

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

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

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Пивовар Олександр Миколайович

УДК 631.362:664.72

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Удосконалення комплексу машин післязбиральної обробки
ячменю з модернізацією 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 _____ Пивовар О.М.

Керівник роботи

Дерев’янка Д.А.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Пивовар Олександр Миколайович. Удосконалення комплексу машин післязбиральної обробки ячменю з модернізацією вальцедекового верстата. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання удосконалення комплексу машин післязбиральної обробки ячменю з модернізацією вальцедекового верстата. Проведено аналіз сучасного стану вирощування та переробки ячменю в Україні й світі, визначено основні тенденції зміни посівних площ, обсягів виробництва та напрямів використання зерна. Встановлено, що ефективність переробки ячменю значною мірою залежить від якості післязбиральної обробки, очищення, сортування, луцення, шліфування та фасування готової продукції. У роботі проаналізовано існуючі технологічні схеми переробки ячменю та обґрунтовано доцільність застосування механізованої потокової лінії з послідовним виконанням основних технологічних операцій. Розроблено технологію переробки ячменю з урахуванням роботи бункерів, сепаратора, каменевідбірника, пропарювача, сушарки, вальцедекового верстата, луцильно-шліфувальних і сортувальних машин. Особливу увагу приділено модернізації вальцедекового верстата як ключової машини, що впливає на якість луцення, вихід крупи та зменшення кількості подрібненого ядра. Запропоновані технічні рішення спрямовані на підвищення продуктивності обладнання, зниження енерговитрат, стабілізацію зазору між робочими органами та покращення якості готової продукції. Практичне значення роботи полягає в можливості використання запропонованої технології та модернізованого обладнання на підприємствах післязбиральної обробки й переробки зерна ячменю.

Ключові слова: ячмінь, післязбиральна обробка, переробка зерна, вальцедековий верстат, луцення, круп'яне виробництво.

ANNOTATION

Oleksandr Mykolayovych Pivovar. Improvement of the barley post-harvest processing machinery complex, including the modernisation of the 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, 2026.

This thesis examines the improvement of the barley post-harvest processing machinery complex, including the modernisation of the roller-deck machine. An analysis is carried out of the current state of barley cultivation and processing in Ukraine and worldwide, and the main trends in changes to sown areas, production volumes and uses of the grain are identified. It has been established that the efficiency of barley processing depends to a large extent on the quality of post-harvest handling, cleaning, sorting, hulling, polishing and packaging of the finished product. The paper analyses existing barley processing flow charts and justifies the feasibility of using a mechanised production line with sequential execution of the main processing operations. A barley processing technology has been developed, taking into account the operation of hoppers, a separator, a stone remover, a steamer, a dryer, a roller decorticator, and hulling, polishing and sorting machines. Particular attention has been paid to the modernisation of the roller decorticator as the key machine influencing the quality of decortication, the yield of groats and the reduction in the amount of crushed kernels. The proposed technical solutions are aimed at increasing equipment productivity, reducing energy consumption, stabilising the gap between the working parts and improving the quality of the finished product. The practical significance of this work lies in the possibility of using the proposed technology and modernised equipment at enterprises engaged in post-harvest handling and processing of barley grain.

Keywords: barley, post-harvest handling, grain processing, roller-deck machine, husking, groats production.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ ТА ПЕРЕРОБКИ ЯЧМЕНЮ.....	8
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ЯЧМЕНЮ.....	18
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНЕ УДОСКОНАЛЕННЯ ВАЛЬЦЕДЕКОВОГО ВЕРСТАТА ДЛЯ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЯЧМЕНЮ.....	37
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Ячмінь є однією з найважливіших зернових культур, яка має широке використання у продовольчій, кормовій, пивоварній та круп'яній промисловості. Його цінність визначається високим вмістом поживних речовин, доброю пристосованістю до різних ґрунтово-кліматичних умов, порівняно коротким вегетаційним періодом і стабільним попитом на внутрішньому та зовнішньому ринках. В Україні ячмінь традиційно займає значне місце у структурі зернового виробництва, однак ефективність його використання значною мірою залежить не лише від урожайності, а й від рівня післязбиральної обробки та глибини переробки зерна.

Післязбиральна обробка ячменю є важливою складовою технологічного процесу, оскільки саме на цьому етапі формується якість зернової сировини для подальшого зберігання, реалізації або переробки. До основних операцій післязбиральної обробки належать приймання, очищення, сортування, видалення мінеральних і металоманітних домішок, сушіння, калібрування, лушення, шліфування, контроль якості та фасування готової продукції. Недостатній рівень механізації або неправильний підбір обладнання призводить до збільшення втрат зерна, зниження виходу якісної крупи, підвищення енерговитрат і погіршення економічних показників роботи підприємства.

Особливе місце у технології переробки ячменю займає процес лушення, під час якого від зернівки відокремлюються квіткові плівки та частина оболонки. Якість виконання цієї операції безпосередньо впливає на вихід готової продукції, кількість подрібненого ядра, рівномірність обробки зерна та подальшу ефективність шліфування. Одним із поширених технічних засобів для виконання цієї операції є вальцедековий верстат, у якому зерно обробляється в робочому зазорі між валком і декою. Разом із тим традиційні конструкції таких машин мають певні недоліки, пов'язані з недостатньою

стабільністю зазору, підвищеним травмуванням зерна, нерівномірністю навантаження робочих органів і значними енерговитратами.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності комплексу машин для післязбиральної обробки та переробки ячменю шляхом удосконалення технологічної схеми й модернізації вальцедекового верстата. У сучасних умовах зернопереробні підприємства потребують обладнання, яке забезпечує високу продуктивність, надійність, енергоощадність, стабільну якість обробки та можливість гнучкого регулювання робочих параметрів залежно від властивостей зернової сировини. Тому вдосконалення конструкції вальцедекового верстата є важливим напрямом підвищення ефективності всієї технологічної лінії.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності післязбиральної обробки та переробки ячменю шляхом удосконалення комплексу машин і модернізації вальцедекового верстата.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**: проаналізувати сучасний стан вирощування та переробки ячменю в Україні й світі; розглянути існуючі технології післязбиральної обробки зерна; оцінити рівень механізації процесів очищення, сортування, сушіння, лущення та фасування; розробити технологічну схему переробки ячменю; обґрунтувати склад обладнання потокової лінії; визначити основні напрями підвищення ефективності роботи вальцедекового верстата; запропонувати конструктивне рішення з модернізації робочих органів і механізму регулювання зазору; оцінити очікуваний вплив удосконалення на якість переробки, продуктивність та енерговитрати.

Об'єктом дослідження є технологічний процес післязбиральної обробки та переробки зерна ячменю.

Предметом дослідження є комплекс машин для переробки ячменю та конструктивно-технологічні параметри вальцедекового верстата, що впливають на якість лущення зерна.

У роботі використано методи аналізу технологічних процесів, порівняння існуючих технічних рішень, розрахунку параметрів обладнання, узагальнення виробничого досвіду, графічного моделювання технологічних схем і техніко-технологічного обґрунтування модернізованої машини.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Дерев'янюк Дмитро, Олізаровський Іван, **Пивовар Олександр** Технологія вирощування ячменю ярого в зоні полісся. Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті : зб. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, 22–23 квітня 2026 року. [Електронне видання]. –Рівне : НУВГП, 2026.С. 258-260.

2. Дерев'янюк Д.А., **Пивовар О.М.** Технологічна доцільність післязбиральної доробки ячменю в системі зернового виробництва. Збірник тез XII Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь». 29 квітня 2026 року. Житомир. Видавничий центр ЖАТФК. 2026. С. 144-145

Практичне значення роботи полягає в можливості застосування запропонованої технологічної лінії та модернізованого вальцедекового верстата на підприємствах, що займаються післязбиральною обробкою і переробкою зерна ячменю. Реалізація запропонованих рішень дає змогу підвищити вихід якісної крупи, зменшити втрати та пошкодження зерна, стабілізувати роботу обладнання, знизити питомі енерговитрати й поліпшити економічну ефективність виробництва.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 27 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 54 сторінки комп'ютерного тексту, містить 20 рисунків, 15 таблиць та 3 додатки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ ТА ПЕРЕРОБКИ ЯЧМЕНЮ

1.1. Господарське значення ячменю та сучасні підходи до його вирощування

Ячмінь є однією з базових зернових культур помірної кліматичної зони. Його цінність визначається універсальністю використання: зерно застосовують у годівлі тварин, пивоварінні та солодовому виробництві, виробництві круп, пластівців, комбікормів, дієтичних і функціональних харчових продуктів. Для кваліфікаційної роботи ця культура становить особливий інтерес, оскільки результативність її переробки значною мірою залежить не лише від урожайності, а й від якості післязбиральної доробки, очищення, сушіння, сортування та луцення.

У сучасному виробництві застосовують три основні технологічні підходи до вирощування ячменю: традиційний, інтенсивний і ресурсозберігаючий із елементами точного землеробства. Традиційна технологія базується на оранці, суцільній сівбі та стандартному захисті посівів. Інтенсивна передбачає високоякісне насіння, збалансоване живлення, контроль забур'яненості та хвороб, а також ретельне дотримання строків збирання. Ресурсозберігаючі технології орієнтовані на мінімізацію проходів агрегатів, зменшення витрат палива, використання GPS-навігації, карт урожайності та диференційованого внесення добрив.

Для переробки найважливішими показниками є вирівняність зерна, натура, вологість, вміст білка, плівчастість, наявність битого зерна та домішок. Якщо зерно призначене для солоду, критичною стає здатність до проростання і стабільність біохімічних показників. Для круп'яного напрямку важливі рівномірність фракцій і мінімальна кількість травмованого ядра, тому комплекс післязбиральних машин повинен працювати у режимі, який зберігає технологічні властивості зернівки.

1.2. Динаміка посівних площ і виробництва ячменю в Україні та світі

Міжнародна статистика переважно використовує показник зібраної площі, оскільки саме вона відображає фактичну площу, з якої отримано врожай. За даними FAOSTAT, опрацьованими Our World in Data, статистика зернових культур подається за площами збирання, обсягами виробництва і врожайністю, а для зернових враховується зерно, зібране на сухе зерно. Світовий масив даних охоплює період до 2024 року, а оцінки USDA дають можливість проаналізувати поточний 2025/26 маркетинговий рік.

Світова площа під ячменем у 2013–2025 роках коливалася переважно в межах 46–51 млн га. На відміну від кукурудзи та сої, ячмінь не демонструє тривалого розширення площ, оскільки його ринкова ніша більш спеціалізована: корм, солод, локальна харчова переробка. Водночас світове виробництво утримується на рівні близько 140–160 млн т завдяки підвищенню врожайності, селекції, механізації та оптимізації агротехніки.

В Україні динаміка є більш різкою. До 2021 року площі ячменю були відносно стабільними, але після 2022 року вони суттєво скоротилися через втрату частини виробничих територій, мінування, логістичні обмеження, подорожчання ресурсів та зміну структури посівів на користь культур із кращою маржинальністю. Якщо у 2013 році зібрана площа оцінювалася приблизно у 3,23 млн га, то у 2024–2025 роках вона зменшилася до близько 1,4 млн га. При цьому врожайність у сприятливі роки зросла до 3,6–3,9 т/га, що частково компенсує скорочення площ.

