного підходу. Сучасні сівалки мають GPS-керування і регулювання норми висіву в реальному часі. Це дозволяє диференційно висівати насіння відповідно до карт родючості ґрунту. Автоматичні системи контролю глибини загортання насіння забезпечують рівномірність процесу. Деякі моделі оснащені камерами для моніторингу якості загортання. Агроном може коригувати налаштування без виходу з кабіни трактора [7].

Норма висіву озимого ячменю становить 3–5 млн насінин або близько 200–220 кг/га, виходячи з лабораторної схожості та бажаної густоти стояння 5–6 млн пагонів/га. Для пивоварних сортів норму знижують до 180–200 кг/га через вужчу кореневу систему культури. При розрахунку враховують форму і масу 1000 зернин. Низька густина сприяє утворенню товстих стебел та забезпечує якість зерна. Водночас надмірна густина призводить до витягування рослин та зниження опірності вилягання. Сучасні підходи враховують прогнозовані погодні умови та вологість ґрунту в перші два тижні після сходів. Також до розрахунків додають дані про попередника та вміст поживних елементів у ґрунті. Використання змінних норм висіву за картами забезпечує оптимальне завантаження ресурсів. За інтенсивних технологій аграрії іноді комбінують різні норми в межах одного поля. Це дозволяє підвищити загальну врожайність та якість зерна [5].

Глибина загортання насіння має становити 3–5 см у важких ґрунтах і 5–6 см у легких суглинках. При більш глибокому загортанні сходи пізняться та

сильніше залежать від ґрунтової вологи. Надто дрібний посів ефективний тільки за достатньої вологості верхнього шару, інакше сходи гинуть від пересихання. Оптимальна глибина забезпечує швидкий контакт насінини з вологою, але дозволяє уникнути вітрової ерозії. Важливо забезпечити рівномірне загортання по всьому полі. Нові сівалки з активними катками рівномірно ущільнюють ґрунт навколо насінини. Це сприяє кращому водопостачанню молодих рослин. Системи контролю глибини дають змогу швидко адаптувати глибину під змінені умови поля. Нерівномірне загортання може призвести до розривів у густоті стояння. Правильне агрегування сівалки і трактора є ключовим для оптимального загортання [8].

Осіння мінеральна підготовка поля включає внесення фосфорних та калійних добрив у нормі 60–80 кг/га д.р. фосфору та 40–60 кг/га д.р. калію. Це сприяє формуванню потужної кореневої системи та накопиченню ресурсів для зимівлі. Фосфато-калійні гранули розкидають під час основної оранки, рівномірно розподіляючи їх у метровому шарі ґрунту. Наявність калію підвищує стійкість рослин до вилягання та покращує холодостійкість. У південних регіонах норми можуть бути збільшені на 10–15 % через нижчу природну забезпеченість ґрунтів. Також варто враховувати баланс кальцію та магнію в ґрунті, що впливає на доступність споживання інших елементів. Використання гранульованих форм добрив знизило втрати поживних речовин під час опадів. Внесення добрив у рядки може збільшити локальну ефективність. Мікродобрива фосфору та калію вносять окремо для покращення їх засвоєння. Раціональний підбір добрив є економічно вигідним і екологічно безпечним [3].

Стартова підгодівля при сівбі (магнійні та сірчисті форми добрив) сприяє швидкому розвитку сходів та ранньому куцінню. Застосовують норми 20–25 кг/га д.р. магнію у вигляді сульфату та 10–15 кг/га д.р. сірки. Це забезпечує інтенсивне утворення білків у листках і покращує фотосинтетичну активність. У разі дефіциту магнію проявляються хлорози на старших листках, що негативно впливає на розвиток вузла куціння. Магній також підвищує

зимостійкість рослин. Сірка стимулює синтез амінокислот і підвищує стійкість до хвороб. Використання біодоступних форм сприяє кращому засвоєнню макроелементів. В окремих випадках застосовують хелатні препарати магнію для швидкого кореневого живлення. Комплексна стартова підгодівля поліпшує енергію проростання й якість перших листків. Відповідний баланс поживних речовин у стартовому етапі закладає основу для високої врожайності [9].

Азотні добрива вносять у два заходи: 50 % від загальної дози (60–80 кг/га д.р.) вносять восени до сівби, а решту — рано навесні перед відновленням вегетації. Одноразове внесення повної дози азоту восени призводить до надмірного розвитку надземної маси та зниження зимостійкості за безсніжної зимівлі. Рання весняна підгодівля аміачною селітрою стимулює формування нових пагонів та підвищує врожайність на 0,5–0,9 т/га. Оптимальна весняна норма становить 30–40 кг/га д.р. азоту. Додатково використовують карбамід у фазі BBCH 21–23 для покращення азотного живлення. Надмірне внесення азоту у пізні фази підвищує ризик осипання колосся. Розподілене внесення мінімізує втрати аміаку в атмосферу та зниження ефективності. Системи внесення рідких добрив під час вегетації полегшують управління нормами. Точне внесення азоту на основі аналізу листової маси підвищує ефективність живлення [3].

Захист посівів від бур'янів здійснюється за допомогою ґрунтових та післясходових гербіцидів. У фазі BBCH 12–32 застосовують ґрунтові гербіциди на основі тебуконазолу або дуофайту. Після появи сходів (BBCH 21–30) додатково використовують дифлейм або агрітер Супер. Своєчасне знищення дводольних та однодольних бур'янів мінімізує конкуренцію за вологу та поживні речовини. Інтегрована система захисту ґрунту з мульчуванням стерні знижує потребу в хімічних обробках. Використання GPS-керованих обприскувачів дозволяє диференціювати норму гербіцидів. Біоагенти на основі грибів *Streptomyces* дедалі частіше застосовуються для біологічного контролю. Ротація гербіцидних груп допомагає уникнути резистентності бур'янів. Комплексний підхід до захисту забезпечує стабільні сходи та ефективно подальше зростання рослин [3].

Фунгіцидний захист передбачає дворазові обробки: перша — у фазі кушіння (ВВСН 21–32) препаратами на основі солей міді, тріазолів чи стробілуринів, друга — у фазі виходу в трубку (ВВСН 35–49) для запобігання септоріозу та іржі. Своєчасне обприскування фунгіцидами запобігає зниженню фотосинтетичної площі листків та сприяє формуванню повноцінного зернів'я. Ефективність захисту залежить від умов погоди під час хвороботворних етапів. Додаткові обробки в пізніші фази можуть бути доцільними при високій вологості. Сучасні біопрепарати на основі бактерій *Bacillus subtilis* здатні конкурувати з хімічними засобами. Використання радарного моніторингу поширення хвороб дозволяє своєчасно реагувати. Оптимальні норми витрати та тиск обприскування забезпечують якісне покриття. Після обробок варто контролювати фунгіцидний залишковий ефект на зерні [4].

