

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ЧЕРЕДНИК СЕРГІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 631.3:631.5:621.372

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ І
ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОБРОБКИ ПРОДУКЦІЇ
РОСЛИННИЦТВА З УЛЬТРАЗВУКОВОЮ
ІНТЕНСИФІКАЦІЄЮ ПРОЦЕСУ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Чередник С.Ю.

Керівник роботи

Грабар І.Г.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Чередник Сергій Юрійович. Підвищення ефективності технології і технічних засобів обробки продукції рослинництва з ультразвуковою інтенсифікацією процесу. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

У магістерській роботі досліджено сучасний стан технологій обробки зернових, зернобобових культур і рослинних олій та обґрунтовано доцільність застосування ультразвукової інтенсифікації як ефективною альтернативи традиційним високотемпературним і хімічним методам. На основі аналізу літературних і патентних джерел встановлено, що існуючі технології характеризуються значними недоліками, зокрема тривалістю технологічних операцій, високими втратами поживних речовин, недостатнім рівнем інактивації антипоживних факторів і мікрофлори, підвищеним енергоспоживанням та нестабільністю параметрів процесів, що призводить до зниження якості готової продукції і втрат сировини.

У роботі обґрунтовано можливості використання ультразвукової обробки для інтенсифікації процесів зволоження, очищення, екстракції та фільтрації продукції рослинництва. Розроблено інноваційні ультразвукові технології та конструкції дослідно-промислових установок для їх практичної реалізації. Запропоновано універсальну установку безперервної дії шнекового типу для обробки сипучої рослинної сировини, яка забезпечує високу продуктивність (до 1200 кг/год для сої та до 1700 кг/год для зерна пшениці) та дозволяє досягти ефективності очищення оболонки зерна до 98 %, а також зволоження і інактивації антипоживних речовин на рівні 96–98 % за рахунок спрямованого ультразвукового впливу.

Результати виробничих випробувань підтвердили високу ефективність розроблених технологій і технічних засобів, їх відповідність чинним нормативним вимогам та економічну доцільність впровадження в промислове виробництво. Отримані результати свідчать про перспективність застосування ультразвукових технологій для підвищення ефективності та якості обробки продукції рослинництва.

Ключові слова: ультразвукова обробка, продукція рослинництва, зернові культури, зернобобові культури, очищення зерна, енергоефективність, ультразвукова установка.

ANNOTATION

Cherednyk Serhii Yuriiovich. Improving the efficiency of technology and technical means for processing crop products with ultrasonic process intensification. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.
– Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

The master's thesis investigates the current state of technologies for processing cereal crops, leguminous crops, and vegetable oils, and substantiates the feasibility of applying ultrasonic intensification as an effective alternative to conventional high-temperature and chemical methods. Based on the analysis of literary and patent sources, it has been established that existing technologies are characterized by significant drawbacks, including long processing times, high losses of nutrients, insufficient inactivation of antinutritional factors and microflora, increased energy consumption, and instability of process parameters, which leads to a reduction in the quality of finished products and losses of raw materials.

The thesis substantiates the possibilities of using ultrasonic treatment to intensify the processes of moistening, cleaning, extraction, and filtration of crop products. Innovative ultrasonic technologies and the designs of pilot-industrial units for their practical implementation have been developed. A universal continuous-operation screw-type unit for processing bulk crop raw materials is proposed, which ensures high productivity (up to 1200 kg/h for soybeans and up to 1700 kg/h for wheat grain) and makes it possible to achieve grain hull cleaning efficiency of up to 98%, as well as moistening and inactivation of antinutritional substances at the level of 96–98% due to directed ultrasonic воздействие.

The results of industrial tests confirmed the high efficiency of the developed technologies and technical means, their compliance with current regulatory requirements, and the economic feasibility of their implementation in industrial production. The obtained results indicate the prospects of using ultrasonic technologies to improve the efficiency and quality of crop product processing.

Keywords: ultrasonic treatment, crop products, cereal crops, leguminous crops, grain cleaning, energy efficiency, ultrasonic unit.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ НА ЗЕРНОВІ ТА ЗЕРНОБОБОВІ КУЛЬТУРИ.....	8
РОЗДІЛ 2. ЗАКОНОМІРНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ТА ЕКСТРАГУВАННЯ ПРОДУКЦІЇ РОСЛИННИЦТВА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	35
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток агропромислового комплексу України та світу загалом супроводжується зростанням вимог до ефективності, енергоощадності та екологічної безпечності технологій переробки продукції рослинництва. Зернові та зернобобові культури, а також рослинні олії є стратегічно важливими видами сировини, що формують продовольчу безпеку держави, експортний потенціал та стабільність функціонування харчової і переробної промисловості. У цих умовах особливої актуальності набуває вдосконалення технологічних процесів їх обробки з метою зменшення втрат поживних речовин, підвищення якості готової продукції та зниження енерговитрат.

Традиційні технології обробки продукції рослинництва, засновані переважно на високотемпературних, механічних і хімічних впливах, мають низку системних недоліків. До них належать значна тривалість окремих технологічних операцій, високі втрати білка та біологічно цінних компонентів унаслідок термічної денатурації, недостатня інактивація антипоживних речовин і патогенної мікрофлори, а також підвищене питоме енергоспоживання. Крім того, нестабільність параметрів традиційних процесів часто призводить до зниження виходу готової продукції та перевитрат сировини, що негативно впливає на економічну ефективність виробництва.

У зв'язку з цим особливого значення набуває пошук і впровадження інноваційних фізичних методів інтенсифікації технологічних процесів, які б забезпечували підвищення продуктивності та якості обробки при мінімальному негативному впливі на властивості сировини. Одним із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті є застосування ультразвукової обробки. Ультразвук завдяки кавітаційним, механічним і фізико-хімічним ефектам дозволяє суттєво інтенсифікувати процеси зволоження, очищення, екстракції та фільтрації продукції рослинництва, скоротити тривалість технологічних операцій, знизити

енергетичні витрати та забезпечити більш ефективну інактивацію антипоживних факторів і мікроорганізмів без застосування агресивних хімічних реагентів.

Водночас практичне впровадження ультразвукових технологій у промислову переробку продукції рослинництва стримується недостатньою розробленістю науково обґрунтованих технологічних режимів, а також обмеженою кількістю ефективних і надійних технічних засобів, адаптованих до умов безперервного виробництва. Тому актуальним є комплексне дослідження, спрямоване на підвищення ефективності технологій і технічних засобів обробки продукції рослинництва з використанням ультразвукової інтенсифікації процесів, а також розробка і експериментальна перевірка нових конструктивно-технологічних рішень.

Мета роботи – підвищення ефективності технологічних впливів і технічних засобів переробки зернових і зернобобових культур при інтенсифікації технологічних процесів ультразвуковою обробкою.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких наукових **завдань**:

– проаналізувати за даними літературних і патентних джерел особливості технологічних процесів інактивації інгібіторів трипсину і уреазу зерна сої, знезараження, очищення і зволоження зерна пшениці існуючими технологіями та технічними засобами виробництва продуктів переробки;

– дослідити в лабораторних умовах якісні показники зернових і зернобобових культур оброблених ультразвуком та обґрунтувати режимні параметри і основні конструктивні напрямки розробки технічних засобів;

– розробити технології обробки зернових і зернобобових культур.

Об'єктом дослідження є технологічні впливи та технічні засоби ультразвукової обробки зернових і зернобобових культур.

Предметом дослідження є закономірності технологічних впливів, що протікають при технологічній обробці зернових і зернобобових культур з ультразвуковою інтенсифікацією процесів.

Методи наукового дослідження. При проведенні експериментальних досліджень застосовували методики, встановлені відповідними ДСТУ, доповнені розробленими приватними методиками. Отримані дані експериментальних досліджень обробляли за допомогою комп'ютерних програм Microsoft Excel 2010, Statistica.10. У методології досліджень використано системний підхід, заснований на взаємному впливі технологічного фізико-хімічного впливу і технічних засобів на продукти обробки.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Грабар І.Г., Чередник К.Ю. Результати експериментальних досліджень показників зерна після ультразвукової обробки. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

2. Чередник С.Ю. Закономірності, що зумовлюють підвищення ефективності очищення та екстрагування продукції рослинництва. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 96-97.

3. Чередник С., Кусковський О., Грабар І. Способи та засоби механізації знезараження зерна. учасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 156-163.

Практичну інтерес для аграрних підприємств представляє розроблена технологія і технічні засоби, що дозволяють значно інтенсифікувати процеси підготовки зерна до помелу.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 23 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 67 сторінок комп'ютерного тексту, містить 32 рисунки та 5 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ НА ЗЕРНОВІ ТА ЗЕРНОБОБОВІ КУЛЬТУРИ

1.1. Застосування ультразвуку в харчових та переробних виробництвах

Ультразвук – це механічні звукові хвилі з частотою понад 20 кГц (вище межі чутності людини). У харчових технологіях найчастіше застосовують потужний (низькочастотний) ультразвук із частотою 20–100 кГц для обробки харчових рідин і суспензій. Ультразвук генерується електричною енергією на п'єзокерамічних перетворювачах: на кристал подається змінна напруга, і завдяки п'єзоелектричному ефекту матеріал розширюється та стискається, створюючи механічні коливання заданої частоти. Ультразвукові системи складаються з генератора, перетворювача (зонда або ванни) і камери обробки, що забезпечують поширення хвиль через середовище.

Під час проходження ультразвуку через рідину змінюється тиск в середовищі: чередуються фази високого та низького тиску. У фазі низького тиску в рідині з'являються мікропухирці (кавітейшн) – порожнини, наповнені паром або газом. За високої інтенсивності хвиль ці пухирці стрімко ростуть і при наступній фазі тиску швидко колапсують (завалюються). При колапсі таких «кавітей» в локальному масштабі виникають екстремальні умови: температура в бульбашці може перевищувати 4000–5000 К, а тиск – 1000 атм і більше. Крім того, руйнування бульбашки генерує ударні хвилі і потужні мікрострумені рідини, що створює різкі зсувні напруги та турбулентність у суміші. У підсумку це призводить до інтенсивного мікрومیшання, посиленої масопередачі, руйнування твердих часток і клітинних структур, а також формування дрібних краплин в емульсіях. Така ультразвукова кавітація і механічні ефекти

(стрімування, мікрострумені, ультразвукові мікроструми) відіграють основну роль у поліпшенні технологічних процесів: вони підвищують розчинення і перенесення речовин, диспергують компоненти, сприяють емульгуванню олій та інактивації мікроорганізмів.

Ультразвукові хвилі мають різні режими застосування. У низькоенергетичному режимі (частота >100 кГц, інтенсивність <1 Вт/см²) їх використовують для аналітичного моніторингу (визначення складу, зрілості та фізико-хімічних властивостей продуктів). Навпаки, у потужних промислових системах застосовують частоту 20–100 кГц з інтенсивністю 10–1000 Вт/см², що здатна змінювати структуру і властивості матеріалу. Наприклад, потужний ультразвук використовують для інактивації ферментів, прискорення сушіння та заморожування, екстракції ефірних олій, контролю кристалізації і дегазації рідких продуктів. Ультразвук також поєднують з іншими впливами: при спільній дії тепла (термосонікація) і тиску (маносонікація) досягають більш ефективного знищення мікроорганізмів порівняно з окремим використанням (т.зв. манотермосонікація). Це робить ультразвук універсальним інструментом для прискорення багатьох стадій харчових технологічних процесів.

Молочна промисловість. Ультразвук активно застосовують при виробництві молочних продуктів – для гомогенізації молока, обробки вершків, приготування йогуртів, сирів та морозива. Ударні хвилі і мікрострумені руйнують мембрани жирових глобул, створюючи дрібнішу і більш стабільну емульсію (аналогічно високоефективним гомогенізаторам, але без сильного нагрівання). Завдяки цьому поліпшується текстура і стабільність молокопродуктів, зростає вихід однорідної маси. Ультразвук також може використовуватися для пастеризації (термосонікації): дослідження показують, що в поєднанні з помірним нагріванням він значно знижує мікробне навантаження в молоці та вершках, одночасно зберігаючи органолептику. Так, було встановлено, що УЗ-обробка молока з температурою близько 60 °С може прискорити руйнування бактерій та ферментів (у тому числі бактерицидних),

подовжуючи строк зберігання продукту при мінімальних термічних пошкодженнях.

М'ясна промисловість. УЗ-обробка використовується для підвищення ніжності м'яса та якості маринації. Кавітаційні ефекти пошкоджують колагенові структури і клітинні стінки у м'язах, що пом'якшує волокна і полегшує проникнення розсолів і спецій. Завдяки ультразвуковій інтенсивній дифузії маринади швидше проникають у товщу м'яса, скорочується час витримки. Одночасно ультразвук сприяє частковому зниженню мікробного забруднення поверхні м'яса і риби (особливо коли його поєднують з дезінфікуючими обробками). Наприклад, при обробці шматків помідорів (як модель свіжої продукції) ультразвук у комбінації з хлором забезпечував додаткове зниження кількості патогенних бактерій на 1–2 log (90–99 %). Водночас сам по собі ультразвук рідко повністю стерилізує м'ясо, але може стати частиною гібридних технологій безпечної переробки. Крім того, УЗ-методи застосовують для знепилювання і очищення м'яса, а також для поліпшення проточних процесів (заморожування, дефростація тощо) завдяки кращій рівномірності тепловіддачі.

Зернова та борошняна промисловість. У зернопродуктах ультразвук застосовують переважно для передпосівної обробки насіння (активація проростання), очищення і сортування зерна та оптимізації екстракційних технологій. Коливання низької частоти можуть прискорювати набухання насіння і поліпшувати його схожість (завдяки мікроущільненню поверхні і проникненню води), що використовують при підготовці до виробництва пророщеного продукту. Існують також підходи УЗ-дроблення чи пробивання оболонок злаків для полегшення помелу. Наприклад, ультразвукове промивання та опромінення зерна може призводити до зниження вмісту мікотоксинів та шкідливих фітопатогенів, оскільки кавітація руйнує тканини грибів і пилові забруднення. Окрім того, УЗ-дифузія застосовується при просочуванні зерна для виробництва борошна, що зменшує часові витрати на температуру та підвищує якість кінцевого продукту (наприклад, краща віддільність білка та крохмалю).

Олійна промисловість. Потужний ультразвук широко впроваджують при екстракції рослинних олій (соняшникової, оливкової, ріпакової, авокадо тощо). Ультразвукові хвилі створюють кавітацію всередині рослинних клітин, що розриває їх стінки та звільняє олію. Як результат, істотно збільшується вихід олії і скорочується час екстракції. Наприклад, досліди показали, що ультразвукова екстракція олії з насіння соняшнику дала вихід до 45,4 % (для непозбавленого від шкаралупи насіння) при часі 105 хв, тоді як традиційна екстракція Сокслетом потребувала 6–10 годин. Подібні переваги спостерігались при виробництві оливкової олії: ультразвук у стадії малаксації під тиском 3,5 бар збільшив врожай екстракту без погіршення основних якостей олії. Оскільки ультразвукова екстракція є нетермічною, кінцевий продукт зберігає більше корисних поліфенолів, вітамінів та ненасичених жирних кислот.

Плодово-овочева промисловість. У виробництві фруктів і овочів УЗ-технології застосовують на всіх етапах: очищення, обробка, зберігання, сушіння, екстракція. При митті ультразвукові хвилі ефективно відокремлюють з поверхні пил, бруд і залишки пестицидів (механічно «зчищаючи» їх і руйнуючи стійкі зв'язки). Дослідження показують, що ультразвукове промивання овочів (наприклад, шпинату, капусти) може знизити кількість мікроорганізмів на поверхні та видалити до 80–90 % залишкових пестицидів. УЗ-метод також підвищує безпеку мінімально оброблених овочевих продуктів, особливо в поєднанні з санітарними розчинами: синергія ультразвуку з хлором чи перекисом водню дає помітне додаткове зниження патогенів, яких самі по собі хлор чи ультразвук не повністю знешкоджують.

Ультразвук широко використовують для прискорення сушіння фруктів та овочів. При звичайній конвективній сушінні енергія витрачається на нагрів, а переміщення вологи повільне. Застосування ультразвуку під час сушки («повітряний» або «зондовий» ультразвук) створює в середовищі постійне утворення і руйнування мікропухирців, що руйнують капіляри води й полегшують її дифузії назовні. Це може скоротити час сушіння на 20–70 % та

підвищити якість сушеної продукції (збереження кольору, вітамінів, текстури). УЗ-дезінтеграція клітин дозволяє також ефективніше вилучати з фруктів біологічно активні речовини – наприклад, вітаміни, флавоноїди, пектини. Завдяки цьому ультразвук застосовують при отриманні соків, екстракції пектинів та фенольних сполук з плодово-овочевої сировини; обробка дозволяє збільшити вихід та скоротити час екстракції при низьких температурах. Наприклад, УЗ-підігрів і розрідження маси плодів збільшує кількість вилученого соку і полегшує подальше згущення чи пастеризацію продукту.