Таблиця 1.1 – Порівняння технологій вирощування ячменю

Технологія	Основні операції	Переваги	Недоліки	Придатність для якісної переробки
Традиційна	Оранка, культивуація, суцільна сівба, базовий захист	Відпрацьована схема, доступна техніка	Вищі витрати палива, ущільнення ґрунту, нерівномірність якості	Середня
Інтенсивна	Сортове насіння, оптимальне удобрення, інтегрований захист	Вища врожайність і вирівняність зерна	Потребує точного планування та ресурсів	Висока
Ресурсозберігаюча	Мінімальний обробіток, GPS, карти врожайності, менше проходів	Менші витрати, збереження вологи, контроль операцій	Потребує кваліфікованого персоналу й точного налаштування машин	Висока за умови якісного очищення
Точне землеробство	Диференційоване внесення, датчики, моніторинг БПЛА/супутниками	Керованість якості партій, економія ресурсів	Висока ціна цифрових рішень	Дуже висока

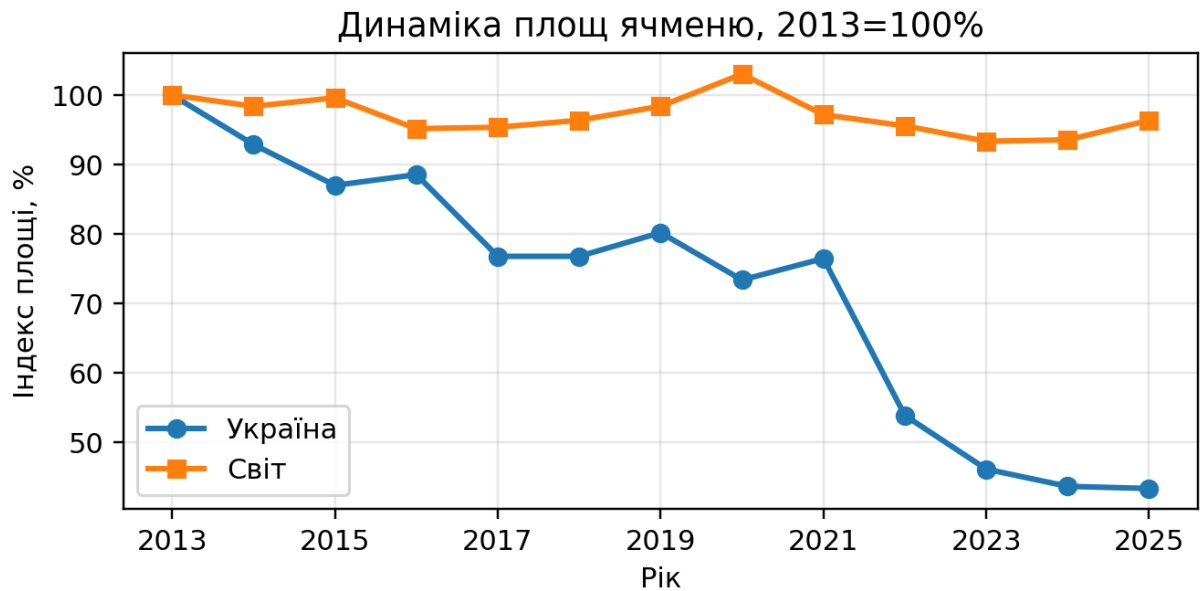


Рис. 1.1. Порівняльна динаміка площ ячменю в Україні та світі (2013=100%). Джерело: узагальнено за FAOSTAT/OWID та USDA FAS.

Таблиця 1.2 – Динаміка площ і виробництва ячменю в Україні та світі

Рік	Україна: площа, млн га	Україна: виробництво, млн т	Світ: площа, млн га	Світ: виробництво, млн т
2013	3.23	7.56	49.6	145.6
2016	2.86	9.44	47.2	147.4
2019	2.59	8.84	48.8	158.9
2021	2.47	9.44	48.2	145.9
2022	1.74	5.61	47.4	151.6
2024	1.41	5.56	46.4	143.4
2025	1.40	5.09	47.8	152.9

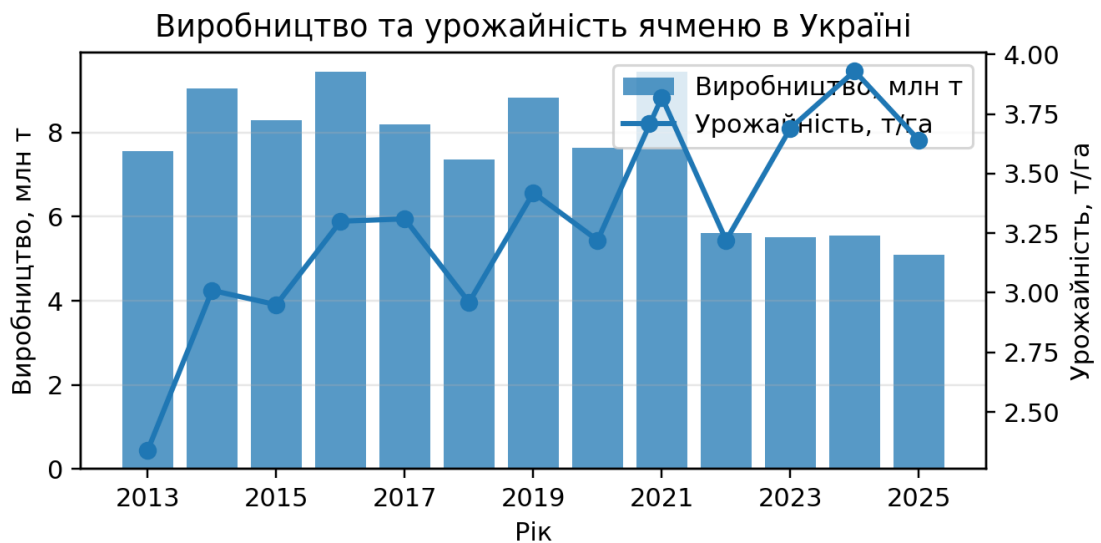


Рис. 1.2. Виробництво та урожайність ячменю в Україні. Джерело: узагальнено за USDA FAS, FAOSTAT/OWID та відкритими оглядами ринку.

1.3. Рівень переробки ячменю в Україні

Український ринок ячменю історично орієнтований на експорт і кормове використання. Значна частина товарного зерна реалізується як сировина, тоді як глибока переробка розвинута нерівномірно. Основними напрямками внутрішнього використання є комбікормове виробництво, солодове виробництво, круп'яна переробка, виготовлення пластівців та локальне використання на тваринницьких підприємствах. У 2025/26 МР оцінка FAS/Київ для України передбачає виробництво ячменю близько 5,54 млн т, експорт близько 1,8 млн т, кормове використання близько 0,9 млн т, а харчове, насіннєве та промислове споживання близько 1,2 млн т. Це означає,

що технологічна переробка не є домінуючим каналом використання, але саме вона формує вищу додану вартість.

Найбільш організованою частиною переробки є солодовий напрям, який залежить від стабільних сортових партій, лабораторного контролю, низької травмованості зерна і правильної післязбиральної доробки. Круп'яний напрям має потенціал розширення, але стримується неоднорідністю сировини, недостатнім оновленням луцильного обладнання, енерговитратністю окремих операцій і нестачею малих гнучких ліній для фермерських господарств. Тому модернізація вальцедекового верстата є логічним технічним рішенням, спрямованим на збільшення виходу якісного ядра, зменшення дроблення та підвищення стабільності процесу луцення.

Розвиток переробки ячменю в Україні доцільно розглядати не лише як питання окремого верстата, а як елемент комплексної лінії: приймання, попереднє очищення, сушіння, фракційне сортування, луцення, аспіраційне відокремлення оболонок, контроль готового продукту та пакування. Якщо хоча б один елемент лінії не відповідає продуктивності інших машин, виникають простої, перевитрати енергії або зниження якості продукту.

1.4. Рівень механізації післязбиральної обробки ячменю

Післязбиральна обробка ячменю включає комплекс механізованих операцій, які починаються одразу після надходження зерна з поля. До них належать приймання, зважування, первинне очищення від крупних і легких домішок, сушіння, активне вентилування, сепарація за розміром і щільністю, зберігання, підготовка до переробки та власне технологічна переробка. Для кормового зерна достатнім може бути очищення, доведення до безпечної вологості та зберігання. Для солодового і круп'яного напрямку потрібні точніші операції: калібрування, відбір повноцінних фракцій, мінімізація механічних пошкоджень, стабільне регулювання зазорів робочих органів.

Українські великі аграрні підприємства та елеватори загалом мають механізовані системи транспортування, очищення, сушіння та зберігання.

Проте рівень автоматизації і цифрового контролю якості залишається неоднорідним. У багатьох господарствах використовуються зерноочисні машини різного віку, стаціонарні або мобільні сушарки, норії, транспортери, вентилятори активного вентилявання, але облік партій, автоматичне регулювання вологості, аспірації та завантаження машин часто виконуються частково вручну. Найбільш вразливою ланкою є перехід від первинної доробки до поглибленої переробки, де потрібні стабільні режими лушення та сортування.

Механізація процесу післязбиральної обробки має розвиватися у напрямі поточкових ліній, де продуктивність кожної машини узгоджена з попередньою і наступною операціями. Для ячменю це особливо важливо через наявність плівчастих оболонок, які потребують м'якої, але достатньо інтенсивної дії робочих органів. Надмірне стискання і тертя збільшують кількість дробленого ядра, а недостатній вплив знижує ступінь лушення. Отже, перспективним є використання модернізованого вальцедекового верстата з точним регулюванням зазору, вібраційним або пружним елементом і можливістю адаптації до різних фракцій зерна.

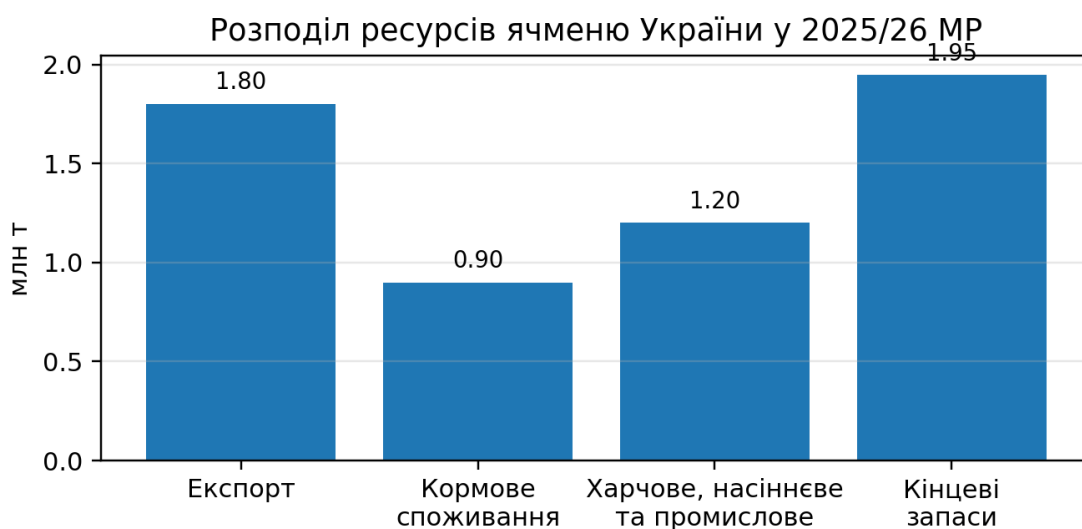


Рис. 1.3. Орієнтовний розподіл ресурсів ячменю України у 2025/26 МР за оцінкою FAS/Kyiv.

Узагальнена схема післязбиральної обробки ячменю



Рис. 1.4. Схема потокової післязбиральної обробки та переробки ячменю.



Рис. 1.5. Оціночний рівень механізації та автоматизації операцій післязбиральної обробки ячменю в Україні.

Таблиця 1.3 – Основні операції післязбиральної обробки ячменю та технічні засоби

Операція	Призначення	Типові машини та обладнання	Критичні параметри
Приймання і зважування	Формування партій, первинний облік	Автоваги, приймальні бункери, пробовідбірники	вологість, натура, домішки
Первинне очищення	Видалення соломи, пилу, крупних і легких домішок	Барабанні, решітно-повітряні сепаратори, аспіраційні канали	продуктивність, втрати зерна
Сушіння	Доведення до безпечної вологості	Шахтні, колонкові, мобільні сушарки	температура агента, кінцева вологість
Калібрування	Поділ на фракції для солоду або лушення	Ситові сепаратори, трієри, пневмостоли	розмір зерна, рівномірність фракції
Лушення	Відокремлення оболонки з мінімальним дробленням ядра	Вальцедекові, абразивні та дискові лущильники	зазор, тиск, швидкість, час дії
Контроль якості	Оцінка придатності партії до зберігання чи переробки	Лабораторні аналізатори, вологоміри, системи простежуваності	вологість, білок, схожість, биті зерна

1.5. Перспективи розвитку та напрями вдосконалення технологій переробки ячменю

Перспективи розвитку післязбиральної обробки ячменю в Україні пов'язані з переходом від простого зберігання і продажу зерна до виробництва продукції з вищою доданою вартістю. Для цього необхідно підвищити стабільність якості сировини, зменшити втрати в процесі доробки, модернізувати луцильні машини і забезпечити автоматизований контроль режимів. У технологічному аспекті першочергового значення набуває фракційна підготовка зерна перед луценням. Однорідна фракція краще проходить через робочу зону вальцедекового верстата, а зазор між валком і декою можна налаштувати точніше.

Другий напрям — енергоощадність. Сушіння, аспірація і механічне транспортування є найбільш енерговитратними операціями. Зменшення кількості повторних проходів зерна через очисні машини, застосування частотного регулювання приводів, автоматичного керування повітряними потоками та раціонального компонування лінії дозволяє знизити питомі витрати електроенергії. Для луцення перспективним є застосування режимів, які поєднують стиск, зсув і м'яку вібраційну дію, оскільки це підвищує ймовірність руйнування оболонки без надмірного руйнування ядра.

Третій напрям — цифровізація. Елеватор або переробний цех має працювати з електронною карткою партії зерна, у якій фіксуються походження, сорт, вологість, домішки, результати очищення, режим сушіння і показники після луцення. Така система спрощує управління якістю, дає змогу швидко змінювати налаштування машин, контролювати втрати та обґрунтовувати економічну ефективність модернізації.