Інсектицидний захист проводять у разі заселення посівів шкідниками комплексу (п'явиця, клоп шкідлива черепашка) у фазі ВВСН 12–92. Застосовують препарати типу евансу або інстрайкера залежно від спектру дії. Обробка захищає молоді рослини від пошкоджень, що можуть призвести до втрати до 30 % урожаю. Інсектицидно-стимулюючі суміші також підвищують стресостійкість сходів. Використання інсектицидних пасток у міжряддях допомагає локалізувати осередки шкідників. Поєднання хімічного та біологічного контролю знижує екологічні ризики. Системи раннього виявлення шкідників з камер дронів підвищують оперативність заходів. Ротація діючих речовин мінімізує розвиток резистентності. Безпечні норми витрати інсектицидів відповідають міжнародним стандартам [2].

Мікродобрива застосовують у різні фази розвитку ячменю для оптимізації фізіологічних процесів. У фазі ВВСН 21–30 вносять Розасоль 15-45-10 у нормі 2–3 кг/га разом із Розаліком (Mg, Mn, S, N) 2–4 л/га. У фазі ВВСН 61–69 використовують Премиант Омега 1 л/га, що підвищує якість зерна та стійкість до хвороб. Мікродобрива забезпечують краще засвоєння макроелементів та стимулюють розвиток стеблової системи. Також застосовують препарати на основі бору та цинку для запобігання хлорозу. Поєднання листових та

кореневих підгодівель дає синергетичний ефект. Інноваційні нано-добрива підвищують біодоступність мікроелементів. Використання безпілотників для внесення знижує ризик пошкодження рослин. Вчасне реагування на дефіцит мікроелементів попереджає зниження врожайності [2].

Регулятори росту застосовують у фазі кушіння для зниження ризику вилягання та підвищення щільності колосу. Застосовують препарати на основі хлормеквату в нормі 0,4–0,6 л/га. Регуляція росту сприяє формуванню більш товстих стебел та підвищує опірність до вітрових навантажень. Окрім того, регулятори покращують закладання колосу та якість зерна. Сучасні біорегулятори на основі амінокислот мають м'яку дію без токсичного залишку. Вони сприяють підвищенню фотосинтетичної активності та стійкості до стресів. Для досягнення максимального ефекту слід дотримуватися концентрацій і фаз застосування. Варто врахувати погодні умови — обробка за високої вологості може знизити ефективність. При поєднанні з фунгіцидними обробками можливе погіршення прилипання. Тому агрономи рекомендують змішувати засоби лише після тестування в полі [4].

Водний режим ґрунту підтримують за допомогою технологій мінімального обробітку та мульчування стерні. Використання no-till із сидеральними попередниками зменшує випаровування вологи та покращує накопичення її в метровому шарі ґрунту. У посушливий період проводять міжрядний обробіток на глибину 5–6 см для руйнування капілярності та зменшення втрат вологи. Контроль вологості важливий до фази колосіння. Додатково застосовують краплинне зрошення у ділянках з дефіцитом вологи. Використання датчиків ґрунтової вологи дозволяє оптимізувати графік поливу. Сонячні станції струмозабезпечення ірригаційного обладнання підвищують енергоефективність. У регіонах зі змінними дощовими сезонами комбінують накопичувальні ставки з вакуумним зрошенням. Точкове зрошення навколо кореневої зони мінімізує стрес для рослин і знижує витрати води [3].

Зимівля культури забезпечується наявністю снігового покриву, який захищає рослини від морозів та вітрової ерозії. За умов безсніжної зими озимий

ячмінь може витримувати температуру до -15°C без значних пошкоджень, за наявності достатнього запасу вуглеводів у вузлі кущіння. Осіннє підживлення та належне формування кореневої системи підвищують зимостійкість. Моніторинг стану рослин проводять після відлиги для оцінки загального відсотка загиблих пагонів. Використання тепловізорів дронами допомагає виявляти проблемні ділянки. Інколи застосовують штучне мульчування снігом або соломою на уразливих ділянках. Вапнування у вересні також може покращити зимостійкість на кислих ґрунтах. Ранні прогріви восени сприяють накопиченню вуглеводів у кореневій частині рослини. Усі ці заходи разом забезпечують успішну перезимівлю [3].

Навесні відновлення вегетації починається за температури ґрунту $+4...+6^{\circ}\text{C}$. Перший весняний огляд полів виконується для оцінки густоти стояння та стану вузла кущіння. У разі загибелі понад 20 % рослин здійснюють пересів у міжряддя. Для стимуляції рістових процесів застосовують аміачну селітру у фазі ВВСН 21–23. Можуть використовуватися також комплексні добривні суміші з мікроелементами для рівномірного живлення. Ранні обробки гербіцидами та фунгіцидами проводять тільки після відлиги та стабілізації погодних умов. Використання мультикоптерів для локальних підгодівель стає дедалі популярнішим. Опади та температурні коливання у квітні значною мірою впливають на відновлення вегетації. Тому аграрії розробляють кілька сценаріїв весняних заходів [5].

Фаза кущіння (ВВСН 21–29) характеризується активним поділом клітин у вузлі кущіння, формуванням бічних пагонів та інтенсивним засвоєнням азоту. У цей період важливо забезпечити оптимальне співвідношення води та поживних речовин. Занадто висока вологість може призвести до розвитку корневих гнилей, тоді як дефіцит вологи призводить до загального зменшення кількості колосків у колосі. Потрібно контролювати рН ґрунтового розчину для ефективного засвоєння азоту. Використання гумусозбагачувальних добрив покращує умови для розвитку вузла кущіння. Біопрепарати на основі триходерми підтримують здоров'я кореневої системи. Додаткові інокуляції

ризосферної мікрофлори підвищують засвоєння макроелементів. Моніторинг параметрів росту за допомогою дронів дає змогу точно оцінити густоту та якість кущіння. Вчасні заходи в цій фазі формують потенціал майбутнього врожаю [3].

Період виходу в трубку (ВВСН 30–39) завершує кущіння та починається формування вузла колосу. У цей момент рослини інтенсивно споживають азот та фосфор для формування квіткових органів. Важливо контролювати наявність поживних елементів у ґрунтовому розчині та при необхідності проводити кореневі підгодівлі. Підживлення стимулює ріст вузла колосу і покращує потенціал виповнення зернів'я. Оптимальні температурні умови цього періоду — $+10...+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ для рівномірного розвитку. Застосування рідких комплексних добрив може підвищити ефективність живлення. Своєчасні фунгіцидні обробки знижують ризик септоріозу на вузлі колосу. Деякі аграрії застосовують стимулятори фотосинтезу для посилення утворення асимілянтів. Цей період визначає кількість колоскових ланок у колосі [3].

Період колосіння (ВВСН 50–59) характеризується формуванням зернів'я та швидким ростом стебел. Температурний оптимум $+15...+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та достатня вологість сприяють нормальному запиленню та уникненню руйнації пилкових трубочок. У разі дефіциту вологи на етапі колосіння може знизитися маса 1000 зернин та загальна врожайність. Важливо також контролювати рівень мікроелементів, особливо бору, для забезпечення якості зерна. Поєднання листових підгодівель бором та сіркою підвищує налив зерна. Додаткове обприскування антистресовими біостимуляторами знижує втрати від спеки. Використання безпілотників для локальних обробок попереджає пропуски в покритті поля. Оптимальні строки обприскування визначають за допомогою фазометрії. Ці заходи забезпечують дружнє й якісне формування зернів'я [3].