Переваги ультразвукової технології. По-перше, ультразвук є нетермічною методикою – він зберігає «свіжі» властивості продукту, а також теплочутливі поживні речовини і аромат, які можуть бути зруйновані при звичайному нагріванні. По-друге, ультразвукова кавітація значно покращує масо- і теплоперенос: процеси екстракції, сушіння і дифузії проходять швидше і глибше, що дає змогу підвищувати вихід корисних компонентів і економити час. Наприклад, УЗ-процес звільняє клітинні ліпіди, білки та феноли в 1,5–2 рази інтенсивніше, ніж механічні методи. Ультразвук значно полегшує емульгування і змішування олій з водними фазами, що забезпечує стабільніші емульсії без додаткових хімічних емульгаторів. По-третє, ультразвук підсилює інактивацію мікроорганізмів і ферментів при відносно низьких температурах (т. зв. санітарна дезінфекція без кип'ятіння). Гібридні схеми (наприклад, термосонікація) дають ефект санітаризації, подібний до термічної, але з меншими змінами смаку і консистенції. Окрім того, ультразвук вважають «зеленим» рішенням: він може зменшити або повністю замінити агресивні хімічні реагенти (наприклад, знижувати потребу у хлорі при мийці продукції), а також знизити енергоспоживання завдяки скороченню циклів обробки.

- Підвищення якості. Ультразвукова обробка дозволяє одержувати більш однорідні маси без великих часток чи агломератів. Так, при гомогенізації морозива УЗ-обробка знизила індекс розшарування фаз на 3–4 рази порівняно зі звичайним гомогенізатором.

- Екологічна безпечність. Ця технологія є екологічною (може замінити хімічні технології, зменшувати використання води та консервантів).
- Розширені можливості. Ультразвук може одночасно виконувати кілька операцій (наприклад, диспергувати, екстрагувати і дезінфікувати), що скорочує число етапів виробництва та підвищує продуктивність процесу.

Попри численні переваги, ультразвукову технологію в харчовій промисловості стримують кілька факторів. По-перше, обладнання для потужного ультразвуку є дорогим: потужні генератори та промислові зондові трансдюсери потребують значних капіталовкладень. Окрім початкових витрат, необхідно регулярно обслуговувати перетворювачі (вони зношуються під дією інтенсивних коливань), що збільшує експлуатаційні витрати. По-друге, УЗ-вплив сильно залежить від властивостей продукту: неоднорідні або загущені середовища глушать звукові хвилі, а повітряні бульбашки чи покриття на поверхні перешкоджають їхньому поширенню. Це означає, що ефективність ультразвуку може суттєво варіювати для різних типів продукції. Мікроструктура і вологість продукту (навантаження пульпи, жировий вміст тощо) змінюють глибину проникнення і силу кавітації, що ускладнює стандартизацію процесів. По-третє, масштабування технології на великі об'єми викликає труднощі: звукові поля швидко затухають, тому для обробки великих потоків потрібна складна проточна арматура з декількома зондами або багатоетапні системи. Одночасно важко забезпечити рівномірне ультразвукове навантаження по всьому об'єму, особливо в товстих чи в'язких продуктах. Нарешті, відсутність усталених регламентів і стандартів для УЗ-обробки гальмує її впровадження: виробникам треба самостійно налаштовувати параметри для кожного продукту, що вимагає часу і ресурсів.

Для впровадження ультразвуку у виробництві використовують різноманітні апарати: лабораторні та промислові ультразвукові гомогенізатори (зондового типу) потужністю від сотень ват до десятків кіловат, ультразвукові ванни для обробки невеликих партій, а також безперервні проточні реактори з

інтегрованими зондами. Наприклад, типові лабораторні апарати Hielscher UP200S чи Sonics VCX-750 (частота $\approx 20\text{--}24$ кГц, потужність 200–500 Вт) дають змогу досліджувати ефекти УЗВ на молочні та фруктові емульсії. Для крупномасштабних процесів існують моделі з потужними трансдюсерами: Hielscher UIP16000 (16 кВт, 20 кГц) і Sonics PR-4000 (4 кВт) використовують у потокових лініях виробництва соків та екстракції олії.

Експериментальні результати підтверджують ефективність УЗВ. Так, ультразвукова гомогенізація морозива продемонструвала значно кращу стабільність емульсії: індекс розшарування фаз (TSI) після УЗ-обробки склав 2,2, тоді як після класичної механічної гомогенізації – близько 7,2. Це означає, що УЗ-вплив зменшує відторгнення водної фази і забезпечує більш однорідний продукт при зберіганні. Інший приклад – ультразвукове вилучення соняшникової олії з насіння: застосування зонда UP400S (24 кГц, 400 Вт) дозволило отримати кращий вихід олії (45,4 % для неочищеного насіння) за час 105 хв, тоді як традиційні методи екстракції потребували 6–10 годин. Подібні результати отримали при ультразвуковій обробці оливкової олії: інтегрування УЗ-пресора UIP4000hdT у стадію малаксації зумовило збільшення врожаю екстрагу без погіршення показників якості (збереження фенольного профілю). У мийці плодово-овочевої сировини тестові лінії продемонстрували, що поєднання ультразвуку з мінеральними дезінфектантами дає додаткове зниження Сальмонел та Лістерій на 1–2 log порівняно з одним лише хлоруванням. Таким чином, практична реалізація показує, що ультразвук може бути впроваджений у різні точки виробничого процесу, де він прискорює операції та покращує кінцеві властивості продукції.

Ультразвукові технології у харчовому виробництві є перспективним інструментом сучасних нетермічних методів обробки. Вони надають можливість інтенсифікувати екстракцію, сушіння, гомогенізацію, маринування та інші ключові операції, зберігаючи при цьому якість продукту і знижуючи енергетичні затрати. Разом з тим, впровадження ультразвуку потребує подолання

економічних і технічних бар'єрів: високих інвестицій, тонкої настройки обладнання під різні продукти і стандартизації процесів. У подальшому розвиток галузі стимулюватиметься зменшенням вартості обладнання, створенням нових матеріалів для трандюсерів і вдосконаленням проточних систем. Важливими напрямками також є комбіновані процеси (ультразвук плюс термо- чи гідростатичні фактори) та розробка прикладних стандартів якості. Загалом, ультразвукові технології здатні забезпечити більш ефективні, екологічно сталі та безпечні виробничі процеси в харчовій промисловості.

1.2 Особливості способів підготовки зернових культур до помелу

Зернові культури становлять невід'ємну частину щоденного раціону 2,34 млн т [1]. На частку пшеничного та пшенично-житнього борошна припадає 93 %.

Технологія виробництва борошна є досить складною і потребує значних капіталовкладень. Технологічні процеси підготовки зерна до помелу мають вирішальне значення для отримання якісного борошна. Поряд із великими виробниками, в Україні переробкою зерна займаються також малі підприємства та фермерські господарства.

Борошномельна промисловість України забезпечує потреби населення у необхідних обсягах, однак її ефективному розвитку перешкоджають низький рівень технічного оснащення та технологічна відсталість багатьох млинів [1].

Для суттєвого розвитку кормової та харчової промисловості потрібні інноваційні підходи та рішення, спрямовані на модернізацію технологічного обладнання і вдосконалення виробництва як цілісної системи.

Технологічні властивості зерна визначаються трьома основними показниками: питомим виходом готової продукції, якістю готової продукції та питомими витратами енергії на одиницю маси готового продукту.

Найбільш поширеною зерною культурою є пшениця. Залежно від технологічних, харчових і товарних властивостей, пшеницю поділяють на такі

типи: I – м'яка яра, II – тверда яра, III – м'яка яра білозерна, IV – м'яка озима червонозерна, V – м'яка озима білозерна, VI – тверда озима.

Пшениця V та VI типів не має промислового значення. Для виробництва хлібопекарського борошна зазвичай використовують м'яку пшеницю I, III, IV типів, а пшеницю II типу — для виготовлення макаронних виробів.

Будова зерна пшениці є типовою для всіх видів злакових рослин (рис. 1.1). Ця культура відзначається високими біологічними властивостями та містить елементи, необхідні для фізіологічного розвитку людини.

Хімічний склад анатомічних частин зернівки пшениці наочно показує, що найбільший вміст білка спостерігається в зародку та ендоспермі; клітковини й пентозанів – у плодових оболонках; крохмалю – в ендоспермі; цукрів і ліпідів – у зародку; золи – у насіннєвій та внутрішній плодовій оболонці.

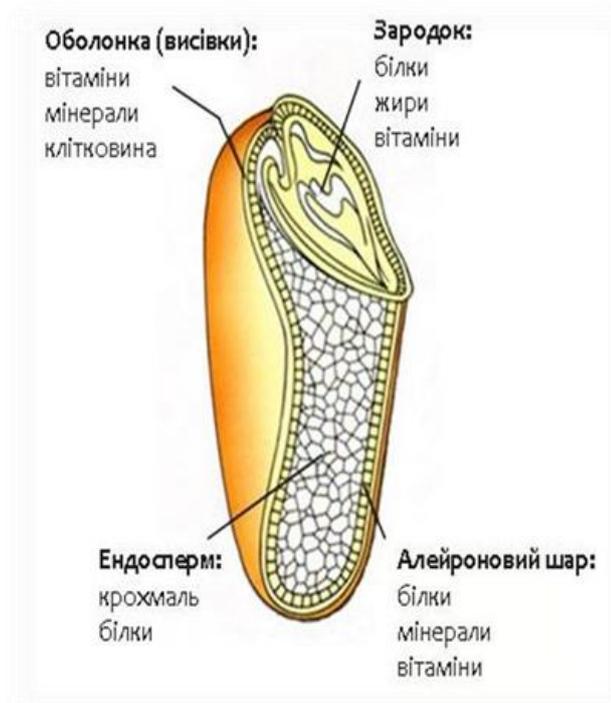


Рис. 1.1. Будова зерна пшениці.

Найціннішою частиною зерна, яка забезпечує отримання борошна вищих сортів, є ендосперм. У ньому білки розподілені нерівномірно — їх концентрація зростає до периферійних шарів. До білків зародка та алейронового шару належать альбуміни й глобуліни, що виконують каталізаторну функцію під час проростання зерна. До білків ендосперму відносять альбуміни, глобуліни,

проламіни та глютеліни. Білки складаються з амінокислот, з'єднаних між собою ковалентними пептидними зв'язками.

Основними білками ендосперму є гліадин і глютенін, які становлять близько двох третин усіх білків зерна. Гліадин належить до групи проламінів; при його гідролізі утворюються пролін і глютамінова кислота. Він слабо розчиняється у воді, але його солі добре розчиняються у водних розчинах спиртів (метанолу, етанолу тощо) при концентрації спирту 60–70 %. Глютенін належить до групи глютелінів, не розчиняється ні в сольових розчинах, ні в спирті, проте може бути екстрагований із подрібненого зерна розбавленими кислотами. Глютенін надає клейковині пружності, а гліадин забезпечує розтяжність тіста.

Під час сортового помелу всі оболонки, зародок і алейроновий шар видаляють. Кількісний вміст цих частин зерна визначає вихід готового борошна. Відомо, що алейроновий шар містить багато жиру і складається переважно з білкових речовин; його частка становить 5,2–8,0 %. Зародок складає 1,4–3,1 % маси зерна й містить білки, жири, вітаміни та мінеральні речовини.

Останніми роками особливу увагу приділяють виробництву хлібобулочних виробів здорового харчування з борошна простого помелу, при якому подрібнюють ціле зерно. У цьому випадку вилучення оболонок не перевищує 2 %.

Основними характеристиками зерна пшениці, що визначають тип і підтип, є: колір, запах, масова частка білка, кількість і якість клейковини, число падіння, склоподібність, натура, вологість, вміст сміттєвих і зернових домішок. Усі ці біологічні показники становлять основу якісних характеристик переробленої продукції. Оцінювання технологічних властивостей зерна здійснюють за співвідношенням виходу борошна до його зольності.

Величина зольності та якісний склад золи залежать від виду, сорту й ґрунтово-кліматичних умов вирощування. У золі пшениці переважають фосфор, калій і магній, а також міститься значна кількість мікроелементів: 3,0–6,9 % марганцю, 0,3–0,6 % нікелю, 3,7–7,9 % цинку, 0,72–0,75 % міді, 0,035 %

молібдену, 7,9–8,1 % кобальту. Біологічно ці елементи постійно впливають на показник зольності зерна, проте практично завжди залишається неврахованою додаткова зольність, яка залежить від чистоти оболонки зерна. Вона складається з залишків мінеральних (пилових) відкладень і слідів зараження, тісно пов'язаних з оболонкою. І якщо мінеральні складові в зерні є корисними, то на оболонці вони виступають забруднювачами, що погіршують якість оббивного борошна, а наявність слідових кількостей зараження призводить до псування готового продукту.

Склоподібність впливає на режими підготовки зерна до помелу. Вона визначається здатністю зерна заломлювати світло. Склоподібними називають такі зерна, які слабо заломлюють світловий промінь і під час просвічування виглядають прозорими. Борошністі зерна при розгляданні на світло непрозорі, а під час просвічування здаються темними. Розподіл видобувних частин ендосперму за потоками сортового борошна залежить від склоподібності: чим вона вища, тим більша частка крохмалистого ядра переходить із центральної частини зерна. Вологість зерна безпосередньо залежить від його склоподібності.

Під час зберігання вологість 14,0–15,5 % вважається критичною — за таких показників зерно переходить зі стану спокою до активної життєдіяльності, що є неприпустимим. Волога в зерні перебуває у зв'язаному стані, однак при зміні технологічних параметрів цей зв'язок порушується, і властивості зерна змінюються.

Енергія зв'язку води залежить від тиску пари, що характеризує вологість зерна у гігроскопічній області. Тверді сорти пшениці мають товсті клітинні стінки та поглинають більше води завдяки наявності геміцелюлози. У м'яких сортів пшениці клітинні стінки тонкі, майже не містять геміцелюлози, що зумовлює низьку поглинальну здатність. Ці властивості водопоглинання передаються і борошну.

Різні анатомічні частини зернівки поглинають різну кількість води з неоднаковою інтенсивністю. Найшвидше воду поглинає зародок.

При цьому чим більше білка міститься в зерні, тим більше води воно вбирає, однак швидкість поглинання є вищою у крохмалистого зерна. Під час підготовки зерна до помелу особливу увагу приділяють його вологості. Виходячи з цього, технологія зволоження має велике значення.

1.2.2 Вимоги, що висуваються до зернових культур

Стан зерна, його запах, колір, вологість, вміст сміттєвих і зернових домішок, а також зараженість шкідниками регламентуються для кожного типу пшениці окремо.

Залежно від класу твердої пшениці варіюють такі показники: масова частка білка – від 10,0 до 13,5 %, кількість клейковини – від 18 до 28 %, число падіння – від 80 до 200, склоподібність – від 70 до 85 %, натура – у межах 710–770 г/л, вміст сміттєвих домішок – до 0,3 % мінеральних і до 5,0 % зернових. Для пшениці 5-го класу багато показників не обмежуються, при цьому вміст сміттєвих домішок може досягати 5 %, а зернових – 15 %.

Для м'якої пшениці показники змінюються в таких межах: масова частка білка – від 10 до 14,5 %, кількість клейковини – від 18 до 32 %, число падіння – від 80 до 200, склоподібність – від 40 до 60 %, натура – від 710 до 750 г/л, вміст сміттєвих домішок – 0,3 % для мінеральних і 5,0 % для зернових.

Також регламентується вміст токсичних елементів, мікотоксинів, бензапірену, пестицидів, радіонуклідів, шкідливих домішок, генетично модифікованих організмів, а також зараженість шкідниками та забрудненість мертвими комахами-шкідниками у зерні пшениці.

Головними завданнями під час переробки зерна на борошно є збереження зерна з нормованими показниками, що не перевищують вимог ДСТУ, а також високоєфективна підготовка зерна до помелу, яка забезпечує досягнення необхідних технологічних параметрів.

1.2.3 Способи та засоби механізації знезараження зерна

Зерно схильне до зараження пліснявими грибами та шкідниками хлібних запасів, що є серйозною проблемою у кормовиробництві та харчовій промисловості. Ураження зерна мікотоксинами пліснявих грибів може призвести до отруєнь і навіть летальних випадків при значній концентрації. Комахи-шкідники зерна погіршують його хлібопекарські властивості, знижують масу, сприяють розвитку патогенної мікрофлори та викликають саморозігрівання зерна, що призводить до його псування й необхідності утилізації [3].

Усім відома так звана “картопляна хвороба” хліба, яка виникає внаслідок діяльності спороутворювальних термофільних бактерій *Bacillus subtilis*. Вони у великій кількості присутні на рослинах і в ґрунті, тому їхні спори потрапляють у борошно. Цей процес необхідно усувати на ранньому етапі – ще до помелу зерна.

Причиною глобального поширення шкідників є широке вирощування нестійких сортів пшениці [3].

Особливо за останні 50 років спостерігається значне збільшення чисельності шкідливої черепашки. Також фіксується зростання кількості захворювань рослин, спричинених ураженням пліснявими грибами, які є продуцентами мікотоксинів — дезоксиніваленолу, ніваленолу, зеараленону, афлатоксинів, охратоксинів та інших [3].

Основними джерелами зараження зерна і зернопродуктів є незнезаражені сховища, приймальні майданчики, території біля складів, зерноочисні машини й механізми, тара, інвентар та транспортні засоби, а також заражене зерно, що надходить від виробників.

Зерно надходить на помел із високим рівнем зараженості ($5 \cdot 10^6 \dots 8 \cdot 10^8$ КУО/г). Суха очистка зерна під час зберігання та підготовки до помелу лише незначно знижує рівень зараження шляхом видалення оболонки, однак при подальшому зволоженні та взаємодії з водою відбувається повторне зараження

здорових зерен, тому зниження обсіменіння мікроорганізмами практично не спостерігається [3].