Четвертий напрям — адаптація обладнання до умов малих і середніх господарств. Для них доцільні модульні лінії невеликої продуктивності, які включають приймальний бункер, очищення, калібрування, луцення, аспірацію та фасування. Модернізація вальцедекового верстата в такій лінії має бути спрямована на точне регулювання зазору, зменшення

металоемності, спрощення обслуговування, підвищення надійності механізму деки та зниження травмування зерна.

Логіка вдосконалення комплексу машин переробки ячменю

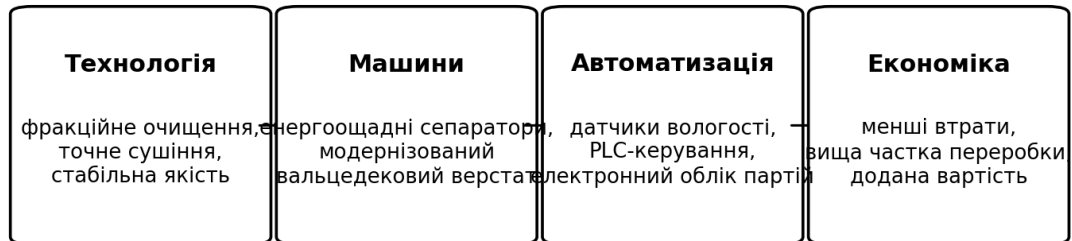


Рис. 1.6. Узагальнені напрями вдосконалення комплексу машин післязбиральної обробки і переробки ячменю.

Таблиця 1.4 – Основні напрями вдосконалення технології переробки ячменю

Напрямок	Проблема, що вирішується	Технічне рішення	Очікуваний результат
Фракційна підготовка	Нерівномірний розмір зерна у робочій зоні	Калібрування перед луценням	Зменшення дроблення і стабільний вихід ядра
Модернізація луцильника	Жорсткий режим роботи серійних машин	Регульована дека, пружні елементи, вібраційна дія	М'яке луцення та вища якість продукту
Автоматизація	Ручне налаштування, нестабільність режимів	Датчики, частотні перетворювачі, PLC-керування	Стабільність процесу і менші простой
Енергоощадність	Високі витрати сушіння й аспірації	Рекуперація тепла, оптимізація потоків, один прохід через лінію	Зниження питомих витрат енергії
Якість і простежуваність	Змішування партій різної якості	Електронний паспорт партії, лабораторний контроль	Передбачувана якість готової продукції

Висновки по розділу

Проведений аналіз показує, що ячмінь залишається важливою культурою для світового та українського зернового виробництва, однак його площі в Україні після 2022 року суттєво скоротилися. Водночас зростання врожайності та попит на кормову, солодову і круп'яну сировину зберігають актуальність удосконалення технологій його післязбиральної доробки.

Рівень механізації базових операцій — збирання, транспортування, очищення, сушіння та зберігання — є достатньо високим у великих господарствах і на елеваторах, але глибока переробка та цифровий контроль режимів потребують розвитку. Найперспективнішими напрямками є фракційне сортування зерна, автоматизоване регулювання робочих органів, зниження енерговитрат і модернізація вальцедекового верстата для м'якого лущення з мінімальним травмуванням ядра.

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ЯЧМЕНЮ

Післязбиральна переробка ячменю є завершальною ланкою виробництва, у якій сировина перетворюється на стабільний за якістю продукт, придатний для зберігання, реалізації або подальшої харчової переробки. На відміну від простого очищення зернової маси, технологія виробництва ячмінної крупи поєднує приймання, зважування, сепарування, видалення мінеральних і металоманітних домішок, фракціонування, гідротермічну підготовку, сушіння, лушення, шліфування, сортування та фасування. Саме послідовність і узгодженість цих операцій визначають вихід крупи, втрати зерна, енергоємність процесу та рівень механізації цеху.

У цьому розділі розроблено проектну технологію переробки ячменю з урахуванням заданої технологічної схеми та специфікації обладнання. Центральною машиною лінії прийнято вальцедекковий верстат, робота якого впливає на ефективність відокремлення оболонок і на частку цілого ядра після лушення. Тому технологічні режими підібрані так, щоб забезпечити рівномірне завантаження верстата, стабільну подачу підготовленого зерна та мінімальне руйнування ядра.

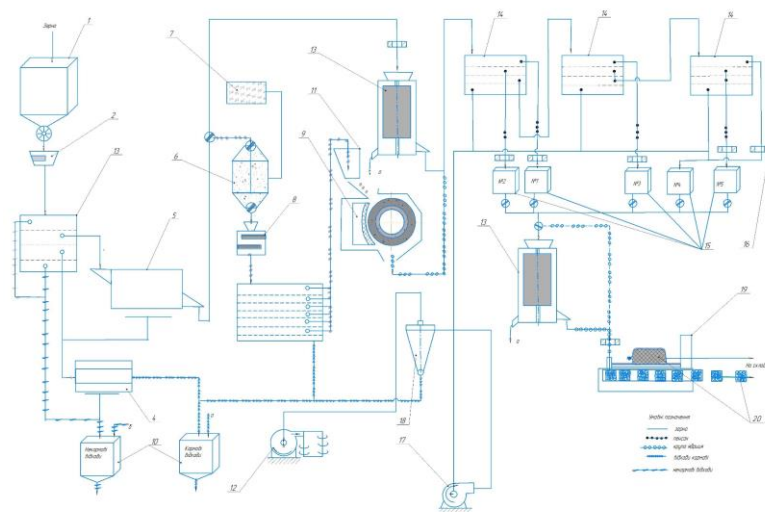


Рис. 2.1. Технологічна схема переробки ячменю, прийнята для проектування

2.1 Вихідні дані для проєктування технологічної лінії

Для розрахунків прийнято малотоннажну цехову лінію безперервної дії, орієнтовану на переробку продовольчого ячменю у крупу. Номінальна продуктивність лінії за зерном приймається $Q = 1,0$ т/год. Такий рівень продуктивності є доцільним для локального переробного підрозділу аграрного підприємства або кооперативного пункту, оскільки дає можливість переробляти власну сировину, формувати додану вартість на місці та зменшувати залежність від зовнішніх елеваторних і круп'яних підприємств.

Вихідна сировина повинна відповідати вимогам безпечної переробки: зерно має бути дозрілим, очищеним від грубих домішок, без ознак самозігрівання, плісняви, зараження шкідниками та стороннього запаху. Для стабільної роботи вальцедекового верстата важливо забезпечити однорідність партії за крупністю, оскільки зернівки різного розміру по-різному деформуються у зазорі між робочим валком і декою. Тому перед лущенням у схемі передбачено калібрування, а після кожної операції, що може утворювати пил або дрібку, – аспіраційне та сортувальне розділення.

Таблиця 2.1 – Вихідні параметри для проєктування лінії переробки ячменю

Показник	Позначення	Прийняте значення	Пояснення
Продуктивність за зерном	Q	1,0 т/год	Прийнято для технологічного розрахунку лінії
Тривалість зміни	$T_{зм}$	8 год	Однозмінний режим роботи
Добовий фонд роботи	$T_{доб}$	8 год	Без урахування додаткової зміни
Річний фонд роботи	D	200 діб	Для сезонно-річного завантаження цеху
Вологість зерна після сушіння	W	13,5–14,5 %	Безпечна вологість для зберігання та лущення
Вміст смітної домішки після очищення	$I_{см}$	не більше 1,0 %	Перед направленням у бункери каліброваного зерна
Вихід товарної крупи	η_k	0,62–0,66	Залежить від сорту, крупності й режиму лущення
Коефіцієнт готовності обладнання	K_g	0,92–0,95	Після планового ТО та регулювання

За прийнятої продуктивності 1,0 т/год змінний обсяг переробки становить 8,0 т зерна. При 200 робочих добах річна переробка дорівнює 1600 т ячменю. Якщо вихід готової крупи прийняти 0,64 від маси вихідного зерна, то проєктний випуск готової продукції становитиме близько 5,12 т за зміну і 1024 т за рік. Ці розрахункові значення використовуються для вибору місткості бункерів, продуктивності фасувальної машини, параметрів аспірації та режимів роботи основних машин.

2.2 Опис прийнятої технологічної схеми переробки

Технологічна схема передбачає прямоточне переміщення зерна з поетапним видаленням домішок і відходів. На початку процесу зерно надходить у приймальний бункер 1, після чого через дозувальний пристрій подається на автоматичну вагу 2. Зважування необхідне не лише для комерційного обліку, а й для контролю фактичного завантаження лінії та розрахунку виходу крупи за кожною партією.

Після зважування ячмінь спрямовується на сепаратор 3, у якому відокремлюються великі, дрібні та легкі домішки. Далі зерно проходить бурат 4 і каменевідбірник 5, що знижує ризик потрапляння твердих мінеральних включень у робочі органи луцильних машин. Відходи виводяться у бункери 10, а очищений матеріал подається на подальшу підготовку. Наявність магнітних уловлювачів 16 у кількох контрольних точках підвищує безпеку обладнання та запобігає потраплянню металевих частинок у готову продукцію.

Очищене зерно надходить у бункери каліброваного зерна 11, де партія вирівнюється за фракціями. Після цього передбачено гідротермічну обробку: пропарювач 6, парогенератор 7 і сушарка 8. Пропарювання частково послаблює зв'язок оболонок із ядром, підвищує пластичність оболонки та зменшує крихкість ядра. Сушіння повертає зерно до вологості, оптимальної для лущення, та стабілізує процес у вальцедековому верстаті 9.

Ключовим етапом є лущення у вальцедековому верстаті. У ньому зернівка потрапляє у робочу зону між валком і декою, де оболонка руйнується дією стиску, зсуву й тертя. Після первинного лущення продукт подається на луцильно-шліфувальні машини 13, де відбувається остаточне відокремлення залишків оболонок, вирівнювання поверхні ядра та підготовка до сортування. Сортувальні машини 14 і 21 розділяють продукт за крупністю, а бункери-накопичувачі 15 забезпечують рівномірне живлення фасувальної машини 19. Готова упакована крупа 20 направляється на склад.

Таблиця 2.2 – Склад обладнання цеху за технологічною схемою

Поз.	Обладнання	Кіл.	Технологічне призначення
1	Бункер	1	Приймання зерна та вирівнювання подачі на вагу
2	Автоматична вага	1	Облік маси партії та контроль продуктивності
3	Сепаратор	1	Відділення великих, дрібних і легких домішок
4	Бурат	1	Додаткове ситове очищення та відбір дрібної фракції
5	Каменевідбірник	1	Видалення мінеральних домішок підвищеної густини
6	Пропарювач зерна	1	Гідротермічна підготовка оболонок до лущення
7	Парогенератор	1	Постачання пари для пропарювача
8	Сушарка	1	Доведення вологості до режиму лущення
9	Вальцедековий верстат	1	Первинне лущення з відокремленням оболонок
10	Бункери відходів	2	Накопичення кормових і не кормових відходів
11	Бункери каліброваного зерна	6	Пофракційне накопичення зерна перед ГТО та лущенням
12	Батарея фільтрів	1	Очищення повітря від пилу
13	Луцильно-шліфувальна машина	2	Доробка ядра після вальцедекового верстата
14	Сортувальна машина	1	Розділення продуктів лущення за розміром
15	Бункер-накопичувач	5	Проміжне накопичення крупи й фракцій
16	Магнітний уловлювач	7	Захист машин і готової продукції від металодомішок
17	Вентилятор	1	Створення повітряного потоку в аспіраційній системі
18	Циклон	1	Осадження пилу та легких частинок
19	Фасувальна машина	1	Дозування і пакування готової крупи
20	Упакована крупа	-	Готовий продукт, що направляється на склад
21	Сортувальна машина	1	Контрольне сортування перед фасуванням

Укрупнена логіка роботи проєктної лінії переробки ячменю

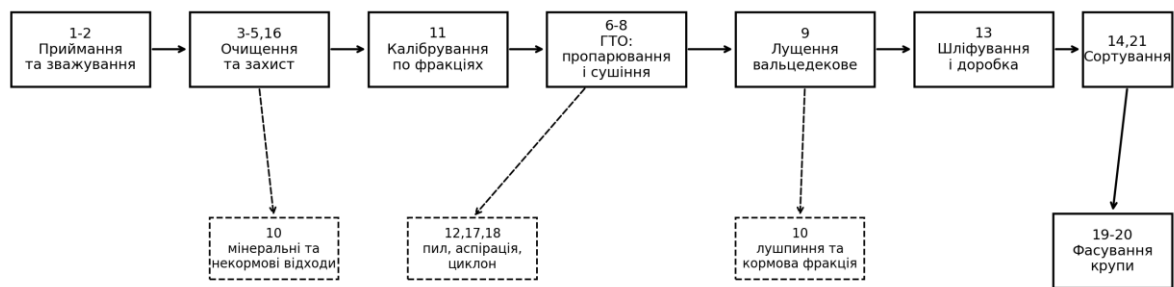


Рис.2.2. Узагальнена блок-схема руху зерна, продуктів і відходів

2.3 Розрахунок матеріального балансу переробки

Матеріальний баланс потрібний для визначення очікуваного виходу готової крупи, обсягів відходів, місткості бункерів і навантаження на аспіраційну систему. Розрахунок виконано на 1000 кг вихідного ячменю. Втрати та вихід окремих фракцій прийнято з урахуванням того, що сировина перед лущенням проходить очищення, калібрування, пропарювання і сушіння. Для стабільної роботи лінії важливо, щоб баланс контролювався за кожною партією, оскільки відхилення в бік підвищеного утворення лушпиння або пилу свідчить про надмірно жорсткий режим лущення.