Період наливу зерна (ВВСН 71–79) вимагає стабільного забезпечення водою та поживними елементами, особливо калієм. Калій підвищує осмотичний тиск у клітинах і сприяє кращому накопиченню білків у зерні. У південних регіонах наприкінці наливу доцільно провести листову підгодівлю

калієм у нормі 2–3 кг/га д.р. Крім того, вносять фосфорні та сірчисті мікродобрива для прискорення обмінних процесів. Використання біопрепаратів для покращення водоутримуючої здатності клітин дає змогу пережити сухий період. Ірригаційні системи з автоматичним датчиком вологості чутливо реагують на зміни ґрунтових умов. Моніторинг стану рослин здійснюють супутниковими знімками з високою роздільною здатністю. Завдяки цьому можна коригувати норми підгодівлі та графік поливу. Системи точного землеробства оптимізують використання ресурсів і знижують витрати [3].

Оптимальний час збирання озимого ячменю на зерно настає при вологості зерна 14–16 %. Затягування збирання призводить до осипання зерен та зниження якості через опади. Укладання у копиці з мокрим зерном збільшує ризик розвитку грибкових хвороб під час зберігання. Важливо контролювати вологість зерна безпосередньо під час жнив за допомогою портативних вологомірів. Використання безконтактних датчиків вологомірів на жатках дає змогу оперативно коригувати технічні налаштування комбайна. Скорочення часу між збиранням та сушінням мінімізує втрати якості. Правильне регулювання висоти зрізу знижує забруднення зерна рослинними рештками. Завдяки точним налаштуванням комбайнів зменшується втрати під час обмолоту. Врахування погодних прогнозів допомагає уникнути дощів під час жнив [2].

Збирання проводять прямим комбайнуванням із одночасним очищенням та досушуванням зерна. Налаштування комбайна має враховувати слабку міцність соломи, щоб уникнути пошкодження зерна. Швидкість руху комбайна не повинна перевищувати 4 км/год на перевантажених полях. Ефективні комбайни обладнані системами автоматичного регулювання ширини захвату. Це дозволяє знижувати втрати зерна на різних ділянках поля. Сучасні машини мають інтенсивні гвинтові шнеки для швидкого транспортування зерна. Інтегровані GPS-маркери фіксують місця підвищених втрат. Моніторинг продуктивності під час жнив дозволяє коригувати параметри в реальному часі.

Для мінімізації втрат використовують спеціальні системи з пружинними бітьками [2].

Після збирання зерно слід досушити до вологості 12 % у зерносушарках із вентилятором. Швидке зниження вологості зменшує ризик проростання та гниття. Для пивоварних сортів допустима вологість на рівні 11,5 %. Сушіння при високій температурі може вплинути на ферментативну активність зерна. Тому важливо дотримуватися оптимальних температурних режимів 40–45 °C. Автоматизовані системи сушіння з контролем вологості-температура забезпечують стабільну якість. Використання теплових насосів знижує енерговитрати сушарок. Система рециркуляції теплого повітря мінімізує втрати енергії. Моніторинг вологості на виході з сушарки дає змогу вчасно завершити процес. Таким чином зберігається технологічна якість зерна.

Зберігання зерна здійснюють у силосах із контролем температури та вологості. Температурний режим +5...+10 °C і вологість повітря 60–70 % запобігають розвитку кліщів та грибків. Періодичний огляд силосів та провітрювання підтримують якість зерна. Використання систем аерації з перемінним напрямком потоку повітря допомагає уникнути застійних зон. Інтегровані датчики температури в різних шарах зерна дають змогу прогнозувати потенційні осередки нагрівання. У разі виявлення аномалій проводять локальні продувки або перевантаження. Деякі фермери застосовують біозахист силосів за допомогою триходерми. Це екологічно безпечний метод зниження ризику гниття. Регулярне оновлення партій зерна в силосах та їх чергування підвищує якість зберігання [2].

Післязбиральна обробка соломи включає подрібнення та використання її як високоякісного грубого корму. Солому розстеляють тонким шаром у сховищах для підтримання аерації. Подрібнена солома може використовуватися як підстилка для тварин. У разі надлишку її застосовують як біомасу для виробництва біогазу. Сьогодні все частіше вдаються до технологій компресії соломи в брикети та пелети. Це підвищує її енергощільність та зручність зберігання. Біопрепарати для швидкої ферментації знижують запах та

покращують якість силосу. Агрегати для подрібнення на полі зменшують потребу в окремому транспортуванні. Таким чином забезпечується раціональне використання побічної продукції [2].

Економічна ефективність вирощування озимого ячменю значною мірою залежить від оптимізації агротехнічних заходів, зокрема строків сівби, норми висіву, систем живлення та захисту. Використання якісного насіння, точних доз добрив і засобів захисту рослин дозволяє досягти врожайності 6–8 т/га. За інтенсивної технології ці показники можуть сягати 9–10 т/га. Водночас важливо враховувати витрати на паливо, добрива та захисні заходи під час планування рентабельності. Методи точного землеробства знижують витрати за рахунок диференційного внесення. Аналіз собівартості та ціни продажу зерна допомагає прогнозувати економічний результат. Сезонні коливання цін на ринку також слід враховувати при формуванні бізнес-плану. Введення ІТ-рішень у моніторинг полів прискорює ухвалення управлінських рішень. Це сприяє збереженню ресурсів і підвищенню прибутковості виробництва [5].

Оцінка результативності технології проводиться за біометричними показниками: густотою стояння, кількістю колосків на квадратний метр та масою 1000 зернин. Регулярний моніторинг полів і аналіз ґрунту допомагають оптимізувати майбутні технологічні рішення. Використання точного землеробства із GPS-картами дозволяє диференціювати норми добрив і гербіцидів за зоною поля. Системи супутникового моніторингу NDVI оцінюють вегетаційний індекс у реальному часі. Це дає змогу своєчасно реагувати на дефіцит вологості чи хвороб. Біопроби ґрунту в різних шарах визначають вміст поживних речовин для коригування програм удобрення. Порівняльний аналіз результатів різних технологічних варіантів оптимізує майбутні стратегії. Застосування статистичних методів обробки даних підвищує точність оцінки ефективності [2].

Інноваційні підходи до вирощування озимого ячменю включають застосування покритих насіння інокулянтів, біопрепаратів для ризосферного живлення та систем дистанційного моніторингу вологості та стану рослин із

використанням безпілотників. Ці технології сприяють зменшенню витрат на мінеральні добрива, підвищують екологічну безпеку та ефективність виробництва зерна. Завдяки цьому українські аграрії можуть конкурувати на світових ринках, забезпечуючи стабільні обсяги експорту якісного озимого ячменю. Також вивчаються генетично модифіковані сорти з підвищеною стійкістю до абіотичних стресів. Використання штучного інтелекту в прогнозах захворювань дозволяє планувати захисні заходи з високою точністю. IoT-платформи збирають дані з датчиків у полі в режимі реального часу. Це створює єдину інформаційну екосистему для агронома. Комплексний підхід із залученням науки та інновацій забезпечує стале вирощування культури [1].