Серед способів біологічного знешкодження мікотоксинів відомі ферментативні методи, при яких ферменти каталізують природні процеси деструкції мікотоксинів. Ці процеси відбуваються в умовах, сприятливих для довкілля, і не потребують підвищених температур, тиску, а також використання агресивних лужних чи кислотних реагентів і розчинників [3].

Ефективність способів біологічного знешкодження мікотоксинів, заснованих на ферментативних окисних процесах, є відносно високою. Швидкість розкладання мікотоксинів становить близько 5,85 мг/л/год. Однак ці методи мають низку суттєвих недоліків: нестабільність використовуваних ферментів; необхідність дотримання спеціальних умов їх зберігання; потреба у використанні додаткових дорогих редокс-медіаторів; необхідність підтримання підвищеної концентрації кисню у середовищах, що містять мікотоксини, тощо. Проте головний недолік полягає в тому, що в результаті застосування таких окисних ферментативних способів утворюються нові сполуки, які є не менш, а іноді навіть більш токсичними, ніж вихідні токсини [3].

Також існують методи обробки зерна перед закладанням на зберігання з використанням органічних консервантів – пропіонової кислоти з додаванням хітозану, а також суміші пропіонової кислоти з калієм сорбату. Проте застосування хімічних речовин у продуктах харчування є неприпустимим, оскільки всі ці сполуки переходять у кінцевий продукт [3].

Недоліком таких методів є також те, що при тривалому споживанні тваринами кормів, оброблених подібними консервантами, існує висока ймовірність виникнення хімічних опіків стравоходу та шлунка. Через підвищений вміст пропіонової кислоти зерно втрачає схожість і набуває кислого присмаку [3].

Наразі відомо чимало способів знешкодження мікотоксинів, але жоден із них не має оптимальної ефективності та супроводжується значною кількістю

недоліків. Тому доцільніше не боротися з наслідками діяльності пліснявих грибів, а запобігати їх розвитку [3].

Існує також спосіб знезараження зернової сировини, що передбачає зволоження зерна, його обробку у водному середовищі в акустичному полі з широким спектром частот при кавітаційно-пороговому значенні звукового тиску, який створюється гідроакустичним випромінювачем, із одночасним диспергуванням у середовищі повітря, що подається імпульсно в резонаторні камери випромінювача. Недоліком цього способу є те, що зменшення кількості пліснявих грибів становить лише близько 80 %, що не вирішує проблему усунення токсичності. Висока інтенсивність ультразвукових хвиль (4 Вт/см^2) порушує структуру зерна та його оболонку, що ускладнює збереження властивостей під час зберігання [3].

Існує спосіб деконтамінації сільськогосподарських кормів, забруднених мікотоксинами, шляхом їх попередньої обробки активованим розчином перед процесом екструдування корму. Як активований розчин використовують рідину, отриману на установці типу СТЕЛ при густині струму $0,06\text{--}0,15 \text{ А/см}^2$, напрузі $40\text{--}50 \text{ В}$, швидкості потоку католіту й аноліту $2,8\text{--}4,5 \text{ л/год}$, яка містить $4,0\text{--}5,0 \text{ г/л NaCl}$ і $0,3\text{--}0,7 \text{ г/л}$ гліцину, з показниками кислотності $2,0\text{--}3,0 \text{ рН}$ [3].

Недоліком цього способу є те, що будова зернівки (зокрема наявність у ній остюка та борозенки) ускладнює очищення зерна від пліснявих грибів, і тому статична обробка лише анолітом є недостатньо ефективною [3].

Існує пристрій для знезараження зерна у складі зерно- та насіннеочисного агрегату, який містить модуль СВЧ-обробки, встановлений на виході зернового потоку із зерноочисної машини [3].

Недоліком СВЧ-обробки є використання підвищеної температури, що призводить до денатурації білка та негативно впливає на якісні характеристики зерна і його білкову цінність.

Відомі також технології та технічні засоби знезараження зерна в електростатичному полі [3].

Пристрій для знезараження зерна в електростатичному полі (рис. 1.2) містить корпус із генератором високої напруги 5. Оброблюваний продукт подається шнеками, виконаними у вигляді електропровідного стрижня 1 з діелектричними лопатками 2, розташованими по гвинтовій лінії. Разом із металевим корпусом, який виконує роль екрана, вони утворюють високовольтну пару електродів, що формують в об'ємі корпусу електростатичне поле. Пристрій також оснащений вібратором 6, який забезпечує можливість обробки зерна різного ступеня вологості [3].

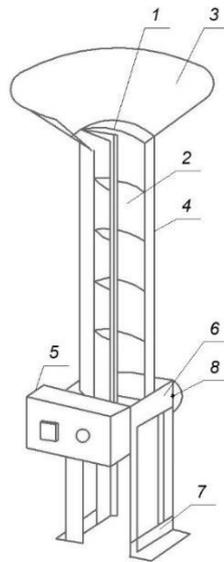


Рис. 1.2. Пристрій для знезараження зерна: 1 – електропровідний стрижень; 2 – діелектричні лопатки; 3 – завантажувальний бункер; 4 – циліндрична труба; 5 – генератор високої напруги; 6 – корпус; 7 – кріплення; 8 – вібратор [3].

Недоліком цієї технології є те, що під час обробки в електростатичному полі відбувається стимуляція зерен до проростання, тому такий спосіб доцільно застосовувати лише під час передпосівної обробки зерна [3].

Відомі також способи ультрафіолетового знезараження зерна. Проте для успішного проведення процесу необхідно подавати зерно тонким шаром, проникним для УФ-випромінювання, що потребує значних витрат часу [3].

Існує пристрій для охолодження зерна, який забезпечує вакуумне холодильне зберігання. Однак цей пристрій не знезаражує зерно, а лише на короткий час пригальмовує розвиток мікроорганізмів [3].

У деяких країнах для знезараження зерна застосовують невеликі дози радіоактивного іонізуючого гамма-випромінювання. Використання такої технології передбачає високотехнологічне виробництво та значні фінансові витрати. При цьому і виробництво, і сировина стають радіоактивними, тому для застосування цієї технології необхідно отримати спеціальний дозвіл [3].

Відоме також пристосування для гідратації біополімерів. Воно призначене для обробки зерна, насіння, плодів та іншої біомаси перед закладанням на зберігання (рис. 1.3) [3].

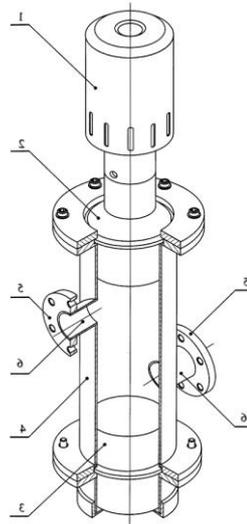


Рис. 1.3. Пристрій для гідратації біополімерів: 1 – електроакустичний перетворювач; 2 – акустичний хвильовий трансформатор; 3 – відбивач-резонатор; 4 – реактор; 5 – фланці; 6 – патрубки [3].

Цей спосіб дає змогу знизити мікробіологічне забруднення зерна завдяки інтенсифікації знезараження води, що його зволожує, та підвищенню вмісту бактерицидної речовини – перекису водню, яка утворюється внаслідок кавітаційного впливу. Недоліком цього пристрою є обмежений об'єм камери та технічна неможливість обробляти безпосередньо саме зерно, оскільки активується лише вода [3].

Відомий також пристрій – барабанний стерилізатор для знезараження сипких продуктів при поєднаному впливі озону та ультрафіолетового випромінювання (рис. 1.4) [3].

Барабанний стерилізатор містить циліндричну камеру дезінфекції, раму, пульт керування, електропривід і лоток для вивантаження знезараженої продукції. За його допомогою здійснюється дезінфекція продукції обробкою озоном у поєднанні з короткохвильовим УФ-випромінюванням. Недоліком озонування є те, що створюється гранична концентрація озону, яка є шкідливою для зерна. Крім того, озон стимулює схожість і проростання зерна, що є неприпустимим під час його зберігання [3].

На практиці також застосовують пристрій для комбінованого знезараження зерна з використанням електромагнітного поля надвисокої частоти (рис. 1.5). Сухе зерно, очищене від домішок, зволожують знезаражувальним водним розчином і обробляють в електромагнітному полі надвисокої частоти з високою щільністю потоку енергії [3].



Рис. 1.4. Барабанний стерилізатор [3].

Недоліком цього способу є негативний вплив СВЧ-випромінювання, який ґрунтується на високотемпературній обробці зерна, що призводить до денатурації білків і погіршення його якісних характеристик [3].

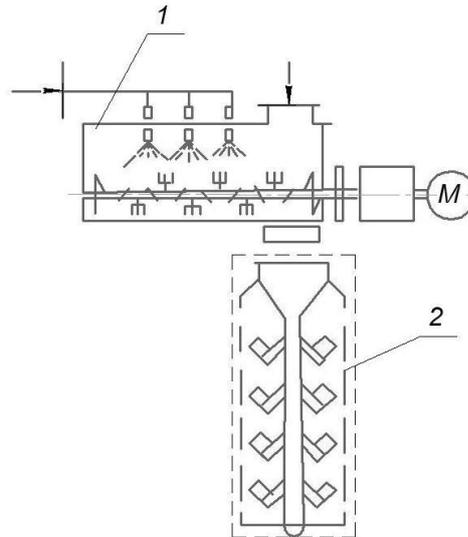


Рис. 1.5. Комбінований знезаражувальний пристрій: 1 – зволожувальна машина; 2 – вертикальна проточна робоча камера хвилевідного типу для СВЧ-обробки зерна [3].

1.2.4 Способи та засоби механізації технологічного процесу підготовки зерна до помелу

Однією з основних технологічних операцій у виробництві борошна, що забезпечує його подальші якісні показники, є підготовка зерна до помелу. В сучасних умовах у зерноочисному відділенні за допомогою відповідної обробки досягають зниження зольності шляхом видалення пилу та слідів зараження. Загальне зниження зольності в зерноочисному відділенні становить 0,1–0,15 %.

Сучасні великі зернопереробні підприємства оснащені значною кількістю різноманітних технологічних машин, які забезпечують очищення зерна від домішок, а також виконують інші операції, необхідні для надання зерну заданих властивостей, що гарантують оптимальні борошномельні показники.

Залежно від сорту отриманого борошна застосовують різні технології підготовки зерна до помелу, які відрізняються інтенсивністю технологічних операцій та складом обладнання (рис. 1.6 і 1.7).

Під час сортового помелу пшениці на млинових заводах до процесу підготовки зерна висуваються дуже високі вимоги. Окрім очищення від мінеральних домішок, проводять гідротермічну обробку зерна для надання йому оптимальних технологічних властивостей. Зерно проходить очищення на поточно-технологічній лінії з використанням 15–20 машин (рис. 1.6). Режими зволоження та тривалість відволожування зерна встановлюють залежно від його фізико-механічних властивостей.

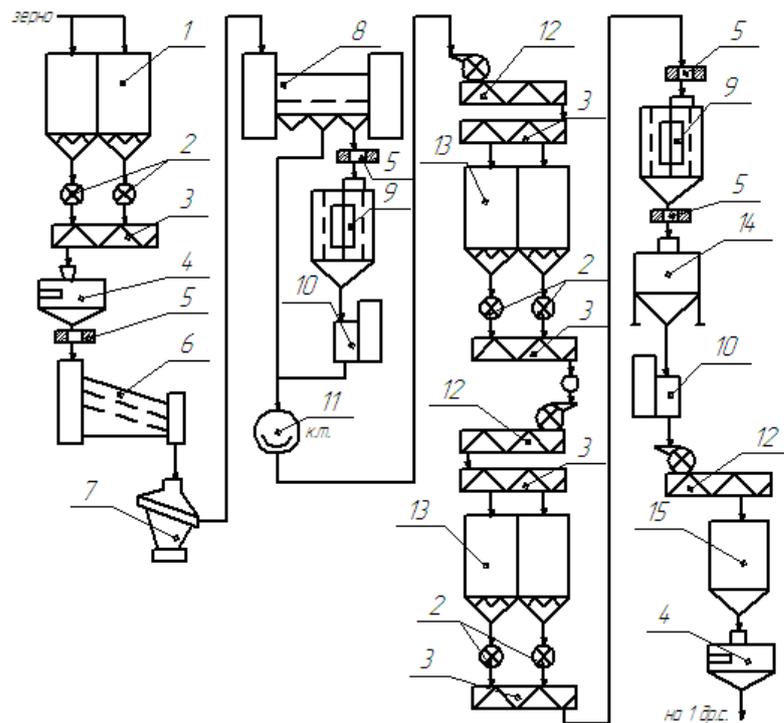


Рис. 1.6. Технологічна схема підготовки зерна до сортового помелу пшениці: 1 – бункери для неочищеного зерна; 2 – дозатор; 3 – шнек-змішувач; 4 – автоматичні ваги; 5 – магнітний сепаратор; 6 – повітряно-ситовий сепаратор; 7 – каменевідбірник; 8 – концентратор; 9 – оббивальна машина; 10 – аспіратор; 11 – трієр-вівсюговідбірник; 12 – зволожувальна машина; 13 – бункери для відволожування; 14 – ентолейтор; 15 – бункер для повторного зволоження.

Під час простого помелу пшениці отримують оббивне борошно, показники якості якого практично відповідають показникам якості зерна. Часто таке борошно називають цільнозерновим. Вихід борошна становить 96 %, висівок – 1 %, зольність – не менше ніж на 0,07 % нижча, ніж у зерна до очищення. Масова

частка сирій клейковини – не менше 20 %. Борошно має сіруватий відтінок із помітними частками оболонок зерна.

Під час оббивного помелу особливу увагу приділяють видаленню домішок із зерна за допомогою повітряно-ситових сепараторів 3 (рис. 1.10), каменевідбірників 4 і трієрів 5, 6. Очищення поверхні зерна здійснюють методом сухого луцення на оббивальних машинах 8 в один або два проходи. Гідротермічну обробку проводять у разі, якщо вологість зерна менша за 14 %.

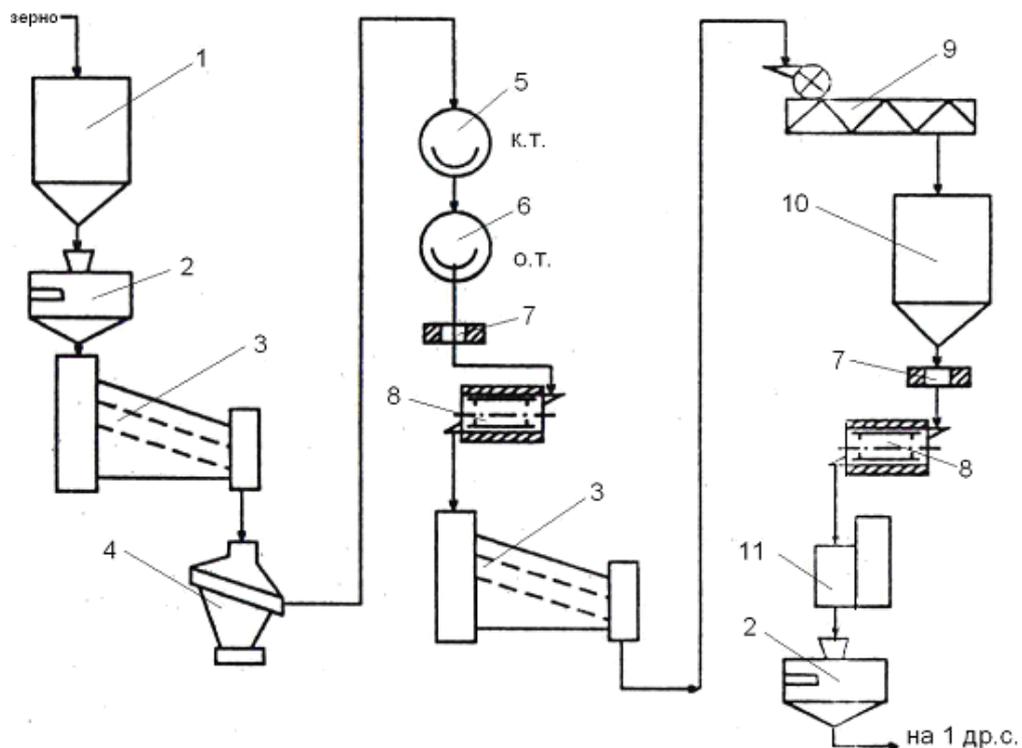


Рис. 1.7. Технологічна схема підготовки зерна до простого помелу для виробництва оббивного борошна: 1 – бункер для неочищеного зерна; 2 – автоматичні ваги; 3 – повітряно-ситовий сепаратор; 4 – каменевідбірник; 5 – куколевий трієр; 6 – вівсюговий трієр; 7 – магнітний сепаратор; 8 – оббивальна машина; 9 – зволожувальна машина; 10 – бункер для відволожування; 11 – аспіратор.

Однак під час простого помелу застосовувані операції підготовки зерна до помелу є малоефективними: зниження зольності при використанні оббивальних машин становить лише 0,07 %, а при застосуванні луцильних машин типу ЗШН – до 0,15 %, що негативно впливає на якість оббивного борошна.