Загальна формула матеріального балансу має вигляд: $M_0 = M_K + M_{\text{корм}} + M_{\text{лушп}} + M_{\text{пил}} + M_{\text{мін}} + M_{\text{ус}}$, де M_0 – маса зерна, що подається на лінію; M_K – маса готової крупи; $M_{\text{корм}}$ – маса кормових побічних продуктів; $M_{\text{лушп}}$ – маса лушпиння та некормових відходів; $M_{\text{пил}}$ – маса пилу, уловленого аспіраційною системою; $M_{\text{мін}}$ – маса мінеральних домішок; $M_{\text{ус}}$ – маса усушки під час гідротермічної обробки та сушіння.

Таблиця 2.3 – Розрахунковий матеріальний баланс на 1000 кг ячменю

Стаття балансу	Маса, кг	Частка, %	Пояснення
Вихідне зерно ячменю	1000	100,0	Партія після приймання
Готова ячмінна крупа	640	64,0	Основний товарний продукт
Кормові відходи та дрібка	190	19,0	Може використовуватися у кормових сумішах
Лушпиння і некормові відходи	105	10,5	Видаляються після лущення та очищення
Пил аспірації	35	3,5	Уловлюється фільтрами та циклоном
Мінеральні та металомагнітні домішки	5	0,5	Видаляються каменевідбірником і магнітами
Усушка при ГТО та сушінні	25	2,5	Зниження маси за рахунок видалення вологи

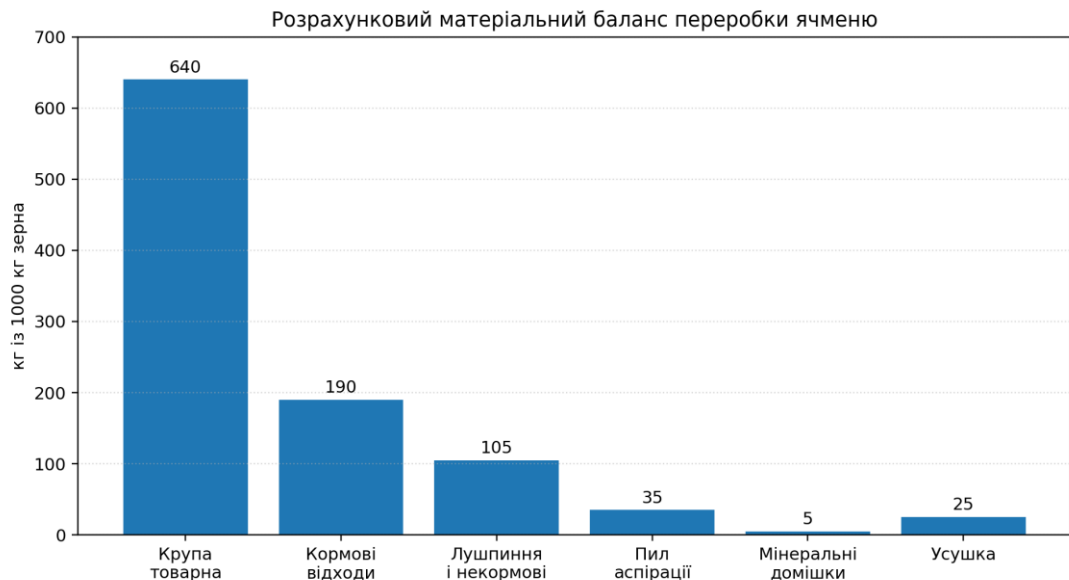


Рис. 2.3. Діаграма матеріального балансу переробки ячменю

Для змінного фонду роботи 8 год маса вихідного зерна становитиме 8,0 т, маса готової крупи – 5,12 т, кормових побічних продуктів – 1,52 т, лушпиння та некормових відходів – 0,84 т, пилу аспірації – 0,28 т. Отже, бункери відходів повинні забезпечувати щонайменше змінне накопичення

без переповнення, а аспіраційна система повинна мати резерв за пиловим навантаженням. Доцільно організувати окреме зберігання кормової і некормової фракції, оскільки їх подальше використання різне.

Структура виходу продуктів та відходів

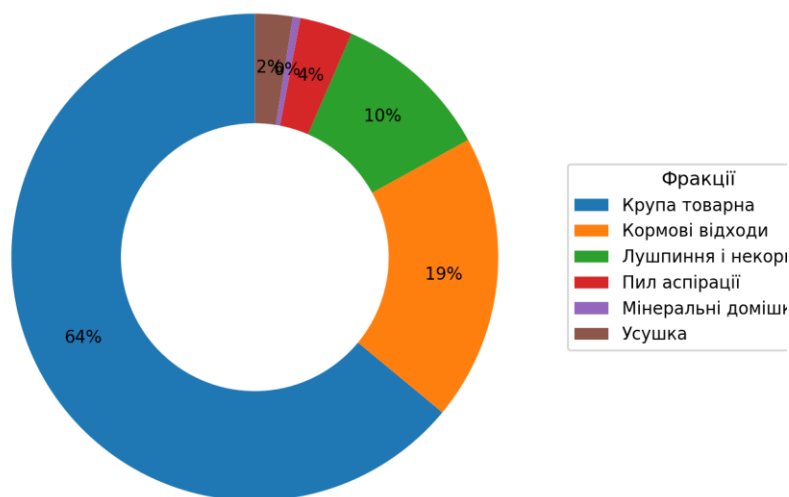


Рис. 2.4. Структура виходу готової продукції та відходів.

2.4 Обґрунтування режимів основних технологічних операцій.

Режими роботи обладнання вибирають так, щоб кожна наступна машина отримувала продукт з параметрами, необхідними для якісного виконання своєї операції. Якщо очищення недостатнє, тверді домішки зношують робочі поверхні вальцедекового верстата. Якщо зерно не відкаліброване, у робочому зазорі одночасно перебувають зернівки різної товщини, що призводить до недолющення дрібної фракції і дроблення крупної. Якщо після пропарювання сушіння виконане нерівномірно, лушення стає нестабільним, а кількість пилу та дрібки зростає.

Перший етап – приймання та очищення. Зерно подається в бункер без різких ударних навантажень, далі проходить автоматичну вагу і сепаратор. Регулювання повітряного потоку в сепараторі виконується за вмістом легких домішок у зерновій масі. Бурат використовується як додаткова ситова машина, що стабілізує крупність потоку перед каменевідбірником.

Каменевідбірник повинен працювати з таким нахилом робочої поверхні та витратою повітря, щоб камені й важкі домішки рухалися в окремий канал, а зерно не потрапляло у відходи.

Другий етап – гідротермічна обробка. Пропарювання підвищує технологічну податливість оболонок і зменшує кількість нерозлушеного зерна. У проєктній лінії пропарювач працює разом з парогенератором, а після цього зерно надходить у сушарку. Метою сушіння є не максимальне видалення вологи, а доведення матеріалу до режиму, за якого оболонка достатньо крихка для руйнування, а ядро не надмірно ламке.

Третій етап – лушення й шліфування. Вальцедековий верстат виконує первинне відокремлення оболонок. Для нього критичними є рівномірна подача, точне регулювання зазору, стан робочої поверхні валка і деки, а також відсутність вібрацій, які не передбачені конструкцією. Після нього продукт направляється у дві луцильно-шліфувальні машини, що працюють паралельно або послідовно залежно від фракційного складу продукту. Така схема дає можливість знизити навантаження на кожну машину та підвищити якість поверхні круп.

Таблиця 2.4 – Технологічні операції та контрольні параметри

Операція	Зміст регулювання	Обладнання	Очікуваний результат
Приймання і зважування	Рівномірна подача, відсутність завалів	Автоматична вага 2	Відхилення маси партії не більше 1,0 %
Сепарування	Відбір великих, дрібних і легких домішок	Сепаратор 3, бурат 4	Залишкова смітна домішка до 1,0 %
Видалення каменів і металу	Захист луцильних органів	Каменевідбірник 5, магніти 16	Мінеральні домішки практично відсутні
Калібрування	Розподіл за крупністю	Бункери 11	Пофракційне живлення верстата

Пропарювання	Послаблення оболонки	Пропарювач 6, парогенератор 7	Рівномірне прогрівання зерна
Сушіння	Вологість 13,5–14,5 %	Сушарка 8	Без пересушування та перегріву
Лущення	Руйнування оболонки без дроблення ядра	Вальцедековий верстат 9	Мінімум недолущеного зерна
Шліфування	Зняття залишків оболонок	Машини 13	Стабільна поверхня крупи
Сортування і фасування	Розділення фракцій і пакування	Машини 14, 21, 19	Однорідна фасована продукція

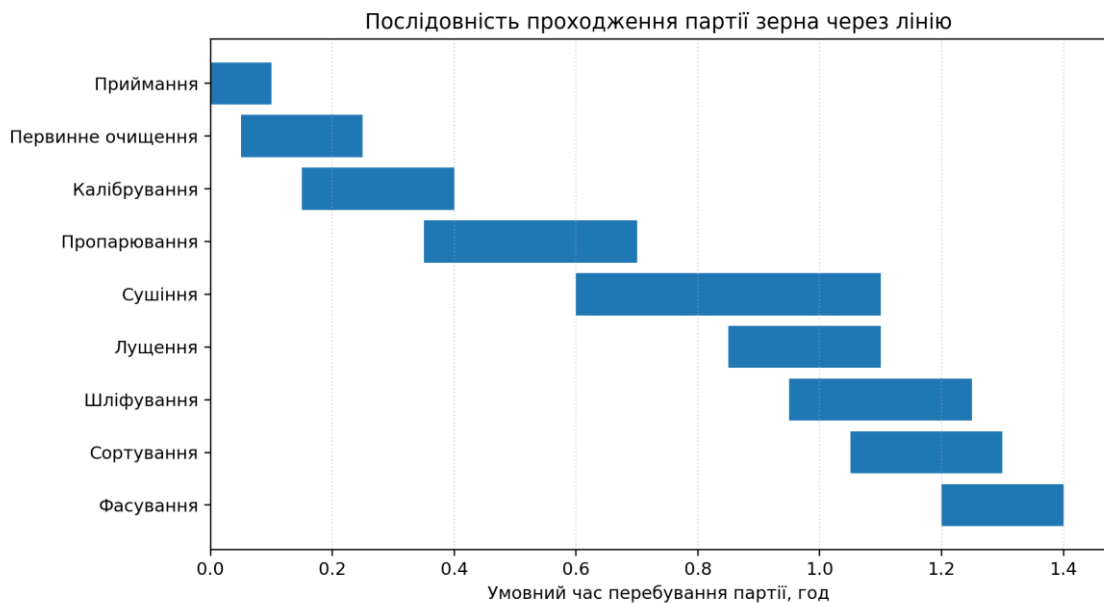


Рис. 2.5. Орієнтовна послідовність проходження партії зерна через технологічну лінію.

2.5 Розрахунок продуктивності та завантаження обладнання

Продуктивність основних машин повинна бути узгоджена між собою. Якщо машина має продуктивність нижчу за номінальну продуктивність лінії, вона стає вузьким місцем, збільшує час перебування продукту в бункерах і спричиняє нерівномірне живлення наступних агрегатів. Якщо продуктивність

значно завищена, обладнання працює з малим коефіцієнтом завантаження, що погіршує енергоефективність і точність регулювання.

Коефіцієнт завантаження обладнання визначається за формулою: $K_z = Q_{\text{роз}} / Q_{\text{пас}}$, де $Q_{\text{роз}}$ – розрахункова подача продукту на машину, т/год; $Q_{\text{пас}}$ – паспортна або прийнята пропускна здатність, т/год. Для більшості машин раціональним є діапазон $K_z = 0,75\text{--}0,90$. Для фасувальної машини розрахункова подача визначається за масою готової крупи, тобто 0,64 т/год, а не за масою вихідного зерна.