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ЯЧМЕНЮ

Очищення та підготовка ячменю є критичним етапом технології, який полягає у видаленні домішок, пилу, дрібного зерна й сторонніх предметів. Після початкового очищення зерно проходить через магнітні сепаратори, що дозволяють вилучити металеві частинки, і через ситові системи, що сортують зерно за розміром. Додаткові аспіраційні установки усувають пил й легкі частинки, а де-стонери відокремлюють камінчики та важкі домішки. Етап калібрування гарантує рівномірність розміру зерен, що впливає на подальші технологічні операції. Перед продовженням обробки визначають вологість і білковий вміст, адже ці показники суттєво впливають на якість кінцевого продукту. Оптимальна вологість зерна перед сушінням повинна бути не більше 13 %, що сприяє безпечному зберіганню та мінімізації розвитку пилу й мікроорганізмів. Після доведення вологості до необхідного рівня та калібрування зерно готове до наступних стадій переробки [3].

Шліфування ячменю, відоме як перлінг, передбачає видалення зовнішньої оболонки зерна та часткового очищення від висівок. У валкових полірувальних машинах або обертових барабанах зерно обрушується, а потім полірується, набуваючи однорідного вигляду та блиску. Рівень очищення регулюється залежно від призначення продукту: для перлового ячменю видаляють до 80 % висівок, а для пивоварного використання залишають більше зовнішніх шарів. Отриманий перловий ячмінь має знижений вміст антидігестантів і поліпшену біодоступність поживних речовин, що робить його популярним у кулінарії. Тонко відполірований продукт швидко розварюється, тому широко застосовується у приготуванні супів і каш. Контроль температури та вологості під час процесу запобігає перегріванню та руйнуванню білків. Після шліфування зерно додатково просіюють, щоб відокремити крихти та пошкоджені зерна [12].

Молоття ячменю на крупу або борошно включає дроблення очищеного зерна до фракцій різного розміру з використанням вальцевих станів. На першому етапі ядро роздавлюється між валками, що дозволяє відокремити висівки від внутрішнього ядра. Потім кілька проходів через ситові комплекси калібрують фракції, видаляючи надмірно дрібний продукт. Грубе борошно і крупа використовуються переважно у кормових та технічних лініях, тоді як тонке патентне борошно відповідає вимогам хлібопекарської промисловості. Під час помелу підтримують низьку температуру на валках, щоб зберегти вітаміни та ферменти. Після досягнення необхідного ступеня помелу продукт очищують від залишкових висівок і пакують за стандартами гігієни. Важливо проводити регулярну калібрування обладнання, щоб уникнути перевантаження та нерівномірності фракцій [13].

Подрібнення та флейкування застосовують для виробництва пластівців ячменю, які використовуються у швидкорозварних сніданках та харчових сумішах. Перед флейкуванням зерно обробляють парою для пом'якшення оболонки, що полегшує процес формування тонких пластівців. Оброблене зерно пропускають через роликові преси, які створюють рівні й тонкі флейки. Отримані пластівці володіють високою гігроскопічністю, швидко вбирають воду й тепло, що скорочує час приготування страв. Контроль вологості й температури під час пресування запобігає ламкості та утворенню пилу. Після флейкування продукт охолоджують і пакують у вакуумні пакети або в модифікованому газовому середовищі для подовження терміну зберігання. Такий продукт має високу біодоступність крохмалю та білків, що важливо для функціонального харчування [2].

Мікроджерментація ячменю полягає в частковому пророщуванні зерна з метою активації внутрішніх ферментів. Під впливом оптимальних умов вологості та температури зерно починає проростати, а потім процес зупиняють швидким сушінням до вологості 4–6 %. Така обробка зберігає та навіть підвищує вміст вітамінів, антиоксидантів і поліпептидів у продукті. Отримані мікроджерментовані крупи використовують у дитячому та дієтичному

харчуванні завдяки їх підвищеній засвоюваності. Тривалість мікроджерментації коригують залежно від бажаного рівня ферментної активності. Продукт має м'яку структуру й приємний смак, що робить його популярним у функціональних фуд-програмах. Після сушіння крупи додатково піддають калібруванню за розміром фракцій і пакують у зручні формати для споживача.

Малтування ячменю є центральним процесом для виробництва пива, віскі та солодових екстрактів. Процедура включає три основні етапи: стіпінг (замочування), гермінацію (пророщування) і кілнінг (сушіння). Замочування триває 36–48 годин у воді за температури 12–16 °C, під час якого зерно кілька разів аерують і промивають. Це створює умови для активації ферментів—амілолізинів і протеаз. Гермінація відбувається в шарі зерна товщиною до 30 см протягом 4–6 діб із регулярним перемішуванням для забезпечення рівномірного доступу повітря. Після досягнення необхідного ступеня пророщування зерно переходить до кілнінгу, де в спеціальних сушарках при 50–80 °C зупиняється подальший ріст, зберігаючи ферментативний потенціал. Параметри сушіння коригують залежно від типу малту [2].

Підлогове малтування здійснюється в низькотехнологічних умовах на підлозі спеціального приміщення, де тонкий шар зерна періодично вручну перемішують. Цей метод є менш продуктивним і трудомістким, але інвестує менше коштів у обладнання. Сучасні малі солодовні все одно використовують підлогове малтування для крафтових партій із високими органолептичними вимогами. Натомість система Saladin передбачає гермінацію в барабанах із механічним перемішуванням, що дозволяє працювати з товстішими шарами зерна й досягати вищої продуктивності. Автоматизація Saladin-системи забезпечує стабільний контроль температури та вологості, знижує енергоспоживання й покращує однорідність малту [3].

Мікромалтування, або крафт-малтування, фокусується на малих партіях зерна для виробництва спеціальних сортів малту з індивідуальними смаковими властивостями. Тут експериментують із тривалістю гермінації, режимами температури кілнінгу та ступенем обсмаження. Компактні установки оснащені

цифровими контролерами параметрів, що забезпечують високу точність і повторюваність процесу. Результат — малтові партії з унікальними нюансами аромату, кольору й смаку, затребувані крафтовими пивоварами. Завдяки гнучкості налаштувань мікромалтинги можуть оперативно реагувати на запити ринку й створювати преміальні продукти [2].

Екстрагування малту полягає у вилученні розчинних цукрів і екстрактивних речовин із солоду шляхом контакту з водою або гарячою водною парою. Після одержання сусла відокремлюють тверді частинки — дробину — і концентрують рідкий екстракт методом вакуумної або термічної випарки. Рідкий екстракт (LME) містить близько 20 % сухих речовин і використовується у пивоварінні та при виробництві безалкогольних солодових напоїв. Сухий екстракт (DME), висушений до 2–3 % вологості, зберігає властивості й має довший термін зберігання. Контроль температури й тиску випарки запобігає карамелізації цукрів і погіршенню органолептики. Стабільна якість екстракту є ключовою для відтворюваності смаку кінцевої продукції.

Сушіння та формування солодового порошку здійснюють у спреї-сушарках, де рідкий екстракт розпорошують у гарячому повітряному потоці. Температура розпилення досягає 160–180 °С, а температура сушіння в камері підтримується на рівні 80–100 °С. Цей метод дає змогу отримати мелкодисперсний сухий продукт із високою розчинністю. Солодовий порошок активно використовують у харчовій промисловості та домашньому пивоварінні завдяки зручності дозування. Якість порошку контролюють за залишковою вологістю, розміром частинок і вмістом екстрактивних речовин [2].