У зв'язку з низькою ефективністю підготовчих операцій під час простого помелу виникає потреба в науковому обґрунтуванні нових технологій шляхом інтенсифікації процесу підготовки зерна до помелу, що підвищують якість його обробки.

Першою технологічною операцією підготовки зерна до помелу є сепарування, яке дає змогу відокремити від зерна різні домішки (сміттєві культури, мінеральні та металомангнітні частинки, легкі відходи). Цю операцію виконують за допомогою спеціальних сепараторів. На наступному етапі здійснюють очищення поверхні зерна, ступінь якого може бути різною. Через особливості анатомічної будови зерна очищення його поверхні під час сухого лущення є ускладненим. Борозенка та остюк створюють перешкоди для досягнення високого рівня очищення й повного видалення оболонки.

Одним із основних критеріїв готовності зерна є його вологість, яка забезпечує оптимальні параметри міцності та пластичності під час помелу, що безпосередньо впливають на якість борошна. Тому зерно проходить кілька стадій обробки: миття або вологе лущення, зволоження та гідротермічну обробку. Пшеницю піддають гідротермічній обробці, режими якої залежать від реологічних властивостей клейковини, склоподібності та інших показників.

Існує чотири основні типи гідротермічної обробки, які забезпечують нормативне зволоження зерна:

- холодне кондиціонування (застосовується при простому помелі);
- гаряче кондиціонування (може застосовуватися як при простому, так і при сортовому помелі);
- швидкісне кондиціонування (використовується лише при сортовому помелі);
- вакуумне кондиціонування (застосовується дуже рідко і тільки при сортовому помелі).

Холодне кондиціонування проводять за температури 18...20 °С або водою, підігрітою до 30...35 °С. Зерно зволожують, після чого його направляють на

відволожування, яке триває від 8 до 48 годин залежно від початкової вологості. У цей період відбувається перерозподіл вологи між анатомічними частинами зерна. Цей процес необхідний для набухання та розпушення ендосперму, утворення мікротріщин, послаблення зв'язків між алейроновим шаром і ендоспермом, що покращує процес помелу.

Однак холодне кондиціювання має низку недоліків:

1. У разі недотримання часових режимів відволожування можуть погіршитися показники клейковини. Зокрема, для слабкої клейковини холодне кондиціювання є небажаним через зниження пружності та збільшення пластичності структури зерна.

2. Неможливість досягнення високої інтенсивності процесу відволожування, оскільки він відбувається під дією статичних гідродинамічних сил, які проявляють максимальну інтенсивність лише на початковому етапі.

3. Процес залежить від ступеня зволоження кожного окремого зерна, тому воно повинно насичуватися водою рівномірно, що практично неможливо, оскільки не забезпечується обмивання кожного зерна.

4. Холодне кондиціювання не знезаражує зерно; навпаки — воно активізує розвиток зараження.

Під час гарячого кондиціювання спостерігаються глибші зміни структури зерна внаслідок термодинамічного впливу, а також прискорення процесу масопередачі. Ендосперм швидше розпушується, а оболонки стають більш еластичними. Для зерна зі слабкою клейковиною можливе покращення реологічних властивостей; при цьому відбувається активація ферментних систем зерна та переміщення їх до зони зародка, що сприяє синтезу і формуванню нового рослинного організму.

Під час швидкісного кондиціювання зволоження та нагрівання здійснюються парою при тиску, близькому до атмосферного. Цей спосіб інтенсифікує процес зволоження та прискорює розпушення ендосперму.

На кінцевий результат насичення зерна вологою при швидкісному кондиціюванні впливають такі фактори, як температура зерна та повітря в приміщенні, швидкість подачі зерна тощо. Пара сприяє більш рівномірному розподілу вологи в зернівці, ніж при холодному чи гарячому кондиціюванні, проте через високу температуру пари може відбуватися нерівномірне зміцнення клейковини зерна та навіть денатурація білка. Процес зволоження зерна є необхідним для доведення його до потрібних технологічних параметрів, полегшення відокремлення оболонки та забезпечення якісного помелу.

Слід зазначити, що жоден із способів кондиціювання не забезпечує знезараження зерна, оскільки багато мікроорганізмів стійкі до дії підвищених температур.

Обладнання для вологої обробки зерна на борошномельних підприємствах представлене машинами для зволоження А1-БШУ, А1-БУЗ, А1-БАЗ, а також обладнанням для миття та вологого луцення зерна Ж-БМБ, А1-БМШ.

Машина А1-БМШ (рис. 1.8) призначена для миття, віджимання та луцення зерна.

Зерно, що завантажується в машину через приймальний патрубок, подається в мийну зону, куди надходить вода. Гвинтоподібними лопатями зерно підіймається вгору, проходячи зони миття, віджимання, луцення та камеру викиду. Внаслідок тертя зерна об ситовий циліндр його поверхня частково очищається від надорваних оболонок. Недоліками цього пристрою є значна витрата води та високі енерговитрати.

Машина Ж9-БМБ (рис. 1.9) призначена для очищення поверхні зерна від дрібних фракцій пилу, частинок ґрунту, органічних та мінеральних домішок.

Зерно надходить через приймальний пристрій у ванну з водою, де воно відділяється від мінеральних домішок, після чого шнеком подається у віджимну колонку. Під дією відцентрової сили вологе зерно притискається до сітчастого циліндра і піднімається до випускного патрубку. Недоліками цього пристрою є

великі габаритні розміри та низька ефективність очищення зерна від мінеральних домішок.

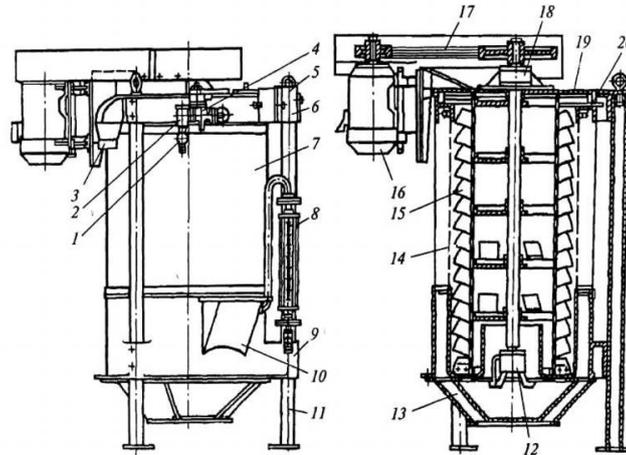


Рис. 1.8. Машина А1-БМШ: 1 – запірний вентиль; 2 – фільтр; 3 – випускний патрубок; 4 – мембранний вентиль; 5 – прилад для контролю подачі води; 6 – траверса; 7 – кожух; 8 – ротаметр; 9 – корпус; 10 – приймальний патрубок; 11 – стійки; 12 – нижній підшипниковий вузол; 13 – кільцевий конічний канал; 14 – лускатий (ситовий) циліндр; 15 – ротор; 16 – електродвигун; 17 – клинопасова передача; 18 – верхній підшипниковий вузол; 19 – кришка; 20 – трубчасте пластмасове кільце.

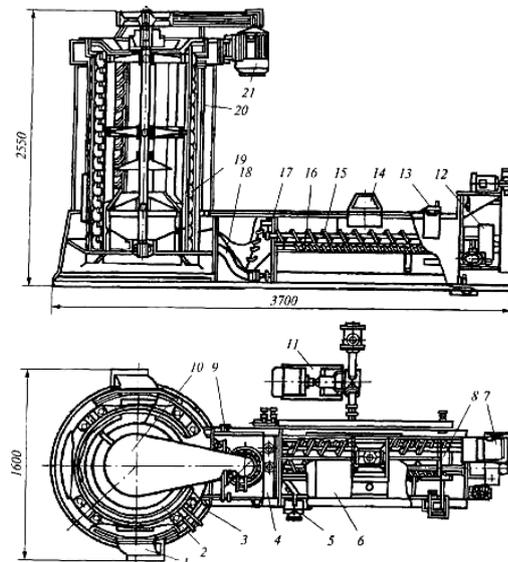


Рис. 1.9. Мийна машина Ж9-БМБ: 1, 5 – випускні патрубки; 2 – віджимна колонка; 3 – зрошувач; 4 – зливальний пристрій; 6 – ванна; 7 – електродвигун; 8 – воронка; 9 – патрубок; 10 – захисне огороження; 11 – насосна установка; 12 – редуктор; 13 – каменевіддільник; 14 – приймальний пристрій; 15 – шнек для

зерна; 16 – шнек каменевідділення; 17 – проміжна стінка; 18 – воронка труби; 19 – лопатки барабана; 20 – ситовий кожух; 21 – електродвигун.

Машини типу А1-БШУ випускаються у двох варіантах: А1-БШУ-1 і А1-БШУ-2. Машину А1-БШУ-1 встановлюють на початку третього етапу холодного кондиціювання — над бункером для зволоження зерна перед першою драною системою, а машину А1-БШУ-2 (рис. 1.10) використовують для основного зволоження. Її встановлюють замість мийної машини Ж9-БМА або машини А1-БМШ-1 для вологого лущення зерна, тобто на початку першого етапу холодного кондиціювання – перед розподільними гвинтовими конвеєрами, що направляють зерно у бункери для відволожування.

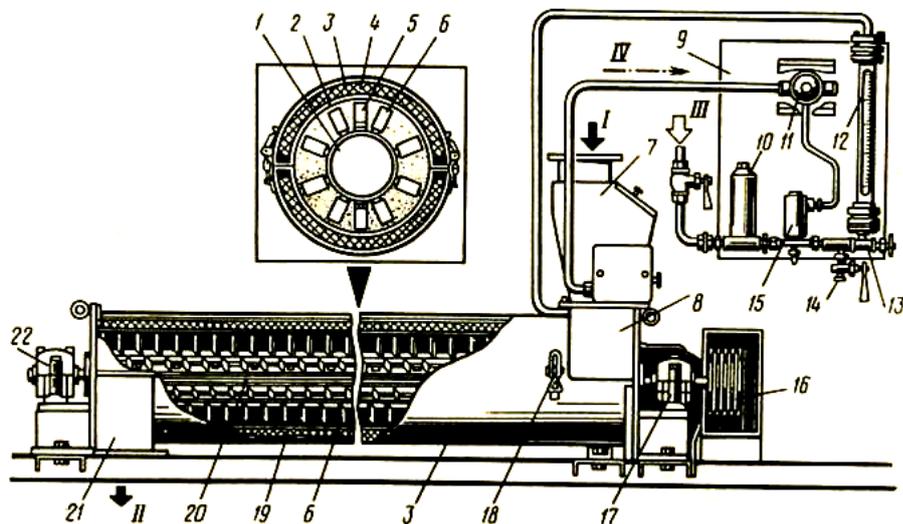


Рис. 1.10. Машина А1-БШУ-2 для зволоження зерна: 1 – вал; 2 – корпус; 3 – кожух; 4 – прокладка; 5, 6 – лопаті; 7 – індикатор наявності зерна; 8, 21 – приймальний і випускний патрубки; 9 – панель; 10 – фільтр; 11 – електророзетка; 12 – ротаметр; 13 – голчастий вентиль; 14 – зливний кран; 15 – електромагнітний вентиль; 16 – привід; 17, 22 – корпуси підшипників; 18 – запірний механізм; 19 – бич; 20 – шпилька.

Зерно подається в машину, переміщується бичовим ротором і під дією відцентрових сил відкидається до кожуха. Інтенсивне перемішування зерна з водою дає змогу використовувати зволожувальну машину як для закладання зерна у бункери відволожування, так і для повторного зволоження. Установки

типу А1-БШУ лише зволожують зерно, але не сприяють його очищенню від мінеральних домішок, пліснявих грибів і шкідників.

Технології підготовки зерна до сортового помелу базуються на використанні великої кількості технологічних машин і значних виробничих площ, що зумовлює тривалість процесу підготовки та високі економічні витрати.

Проведений аналіз показав, що технічні засоби для зволоження та миття зерна при його підготовці до сортового або оббивного помелу різняться за своїм складом. У разі сортового помелу зерно під час підготовки ретельно миють, з нього видаляють оболонку, алейроновий шар і зародок. Залишений ендосперм характеризується високою чистотою та мінімальною зольністю. При простому помелі біологічна структура зерна зберігається повністю.

Під час сухої обробки зерна застосовується мінімальна кількість машин, що не забезпечує якісного очищення оболонки від мінеральних забруднень і слідів зараження. І якщо при сортовому помелі очищення зерна відповідає всім нормативним вимогам, то при простому помелі воно є незадовільним.

РОЗДІЛ 2

ЗАКОНОМІРНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ТА ЕКСТРАГУВАННЯ ПРОДУКЦІЇ РОСЛИННИЦТВА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Закономірності, що зумовлюють підвищення ефективності очищення та екстрагування продукції рослинництва

Під час екстрагування й екстракції відбуваються процеси вилучення з твердих речовин макромолекул білка, антипоживних інгібіторів ферменту трипсину та уреаз, продуктів окиснення в нерафінованій соняшниковій олії, а також видалення мінеральних забруднень, слідів зараженості та відволожування зерна під час його підготовки до помелу.

Агрегатний стан фаз у оброблюваній сировині поділяється на «тверде тіло – рідина» для обробки зернових і зернобобових культур та «рідина – газ» під час обробки нерафінованої рослинної олії з кислотними вмісцями. Зазначені системи відрізняються кінетикою масоперенесення, і процеси екстрагування описуються такими стадіями:

- проникнення розчинника в пори частинок оброблюваного твердого тіла (зерна);
- розчинення та відрив із оброблюваної поверхні цільового компонента (інгібітора трипсину і уреаз для зернобобових, а також мінеральних забруднень і осередків ураження для зернових);
- перенесення екстрагованої речовини всередині частинки сировини до поверхні поділу фаз і проникнення в пори й капіляри зерна для його зволоження;
- перенесення екстрагованої речовини в рідкій фазі від поверхні поділу та насичення зерна вологою до досягнення нормативної вологості;

- створення напрямку перенесення дрібнодисперсних зважених частинок забруднень і продуктів окиснення нерафінованих рослинних олій в адсорбент, відділення їх від фільтраційної поверхні та перенесення в збірну ємність.

При цьому у статичному стані процес масоперенесення відбувається за уповільненим сценарієм, коли кожна наступна зона пор і капілярів починає омиватися лише після створення напрямку потоку попереднім омиванням. Увесь процес інерційний і дуже тривалий. Наприклад, зволоження зерна пшениці до вологості 14,5–17,0 % традиційно виконується у спеціальних ємностях і триває від 8 до 48 год залежно від початкової вологості. Це є нетехнологічним і затратним процесом.

Очевидно, що процес масоперенесення необхідно прискорювати, і це вже давно здійснюється, наприклад, із використанням тепла, розчинювальних реагентів, різноманітних фізичних, електрофізичних і хімічних методів обробки. Також очевидно, що всім відомим методам притаманні певні переваги та недоліки, які слід враховувати під час розроблення нових технологій.

Сучасний стан питання технологічного впливу на продукцію рослинництва полягає в тому, що обробка здійснюється за умов одночасної взаємодії кількох операцій технологічних процесів, що забезпечують ресурсозбереження, високу якість, продуктивність, технологічну досконалість та можливість автоматизації виробництва.

2.2 Застосовуване лабораторне обладнання та апаратура

При проведенні експериментальних досліджень використовували стандартне і нестандартне обладнання та апаратуру, що дозволяють в лабораторних умовах проводити експерименти, спрямовані на підтвердження даних теоретичного аналізу процесових явищ масопередачі в умовах гідродинамічного, гідротермічного та акустичного впливів на оброблюваний рослинницький матеріал, оцінювати їх кількісними характеристиками та

якісними показниками, досліджувати режимні складові технологічних процесів і на підставі отриманих даних після їх обробки виробити конструктивні рішення для розробки дослідно-конструкторського обладнання.

При проведенні експериментальних досліджень обробці піддавали: пшеницю Миронівська 89, сою Злато, Бара, Соєр 4, Соєр 5.

Для проведення експериментів використовували установки УЗУ 4-1.6-О, УОМ-2, ПСБ-Галс, РАП-01 (рис. 2.1), а також ультразвуковий занурювальний випромінювач.



а



б



в



г

Рис. 2.1. Ультразвукові установки: а – УЗУ 4-1.6-О; б – УОМ-2; в – ПСБ-Галс; г – РАП-01

Ультразвукове обладнання відповідає українським стандартам. В основу методики дослідження покладено логічний взаємозв'язок, що дозволяє вивчати вплив температури, частоти ультразвукових коливань, інтенсивності ультразвукового поля і часу обробки на показники якості зерна, що обробляється.

В якості лабораторної була прийнята установка УЗУ 4-1.6-О, яка дозволяє змінювати частоту ультразвукових коливань і температуру води, що дає можливість визначати раціональні інтервали режимних параметрів обробки (рис. 2.2).