Таблиця 2.5 – Розрахунок коефіцієнтів завантаження обладнання

Машина	$Q_{\text{роз}}$, т/год	$Q_{\text{пас}}$, т/год	K_z	Коментар
Сепаратор	1,00	1,20	0,83	Резерв для партій із підвищеною засміченістю
Бурат	1,00	1,10	0,91	Працює близько до оптимального режиму
Каменевідбірник	0,98	1,18	0,83	Після первинного очищення потік дещо менший
Пропарювач	0,95	1,05	0,90	Потребує стабільної подачі
Сушарка	0,95	1,08	0,88	Має невеликий технологічний резерв
Вальцедековий верстат	0,90	0,99	0,91	Ключова машина, бажаний точний контроль подачі
Луцильно-шліфувальні машини, 2 шт.	0,85	1,02	0,83	Робота з резервом завдяки двом машинам
Сортувальні машини	0,70	0,88	0,80	Навантага зменшується після видалення відходів
Фасувальна машина	0,64	0,80	0,80	Розрахунок за готовою крупою

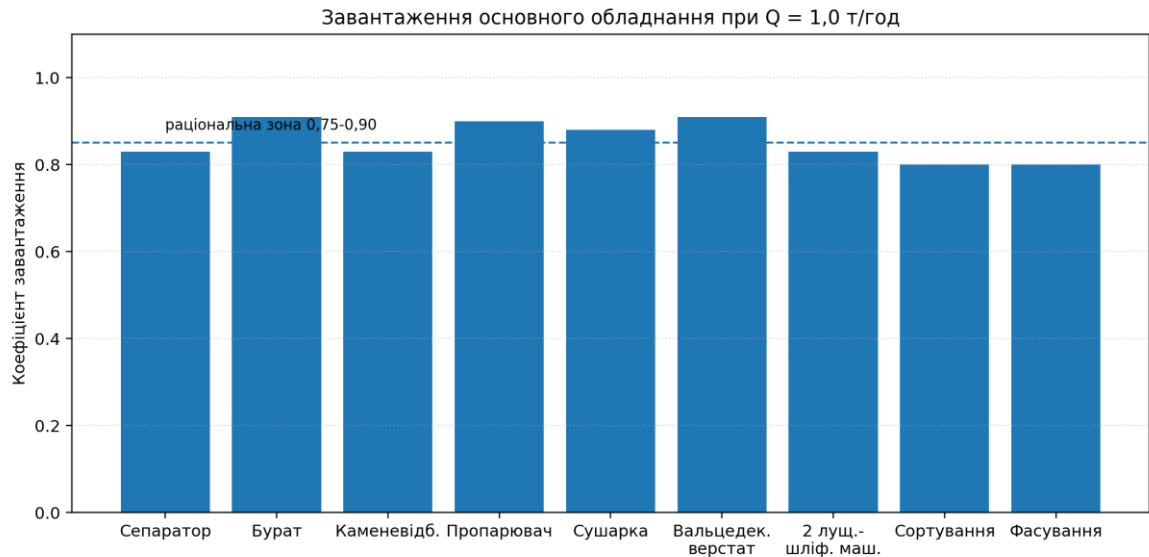


Рис. 2.6. Діаграма завантаження основних машин проєктної лінії.

Із розрахунку видно, що найбільше завантажені бурат, пропарювач і вальцедекковий верстат. Саме вони потребують першочергового контролю під час пусконаладжувальних робіт. Для вальцедеккового верстата перевантаження небажане, оскільки збільшення товщини шару зерна в робочій зоні погіршує вибірковість лущення і спричиняє дроблення. Тому перед ним доцільно встановити регульований живильник і датчик рівня у бункері, який автоматично стабілізує подачу.

2.6 Енергетичне забезпечення, аспірація та пиловидалення

Післязбиральна переробка ячменю супроводжується утворенням пилу, лущиння і дрібних частинок. Найбільше пилове навантаження виникає у зонах сепарування, лущення, шліфування, пересипання продукту між бункерами та фасування. Тому аспірація розглядається не як допоміжна система, а як обов'язковий елемент технологічної лінії, що впливає на безпечність праці, санітарний стан приміщення, вибухопожежну безпеку і якість готової крупи.

У схемі передбачено батарею фільтрів 12, вентилятор 17 і циклон 18. Вентилятор створює розрідження в аспіраційних укриттях, циклон осаджує частину пилу й легких частинок, а фільтри виконують остаточне очищення повітря. Для малотоннажної лінії доцільно застосовувати локальні

аспіраційні відсмоктувачі біля сепаратора, лушильних машин, пересипних точок і фасувального вузла. Повітроводи слід виконувати з мінімальною кількістю різких поворотів, а бункери пилу необхідно регулярно очищати.

Енергетичне навантаження лінії формується електроприводами транспортерів, ситових машин, сушарки, лушильно-шліфувальних машин, вентилятора, фільтрів і фасувального обладнання. У проектному розрахунку встановлена електрична потужність оцінена на рівні 79 кВт, з яких найбільшу частку займають лушення та шліфування. Окремо враховується теплова енергія для пропарювання, яка залежить від вологості зерна, температури пари й режиму кондиціювання.

Таблиця 2.6 – Орієнтовний розподіл електричної потужності лінії

Група обладнання	Потужність, кВт	Частка, %	Склад групи
Очищення і транспортування	11	13,9	Сепаратор, бурат, норії, живильники
Гідротермічна обробка та сушіння	22	27,8	Пропарювач, сушарка, допоміжні приводи
Лушення і шліфування	29	36,7	Вальцедековий верстат і дві лушильно-шліфувальні машини
Аспірація та фільтрація	8	10,1	Вентилятор, циклон, батарея фільтрів
Сортування і фасування	9	11,5	Сортувальні машини та фасувальний автомат
Разом	79	100,0	Орієнтовна встановлена електрична потужність

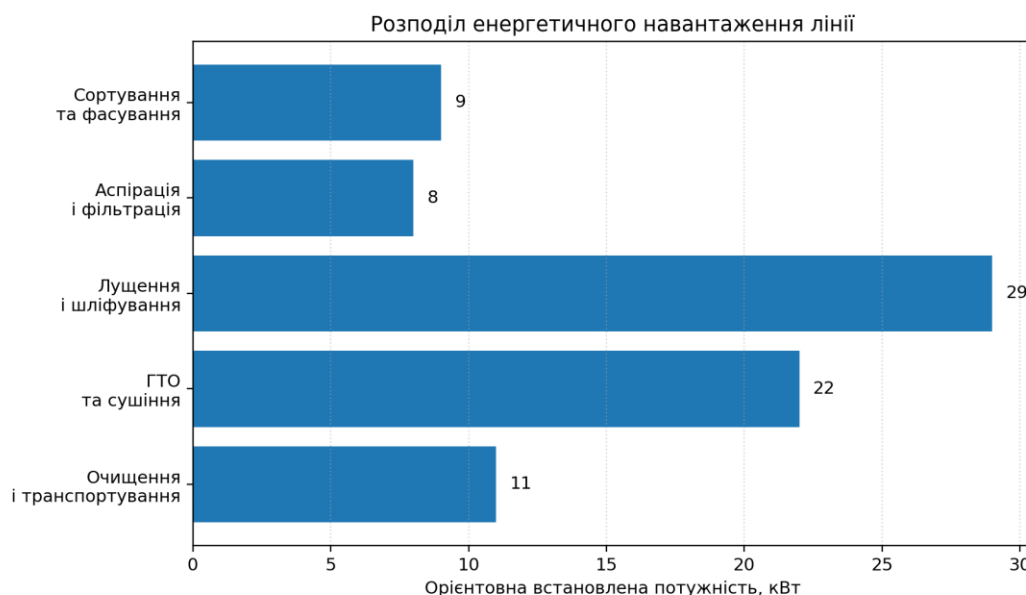


Рис. 2.7. Розподіл енергетичного навантаження між групами обладнання.

2.7 Контроль якості продукту та керування технологічним процесом

Контроль якості у проєктній технології доцільно організовувати не лише на виході готової крупи, а й у проміжних точках. На вході контролюють вологість, засміченість, запах, зараженість і крупність зерна. Після сепарування визначають залишкову кількість домішок. Після каменевідбірника та магнітних уловлювачів перевіряють відсутність мінеральних і металоманітних домішок. Після сушарки вимірюють вологість і температуру зерна, оскільки перегрів погіршує якість ядра.

Після вальцедекового верстата оцінюють частку нерозлущених зернівок, кількість битого ядра і вміст лущиння у продукті. Якщо частка нерозлущених зернівок зростає, необхідно зменшити зазор або підвищити інтенсивність підготовки зерна. Якщо зростає кількість дробленого ядра, зазор збільшують, знижують подачу або коригують вологість після сушіння. Після шліфування контролюють однорідність поверхні ядра, а перед фасуванням – масу дози, чистоту фракції, відсутність сторонніх включень і герметичність упаковки.

Таблиця 2.7 – Контрольні точки якості в технології переробки ячменю

Контрольна точка	Показник	Засіб контролю	Дія при відхиленні
Вхідна сировина	Вологість, засміченість, крупність	Вологомір, ситовий аналіз, огляд	Прийняти, досушити або повернути на очищення
Після сепаратора	Залишкова смітна домішка	Контрольна проба	Регулювання сит і повітряного каналу
Після каменевідбірника	Камені, металоманітні частинки	Візуальний огляд, магнітний контроль	Зупинка та очищення, якщо домішки повторюються
Після сушарки	Вологість і температура	Вологомір, термодатчик	Коригування температури та часу сушіння
Після вальцедекового верстата	Недолушення, битість ядра	Ситовий аналіз, огляд проби	Регулювання зазору, подачі, стану деки
Після шліфування	Залишки оболонок, пил	Проба продукту, аспіраційний контроль	Зміна інтенсивності шліфування
Перед фасуванням	Фракційність, маса дози	Ваговий контроль, сито	Коригування сортування та дозатора

Для підвищення стабільності процесу доцільно впровадити елементи автоматизованої системи керування. Мінімальний рівень автоматизації має включати датчики рівня в бункерах, датчик струму електродвигуна вальцедекового верстата, контроль температури сушіння, частотне регулювання живильників і вентилятора, а також електронний журнал маси партій за даними автоматичної ваги. Така система дає змогу швидко визначати відхилення, зменшувати простої та підвищувати відтворюваність технологічних режимів.

2.8 Напрями удосконалення технології переробки ячменю

Аналіз проектної схеми показує, що основні резерви підвищення ефективності пов'язані з трьома групами рішень: удосконаленням центральної лушильної машини, стабілізацією підготовки зерна перед лущенням і цифровим контролем потоків. Вальцедековий верстат є найбільш чутливим до коливань крупності, вологості та подачі. Тому його модернізація повинна бути спрямована не лише на підвищення продуктивності, а й на зменшення питомого тиску на зернівку, зниження дроблення ядра та розширення діапазону регулювання зазору.

Перспективним напрямом є застосування приводу з частотним керуванням, датчика навантаження, швидкозмінної деки та точного механізму регулювання робочого зазору. Для підтримання сталого режиму слід узгодити роботу живильника і вальцедекового верстата: при зростанні струму двигуна або рівня недолучення система повинна зменшувати подачу або сигналізувати оператору про потребу коригування зазору. Таке рішення особливо важливе при переробці партій з різною крупністю та склоподібністю зерна.

Другий напрям – удосконалення гідротермічної підготовки. Рівномірне пропарювання та сушіння знижують напруження у ядрі, підвищують відокремлюваність оболонок і зменшують утворення пилу. Доцільно встановити датчики температури і вологості зерна після сушарки та вести оперативний журнал параметрів. Для зменшення енерговитрат сушіння може працювати з рекуперацією теплого повітря, а парогенератор – з автоматичним підтриманням тиску пари.

Третій напрям – розвиток аспірації, сортування та фасування. Замкнута аспірація з фільтрами знижує пиловиділення в цеху, підвищує безпечність і зменшує втрати продукту. У зоні сортування варто передбачити можливість встановлення оптичного або фотосепараційного контролю для видалення потемнілих, пошкоджених і сторонніх частинок. Фасування доцільно

поєднати з контрольним зважуванням і маркуванням партій, щоб забезпечити простежуваність продукції.