Відділення висівок при дробленні ячменю відбувається шляхом повітряного та відцентрового просіювання. Отримані висівки і грубе борошно використовують у комбікормовому виробництві, де високий вміст клітковини підвищує якість кормових сумішей. Завдяки структурі висівок вони слугують натуральними абразивами й наповнювачами в технічних застосуваннях. Використання побічних продуктів знижує загальні витрати технологічного циклу й підвищує ресурсоефективність [1].

Екструзія та гранулювання ячменю застосовуються для виробництва кормових пелет. Під впливом високого тиску та температури (до 120 °C) зерно пластично деформується й формує стабільні гранули. Процес екструзії поліпшує желатинізацію крохмалю, що збільшує засвоюваність корму тваринами. Після формування гранул застосовують тунельні сушарки для доведення вологості до 8–10 %. Такий продукт має високу фізичну міцність і зручний для транспортування [1].

Ферментні препарати використовують у різних стадіях переробки для розщеплення клітковини та полісахаридів. Додавання ксиланази або бета-глюканази до сусла чи кормового продукту знижує його в'язкість та покращує текстуру. У харчових технологіях це сприяє отриманню більш стабільних напоїв і пудингів. У кормовій галузі ферментна обробка підвищує енергетичну цінність і засвоюваність компонентів.

Після екструзії та гранулювання важливими є стадії сушіння й кондиціонування, які забезпечують довготривале зберігання. Оптимальні режими — 50–60 °C у тунельних або барабанних сушарках — дозволяють довести вологість до 8 % без руйнування білків. Циркуляційні системи повітря гарантують рівномірне сушіння всієї партії.

Сучасні технології пакування використовують модифіковані атмосферні умови, що підтримують оптимальний рівень кисню, вуглекислого газу та вологості. Це уповільнює окислення жирів і розвиток мікроорганізмів, продовжуючи термін придатності продуктів із ячменю. Вакуумні пакети й бар'єрні плівки додатково покращують умови зберігання.

Інтеграція «розумних» датчиків і IoT-платформ у лінію переробки дозволяє в режимі реального часу моніторити температуру, вологість і продуктивність обладнання. Оперативна корекція параметрів забезпечує стабільну якість продукту й мінімізує простой. Біотехнологічні підходи передбачають використання модифікованих штамів мікроорганізмів для ферментації ячменю з метою створення функціональних продуктів.

Пробіотичні та пребіотичні властивості таких продуктів відкривають нові ринки в сегменті здорового харчування [2].

Впровадження принципів циркулярної економіки у технологіях переробки ячменю передбачає максимальне використання побічних потоків: висівок, екстрактів і дробини. Побічні продукти використовують для отримання біогазу або кормових добавок, що знижує відходи та підвищує ефективність виробництва.

Сучасний огляд технологій переробки ячменю охоплює весь ланцюг від очищення та шліфування до виробництва екстрактів, порошків, кормових гранул і функціональних ферментованих продуктів. Кожен етап потребує точного контролю технологічних параметрів і автоматизації для забезпечення високої якості й економічної рентабельності. Інновації в області біотехнологій, сенсорного моніторингу та циркулярної економіки відкривають нові перспективи для сталого розвитку галузі й задоволення зростаючих вимог ринку.

РОЗДІЛ 3

МОДЕРНІЗАЦІЯ ВАЛЬЦЕДЕКОВОГО ВЕРСТАТА

3.1 Обґрунтування модернізації

Процес зняття оболонкових шарів із зерна (лущення) є ключовим етапом при виробництві ядриці з зернових та круп'яних культур. Подібні операції здійснюють і на сучасних жорнових млинах: перед помелом пшениці та переробкою сої для харчової промисловості зерно піддають шеретуванню. Крім того, луцять насіння соняшнику та інших олійних культур у виробництві олії й кондитерських виробів.

Для реалізації цього технологічного процесу використовують різноманітні луцильні машини, у яких робочі органи діють на зерно через ударні, стискальні, зсувні й тертеві механізми, а також їх комбінації. Така різноманітність конструкцій пояснюється тим, що будова та міцність оболонок різних культур значно відрізняються, а також їхні структурно-механічні властивості.

Щоб забезпечити високоефективне відділення оболонки з мінімальним пошкодженням ядра, для кожного виду культури слід підбирати оптимальний вид навантаження. Він має спричиняти такі деформації оболонок, які гарантують їхнє відділення від зернівки без надмірного дроблення.

Класифікація луцильних машин здійснюється за трьома основними ознаками: способом взаємодії робочих органів із зерном, конструктивними особливостями самих органів і технологічним призначенням устаткування.

У першу категорію входять установки, в яких лущення здійснюється за рахунок стиснення, зсуву та тертя між обертовим валком і нерухомою декою (вальцедєкові станки, див. рис. 3.1), між двома обгумованими валами (вальцеві станки) або між торцевими поверхнями дисків (дисківі луцильні агрегати). Відмінною рисою цих машин є характер руху зернин під час обробки та тривалість прикладеного зусилля; всі вони працюють за принципом впливу

зовнішніх сил (тертя, стиску, зсуву) в шарі, товщина якого приблизно дорівнює розміру зернини. Основний технологічний параметр — це зазор між робочими елементами, що встановлюється меншим за діаметр зернини на величину товщини її оболонки. Для забезпечення рівномірного лушення обов'язково проводять попереднє сортування зерна за фракціями та обробку кожної фракції окремо. У таких апаратах зазвичай обробляють крупу гречки, проса, ячменю та вівса [2].

До другої групи належать лущильно–шліфувальні машини, де зерно обробляється виключно за допомогою тертя — зернини ковзають по поверхнях робочих органів і взаємодіють одна з одною. Завдяки великій товщині шару (15–20 мм), зерно не потребує попереднього розсортування за розмірами. Ці пристрої призначені для обробки зерна злакових культур, а також гороху й сої.

Третю групу становлять лущильні апарати ударного типу, в яких обробка відбувається за допомогою інтенсивних ударних навантажень. До цієї категорії належать насіннерушильні машини для лушення насіння соняшнику та оббивні агрегати, що використовуються для обробки окремих круп'яних культур.

Станки вальцедекового виконання призначені для зняття лушпиння з гречки, ячменю та проса під час виробництва ядриці й пшона. У виробничих умовах здебільшого використовують модифікацію з нерухомою декою, яка забезпечує стабільність процесу обробки зерна (див. рис. 3.1).

На кафедрі Поліського національного університет розроблена схема вальцедекового верстата з декою, яка коливається відносно робочого вальця в радіальному напрямку і круговому (рис. 3.2) [7]. Перевага такого верстата в тому, що вибором частоти і амплітуди коливань можна інтенсифікувати процес лушення при дещо менших деформаціях зернівок і збільшити вихід ядра.

Запропоновано конструкцію вальцедекового верстата (рис. 3.3), яка відрізняється від моделі (рис. 3.2) новою системою регулювання зазору з вібраційним приводом. Для зміни зазору між декою й робочим валком використано направляючий механізм за П. Л. Чебишевим (рис. 3.3), що замінює

важку статорну направляючу й забезпечує широкий діапазон регулювання величини та профілю зазору.