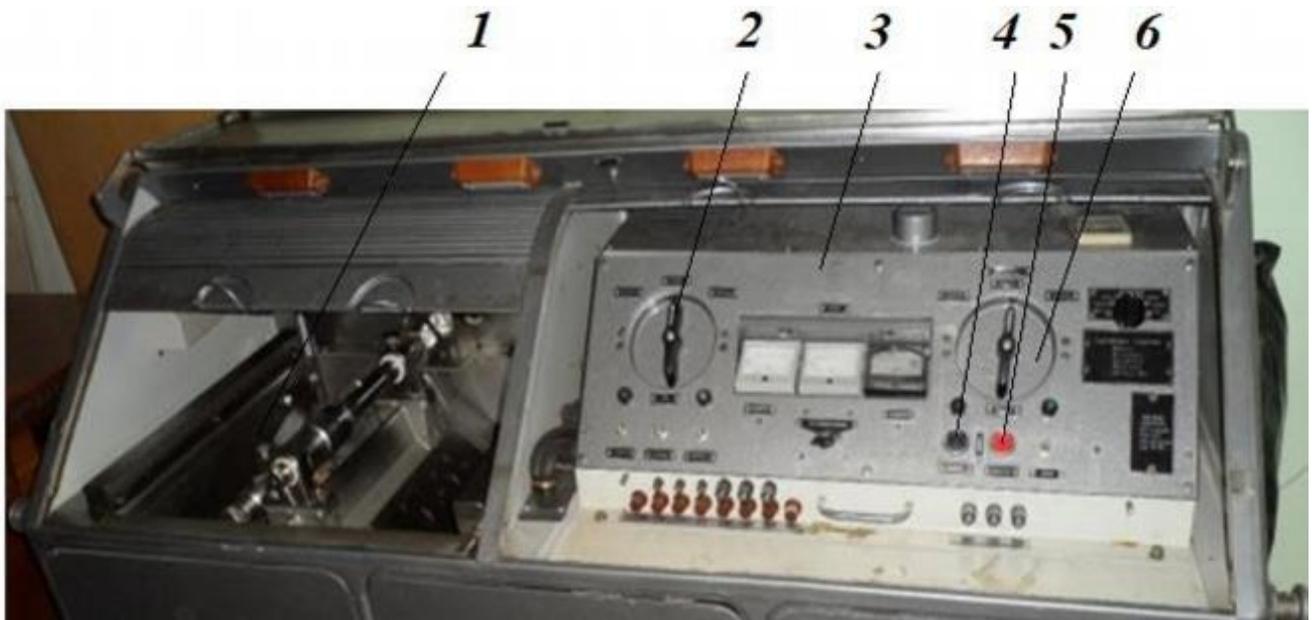


Рис. 2.2. Лабораторна установка УЗУ 4-1.6-О: 1 – ультразвукова ванна; 2 – перемикач живлення ультразвуку між ваннами; 3 – панель приладу; 4 – кнопка «пуск»; 5 – кнопка «стоп»; 6 – перемикач живлення ТЕНів двох ванн

За основні якісні показники брали: абсолютну кількість мінеральних забруднень поверхні зерна, зольність, вологість, вміст білка, клейковини, мікротвердість.

Для дослідження ефективності обробки партії зерна масою 300 г піддавали впливу ультразвуку в діапазоні частот 20–35 кГц в ультразвукових установках при різній інтенсивності ультразвукових хвиль (від 0,3 до 1 Вт/см²) від 1 до 40 хв з розчином аноліту АНК і без нього.

Контролем служили нативне зерно (контроль I) і зерно, що піддавалося впливу ультразвуку у воді (контроль II). Мікробіологічні дослідження проводили за ДСТУ. Зерно досліджували на наявність бактерій і цвілевих грибів на третій, четвертий і п'ятий день після висіву на агаризоване живильне середовище шляхом підрахунку колоній.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Результати експериментальних досліджень показників зерна після ультразвукової обробки

Теоретичними дослідженнями встановлено основні закономірності процесів масопередачі, інтенсифікованих акустичними коливальними рухами. Визначено інтервальні граничні значення амплітуди, частоти, інтенсивності та часу ультразвукових впливів [1].

Експериментальні дослідження показали, що шляхом ультразвукового впливу досягаються високі показники очищення та спостерігається початок лущення оболонки зерна. Це пояснюється тим, що ультразвук сприяє виникненню потужних мікроударних хвиль і мікропотоків, які породжуються пульсуючими кавітаційними бульбашками, що схлопуються [1].

Пульсуючі багаторазові гідродинамічні кумулятивні мікропотоки при схлопуванні кавітаційних бульбашок відокремлюють від поверхні зерна забруднення, а також викликають часткове відшаровування плодової оболонки від алейронового шару. Час і енерговитрати на проникнення вологи в алейроновий шар і ендосперм зерна значно, у кілька разів, скорочуються завдяки інтенсивному зародженню та утворенню мережі мікротріщин, які вбирають у себе вологу, що безперервно спрямовується пульсуючими мікропотоками [1].

Ця обставина також свідчить про інтенсифікацію процесу зволоження структури зерна шляхом збільшення рушійної сили масопередачі за рахунок дії пульсуючих мікропотоків [1].

Виходячи з проведених розрахунків, встановлено раціональні режимно-конструктивні показники, що стали основою для експериментальних досліджень параметрів підготовки зерна до помелу (табл. 1). Під час експериментальних досліджень з метою визначення раціональних технологічних режимів

інтенсифікації процесу відволожування зерна вивчали інтервали температури нагрівання води — 20 °С, 25, 30, 40 °С при змінній частоті ультразвуку 18 кГц, 18,15; 18,3; 18,5 кГц і тривалості УЗ-обробки 20 с, 40, 60, 80 с. На рис. 1, 2, 3 наведено зразки зерна до та після акустичної обробки [1].

Таблиця 3.1 – Зведені розрахункові режимно-конструктивні параметри установки для обробки зерна

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Максимальний радіус кавітаційні порожнини R_{\max} , м	0,00123	Інтенсивність УЗ-хвиль I , Вт/см ²	0,99
Кавітаційна область $E_{об}$, Дж	$0,77 \cdot 10^{-3}$	Направлення поширення УЗ-хвиль β , град.	30
Частота УЗ-коливань f , кГц	18	Довжина установки h , м	1,1
Довжина хвилі λ , м	0,083	Діаметр камери УЗ-обробки, м	0,4
Амплітуда УЗ-коливань A , м ³	1,22	Об'єм камери УЗ-обробки V_k , м ³	0,138
Відстань від джерела УЗ- коливань, м	0,6	Діаметр джерела УЗ, м	0,2
Коефіцієнт поглинання УЗ-хвиль α	$64 \cdot 10^3$	Кількість джерел УЗ, од.	6



a

б

Рис. 3.1. Стан поверхні зерна (4×): а – обробленого акустичною кавітацією у воді; б – необробленого [1].



Рис. 3.2. Зерно, оброблене ультразвуком із частотою 18 кГц протягом 30 с (4×).

Вплив пульсуючих мікропотоків на зерно призводить до утворення в ньому мікротріщин, які заповнюються водою, викликаючи його набухання та надирив оболонки, що в кілька разів підсилює процес масопередачі та, відповідно, відволожування (див. рис. 3.2) [1].

Дослідженнями встановлено, що збільшення частоти та інтенсивності ультразвуку призводить до руйнування плодової оболонки й пошкодження поверхні зерна (див. рис. 3.3), що є небажаним [1].



Рис. 3.3. Зерно пшениці після впливу ультразвуку з частотою 20 кГц та інтенсивністю 3 Вт/см² у воді (4×) [1]

Вагому роль при оцінюванні якості борошна відіграє чистота поверхні оболонки зерна та наявність слідів зараженості, накопичувачами яких є борозенка і борідка. Вони повинні перебувати в ідеальному стані. З цією метою перевіряли якість очищення та профілактичної обробки зерна під час його підготовки до зберігання [1]. На поверхні зерна пшениці виділяють кілька типів забруднень: мінеральні частинки (пил, пісок), органічні залишки (солома, частинки плевел), мікроорганізми (бактерії, грибки) та хімічні забруднювачі (залишки пестицидів). Адгезія цих забруднень варіюється від 5 до 1000 Па залежно від їхньої природи, розміру частинок і локалізації на зерні. Найбільшу міцність зчеплення демонструють мікроорганізми – до 1000 Па в області борозенки та борідки, де щільність мікробіологічного забруднення сягає 10^6 КУО/см². Щільність розподілу мінеральних домішок становить 0,8–1,2 мг/см², при цьому до 70% концентрується в борозенці та борідці зерна [1].

Зольність зерна є показником, що характеризує, зокрема, і незернові складові, такі як мінеральні забруднення та сліди зараженості.

Експериментально підтверджено, що на зольність зерна впливає якість очищення його поверхні. Концентрація мінеральних речовин, що впливають на загальні параметри показника зольності зерна, залежить від анатомічних частин зернівки. У активному стані в зернах пшениці та жита зольність становить 1,5–2,3 %, а в оболонці – 3,5–24,5 %. При цьому більша частина мінеральних забруднень (до 65 %) знаходиться на оболонці. Таким чином, при повному видаленні мінеральних забруднень, слідів цвілевих грибів і шкідників зольність у зерні можна довести до досить низьких показників, коли вона буде формуватися здебільшого анатомічними складовими зерна.

Результати експериментальних досліджень зольності зерна представлені на рис. 3.4 і 3.5. При вихідній зольності 1,8 % мінімальні показники після обробки ультразвуком частотою 18 кГц при нагріванні води до 40 °С досягають рівня 1,05 % (час обробки 80 с), що свідчить про високу якість очищення оболонки.

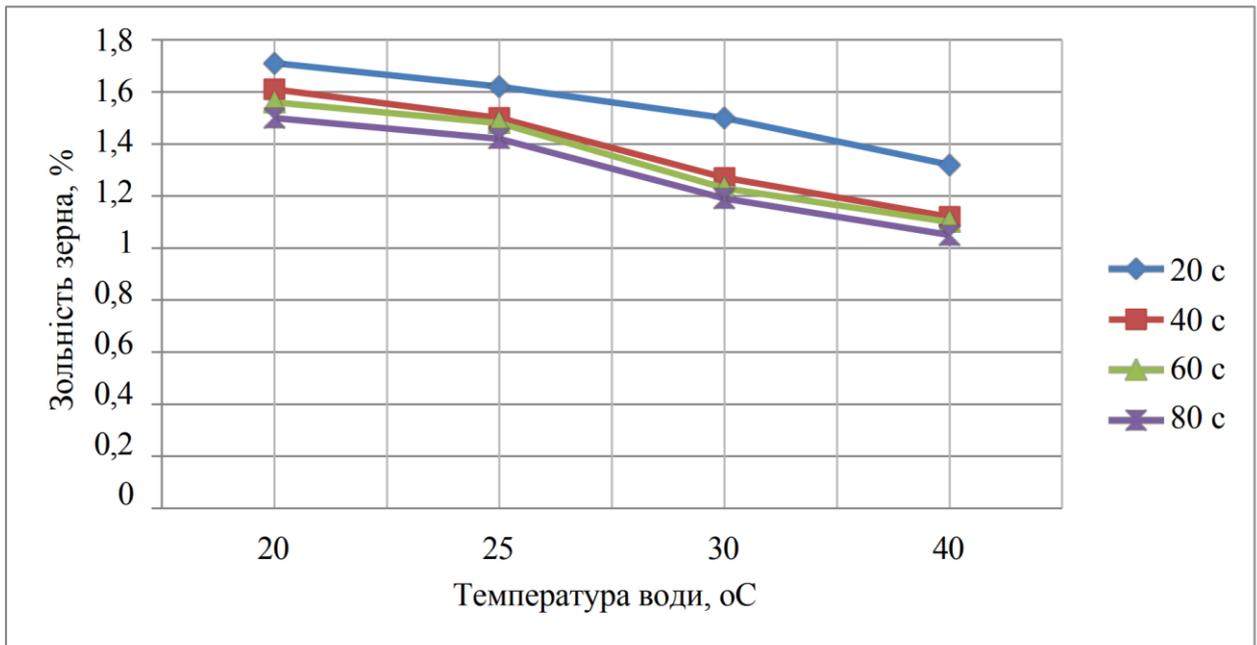


Рис. 3.4. Залежність зміни зольності зерна від часу обробки і температури води (частота ультразвукових коливань 18 кГц)

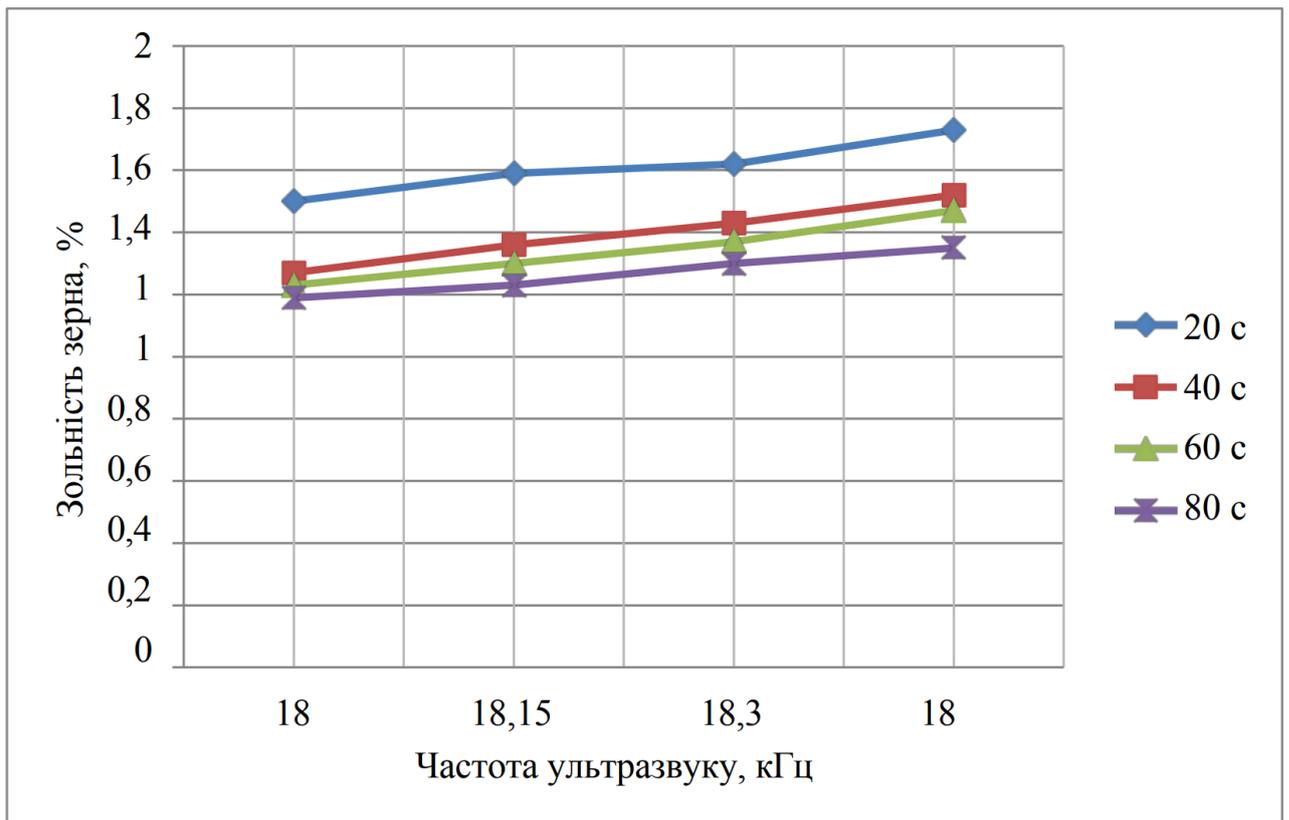


Рис. 3.5. Залежність зміни зольності зерна від часу обробки і частоти ультразвукових коливань (температура обробки 30 °С)

За підсумками досліджень прийнято рішення прийняти частоту ультразвукових коливань 18 кГц, температуру нагрівання води 30 °С, оскільки отриманий показник зольності 1,19–1,2 % є досить високим, зниженим більш ніж на 60 % у порівнянні з показником, отриманим сухим луценням, що застосовується при простому помелі. Слід також зазначити, що підвищені показники частоти ультразвуку, часу обробки і температури нагріву не покращують результативність.

Мікротвердість зерна відноситься до структурно-механічних міцнісних характеристик. Вона характеризує технологічну готовність зерна до помелу і залежить від його зволоженості. Встановлено, що після сухого луцення і відволоження в ємностях протягом 26 годин всього 33,3 % зерна підготовлено до якісного помелу. Вкрай нестабільний процес відволоження супроводжується надмірною міцністю структури, що перевищує 15 кг/мм², що вимагає збільшення зусилля, що докладається для руйнування ендосперми та алейронового шару в мельному обладнанні. У технологічному плані це призводить до неможливості отримання фракції тонкого помелу внаслідок високої стійкості зерна до руйнування. У технічному плані відбувається зниження зносостійкості вальців і показників надійності, безвідмовності та довговічності обладнання. Знижена міцність (менше 13 кг/мм²) тягне за собою підвищення пластичності структури зерна. У даному випадку в технологічному плані має місце сплющення мікрочастинок, відповідно, знижується якість борошна. У технічному плані погіршується процес помелу зерна вальцями, забиваються розмельні ризики за рахунок залипання матеріалу, виникає необхідність частих технічних обслуговувань обладнання.

Експериментально вивчено залежності мікротвердості зерна від часу УЗ-обробки, частоти ультразвуку і температури (рис. 3.6 і 3.7).