Таблиця 2.8 – Основні напрями удосконалення технології переробки ячменю

Напрямок	Технічна реалізація	Очікуваний ефект
Модернізація вальцедекового верстата	Точний зазор, стабілізація подачі, частотний привід	Зростання виходу цілого ядра, менше дроблення
Пофракційне лушення	Використання 6 бункерів каліброваного зерна	Однорідніше навантаження на робочу зону
Контроль ГТО	Датчики температури й вологості після сушарки	Стабільна підготовка оболонки до руйнування
Аспірація замкнутого типу	Фільтри, циклон, контроль пилу	Безпечніші умови праці та менші втрати
Автоматизований облік	Зв'язок ваги, бункерів і журналу партій	Точний розрахунок виходу та відходів
Якісне сортування	Контрольне ситове або оптичне розділення	Вища товарність крупи

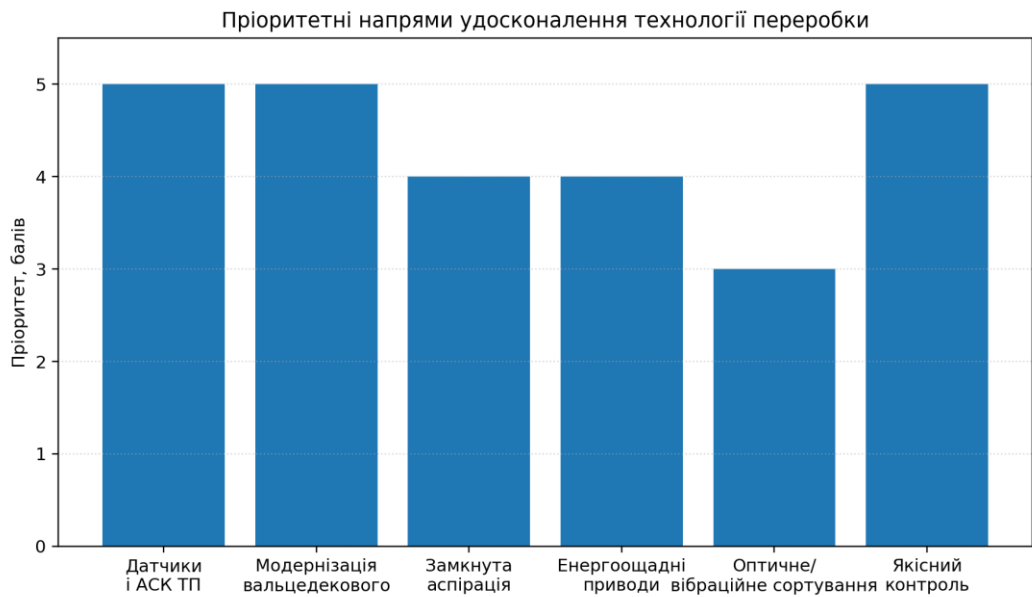


Рис. 2.8. Пріоритетність напрямів удосконалення технології переробки.

2.9 Організація роботи лінії та технологічний регламент

Рациональна організація роботи цеху передбачає пуск обладнання у послідовності, зворотній до руху продукту: спочатку вмикають аспірацію, сортування, шліфування, лушення, сушарку, пропарювач, транспортні механізми і лише після цього подачу зерна з приймального бункера. Такий порядок запобігає накопиченню продукту в машинах і забиванню пересипних вузлів. Зупинка виконується у протилежній логіці: спочатку припиняють подачу зерна, а потім після очищення машин від залишків продукту вимикають основні агрегати й аспірацію.

Перед початком зміни оператор перевіряє чистоту бункерів, стан сит, кріплення магнітних уловлювачів, роботу вентилятора та відсутність сторонніх предметів у живильниках. Після 30–40 хв роботи відбирають першу контрольну пробу після вальцедекового верстата і коригують зазор. У процесі зміни оператор контролює завантаження машин за амперметрами, наявність продукту в бункерах, вологість після сушіння та масу фасованої продукції. Після завершення зміни проводиться очищення фільтрів, видалення відходів, санітарне прибирання та короткий запис про фактичний вихід крупи.

Таблиця 2.9 – Орієнтовний регламент роботи зміни

Етап зміни	Тривалість	Зміст робіт
Підготовка до пуску	20–30 хв	Огляд обладнання, очищення, перевірка аспірації та магнітів
Пуск і вихід на режим	15–20 хв	Поступове завантаження лінії, контроль проби
Стабільна переробка	6,5–7,0 год	Основний випуск продукції, контроль якості і завантаження
Проміжне очищення	10–15 хв	Очищення пересипів, перевірка бункерів відходів
Зупинка і санітарне прибирання	30–40 хв	Виведення залишків продукту, очищення машин і фільтрів

Розрахована технологія забезпечує повний цикл переробки ячменю в межах одного цеху. Її перевагою є поєднання традиційних механічних процесів з можливістю подальшої автоматизації. Лінія має достатню кількість проміжних бункерів для згладжування нерівномірності подачі, окрему систему аспірації, двоступеневу доробку після вальцедекового верстата та контрольне сортування перед фасуванням. Найбільш відповідальними вузлами є пропарювач, сушарка і вальцедековий верстат, оскільки саме вони формують умови якісного відокремлення оболонок.

Висновки по розділу

У другому розділі спроектовано технологію переробки ячменю на крупу за заданою технологічною схемою. Встановлено, що лінія повинна працювати як узгоджений комплекс машин, у якому приймання, очищення, калібрування, гідротермічна обробка, сушіння, лушення, шліфування, сортування і фасування пов'язані єдиним матеріальним потоком. За основу прийнято продуктивність 1,0 т/год за вихідним зерном, що відповідає змінній переробці 8,0 т ячменю та орієнтовному випуску 5,12 т готової крупи.

Складено матеріальний баланс, відповідно до якого з 1000 кг ячменю отримують близько 640 кг товарної крупи, 190 кг кормових побічних продуктів, 105 кг лушпиння і некормових відходів, 35 кг аспіраційного пилу, 5 кг мінеральних домішок і 25 кг усушки. Такий баланс дає змогу визначити місткість бункерів, продуктивність фасувального обладнання та навантаження на аспіраційну систему. Розрахунок завантаження показав, що основну увагу слід приділяти бурату, пропарювачу і вальцедековому верстату, які працюють із найбільшими коефіцієнтами завантаження.

Обґрунтовано технологічні режими основних операцій та визначено контрольні точки якості. Найважливішими параметрами є вологість після сушіння, рівномірність калібрування, стабільність подачі на вальцедековий верстат, величина робочого зазору, частка нерозлущеного зерна і кількість битого ядра. Напрямами вдосконалення технології визначено модернізацію

вальцедекового верстата, автоматизоване керування подачею, контроль гідротермічної обробки, розвиток аспірації, енергоощадні приводи та підвищення точності сортування і фасування.

РОЗДІЛ 3

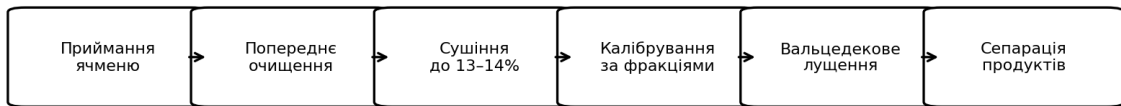
КОНСТРУКТИВНЕ УДОСКОНАЛЕННЯ ВАЛЬЦЕДЕКОВОГО ВЕРСТАТА ДЛЯ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЯЧМЕНЮ

3.1. Передумови модернізації та вибір конструктивного рішення

Післязбиральна обробка ячменю охоплює сукупність операцій, спрямованих на доведення зернової маси до технологічного стану, придатного для подальшого зберігання, переробки або виробництва круп'яної продукції. У загальному комплексі машин особливе значення має лущення, оскільки саме під час цієї операції від зернівки відокремлюються квіткові плівки та частина поверхневих оболонок. Якість виконання лущення безпосередньо впливає на вихід цілого ядра, кількість мучки, енерговитрати та стабільність роботи всієї технологічної лінії.

Ячмінь належить до культур із порівняно міцним зв'язком оболонок з ядром. При надмірно жорсткій дії робочих органів зернівка не лише звільняється від оболонки, а й зазнає розтріскування, що погіршує товарні показники продукту. За недостатньої дії частина зерна залишається недолущеною і потребує повторного проходу через машину. Тому конструкція лущильного верстата повинна забезпечувати не максимальне стискання, а кероване поєднання стиску, зсуву та тертя в тонкому шарі зерна.

У практиці післязбиральної та круп'яної переробки застосовуються машини різних принципів дії. Їх можна умовно поділити на три групи: машини, де зерно обробляється у вузькому зазорі між робочими поверхнями; машини стирання, у яких зернова маса рухається товстим шаром і взаємодіє з абразивними або шорсткими поверхнями; машини ударної дії. Для ячменю найдоцільнішим є перший варіант, оскільки він дає змогу дозовано впливати на окрему зернівку та налаштовувати зазор відповідно до фракції.



Місце модернізованого вальцедекового верстата у післязбиральній лінії

Рис. 3.1. Місце вальцедекового верстата у технологічному комплексі післязбиральної обробки ячменю

Порівняння основних способів лушення, які можуть використовуватися у складі зернопереробних ліній, наведено в таблиці 3.1. Зіставлення показує, що для модернізованої лінії обробки ячменю доцільно застосувати вальцедекову схему з керованим зазором і додатковим вібраційним впливом на деку.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика способів лушення зерна

Спосіб лушення	Основна дія на зернівку	Переваги	Обмеження для ячменю
Вальцедековий	Стиск, зсув і тертя у зазорі між валком та декою	Точне налаштування режиму, можливість пофракційної обробки, високий вихід ядра	Потрібне попереднє калібрування зерна та точне регулювання зазору
Лущильно-шліфувальний	Тертя зерна об робочі органи та між собою у шарі зернової маси	Менша чутливість до розміру зерна, проста схема роботи	Вища ймовірність утворення мучки та нерівномірне зняття оболонок
Ударний	Короткочасний удар робочого органа або зернівки об поверхню	Велика питома продуктивність, простота ротора	Для ячменю створює підвищений ризик дроблення ядра

Базовий вальцедековий верстат складається з робочого валка, живильного пристрою, нерухомої деки та вузла регулювання її положення. Зерно надходить із бункера, дозовано подається живильним валком і потрапляє в робочу зону, де переміщується між валком і декою. У цій зоні

оболонка руйнується, а ядро має залишатися цілим. Основним регулювальним параметром є зазор h , який задають меншим за характерний поперечний розмір зернівки на величину товщини оболонки.

Недоліком традиційної схеми є те, що нерухома дека формує майже постійний силовий режим. У разі неоднорідності зернової маси окремі зернівки піддаються надмірному тиску, тоді як дрібніші можуть проходити з неповним руйнуванням оболонок. Крім того, механізми встановлення деки, виконані у вигляді масивних напрямних або гвинтових упорів, ускладнюють точне оперативне налаштування та підвищують металоємність машини.

Запропоноване конструктивне удосконалення полягає у використанні віброреки, яка переміщується відносно робочого валка за допомогою прямого важільного механізму П. Л. Чебишева та ексцентрикового збурювача. Така система дає змогу накладати на основний робочий зазор малі нормовані коливання. У результаті оболонка руйнується не одним надмірним стисканням, а серією коротких циклів навантаження, що знижує травмування ядра.

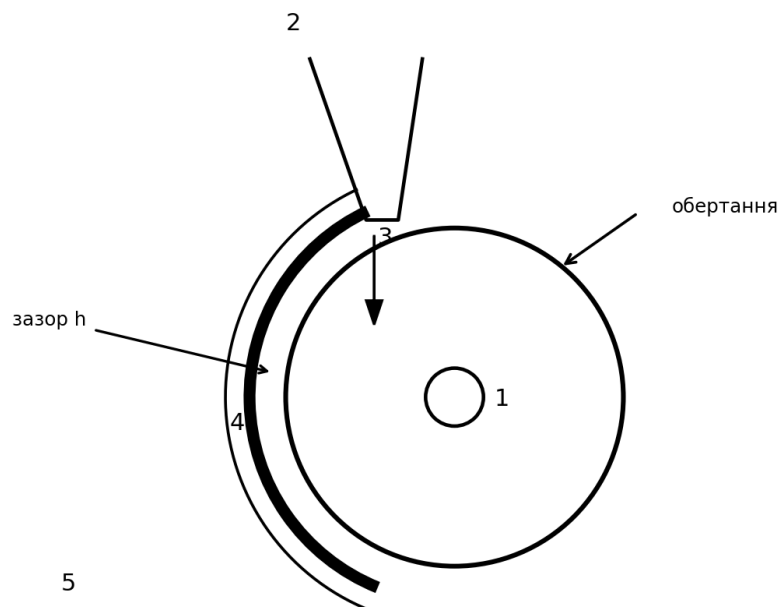


Рис. 3.2. Принципова схема базового вальцедекowego верстата: 1 – робочий валок; 2 – бункер; 3 – живильний валок; 4 – дека; 5 – механізм регулювання зазору

3.2. Будова модернізованого верстата та принцип його роботи

Модернізований вальцедеківий верстат призначений для встановлення у лінії післязбиральної обробки ячменю після очищення, сушіння та калібрування зерна. Конструкція зберігає загальну функціональну схему серійної машини, проте відрізняється способом підвіски деки й організацією робочого зазору. Основними складовими є корпус, робочий валок, рухома дека, ексцентриковий вібратор, пружний шарнір, напрямний важільний механізм, живильний валок і привід.

