

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра харчових технологій

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до кваліфікаційної роботи
ступеня вищої освіти «Бакалавр»
на тему:

**Удосконалення технології знезараження зерна
шляхом надвисокочастотної обробки**

Виконала: здобувачка вищої освіти 4 курсу,
групи ХТ-1-22
освітньо-професійної програми Харчові технології
зі спеціальності 181 Харчові технології

_____ Діана КУТОВА

Керівник: _____ Дмитро ТИМЧАК

Дніпро 2026

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра харчових технологій

Ступінь вищої освіти: «Бакалавр»

Освітньо-професійна програма: «Харчові технології»

Спеціальність: 181 «Харчові технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

харчових технологій,

кандидат технічних наук, доцент

Віталій КОШУЛЬКО

(підпис)

«01» травня 2026 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЦІ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Кутовій Діані Олександрівні

1. Тема роботи: «Удосконалення технології знезараження зерна шляхом надвисокочастотної обробки».

Керівник роботи: Тимчак Дмитро Олександрович, старший викладач, затверджені наказом закладу вищої освіти від «01» травня 2026 року № 875.

2. Строк подання здобувачкою вищої освіти роботи 08 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи: 1. Технологія зберігання зерна, технологія знезараження зерна. 2. Наукова, нормативна, технологічна, технічна та патентна документація.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Вступ. 1 Огляд літератури. 2 Матеріали і методи дослідження. 3 Експериментальна частина. 4 Охорона праці. 5 Організаційно-економічна частина. Загальні висновки. Бібліографія.

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1 Мета і завдання досліджень. 2 Характеристика обладнання. 3 Обговорення результатів досліджень. 4 Кошторис витрат на проведення досліджень. 5 Загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-5	ст. викладач Дмитро ТИМЧАК	01.05.26	08.06.26

7. Дата видачі завдання 01 травня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	01.05-02.05.26	виконано
2	Огляд літератури	03.05-11.05.26	виконано
3	Матеріали і методи дослідження	12.05-13.05.26	виконано
4	Експериментальна частина	14.05-31.05.26	виконано
5	Охорона праці	01.06-02.06.26	виконано
6	Організаційно-економічна частина	02.06-03.06.26	виконано
7	Формулювання висновків по роботі та списку використаних джерел	04.06-05.06.26	виконано
8	Підготовка демонстраційного матеріалу	06.06-08.06.26	виконано

Здобувачка вищої освіти _____ Діана КУТОВА
(підпис)

Керівник роботи _____ Дмитро ТИМЧАК
(підпис)

РЕФЕРАТ

Тема: «Удосконалення технології знезараження зерна шляхом надвисокочастотної обробки»

Кваліфікаційна робота магістра: 65 с., 12 рис., 11 табл., 49 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: зерно пшениці, ячменю.

Метою роботи є удосконалення технології надвисокочастотної обробки зерна для знезараження та підвищення його засвоюваності.

Методи дослідження: Зараженість зерна шкідниками хлібних запасів визначали за ДСТУ ISO 16002:2014 «Зерно та продукти зернові. Методи визначення зараженості живими безхребетними (комахами та кліщами)». Тип та підтип культур визначали за ДСТУ 4529:2006 «Зерно і продукти зернові. Терміни та визначення основних понять». Натурну масу визначали за ДСТУ 10840:2015 «Зерно. Методи визначення натурної маси». Вологість визначали основним стандартним методом висушування навішень у електричній сушильній шафі за ДСТУ ISO 712:2010 «Зерно. Метод визначення вологості». Масу 1000 зерен визначали за ДСТУ 10842:2015 «Зерно. Методи визначення маси 1000 зерен». Склоподібність зерна пшениці проводили за ДСТУ 10987:2015 «Зерно. Метод визначення склоподібності пшениці». Вміст домішок, дрібних зерен та крупність зерна визначали за ДСТУ 10939:2015 «Зерно. Метод визначення засміченості, проходу дрібних зерен та крупності».

У роботі досліджено НВЧ-обробку та підібрано параметри НВЧ-обробки зерна пшениці, спрямованої на знищення шкідників і збереження якісних властивостей зерна. Доведено ефективність різних режимів обробки на рівень знезараженості та вплив на внутрішню структуру зерна. Встановлено, що оптимальні параметри обробки забезпечують високу виживаність поживних компонентів та покращують засвоюваність крохмалю. Розроблено методику проведення досліджень із використанням різних мас зерна та кількості шкідників, оцінено вплив НВЧ-обробки на явну та приховану форми зараженості.