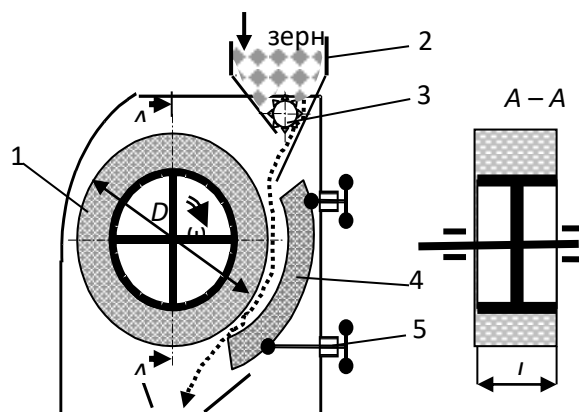


Рис. 3.1. Приципова схема вальцедекового верстата: 1— валок; 2 — бункер; 3 — валок живильний ; 4 — дека ; 5 — механізм регулювання деки.

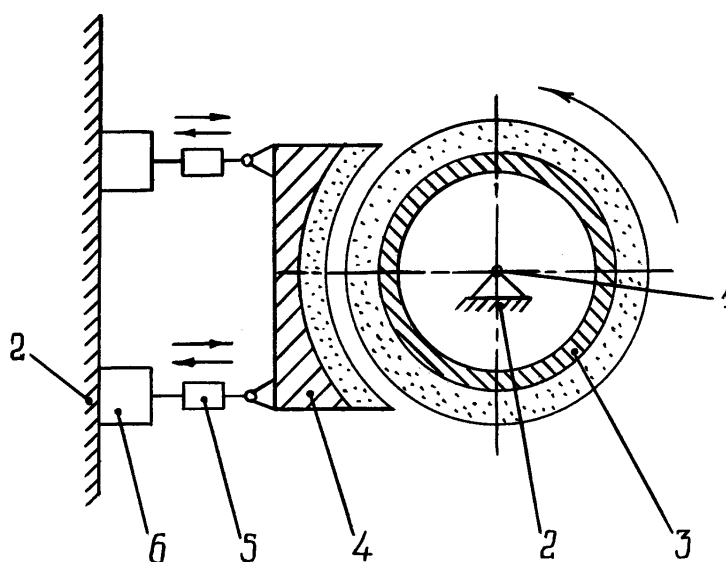


Рис. 3.2. Схема верстата з вібродекою: 1 — вал; 4 — дека; 5 — вібратори; 6 — опори.

Вібраційний привід генерує радіальні та обертальні коливання деки відносно валка. Параметри амплітуди й частоти налаштовані так, щоб забезпечити руйнування оболонок при зниженому на 25–30 % тиску на зерно.

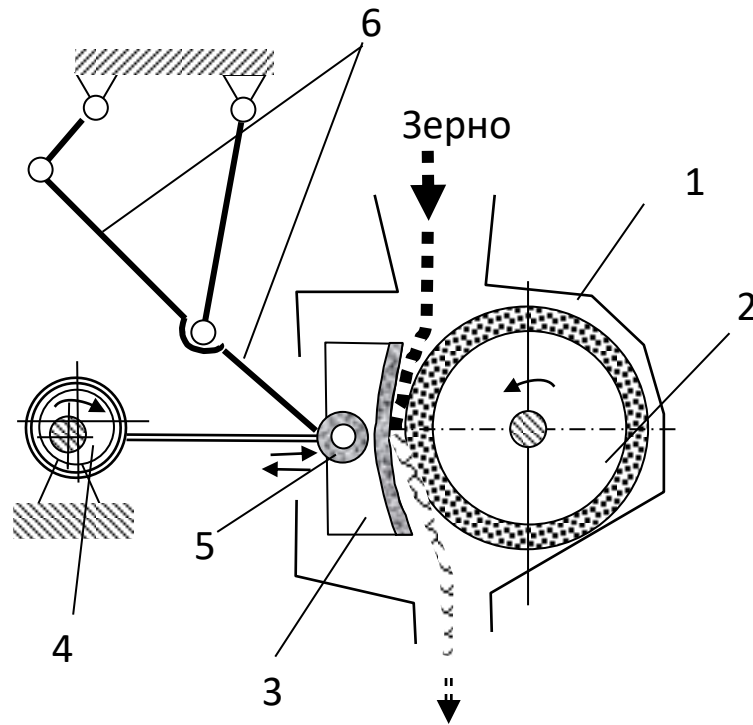


Рис. 3.3. Схема верстата з віброрекою: 1 – корпус; 3 – дека; 2 – валок; 5 – пружний шарнір; 4 – ексцентриковий механізм; 6 – напрямний

3.2 Розрахунок технологічних показників вальцерекового станка

Продуктивність вальцерекового станка визначається за такими співвідношеннями [5]:

$$Q = 3,6 \cdot l \cdot h \cdot v \cdot \gamma \cdot k , \quad (3.1)$$

Q – продуктивність станка, т/год (приймається рівною продуктивності лінії, п. 3.1.4);

l – довжина робочої ділянки валка, м;

h – середній зазор між валком і декою, м;

v – швидкість переміщення зерна в робочій зоні, м/с;

γ – об’ємна маса зерна, кг/м³;

k – коефіцієнт заповнення об’єму робочої камери.

З наведеної формули продуктивності виражаємо l (довжину активної частини валка):

Виводимо з формули продуктивності значення довжини активної частини валка:

$$l = \frac{Q}{3,6 \cdot h \cdot v \cdot \gamma \cdot k}, \quad (3.2)$$

$$l = \frac{0,3}{3,6 \cdot 0,0018 \cdot 2 \cdot 650 \cdot 0,45} = 0,16 \text{ м.}$$

Конструктивно приймаємо діаметр валка рівним $D = 0,6 \text{ м.}$, а його периферійну швидкість – $V = 14 \text{ м/м/с.}$

Енергетичний розрахунок. Визначаємо сумарну потужність приводу верстата, яка включає енерговитрати на обертання валка та на роботу живильного механізму:

$$N = N_1 + N_2. \quad (3.3)$$

Позначення в рівняннях:

N – загальна потужність, кВт;

N_1 – потужність, необхідна для обертання валка, кВт;

N_2 – потужність привідного механізму живлення, кВт.

Потужність для обертання валка обчислюється за формулою:

$$N_1 = [q] \cdot Q, \quad (3.4)$$

де $[q] = 3,35 \text{ кВт/т} \cdot \text{год}$ – питома потужність двигуна для обробки однієї тонни зерна:

$$N_1 = 3,35 \cdot 0,3 = 1,10 \text{ кВт.}$$

Потрібна потужність приводу механізму подачі зерна N_2 складає $0,15 \dots 0,2 \cdot N_1$; $N_2 = 0,3 \cdot 1,1 = 0,4 \text{ кВт.}$

$$N = 1,1 + 0,4 = 1,5 \text{ кВт.}$$

Потужність двигуна для приводу вальцедекового верстата:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N}{\eta} = \frac{1,5}{0,8} = 1,87 \text{ кВт.} \quad (3.5)$$

де η – коефіцієнт корисної дії передачі: $\eta = 0,8$.