Корпус забезпечує взаємне розміщення робочих органів і сприймає навантаження від процесу лущення. Робочий валок виконується з поверхнею, яка створює необхідне тертя для захоплення зернівок. Дека має увігнуту робочу поверхню, радіус якої дещо більший від радіуса валка. Таке співвідношення дозволяє сформувати клиноподібну робочу зону, у якій зернівка поступово стискається і зміщується відносно оболонки.

Напрямний механізм Чебишева використовується як альтернатива важким лінійним напрямним. Його ланки підібрані таким чином, щоб робоча ділянка деки здійснювала рух, близький до поступального, у напрямку нормалі до поверхні валка. Завдяки цьому під час коливань не порушується форма робочої зони, а величина зазору змінюється у заданих межах. Пружний шарнір виконує роль елемента підвіски та одночасно поглинає частину ударних навантажень.

Ексцентриковий механізм створює періодичне переміщення деки. Для ячменю рекомендовано застосовувати малу амплітуду коливань у межах 0,10–0,20 мм. Частота підбирається з урахуванням продуктивності верстата, вологості зерна, жорсткості підвіски та необхідного ступеня лущення. Робота в такому діапазоні дає можливість зменшити статичний тиск на зернівку орієнтовно на 25–30 %, не знижуючи інтенсивності відокремлення оболонки.

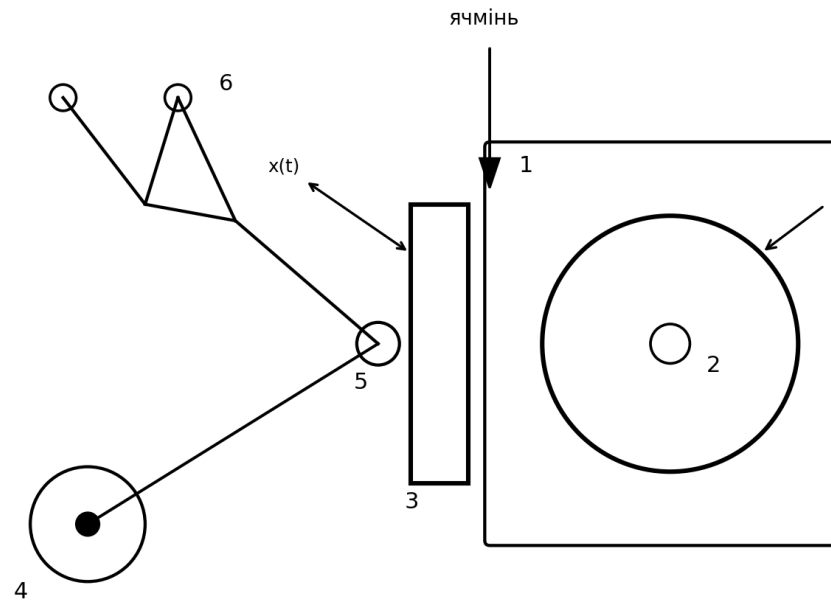


Рис. 3.3. Схема модернізованого вальцедекового верстата з вібродекою: 1 – корпус; 2 – валок; 3 – дека; 4 – ексцентриковий механізм; 5 – пружний шарнір; 6 – напрямний механізм.

Технологічний процес відбувається в такій послідовності. Підготовлене зерно ячменю з бункера надходить до живильного валка, який вирівнює подачу по довжині робочого валка. Далі зернівки входять у зазор між валком і декою. Валок надає їм поступального руху вздовж робочої поверхні, а дека здійснює контрольовані коливання. Внаслідок сумісної дії тертя, зсуву та змінного стиску оболонки тріскаються і відокремлюються від ядра.

Для забезпечення стабільної роботи машини зерно перед лущенням доцільно розподіляти на фракції. Налаштування зазору для кожної фракції виконується окремо: для більшої фракції встановлюють більший середній зазор, для дрібнішої – менший. Після проходження через робочу зону продуктова суміш подається на аспірацію та сепарацію, де відокремлюються оболонки, мучка, недолущене зерно і готове ядро.

Перевагою запропонованого рішення є те, що технологічне регулювання переноситься з грубого механічного стискання на керовану зміну режиму взаємодії зернівки з робочими органами. За рахунок цього можна швидше адаптувати верстат до неоднорідності сировини, зменшити

питоме споживання енергії, знизити зношування деки та валка, а також підвищити стабільність якісних показників обробки.

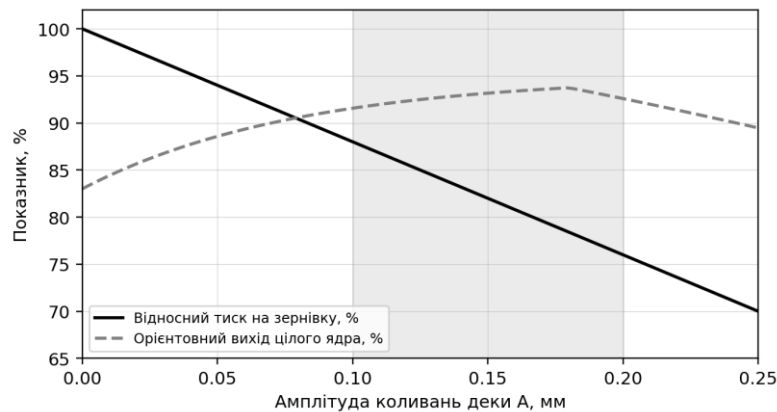


Рис. 3.4. Орієнтовний вплив амплітуди вібродеки на тиск у робочій зоні та вихід цілого ядра

3.3. Технологічний, кінематичний та енергетичний розрахунок

Розрахунок робочих параметрів виконуємо для верстата, який працює у складі лінії післязбиральної обробки ячменю продуктивністю 2,0 т/год. За розрахункову приймаємо зернову масу з вологістю 13–14 %, попередньо очищену від легких, мінеральних і крупних домішок та розподілену на фракції. Це дає змогу застосовувати стабільні налаштування робочого зазору та зменшити кількість повторних проходів.

Продуктивність вальцедеккового верстата визначається площею живого перерізу робочого зазору, швидкістю переміщення зерна, об'ємною масою ячменю та коефіцієнтом заповнення робочої зони:

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

де Q – продуктивність верстата, т/год; l – робоча довжина валка, м; h – середній зазор між валком і декою, м; v – швидкість руху зерна в робочій зоні, м/с; γ – об'ємна маса ячменю, кг/м³; k – коефіцієнт заповнення робочої зони.

Звідси необхідна робоча довжина валка становить:

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

Підставляємо прийняті вихідні дані: $Q = 2,0$ т/год; $h = 0,0015$ м; $v = 10$ м/с; $\gamma = 650$ кг/м³; $k = 0,38$. Тоді:

$$l = 2,0 / (3,6 \cdot 0,0015 \cdot 10 \cdot 650 \cdot 0,38) = 0,15 \text{ м}$$

Отримане значення робочої довжини валка приймаємо $L = 150$ мм. Діаметр валка визначаємо конструктивно з урахуванням достатньої жорсткості, площі контакту із зернівкою та зручності компонування приводу. Приймаємо $D = 400$ мм, що відповідає радіусу $R_1 = 200$ мм.

Частота обертання робочого валка залежить від прийнятої колової швидкості:

$$n_g = 60 \cdot V / (\pi \cdot D) \quad (3.3)$$

Для $V = 10$ м/с і $D = 0,40$ м маємо:

$$n_g = 60 \cdot 10 / (3,14 \cdot 0,40) = 478 \text{ об/хв}$$

Живильний валок повинен подавати зерно рівномірно, без накопичення перед робочою зоною. Його частоту обертання визначаємо через передаточне число зубчастої передачі:

$$n_{ж} = n_g / u \quad (3.4)$$

За $u = 2,5$ отримаємо $n_{ж} = 478 / 2,5 = 191$ об/хв. Це значення забезпечує дозовану подачу і не створює надмірного ущільнення зерна перед зазором.

Для приводу верстата приймаємо асинхронний електродвигун із номінальною частотою обертання 960 об/хв. Передаточне число клинопасової передачі дорівнює:

$$i_n = n_{ог} / n_g = 960 / 478 = 2,01 \quad (3.5)$$

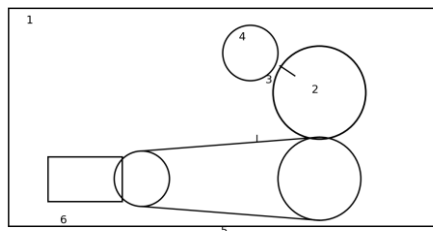


Рис. 3.5. Кінематична схема приводу верстата: 1 – корпус; 2 – робочий валок; 3 – зубчаста передача; 4 – живильний валок; 5 – клинопасова передача; 6 – електродвигун

Енергетичний розрахунок виконуємо для двох основних споживачів потужності: робочого валка і живильного механізму. Потужність на валку залежить від продуктивності та питомої енергоємності процесу. Для прийнятого режиму лушення ячменю беремо питому потужність 0,55 кВт на 1 т/год продуктивності. Тоді потужність приводу валка становить $N_1 = 0,55 \cdot 2,0 = 1,1$ кВт.

Потужність живильного механізму приймаємо на рівні 0,15–0,30 від потужності робочого валка. З урахуванням запасу приймаємо $N_2 = 0,4$ кВт. Сумарна розрахункова потужність дорівнює:

$$N = N_1 + N_2 = 1,1 + 0,4 = 1,5 \text{ кВт} \quad (3.6)$$

З урахуванням коефіцієнта корисної дії передачі $\eta = 0,8$ необхідна потужність електродвигуна становитиме:

$$N_{\text{дв}} = N / \eta = 1,5 / 0,8 = 1,88 \text{ кВт} \quad (3.7)$$

За результатами розрахунку приймаємо електродвигун потужністю 2,2 кВт з частотою обертання близько 960 об/хв. Запас за потужністю потрібний для пуску під навантаженням, компенсації нерівномірності подачі зерна та роботи вібраційного вузла.

3.4. Обґрунтування механізму регулювання зазору з вібродекою

Якість лушення ячменю значною мірою визначається формою та стабільністю робочого зазору. Якщо дека під час регулювання зміщується не паралельно до заданої траєкторії, у верхній і нижній частинах робочої зони виникає різний стиск. Це призводить або до підвищеного дроблення ядра, або до збільшення частки недолушеного зерна. Тому модернізація верстата спрямована не лише на створення коливань, а й на забезпечення правильного напрямку руху деки.

Напрямний механізм Чебишева дозволяє отримати ділянку траєкторії, близьку до прямолінійної. У запропонованій конструкції ця ділянка орієнтується майже нормально до поверхні валка. Завдяки цьому дека при регулюванні й коливанні не перекошується, а середній зазор змінюється

контрольовано. У порівнянні з масивними напрямними важільна система має меншу металоємність, простіше обслуговується і менше забруднюється пилом та продуктами лущення.

Під час роботи на деку діє змушене гармонічне переміщення. Його можна подати у вигляді:

$$x(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (3.8)$$

де $x(t)$ – миттєве переміщення деки, мм; A – амплітуда коливань, мм; f – частота коливань, Гц; φ – початкова фаза; t – час, с. Поточний зазор у робочій зоні змінюється за законом:

$$h(t) = h_0 + A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (3.9)$$

Для фракційованого ячменю приймаємо середній зазор $h_0 = 1,50$ мм. Амплітуда $A = 0,15$ мм забезпечує зміну зазору у межах 1,35–1,65 мм, що достатньо для руйнування оболонок без надмірного защемлення зернівки. Графічне подання закону зміни зазору наведено на рис. 3.6.

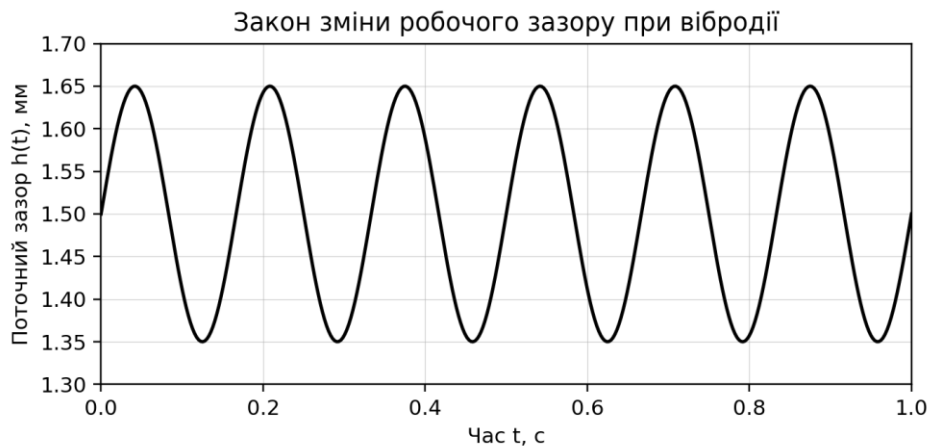


Рис. 3.6. Зміна робочого зазору $h(t)$ за амплітуди $A = 0,15$ мм і частоти $f = 6$ Гц.