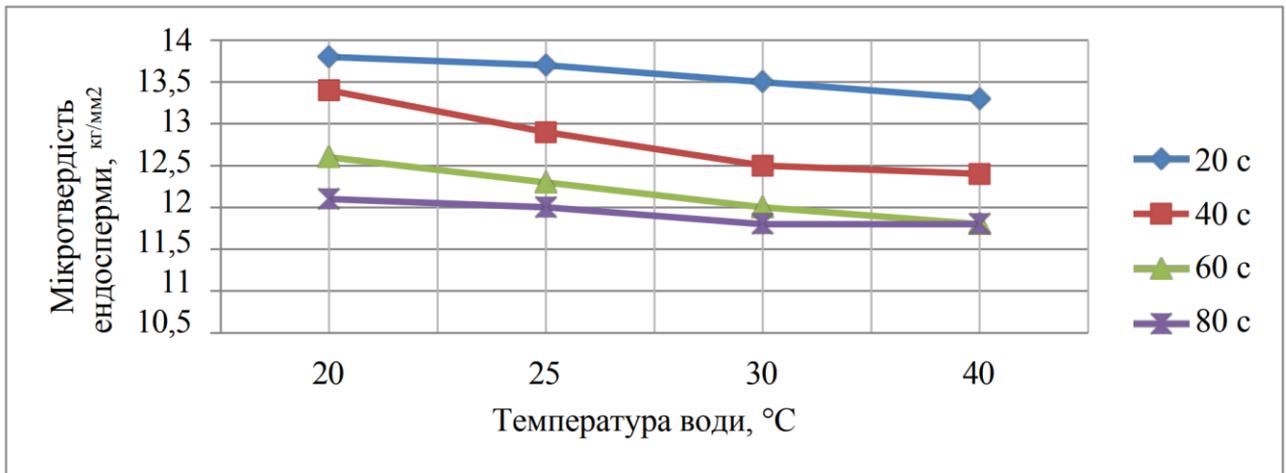


Рис. 3.6. Залежність мікротвердості зерна від часу обробки і температури води (частота ультразвукових коливань 18 кГц)

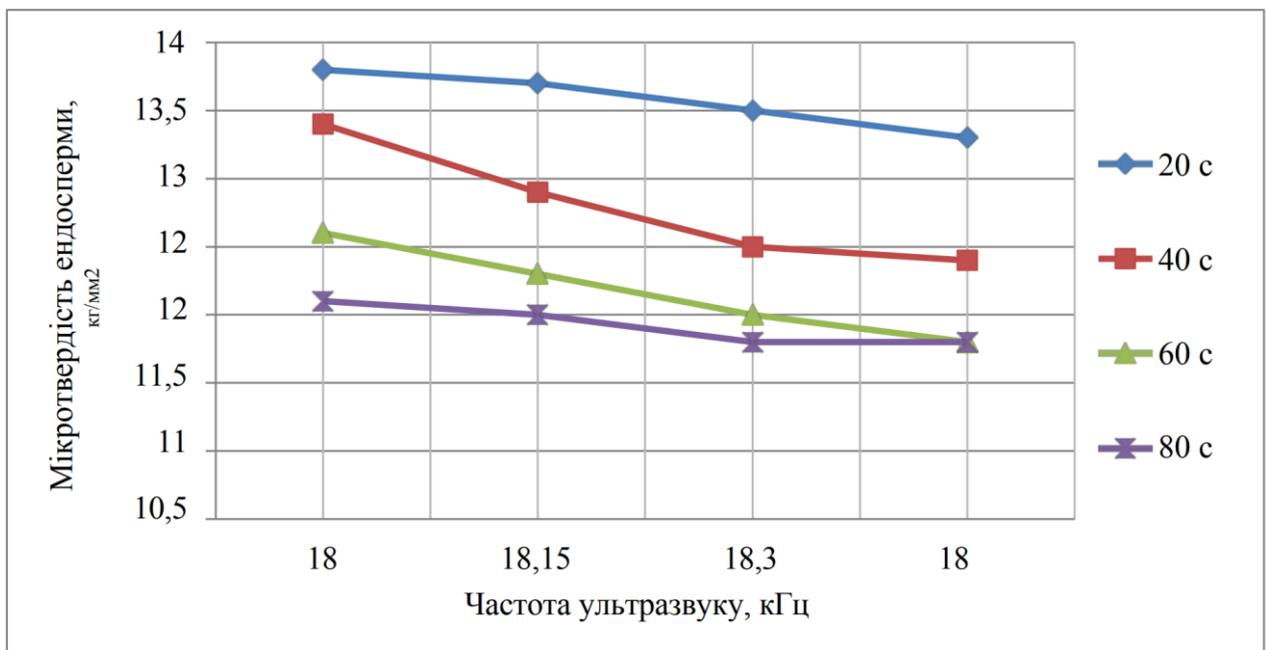


Рис. 3.7. Залежність мікротвердості зерна від часу його обробки та частоти ультразвукових коливань (температура води 30 °C)

Результати досліджень показали, що ультразвукова обробка дозволяє стабілізувати міцність ендосперму і алейронового шару та забезпечити нормовані помольні показники. Свого оптимуму 13,0–13,4 кг/мм² цей показник досягає при ультразвуковій обробці в діапазоні 18,0–18,5 кГц, температурі нагрівання суспензії 30...40 °C і часі обробки 30–40 с. У даних діапазонах досягається 100%-ва підготовленість зерна до помелу.

Зерно, що поставляється на зернопереробні підприємства, може бути уражене цвілевими грибами та мікотоксинами. Ця обставина негативно впливає на якість борошна та хлібобулочних виробів.

При виробництві обойного борошна профілактичну обробку зерна не проводять, а для профілактичної обробки зерна при його зберіганні та підготовці до сортового помелу застосовують спосіб, заснований на використанні безпечного засобу розчину аноліту для знезараження зерна при ультразвуковій обробці.

При експериментальних дослідженнях знезараження та очищення зерна, призначеного для зберігання, використовували частоти ультразвуку 20 кГц; 24; 26; 35 кГц, інтенсивність 0,3 Вт/см²; 0,5; 1,0 Вт/см², час УЗ-обробки – 1 хв; 10; 20; 30; 40 хв [7].

Зерно на наявність мікотоксинів досліджували методом рідинної хроматографії за стандартними методиками [2, 3]. Результати представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Допустимий і дійсний вміст мікотоксинів у зерні пшениці

Показник	Допустиме нормативне значення, мг/кг	Експериментальний показник, мг/кг	Нормативні документи на методи вимірювань	Плісняві гриби, що продукують мікотоксини
Афлатоксин В ₁	не більше 0,02	0,04	ФР 1.31.2008.04629	<i>Aspergillus</i>
Т-2 токсин	не більше 0,1	0,01	МУ 3184-84	<i>Fusarium</i>
Охратоксин А	не більше 0,05	0,03	ДСТУ	<i>Aspergillus, Penicillium</i>

У зерні пшениці виявлено підвищений вміст афлатоксину В₁, Т-2 токсин і охратоксин А знаходяться в допустимому інтервалі. Вміст афлатоксину В₁ перевищує в два рази нормативні показники.

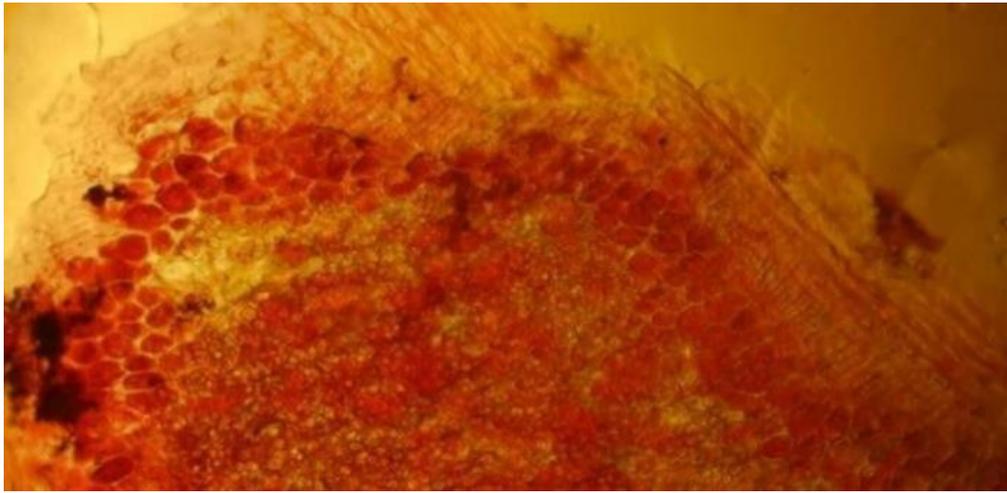


Рис. 3.8. Зріз сухого зерна пшениці, що містить мікотоксини (1000×)

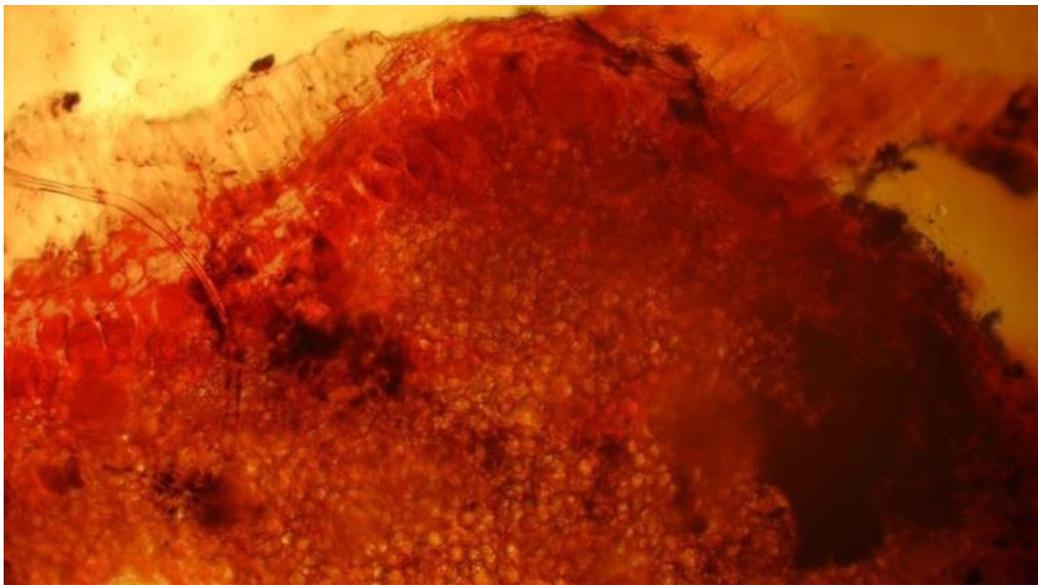


Рис. 3.9. Зріз мокрого зерна пшениці, що містить мікотоксини (1000×)

Встановлено, що при простому зволоженні зерна площа пошкодження мікотоксинами значно підвищується (див. рисунок 3.7). Це свідчить про інтенсивне зростання зараженості, що ще раз підтверджує необхідність скорочення часу відволоження не тільки з виробничих причин, але і з причини зменшення зараженості зерна мікотоксинами.

Продуцентами мікотоксинів є цвілеві гриби [6], тому для запобігання зараження і поширення необхідно проводити профілактичну обробку зерна від цвілевих грибів на стадії передачі на зберігання, а не боротися з результатами їх життєдіяльності в період зберігання і при підготовці до помелу.

Найбільш ефективною виявилася обробка зерна в розчині аноліту ультразвуком частотою 26 кГц при інтенсивності ультразвуку 1 Вт/см^2 і часі обробки 30 хв (рис. 3.10).

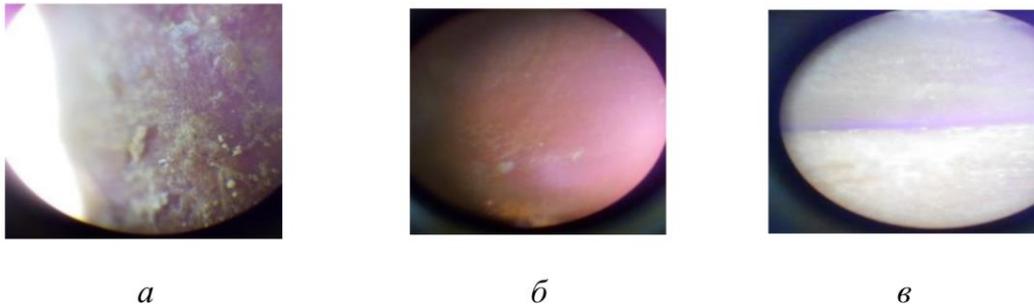


Рис. 3.10. Вплив ультразвуку частотою 26 кГц і аноліту АНК на розвиток цвілевих грибів на поверхні зерна ($160\times$): а – нативне зерно; б – оброблене ультразвуком у воді; в – оброблене ультразвуком у розчині аноліту АНК.

Слід зазначити, що після обробки поверхня зерна була абсолютно чистою, навіть у зоні борозенки та борідки (див. рис. 3.10, в).

На рис. 3.11 представлені зразки росту колоній нативного зерна (а); зерна, обробленого ультразвуком частотою 26 кГц у воді (б) і в середовищі аноліту (в).

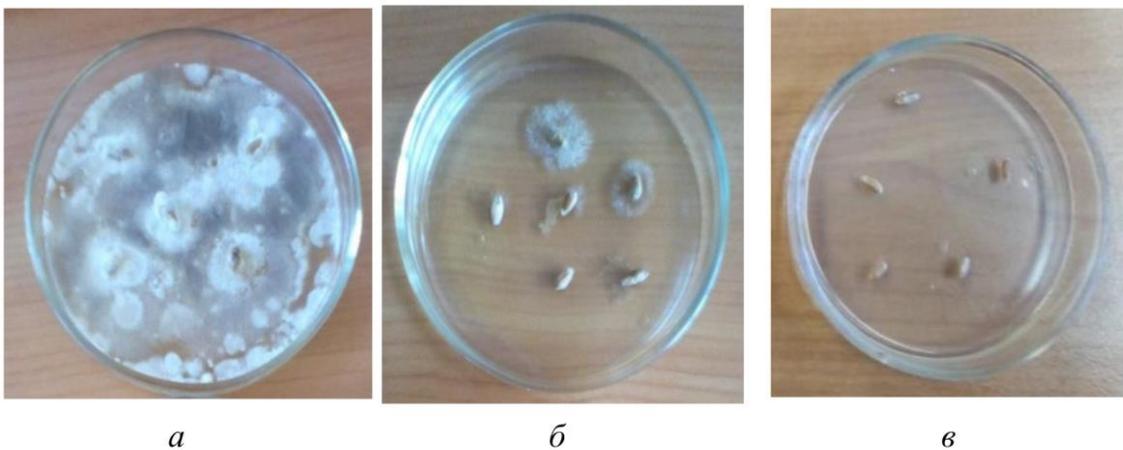


Рис. 3.11. Ріст колоній мікроорганізмів зерна, обробленого ультразвуком у воді та аноліті АНК: а – нативне зерно; б – зерно, оброблене ультразвуком у воді; в – зерно, оброблене ультразвуком у середовищі аноліту

Зростання колоній мікроорганізмів спостерігається протягом усього періоду досліджень. На першій стадії в нативному зерні це відбувається через їх наявність у природі і, відповідно, від безлічі природних умов (стан насіння,

умови вирощування, збирання та зберігання). Надалі колонії мікроорганізмів тільки збільшуються, піддаючи зараженню і псуванню всю оболонку зерна і його внутрішню структуру. На рис. 3.11 (а) чітко відображена картина розвитку мікроорганізмів. На цій підставі впливає, що профілактична обробка необхідна вже на стадії приймання і зберігання. Однак навіть при дотриманні цієї умови мікроорганізми в зерні мають властивість регенерувати і поширюватися при зберіганні, на оболонці при цьому утворюються нові колонії.

Їх досить ефективно можна видалити обробкою ультразвуком у воді (див. рис.3.11, б), але вогнища розвитку не зникають. Очевидно, що необхідна активація процесу, покликана звести нанівець вогнища розвитку. Ця мета може бути досягнута шляхом використання розчину аноліту (див. рис. 3.11, в).

Аноліт відноситься до 4-го класу малотоксичних речовин згідно з ДСТУ, є екологічно чистим розчином високоактивних кисневих сполук хлору та озону. Він має дезінфікуючу, стерилізуючу та універсальну біоцидну дію і повністю інактивує життєдіяльність продуцентів мікотоксинів.

При дослідженні зерна пшениці на наявність бактерій і цвілевих грибів спосіб ультразвукової обробки показав наступні результати (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Результати мікробіологічного дослідження зерна, обробленого ультразвуком частотою 26 кГц

Вид обробки	Вміст мікроорганізмів, %	Зниження вмісту мікроорганізмів, %
Обробка в розчині аноліту без ультразвуку	25	75
Ультразвукова обробка у воді	37	63
Ультразвукова обробка в розчині аноліту	2	98

Обробка зерна в середовищі аноліту при частоті ультразвуку 26 кГц і інтенсивності хвилі 1 Вт/см^2 протягом 30 хв дозволила придушити розвиток мікрофлори на 98 %. Це свідчить про виключно високий ступінь знезараження.

При обробці зерна пропонованим способом його оболонка не пошкоджується, відбувається очищення поверхні і знезараження, тому даний

спосіб можна рекомендувати для профілактичної обробки зерна перед переробкою або при його закладці на зберігання.