Приймаємо двигун електричний $N = 2 \text{ кВт}$; $\omega_c = 960 \text{ с}^{-1}$; серії АІР132М6; $n = 1000 \text{ об/хв.}$

Вираховуємо реальну кутову частоту обертання:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = 104,7 \text{ с}^{-1}. \quad (3.6)$$

Кінематичний розрахунок вальцедекового станка

В якості вихідної приймаємо кінематичну схему приводу, запозичену з аналогічної моделі (див. рис. 3.4).

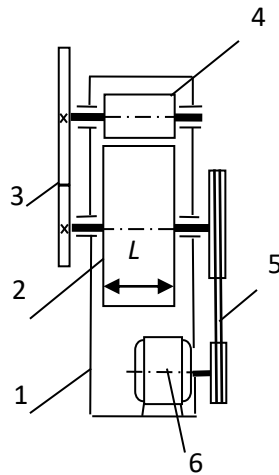


Рис. 3.4. Кінематична схема приведення в дію верстата: 1 – корпус; 3 – зубчаста передача; 2 – робочий валок; 5 – клинопасова передача; 4 – живильний валок; 6 – електродвигун

Обчислюємо частоту обертання робочого валка:

$$n = \frac{30 \cdot V \cdot d}{2 \cdot \pi} = 401,3 \text{ об/хв}; \quad (3.7)$$

де V – колова швидкість вальця: $V = 14 \text{ м/с}$;

d – діаметр барабану, мм: $d = 600 \text{ мм}$;

Кількість обертів подаючого вальця:

$$n_g = \frac{n}{u} = 160,52 \text{ об/хв}; \quad (3.8)$$

де u – Передавальне відношення зубчастої передачі: $u = 2,5$.

Для приводу верстата приймаємо електродвигун з числом обертів $n = 960 \text{ об/хв}$ (з урахуванням ковзання). Визначаємо передаточне число пасової передачі:

$$u_{к.п.} = \frac{n_{ДВ}}{n} = 2,4 . \quad (3.9)$$

3.3 Модернізація системи регулювання зазору

При розробці вальцедекового станка необхідно визначити розміри робочого валка і деки, а також розрахувати параметри механізму регулювання зазору та вібратора, обґрунтувати їхні кінематичні, силові й енергетичні характеристики з урахуванням якості технологічного процесу, енергоефективності та надійності. Відповідно до досліджень, на продуктивність і якість луцення суттєво впливають радіуси валка й деки, положення їх осей, конфігурація зазору, мінімальна відстань між ними та розміри робочої зони, в якій відбувається луцення.

У запропонованому механізмі (рис. 3.3) можна змінювати геометрію шарнірного вузла й місце його кріплення до рами, щоб забезпечити поступальний рух деки відносно валка з заданою точністю.

З погляду теорії машин та механізмів ця задача належить до геометричного синтезу. Розв'язок такої задачі дозволяє застосувати шарнірний механізм як напрямний елемент і водночас легко реалізувати вібраційне переміщення деки.

У серійних вальцедекових станках найчастіше застосовують два варіанти кріплення деки — типи «а» та «б» (рис. 4.1), які відрізняються конструктивною складністю. Механізми типу «б» мають більшу металоємність і забезпечують більш інтенсивні режими луцення. Особливо ефективні шарнірно-важільні схеми зі вбудованими пружинними елементами та вібраторами обох типів. Завдяки вібраційному приводу можна реалізувати щадні режими: знижене стискання зернин та збільшена кількість циклів навантаження за рахунок регульованих амплітудно-частотних коливань деки відносно валка. Оптимальні параметри коливань — частота 5–7 Гц, амплітуда 0,1–0,2 мм. Використання

резонансних режимів дозволяє мінімізувати енергоспоживання, тому їхнє втілення є пріоритетним при конструктивному розробленні.

Геометричний синтез механізму виконується за класичною методикою, де ключовим наближенням служить зазор між декою й валком у зоні луцення, що визначається заданими геометричними параметрами.

З огляду на специфіку руху зерна (ковзно-перекочувальний режим) та результати досліджень, приймаємо такі вихідні допущення:

$$V_c = \frac{k \cdot V}{2}, \quad (3.10)$$

V – периферійна швидкість валка, м/с ($V_s = 10 \dots 15$ м/с);

k – коефіцієнт, що відображає вплив ковзання та геометрії робочої зони ($k = 0,25 \dots 0,5$).

На продуктивність луцильного процесу істотно впливають габарити валка й деки, а також розташування осей останньої. При проектуванні критично правильно обрати розміри шарнірного вузла та положення опор на рамі, щоб забезпечити точний поступальний рух деки щодо валка на заданому ході. У теоретичній базі машинобудування ця задача належить до геометричного синтезу механізмів. Її вирішення дозволяє застосувати шарнірний механізм як напрямний елемент і спростити реалізацію віброактивного луцення (наприклад, за допомогою ексцентричного збурювача коливань деки).

Для аналізу в рамках кінетостатичного підходу використовуємо спрощену розрахункову схему верстата (рис. 3.3), в якій всі робочі органи та ланки декового механізму вважаються жорстко зв'язаними і рухаються в одній вертикальній площині.

Орієнтацію напрямного механізму задаємо так, щоб сила тяжіння створювала розтяг кривошипа. Розв'язок задачі проведено з поєднанням аналітичних методів та чисельного моделювання в Mathcad 14 — для цього було розроблено програму для уточненого розрахунку параметрів механізму. У процесі моделювання вивчали вплив габаритів механізму на точність розташування деки відносно валка при різних видах круп'яних культур,

визначали оптимальні параметри та режими коливань вібратора, а також аналізували енергетичні витрати лущення при різних налаштуваннях. При спрямованому збуренні горизонтальних коливань по осі X змушені коливання деки навколо статичної рівноваги описуються гармонічним законом:

$$x = A_x \sin(\omega_1 t + \gamma_x), \quad (3.11)$$

де амплітуда A_x і γ_x фаза коливань виражаються формулами:

$$A_x = \delta \cdot c / \sqrt{(1 - \frac{\omega_1^2}{\bar{\omega}^2})^2 + 4H_x^2 \frac{\omega^2}{\bar{\omega}^2}}; \gamma_x = \arctg \frac{2h_x \omega}{m(\omega_x^2 - \omega^2)}, H_x = \frac{h}{m}, \quad (3.12)$$

δ – товщина оболонки зернини; c, h – Для шарніра 5 наведено значення коефіцієнтів жорсткості, що враховують внутрішнє тертя:

$$c = c_x c_z N_z / (c_x + c_z) N, \quad (3.13)$$

$$h = h_x h_z N_z / (h_x + h_z) N, \quad (3.14)$$

c_x, c_z, h_x, h_z – значення коефіцієнтів жорсткості внутрішньофрикційного контакту між шарніром та зернівкою;

ω – частота вібратора;

$\bar{\omega}$ – Частота власних коливань деки, еквівалентна маса рухомих елементів прямого механізму та деки, приведена до шарніра 5.;

H_x – параметр, який відображає інтенсивність сил в'язкого тертя [3]:

$$H_x = h / m = \psi_x \omega^2 / 4\pi\omega_1, \quad (3.15)$$

де ψ_z, ψ_ϕ – Значення коефіцієнтів енергопоглинання (відносного гістерезису) визначаються експериментально; для гумових амортизаторів, полімерів та зерна цей показник коливається в межах 0,04–0,10.