Кінематичний синтез механізму виконується з умови, що робоча поверхня деки повинна переміщуватися з мінімальним відхиленням від прямолінійної траєкторії на всьому діапазоні регулювання. У розрахунковій схемі ланки вважаємо жорсткими, рух відбувається у вертикальній площині, а пружні властивості зосереджені в шарнірі та демпфувальних елементах.

Силова взаємодія деки із зернівкою формується внаслідок попереднього налаштування зазору та вібропереміщення. У спрощеному вигляді сумарне навантаження можна оцінити за залежністю:

$$F\Sigma = c_{np} \cdot (\Delta_0 + x(t)) \quad (3.10)$$

де $F\Sigma$ – сумарна сила тиску на зерновий шар; c_{np} – приведена жорсткість системи “дека – зернівка – шарнір”; Δ_0 – початкова деформація зернівки, обумовлена встановленим зазором. Потужність, потрібну для підтримання коливань деки, оцінюємо за виразом:

$$N_{vib} = F\Sigma \cdot 2\pi \cdot f \cdot A / (1000 \cdot \eta_{vib}) \quad (3.11)$$

За прийнятими параметрами вібровузла орієнтовна потужність, яка витрачається на формування коливань деки, становить 0,27 кВт. Це порівняно невелика величина відносно загальної потужності верстата, тому застосування вібродеки не потребує істотного збільшення встановленої потужності приводу.

Основні розрахункові параметри модернізованого вальцедекового верстата наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахункові параметри модернізованого вальцедекового верстата

Параметр	Позначення	Прийняте значення
Робоча довжина валка	L	150 мм
Радіус робочого валка	R ₁	200 мм
Радіус робочої поверхні деки	R ₂	206 мм
Відстань між опорами напрямного механізму	Q	196 мм
Радіус кривошипа	r	100 мм
Довжина шатуна напрямного механізму	l	245 мм
Довжина шатуна вібратора	L _с	200 мм
Частота обертання робочого валка	n _в	478 об/хв
Рекомендована частота коливань деки	f	5–7 Гц
Амплітуда коливань деки	A	0,10–0,20 мм
Орієнтовна потужність вібровузла	N _{вib}	0,27 кВт
Встановлена потужність електродвигуна	N _{дв}	2,2 кВт

Для обмеження амплітуди коливань у конструкції необхідно передбачити регульовані упори. Вони виконують дві функції: захищають

зерно від випадкового надмірного стиску і запобігають ударному контакту деки з валком у разі порушення налаштувань. Між декою та корпусом доцільно застосувати змінні пружні елементи, які дають можливість адаптувати жорсткість підвіски до вологості та твердості зерна.

Робочі поверхні валка і деки повинні мати зносостійке покриття або змінні накладки. Для ячменю бажано використовувати поверхню з помірною шорсткістю: вона має забезпечувати захоплення зернівки, але не повинна інтенсивно стирати ядро. У зоні виходу продуктів лущення передбачається патрубок для підключення аспірації, що зменшує запиленість і поліпшує умови роботи обслуговуючого персоналу.

Обслуговування модернізованого верстата передбачає перевірку стану підшипникових вузлів, натягу клинопасової передачі, зазору між валком і декою, кріплення ланок напрямного механізму та справності пружного шарніра. Перед запуском після переналагодження необхідно виконати короточасний холостий пуск і переконатися у відсутності зачіпання деки за валок. Під час роботи під навантаженням контролюють рівномірність подачі, якість лущення та температуру підшипників.

Висновки по розділу

У розділі обґрунтовано доцільність модернізації вальцедекового верстата, який використовується у складі комплексу машин післязбиральної обробки ячменю. Встановлено, що традиційна схема з нерухомою декою не завжди забезпечує оптимальний режим дії на зернівку, особливо за неоднорідності зернової маси.

Запропоновано конструкцію з вібродекою, напрямним механізмом Чебишева, пружним шарніром і ексцентриковим збурювачем коливань. Таке рішення дає змогу реалізувати м'який багатоцикловий режим лущення, зменшити тиск у робочій зоні та підвищити ймовірність збереження цілого ядра.

Виконано технологічний, кінематичний та енергетичний розрахунки. Для продуктивності 2,0 т/год прийнято робочу довжину валка 150 мм, діаметр 400 мм, частоту обертання робочого валка 478 об/хв, встановлену потужність електродвигуна 2,2 кВт, амплітуду коливань деки 0,10–0,20 мм і рекомендовану частоту 5–7 Гц.

Модернізований вузол регулювання зазору спрощує налаштування верстата під різні фракції ячменю, знижує металоємність напрямної системи, підвищує технологічну гнучкість машини та створює передумови для зменшення енерговитрат і втрат зерна під час луцення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто комплекс питань, пов'язаних із підвищенням ефективності переробки зерна ячменю, покращенням якості готової продукції та удосконаленням технічного забезпечення технологічного процесу. Актуальність роботи зумовлена тим, що ячмінь є важливою зерновою культурою для продовольчого, кормового, пивоварного та круп'яного виробництва, а якість його післязбиральної обробки безпосередньо впливає на рівень втрат, вихід готової продукції та економічні результати роботи зернопереробного підприємства.

У першому розділі було проаналізовано сучасний стан вирощування та переробки ячменю в Україні й світі. Встановлено, що посівні площі та обсяги виробництва ячменю змінюються залежно від ринкової кон'юнктури, кліматичних умов, структури сівозмін і попиту з боку переробної та кормової промисловості. Незважаючи на значний виробничий потенціал України, рівень глибокої переробки ячменю залишається недостатнім, оскільки значна частина зерна використовується як кормова сировина або експортується без створення доданої вартості. Це свідчить про необхідність розвитку сучасних технологій очищення, сортування, сушіння, лушення, шліфування та фасування ячмінної продукції.

У другому розділі розроблено технологію переробки ячменю на основі потокової механізованої лінії. До складу лінії включено бункер, автоматичну вагу, сепаратор, бурат, каменевідбірник, пропарювач зерна, парогенератор, сушарку, вальцедековий верстат, бункери відходів і каліброваного зерна, батарею фільтрів, луцильно-шліфувальні машини, сортувальні машини, магнітні уловлювачі, вентилятор, циклон і фасувальну машину. Запропонована схема забезпечує послідовне виконання основних операцій переробки: приймання, очищення, видалення домішок, гідротермічну обробку, сушіння, калібрування, лушення, шліфування, сортування, аспіраційне очищення та пакування готової крупи. Використання такої лінії

дає змогу підвищити рівень механізації процесу, зменшити частку ручної праці, стабілізувати якість продукції та забезпечити раціональне використання зернової сировини.

У конструктивній частині особливу увагу приділено модернізації вальцедекового верстата, який є одним із ключових елементів технологічного процесу лушення ячменю. Встановлено, що ефективність роботи цієї машини значною мірою залежить від стабільності робочого зазору між валком і декою, характеру дії робочих органів на зернівку, рівномірності подачі матеріалу та можливості регулювання режимів обробки. Запропоноване удосконалення спрямоване на покращення умов лушення, зменшення травмування ядра, підвищення виходу якісної крупи та зниження енерговитрат. Модернізація механізму регулювання зазору й застосування більш раціонального режиму взаємодії зерна з робочими органами дозволяють забезпечити м'якшу та рівномірнішу обробку ячменю.

У результаті виконання роботи встановлено, що ефективність післязбиральної обробки ячменю залежить не лише від окремої машини, а від узгодженої роботи всього комплексу обладнання. Найбільш перспективними напрямками вдосконалення технології є автоматизація контролю подачі зерна, застосування датчиків навантаження та вологості, удосконалення аспіраційної системи, зменшення енергоємності сушіння, підвищення точності сортування та модернізація робочих органів машин для лушення. Запропоновані рішення мають практичне значення для зернопереробних підприємств, оскільки можуть бути використані для підвищення продуктивності лінії, зменшення втрат сировини, покращення якості готової продукції та збільшення економічної ефективності виробництва. Таким чином, поставлена мета роботи досягнута, а розроблені технологічні й конструктивні рішення можуть бути рекомендовані для впровадження у процес післязбиральної обробки та переробки ячменю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.
2. ДСТУ 3769-98. Ячмінь. Технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 1998. 18 с.
3. ДСТУ 7700:2015. Крупи ячмінні. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 18 с.
4. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 173 с.
5. ДСТУ ISO 22000:2019. Системи управління безпечністю харчових продуктів. Вимоги до будь-якої організації в харчовому ланцюгу. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
6. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 30 с.
7. Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 5.06.2026).
8. Державна служба статистики України. Сільське, лісове та рибне господарство : статистична інформація. URL: <https://stat.gov.ua/uk/topics/silske-lisove-ta-rybne-hospodarstvo> (дата звернення: 5.06.2026).
9. Кирильчук А. М. Стан та шляхи збільшення виробництва зерна ячменю в Україні. Таврійський науковий вісник. 2023. № 131. С. 85–93.
10. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва : навчальний посібник. Чернівці : Кіцманський фаховий коледж, 2018. URL: <https://kizman-tehn.com.ua/wp-content/uploads/2018/04/НП-Технологія->

зберігання-та-перероб.-продукц.-рослинництва.pdf (дата звернення: 25.06.2026).

11. Машина, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки зерна. Дослідницьке, конструкторське і технологічне забезпечення агропромислового виробництва. Київ : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2024. URL: https://ndipvt.com.ua/TiTAPK/Books/fragment_obrobka.pdf (дата звернення: 5.06.2026).

12. Михайлов А. Д. Машина для первинної обробки врожаю сільськогосподарських культур : методичні вказівки. Харків : Державний біотехнологічний університет, 2023. 25 с.

13. Технологія зберігання і переробки зерна : методичні вказівки для проведення лабораторних робіт. Вінниця : ВНАУ, 2017. URL: <https://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/14679.pdf> (дата звернення: 5.06.2026).

14. Післязбиральна обробка зернових мас. Бібліотека українських підручників. URL: <https://buklib.net/books/22713/> (дата звернення: 25.06.2026).

15. FAOSTAT. Crops and Livestock Products. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/> (accessed: 5.06.2026).

16. Our World in Data. Barley production, 2024. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/barley-production> (accessed: 25.06.2026).

17. USDA Foreign Agricultural Service. Grain and Feed Annual: Ukraine. Kyiv : USDA FAS, 2024. URL: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Grain+and+Feed+Annual_Kyiv_Ukraine_UP2024-0008.pdf (accessed: 25.06.2026).

18. USDA Foreign Agricultural Service. Grain and Feed Annual: Ukraine. Kyiv : USDA FAS, 2025. URL: <https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?file>

Name=Grain+and+Feed+Annual_Kyiv_Ukraine_UP2025-0010 (accessed: 25.06.2026).

19. USDA Foreign Agricultural Service. Grain: World Markets and Trade. Washington : USDA FAS, 2026. URL: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf> (accessed: 25.06.2026).

20. FAO. Barley: Post-Harvest Operations. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012. URL: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/inpho/docs/Post_Harvest_Compendium_-_BARLEY.pdf (accessed: 25.06.2026).

21. 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.

22. Bogonos M., Stepaniuk O., Nivievskyi O. Agricultural Outlook Ukraine 2024–2033. Kyiv : Kyiv School of Economics, 2024. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/UA-Outlook-2024-2033-Report-1.pdf> (accessed: 25.06.2026).

23. Kalna-Dubinyuk T. An Overview of Agricultural Production in Ukraine. CARD Working Paper. 2024. URL: <https://www.card.iastate.edu/files/publications/pdf/24WP660.pdf> (accessed: 25.06.2026).

24. Kharchenko Y., Buculei A., Chorny V., Sharan A. Influence of technical and technological parameters on the barley dehulling process. Ukrainian Food Journal. 2022. Vol. 11, Issue 4. P. 542–557.

25. Amar K., Elamrani A., Fadil M. Milling process in Moroccan barley mills. Der Pharma Chemica. 2013. Vol. 5, No. 6. P. 167–174. URL: <https://www.scholarsresearchlibrary.com/articles/milling-process-in-moroccan-barley-mills.pdf> (accessed: 25.06.2026).

26. Zhu L., Spachos P., Pensini E., Plataniotis K. N. Deep Learning and Machine Vision for Food Processing: A Survey. Current Research in Food Science. 2021. Vol. 4. P. 233–249.

27. Технологічна схема переробки зерна : специфікація обладнання до кваліфікаційної роботи. 09.22.КР.208.100.00.00.ТС. 2026. 2 с.