3.2. Обґрунтування конструкції універсального обладнання безперервної дії для обробки зерна пшениці та сої

Виходячи з даних теоретичного аналізу, експериментальних даних і результатів математичного моделювання для конструктивного рішення найбільш перспективною прийнята схема універсального технічного засобу безперервної дії, заснованого на принципі роботи шнекового подаючого транспортного механізму. Ідея використання шнекового механізму сконцентрована насамперед на можливості створення декількох робочих зон на одному валу і корпусі шнека, зміни частоти обертання валу шнека за допомогою мотор-редуктора і частотного перетворювача і на цій основі варіювання часом проходження оброблюваного матеріалу під дією ультразвукових хвилеводів, встановлених на корпусі. Поряд з цим на одному шнековому валу можна проектувати гвинти різних конструктивних розмірів і кількості в залежності від передбачених процесів в технологічних операціях. Розглянуте технічне рішення має унікальні властивості універсальності, що забезпечують безперервне виконання всіх технологічних операцій: завантаження зерна сої, створення водно-соевої суспензії, обробка суспензії ультразвуком протягом встановленого часу, попереднє і остаточне віджимання обробленої продукції та її вивантаження.

Це дозволяє за рахунок основних встановлених режимних показників здійснити важливу складову сучасного виробництва кормів і харчових продуктів – часткову автоматизацію, яка полягає в автоматизації технологічних операцій і найбільш ефективна тоді, коли управління процесами внаслідок їх складності, прихованості і швидкоплинності практично недоступне людині.

Розроблене обладнання дозволяє використовувати його з високим ступенем ефективності для різних технологічних цілей при переробці сипучих матеріалів

рослинницької продукції і суспензій, в першу чергу зернових і зернобобових культур, а також насіння соняшнику. Це забезпечується за рахунок встановлених режимних і конструктивних параметрів: діаметра і довжини труби шнека і частоти обертання вала шнека від приводного механізму. Найбільш технологічно і технічно кращим є те, що по довжині єдиного шнекового валу можна розмістити різні зони для виконання різних технологічних операцій, які в сукупності складають закінчений технологічний процес. Технологічні процеси підготовки зерна до помелу, очищення різних сипучих матеріалів продукції рослинництва та інактивації зерна сої в загальному вигляді ідентичні, є лише відмінності в кінцевій меті обробки.

Шнековий подаючий транспортний пристрій використовується на практиці переважно для переміщення сипучих вантажів і різних видів суспензій. У нашому випадку переміщення доповнено технологічними операціями ультразвукової обробки зерна пшениці та сої.

Конструктивна схема шнекового подаючого транспортера для ультразвукової обробки зерна пшениці та сої представлена на рис. 3.12.

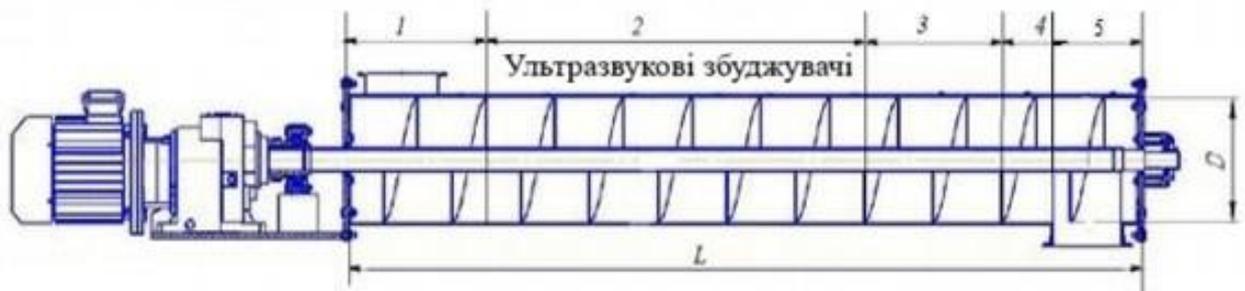


Рис. 3.12. Конструктивна схема шнекового подаючого транспортера

Конструктивно шнековий механізм розташований у трубі і по довжині поділяється на робочі зони (див. малюнок 4.45): 1 – приймання матеріалу для обробки і створення водно-зернової суспензії; 2 – ультразвукова обробка; 3 – попереднього віджиму; 4 – остаточного віджиму обробленої сировини; 5 – вивантаження обробленої сировини. При цьому всі технологічні операції з переробки сипучої продукції рослинництва можуть бути зведені в одну загальну

технологічну схему, доповнену для прикладу вхідними даними для конструювання установки для інактивації зерна сої.

У технологічній схемі представлені узагальнені дані, що враховують особливості технологічних процесів, для яких проектується установка. Зокрема, для установок для переробки зерна сої та пшениці визначені такі вхідні дані:

- ультразвукова обробка зерна сої та пшениці повинна відбуватися в суспензії пропорцією 50:50; для забезпечення постійного рівня рідини шнековий механізм повинен бути розташований під кутом до горизонталі і забезпечений підживлювальним пристроєм; для встановлення робочої температури обробки суспензії пристрій повинен мати систему підігріву;

- залежно від часу обробки суспензії установку необхідно укомплектувати п'єзоелектричними коливальними системами з п'єзокерамічними елементами, послідовно сформованими хвильовими модулями, що мають кілька випромінюючих поверхонь; дане конструктивне рішення дозволить знизити сумарний час УЗ-обробки і збільшити площу оброблюваної поверхні;

- установка повинна бути пристосована до потоково-технологічної лінії кормового цеху і борошномельного підприємства;

- установка повинна бути мобільною і модульно вбудовуваною у виробництво;

- установка повинна бути легко переналаштовуваною для обробки різної продукції кормової та харчової промисловості відповідно до призначення та мети обробки;

- робоча частина і живильний шнек установки повинні забезпечувати обробку матеріалу в межах встановленого критичного часу.

Схема установки представлена на рис.3.13.

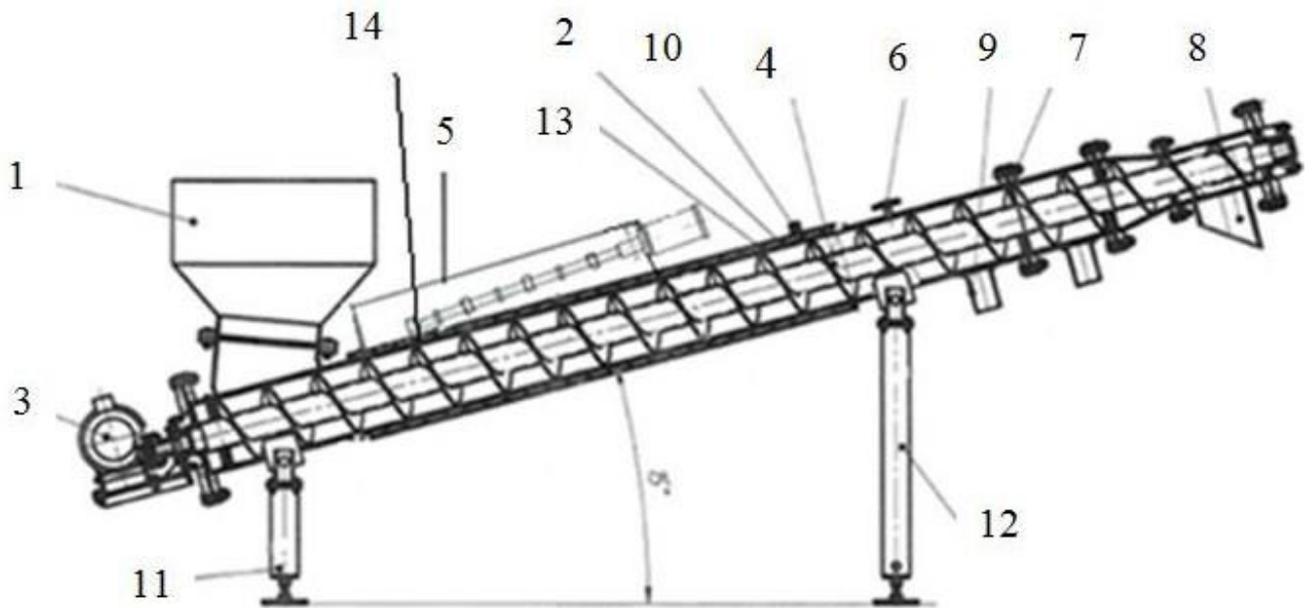


Рис. 3.13. Схема ультразвукової установки для обробки зерна: 1 – бункер; 2 – корпус; 3 – мотор-редуктор; 4 – шнек; 5 – ультразвуковий випромінювач; 6 – штуцер подачі води; 7 – перфорована перегородка; 8 – вивантажний патрубков; 9 – патрубков з сіткою для відведення води; 10 – датчик температури; 11 – нерухома стійка; 12 – регульована стійка; 13 – кабельний нагрівач; 14 – захисний екран з утеплювачем

Зерно завантажують у бункер 1, за допомогою шнека 4 воно переміщується вгору по корпусу 2 установки. Ультразвукова обробка зерна здійснюється системою послідовних ультразвукових п'єзоелектричних випромінювачів 5, розташованих по всій довжині зони обробки ультразвуком. Через штуцер 6 в корпус подається вода в кількості, необхідній для підтримки рівня вологого зерна вище рівня розміщення ультразвукового випромінювача. Рівень поданої води обмежується кутом підйому установки 30° , що забезпечує час перебування суспензії в зоні УЗ-обробки. Для контролю заповнення водою служать два оглядові вікна, встановлені на протилежних сторонах корпусу навпроти один одного. Зерно піддається обробці протягом часу перебування в робочому діапазоні дії ультразвукових випромінювачів. Необхідний діапазон дії ультразвукових випромінювань на оброблювану суспензію встановлюють частотою обертання і кроком витка шнека.

Для видалення (віджиму) води з зерна після обробки в корпусі передбачена перфорована перегородка 7, через яку зерно продавлюється шнеком, тим самим здійснюється попередній віджим. За перфорованою перегородкою є конічне звуження корпусу, проходячи через яке зерно за рахунок ущільнення піддається другому, остаточному, віджиму. Вода видаляється через патрубки з сіткою 9, один з яких встановлений перед перфорованою перегородкою, а другий – перед конусом корпусу. Потім зневоднене зерно вивантажується через вивантажний патрубок 8.

З метою дотримання температурного режиму частина корпусу установки в зоні ультразвукової обробки забезпечена кабельним нагрівачем 13. Температуру нагріву регулюють і контролюють датчиком температури 10. Нагрів необхідний лише при пуску установки, надалі температурний режим підтримується процесами внутрішнього тертя мікропотоків при УЗ-обробці.

Корпус закріплений на двох стійках – нерухомій 11 і регульованій 12, за допомогою якої регулюють кут нахилу.

Бункер завантаження зерна має два виконання:

- для розташування корпусу установки під кутом $15^{\circ}\dots 30^{\circ}$.
- для розташування корпусу установки під кутом $35^{\circ}\dots 45^{\circ}$.

Шнек установки включає в себе:

- зону завантаження з бункера;
- робочу зону, де зерно перемішується з водою, утворюючи 50%-ву водну суспензію, і обробляється ультразвуком;
- зону попереднього зневоднення суспензії за рахунок вільного стікання води в робочу зону;
- зону віджиму, де із суспензії видаляється до 88 % вологи; при цьому вода після віджиму повертається в шнек, що істотно скорочує технологічну витрату води.

Регулювання подачі зерна в робочу зону здійснюють за допомогою зміни частоти обертання шнека, а також ножовим шибером, що обмежує надходження

сухого зерна сої з бункера. Тиск в зоні віджиму забезпечується конічним звуженням корпусу шнека і відповідним плавним зменшенням діаметра гвинта.

На рис. 3.15 і 3.16 представлена установка для УЗ-обробки сипучої продукції рослинництва.

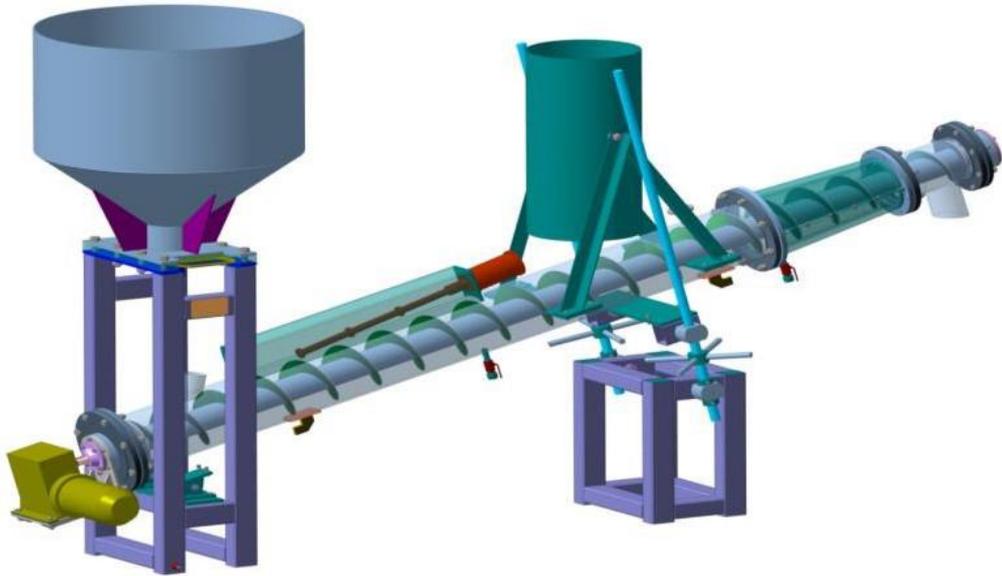


Рис. 3.15. Ультразвукова установка для обробки сипучої продукції рослинництва з фіксацією робочих зон

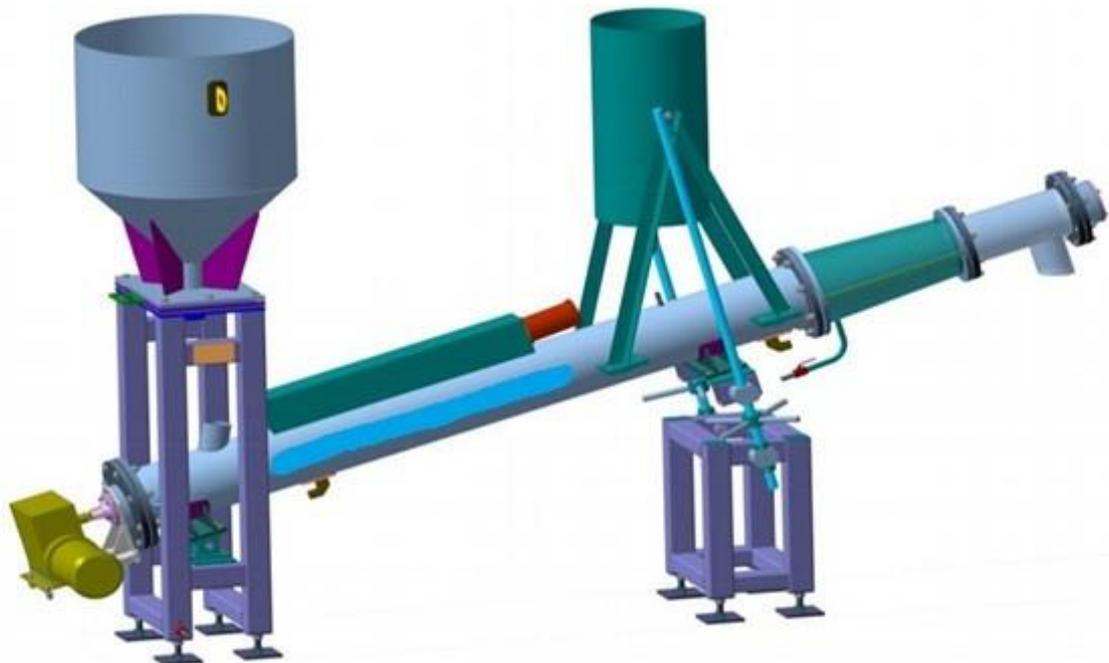


Рис. 3.16. Загальний вигляд ультразвукової установки для обробки сипучої продукції рослинництва

Установка дозволяє обробляти зерно з регульованим часом і температурою обробки, що дозволяє застосовувати дану конструкцію для обробки зерна пшениці, сої та іншої ідентичної сировини.

Розроблено також конструкцію установки періодичної дії малої продуктивності для ультразвукової обробки зерна сої. Вона базується на інактивації обмеженого обсягу продукту і має певну практичну цінність для виробництва невеликої кількості корму в умовах індивідуальних малих підприємств (рис. 3.17).