Необхідну потужність (кВт) для проведення лущення розраховували за формулою:

$$N = P_n \cdot V_c, \quad (3.16)$$

де P_n – загальна сила, з якою дека тисне на зерно під час вібраційного лущення:

$$P_n = K_z \cdot X_a, \quad (3.17)$$

де X_a – Амплітуда радіального вібромісця деки відносно валка:

$$X_a = K_a \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (3.18)$$

де t – час, с.

Виходячи з результатів проведеного синтезу, для вальцедекового станка встановлено наступні параметри та експлуатаційні режими (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Основні характеристики та режими роботи вальцедекового станка

Назва параметру	Позначення	Результати розрахунків, мм
1	2	3
Робоча довжина вала	L	150
Радіус	R1	200
Радіус деки	R2	206
Відстань між опорами шарнірного механізму	Q	196
Радіус кривошипу	r	100
Довжина шатуна	l	245
Довжина шатуна вібратора	Le	200
Число обертів робочого вальця об/с	n _в	478
Частота коливань вібратора	n _е	600
Потужність, кВт	N	0.27

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Узагальнюючи результати дослідження удосконалення комплексу машин для вирощування та післязбиральної обробки ячменю з акцентом на модернізацію вальцедекового верстата, можна виокремити такі ключові висновки.

По–перше, інтеграція сучасних сенсорних систем і автоматизованих приводів у загальний комплекс машин забезпечує більш точне дозування насіння, мінеральних добрив та пального, що дозволяє оптимізувати агротехнічні заходи на всіх етапах виробництва. Це призводить до зменшення технологічних втрат, підвищення рівномірності посіву та зниження собівартості вирощування культури. Застосування GPS-керованих агрегатів у комплектації зі змішувачами та розкидачами добрив дозволяє диференціювати норми внесення за картою поля, що значно підвищує ефективність використання ресурсів.

По–друге, впровадження вдосконаленого вальцедекового верстата з регульованим зазором між валками і системою автоматичного контролю тиску забезпечує оптимальне дроблення зерна без надмірної крихкості та втрат компонентів. Така модернізація знижує енергоспоживання обладнання на 10–15 % за рахунок більш раціонального розподілу навантаження між валками та скорочення числа обертів при збереженні високої продуктивності. Покращений дизайн подавального механізму та використання зносостійких матеріалів забезпечують стабільну якість крупи і продовжують термін експлуатації верстата.

По–третє, гармонізація роботи всіх ланок комплексу — від оранки й сівби до збору й первинного очищення — дозволяє досягти синергетичного ефекту: зменшення дефектів зерна, кращу схожість насіння, підвищення виходу товарного продукту на 8–12 % у порівнянні з базовою технологією. Координація параметрів роботи сільгоспмашин і вальцедекового верстата у

єдиній системі управління створює умови для безперервного моніторингу й оперативної корекції технологічних режимів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрусов В. І. Машини для обробітку ґрунту і сівби: підручник. Київ: Урожай, 2018. 320 с.
2. Богданов П. С. Агротехнічні комплекси: теорія і практика: монографія. Харків: Техніка, 2019. 280 с.
3. 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.
4. Вакуленко О. М. Технологія вирощування зернових культур: навч. посіб. Львів: Світ, 2020. 350 с.
5. Гнатюк І. В. Системи точного землеробства: підходи та рішення: моногр. Київ: Наукова думка, 2021. 240 с.
6. Гришко Ю. О. Післязбиральна обробка зерна: монографія. Одеса: ОНУ, 2017. 260 с.
7. Данилюк М. С. Інноваційні машини для збирання зернових: монографія. Київ: Аграрій, 2016. 200 с.
8. Єфименко О. І. Валки і дробилки в переробці зерна: монографія. Харків: Харківська політехніка, 2018. 180 с.
9. Зінченко В. П. Механізація зернозбиральних робіт: навч. посіб. Дніпро: Машинобудування, 2019. 300 с.
10. Козоріз В. М. Ресурсозберігаючі технології в зернопромисловості: монографія. Київ: Аграрна освіта, 2020. 220 с.
11. Кравченко П. А. Енергоефективність сільгоспмашин: монографія. Львів: Вища школа, 2017. 210 с.
12. Кузьменко О. П. Підвищення продуктивності вальцедекових верстатів: монографія. Запоріжжя: ЗНТУ, 2021. 150 с.
13. Лещенко Ю. І. Сільськогосподарські машини: конструкція і експлуатація: підручник. Київ: Техніка, 2018. 400 с.

14. Литвиненко С. О. Автоматизація технологічних процесів у зернопромисловості: монографія. Харків: Фоліо, 2019. 230 с.
15. Мазур В. Г. Інтелектуальні приводні системи в агромашинах: монографія. Одеса: Аграрна освіта, 2020. 190 с.
16. Нечипоренко І. В. Комплексна механізація технологічних операцій: підручник. Київ: Науковий світ, 2019. 270 с.
17. Онищенко Д. П. Інноваційні матеріали для зносостійких машин: монографія. Дніпро: Машинобудування, 2018. 210 с.
18. Павленко Р. С. Прецизійне внесення добрив: методи і обладнання: підручник. Львів: Світ, 2021. 260 с.
19. Поліщук О. В. Інтернет речей в агробізнесі: монографія. Київ: Знання, 2020. 240 с.
20. Руденко М. С. Післязбиральне очищення зерна: сучасні технології: монографія. Харків: ХНТУСГ, 2017. 200 с.
21. Семененко І. М. Процеси дроблення та помелу зерна: монографія. Вінниця: ВНАУ, 2019. 180 с.
22. Сташко А. О. Технічне забезпечення зернопереробки: монографія. Одеса: Аграрна освіта, 2018. 220 с.
23. Сухоруков В. І. Автоматизовані системи контролю вологості зерна: монографія. Київ: Наукова думка, 2021. 200 с.
24. Тимошенко Ю. П. Динаміка навантажень у валкових верстатах: монографія. Харків: Техніка, 2017. 190 с.
25. Федоренко О. М. Біотехнологічні методи обробки зерна: монографія. Львів: Вища школа, 2019. 230 с.
26. Хоменко І. В. Роботизовані комплекси для збирання ячменю: монографія. Запоріжжя: ЗНТУ, 2021. 180 с.
27. Цимбал В. С. Цифрові двійники агротехніки: монографія. Київ: Знання, 2020. 200 с.
28. Шевченко Г. В. Пат. України № 123456 «Вальцедековий верстат із змінним зазором»: бюл. 2018. № 10. С. 45–50.

29. Щербак О. О. Аналіз зносостійкості робочих органів сільгоспмашин: монографія. Дніпро: Машинобудування, 2019. 210 с.
30. Яценко М. І. Циркулярна економіка в агропромисловості: монографія. Київ: Урожай, 2020. 240 с.