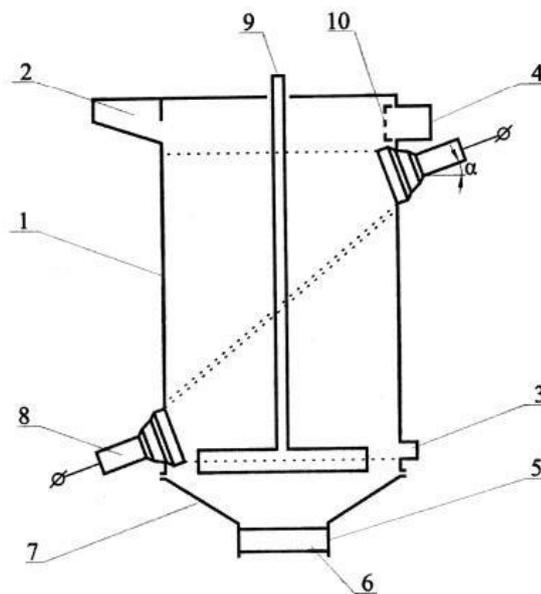


Рис. 3.17. Ультразвукова установка малої продуктивності для обробки зерна сої: 1 – корпус; 2 – завантажувальний лоток; 3 – патрубок подачі рідини; 4 – патрубок для виведення рідини; 5 – вивантажувальний патрубок; 6 – вивантажний пристрій; 7 – знімне дно; 8 – ультразвукові випромінювачі; 9 – мішалка; 10 – фільтр.

Установка працює наступним чином. Воду подають через патрубок 3 (див. рис. 3.17), а зерно – через завантажувальний лоток 2. Обробка відбувається в протитоці, коли зерно завантажують зверху через завантажувальний лоток 2, а рідину подають знизу через патрубок подачі рідини 3. Зерно перемішується з рідиною (температура 18...20 °С) в циліндричному корпусі 1 мішалкою 9 з одночасною акустичною обробкою протягом 30 хв від двох ультразвукових випромінювачів потужністю 1,6 кВт, що створюють щільність акустичної

кавітації не менше 1 Вт/см^2 . Потім зерно осідає в нижній частині пристрою, звідки вивантажується через патрубок 5, обладнаний вивантажувальним пристроєм 6 у знімному дні 7. Фільтр 10 перешкоджає прольоту частинок у патрубок виведення рідини 4.

Джерела ультразвуку 8 розташовані по діагоналі в протилежному напрямку відносно один одного з кутом нахилу $\alpha = 30^\circ \dots 40^\circ$, що дозволяє домогтися ефекту інтенсивної кавітації по всьому об'єму суспензії і підвищення ефективності мікротечій. При куті нахилу менше 30° спостерігається зниження щільності акустичної кавітації, що тягне за собою появу застійних зон і погіршення обробки зерна, а при значеннях α більше 40° має місце перетин ультразвукових хвиль, що призводить до нерівномірності обробки зерна.

3.3 Результати виробничих випробувань ультразвукової установки для безперервної обробки зерна сої

Виходячи з прийнятої конструктивної схеми (додаток I), установка шнекового типу включає в себе:

- зону завантаження сухого подрібненого зерна сої з бункера;
- зону утворення водно-соєвої 50%-ї суспензії, де забезпечуються регулювання подачі зерна сої та дозована підживлення води;
- зону обробки суспензії системою п'єзокерамічних коливальних збудників (час обробки встановлюють зміною подачі зерна сої та регулюванням частоти обертання шнека);
- зону попереднього зневоднення;
- зону віджиму, що забезпечує 82%-е видалення рідини;
- зону вивантаження обробленої продукції.

Конструктивні параметри гвинта шнека представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Конструктивні параметри гвинта шнека

Параметр	Значення
Діаметр, м	
вала гвинта	0,089
гвинта в зоні завантаження	0,203
гвинта в робочій зоні	0,203
гвинта в зоні попереднього віджиму	0,203
гвинта в зоні вивантаження	0,157
Середній діаметр гвинта в зоні віджиму, м	0,18
Початковий	0,203
Кінцевий	0,156
Товщина витка гвинта, м	0,003
Кількість витків гвинта шнека	
у зоні завантаження	2
у робочій зоні	5
в зоні попереднього віджиму	6
в зоні віджиму	3
в зоні вивантаження	1,5
Крок гвинта, м	0,15
Діаметр комірки металеві дрітної сітки, що утворює зону віджиму, мм	0
Товщина перфорованого листа, мм	3,0
Розрахунковий тиск у зоні віджиму, Мпа	0,2

Експериментальні дослідження та прийнята згодом конструкція установки, оснащеної двома п'єзокерамічними коливальними збудниками з певними параметрами ультразвуку, дозволили забезпечити інактивацію інгібітора трипсину та уреазу до 97 % за 30 хв обробки. Велика тривалість обробки обумовлена поганою проникністю ультразвукових мікропотоків крізь оброблювану суспензію, утворенням застійних зон, гравітаційним осіданням твердих частинок зерна сої. Для забезпечення постійної концентрації суспензії 50 % у у оброблюваному у обсязі була змінена конструкція установки. У результаті з'явилася можливість постійного переміщення суспензії шнеком,

покращилася проникність оброблюваного матеріалу і усунені перешкоди при проникненні пульсуючих мікротечій.

У конструкції пропонуваної установки використана п'єзоелектрична коливальна система УЗТА-1/18-0 збільшеної площі (рис. 5.1). Це дозволяє розсіяти оброблюваний матеріал по довжині робочої зони.

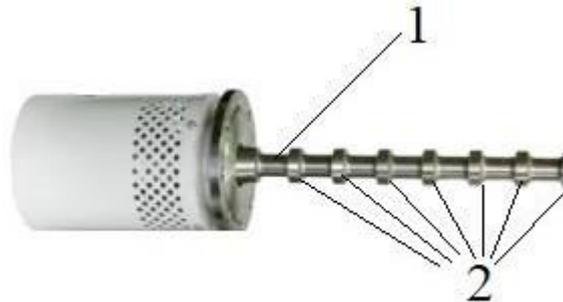


Рис. 3.18. П'єзоелектрична коливальна система збільшеної площі УЗТА-1/18-0: 1 – робочий інструмент; 2 – випромінюючі поверхні

П'єзоелектрична коливальна система збільшеної площі УЗТА-1/18-0 має параметри високоінтенсивної кавітації, значно прискорює процеси екстрагування, зволоження, перемішування, коагуляції та ін.

Робочий інструмент 1 виконаний з титанового стрижня у вигляді послідовно сформованих напівхвильових модулів і має кілька випромінюючих поверхонь 2. Перевага пропонуваної установки полягає в тому, що в ній невеликий шар оброблюваної суспензії переміщується витками шнека і безперервно просувається по довжині робочої зони, де піддається ультразвуковому впливу за допомогою 7 п'єзокерамічних елементів. В результаті скорочується час обробки, що було підтверджено виробничими випробуваннями.

Таким чином, остаточний варіант установки (рис. 3.19), представлений до виробничих випробувань, був вдосконалений. Він відрізняється від конструкції лабораторної установки.



Рис. 3.19. Виробнича збірка установки безперервної дії шнекового типу для ультразвукової обробки сипучої продукції рослинництва.

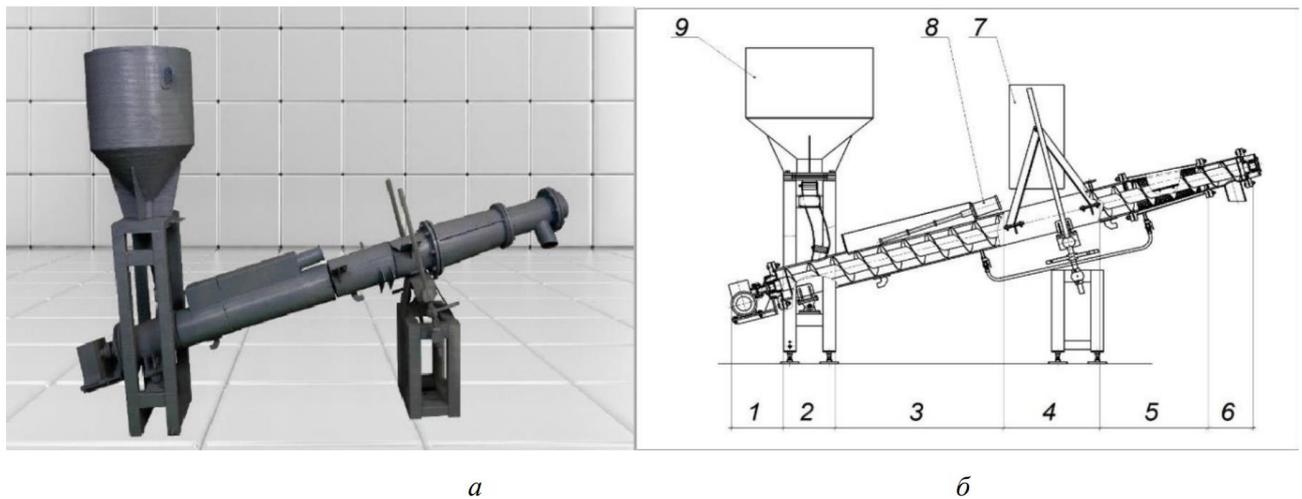


Рис. 3.20. Установка безперервної дії шнекового типу для ультразвукової обробки сипучої продукції рослинництва: а – загальний вигляд; б – схема: 1 – привідна станція; 2 – зона змішування суспензії; 3 – робоча зона ультразвукової обробки; 4 – зона попереднього видалення рідини; 5 – зона віджиму; 6 – зона вивантаження; 7 – ємність для підживлення водою; 8 – п'єзокерамічна коливальна система; 9 – бункер для зерна.

Виробничі випробування установки безперервної дії шнекового типу для ультразвукової обробки сипучої продукції рослинництва проведені в ТОВ

«Полісся». На виробничій ділянці, згідно з умовами договору про спільну роботу, був виготовлений дослідно-промисловий зразок.

Проведено перевірку шнекової ультразвукової установки на відповідність параметричним вимогам. Виявлено відповідність встановленим вимогам дослідно-промислового зразка.

Відповідність функціональним вимогам перевіряли в двох робочих режимах – на холостому ході і під навантаженням.

При перевірці на холостому ході частоту обертання вала шнека встановлювали 18 хв^{-1} протягом безперервної 8-годинної роботи установки.

Під навантаженням установку перевіряли при повному робочому режимі в такій послідовності:

1. У бункер завантажували 50 кг розмеленого повножирного зерна сої.
2. Робочу зону заповнювали водою.
3. У обертний шнековий механізм шляхом відкриття шиберної заслінки подавали оброблюваний матеріал.
4. Надлишки води до досягнення пропорції 50:50 автоматично витіснялися перепускним клапаном, встановленим в корпусі шнека. Через цей же клапан здійснювалося відведення води після попереднього віджиму.
5. Основне віджимання води з суспензії забезпечувалося за рахунок підвищення тиску в кінчному шнековому просторі до $2 \cdot 10^5$ Па. На виході залишкова вологість обробленого зерна сої становила 15 %, що вимагало застосування додаткової сушки. Цілком допустимий метод низькотемпературної аераційної сушки до нормованої залишкової вологості 2–3 %.

Перевіряли ступінь інактивації інгібітора трипсину і урези. Дисперсність суспензії 1,0–1,5 мм, встановлена частота ультразвуку 18 кГц, температура нагрівання води в суспензії до 40 °С.

Дослідженнями встановлено:

- сліди мінеральних забруднень і зараженості відсутні;

- активність інгібітора трипсину після 3 хв обробки ультразвуком знижується з 50–60 до 3–5 мг/г, що підтверджує 6-кратне підвищення ефективності інактивації;

- активність уреазы після ультразвукової обробки знижується з 2,5 до 0,2 рН, що також свідчить про високу ефективність процесу інактивації.

У таблиці 3.5 представлені якісні показники інактивації зерна сої.

Таблиця 3.5 – Якісні показники інактивації зерна сої

Показник	Початковий стан	Після УЗ-впливу	Ефективність, %
Активність інгібітора, мг/г	50	3	+94
Активність уреазы, од. рН	2,5	0,2	+92
Вміст білка, %	38,86	38,03	-2,14

Згідно результатам виробничих випробувань, дослідно-промисловий зразок установки безперервної дії шнекового типу для ультразвукової обробки сипучої продукції рослинництва повністю відповідає вимогам конструкторської документації та забезпечує всі етапи технологічного впливу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

При аналізі літературних і патентних джерел встановлено, що в даний час в промисловості домінують методи обробки зернових, зернобобових культур і рослинних олій, засновані на високотемпературних і хімічних впливах. Однак їх застосування пов'язане з системними недоліками, що істотно обмежують ефективність виробничих процесів і якість одержуваного продукту: тривалість зволоження зерна при обойному помелі досягає 2-3 годин для досягнення нормативних показників (14,5-17%) вологості зерна; інактивація антипоживних речовин у сої не відповідає сучасним вимогам безпеки; втрати білка в процесі обробки становлять 15–20%, а незамінних амінокислот — до 25% внаслідок денатурації при термічному впливі; висока залишкова забрудненість зернової оболонки зерна пшениці мінеральними відкладеннями; висока зараженість мікроорганізмами (10^3 – 10^4 КУО/г) і збереження патогенної мікрофлори після обробки; в нерафінованих оліях вміст первинних і вторинних продуктів окислення обумовлює перевищення нормативних показників. Нестабільність параметрів обробки призводить до 15% втрат сировини. Питоме енергоспоживання традиційних процесів на 40–50% вище необхідного рівня. При проведенні аналізу технічної літератури встановлено, що використання ультразвукової обробки продукції рослинництва дозволить інтенсифікувати процеси екстракції, фільтрації, зволоження.

Розроблено інноваційні ультразвукові технології обробки продукції рослинництва, а також конструкції дослідно-промислових установок для їх реалізації. Універсальна установка безперервної дії шнекового типу для обробки сипучої продукції рослинництва, що характеризується продуктивністю: для сої – 1200 кг/год ; для зерна пшениці – 1700 кг/год; підвищує ефективність очищення оболонки зерна на 98 %, а також зволоження та інактивацію антипоживних речовин в сипучих матеріалах на 96-98% за рахунок спрямованого ультразвукового впливу.

Проведеними виробничими випробуваннями встановлено, що значення всіх технологічних параметрів підтвердили високу ефективність розроблених технологій і установок, їх відповідність нормативним вимогам і економічність впровадження в промислове виробництво.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грабар І.Г., Чередник К.Ю. Результати експериментальних досліджень показників зерна після ультразвукової обробки. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.
2. Чередник С.Ю. Закономірності, що зумовлюють підвищення ефективності очищення та екстрагування продукції рослинництва. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 96-97.
3. Чередник С. Кусковський О. Грабар І. Способи та засоби механізації знезараження зерна. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 156-163.
4. Сакірін. С. Підсумки 2024 року для борошномельної галузі України. АПК-Інформ. URL: <https://www.apk-inform.com/uk/exclusive/topic/1546672>
5. Негура М. Відновлення деталей та механізмів: застосування фізичних методів інтенсифікації. Харчова промисловість. 2021. № 4. С. 25–31.
6. Ковальчук В. П., Мельник О. М. Інноваційні технології обробки зерна в агропромисловому виробництві. Київ : Аграрна наука, 2020. 256 с.
7. Бурлака О. І. Фізичні методи інтенсифікації процесів у переробці сільськогосподарської сировини. Вінниця : ВНАУ, 2019. 198 с.
8. Савченко О. С. Ультразвукові технології в харчовій промисловості. Харчова наука і технологія. 2022. Т. 16, № 2. С. 45–52.

9. Ткаченко І. А., Лисенко М. О. Енергоефективні технології переробки продукції рослинництва. Вісник аграрної науки. 2020. № 11. С. 62–68.
10. Mason T. J., Lorimer J. P. Applied Sonochemistry: Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing. Oxford : Elsevier, 2002. 303 p.
11. Chemat F., Zill-e-Huma, Khan M. K. Applications of ultrasound in food technology. Ultrasonics Sonochemistry. 2011. Vol. 18, No. 4. P. 813–835.
12. Ashokkumar M. The characterization of acoustic cavitation bubbles – An overview. Ultrasonics Sonochemistry. 2011. Vol. 18. P. 864–872.
13. Knorr D., Zenker M., Heinz V., Lee D. U. Applications and potential of ultrasonics in food processing. Trends in Food Science & Technology. 2004. Vol. 15. P. 261–266.
14. Awad T. S. Ultrasonic effects on food properties. In: Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing. New York : Springer, 2011. P. 231–250.
15. Schlüter O., Ehlbeck J. Innovative physikalische Verfahren in der Lebensmittelverarbeitung. Berlin : Springer, 2016. 312 S.
16. Heinz V., Knorr D. Auswirkungen von Ultraschall auf Lebensmittel. Lebensmitteltechnik. 2003. Nr. 7. S. 32–36.
17. Müller R. Ultraschalltechnik in der Agrar- und Lebensmittelindustrie. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2018. 214 S.
18. Peters J. Energieeffiziente Verfahren zur Getreideverarbeitung. Agrartechnik. 2019. Bd. 69, Nr. 4. S. 198–205.
19. Wagner M. Physikalische Prozessintensivierung in der Lebensmitteltechnik. München : Hanser, 2020. 287 S.
20. Cárcel J. A., García-Pérez J. V. Aplicaciones del ultrasonido en la industria alimentaria. Valencia : Editorial UPV, 2015. 221 p.
21. Mulet A., Cárcel J. V. Ultrasonidos aplicados al procesado de alimentos. Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos. 2017. Vol. 57, No. 3. P. 145–153.

22. Paniagua M. J. Tecnologías emergentes para la intensificación de procesos agroindustriales. Madrid : AENOR, 2019. 268 p.
23. Ortuño C., Femenia A. Uso del ultrasonido en la extracción de compuestos bioactivos. Alimentación, Ciencia y Tecnología. 2020. No. 12. P. 33–41.