КЛЮЧОВІ СЛОВА

Знезараження, зерно, пшениця, надвисокочастотна обробка, НВЧ, засвоюваність.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	7
1.1 Способи знезараження зерна.....	7
1.2 Методи обробки зернової сировини з метою підвищення його засвоюваності.....	19
2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	28
2.1 Характеристика використаної сировини	28
2.2 Обладнання для НВЧ-обробки зерна	30
2.3 Методики виконання досліджень	32
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	35
3.1 Визначення впливу потужності магнетрону на ефективність знезараження зерна пшениці	35
3.2 Визначення впливу імпульсного режиму магнетрону на ефективність знезараження зерна пшениці.....	38
3.3 Вплив НВЧ-обробки на структурно-механічні властивості зерна.....	41
3.4 Вплив НВЧ-обробки на вуглеводний склад зерна.....	44
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	48
4.1 Особливості охорони праці на елеваторах	48
4.2 Розробка картки охорони праці на елеваторі	50
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	52
5.1 Розрахунок кошторису витрат на дослідження	52
5.2 Розрахунок ціни дослідження	56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	58
БІБЛІОГРАФІЯ.....	60

ВСТУП

Перед харчовою промисловістю України постає складне завдання забезпечення населення достатньою кількістю якісної та конкурентоспроможної продукції, здатної відповідати сучасним вимогам ринку та стандартам безпечності. Досягнення цього потребує комплексного підходу, що передбачає зниження собівартості виробництва, підвищення якісних характеристик продукції та нарощування обсягів її випуску. Важливим напрямом вирішення зазначених питань є вдосконалення якості комбікормів і зменшення їх витрат на виробництво одиниці продукції тваринництва, що безпосередньо впливає на ефективність галузі в цілому.

Значну частку у складі комбікормів займає зернова сировина, яка становить переважну частину рецептури, тому її раціональне використання набуває особливої актуальності. Ефективність використання зерна визначається не лише його поживною цінністю, а й якісними показниками, адже сировина повинна бути безпечною та не містити факторів, здатних негативно впливати на здоров'я тварин. З цієї причини застосування зерна, ураженого амбарними шкідниками, є недопустимим, оскільки це призводить до зниження якості кормів і може спричинити економічні втрати.

Існуючі методи знезараження зернової сировини характеризуються як певними перевагами, так і суттєвими недоліками, що обмежують їх ефективність та універсальність. Це зумовлює необхідність пошуку нових підходів, спрямованих на створення комплексних технологій, які поєднували б ефективність, безпечність та економічну доцільність обробки.

Окремою проблемою є недостатній рівень засвоєння поживних речовин зернових компонентів організмом сільськогосподарських тварин, особливо птиці, у якої цей показник є відносно низьким. У зв'язку з цим актуальним є підвищення поживної цінності кормів шляхом удосконалення технологій обробки зерна, що дозволить зменшити витрати кормів на одиницю продукції. Одним із перспективних напрямів є модифікація структури крохмалю, зокрема його

часткове розщеплення, що сприяє підвищенню доступності для ферментативного гідролізу та кращому засвоєнню організмом тварин.

Важливим аспектом сучасних технологічних рішень є також відповідність екологічним вимогам та принципам безпечного виробництва харчових продуктів. У зв'язку з цим розроблювані технології повинні забезпечувати мінімальний вплив на довкілля та відповідати сучасним нормативним вимогам у сфері якості та безпечності продукції.

Метою цього дослідження є удосконалення екологічно безпечної технології та обґрунтування раціональних режимів знезараження зернової сировини комбікормів із застосуванням обробки зерна у НВЧ-полі.

Для виконання мети дослідження сформовано наступні завдання:

- провести визначення впливу потужності магнетрону на ефективність знезараження зерна пшениці;
- встановити вплив імпульсного режиму магнетрону на ефективність знезараження зерна пшениці;
- визначити вплив НВЧ-обробки на структурно-механічні властивості зерна;
- встановити вплив НВЧ-обробки на вуглеводний склад зерна.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Способи знезараження зерна

Значні економічні втрати для народного господарства спричиняються внаслідок життєдіяльності різноманітних мікроорганізмів, плісняв під час зберігання, а також комах і кліщів. Відомо, що «стійкість зернової сировини у процесі зберігання насамперед визначається її початковим станом, зокрема складом і чисельністю мікрофлори, наявністю шкідників хлібних запасів, рівнем вологості та іншими показниками» [1-5]. Саме ці фактори значною мірою впливають і на стабільність комбікормів під час зберігання, а також на тривалість їх використання без суттєвого зниження кормової цінності, оскільки зернова сировина є їх основним компонентом.

Основною причиною погіршення якості та псування комбікормів є інтенсивний розвиток у них мікрофлори та комах-шкідників. «Мікробіологічний склад комбікормів переважно формується за рахунок мікроорганізмів, притаманних зерновій масі» [3]. Комбікорми створюють сприятливі умови для розвитку багатьох бактерій і особливо пліснявих грибів, серед яких можуть траплятися штами, здатні продукувати афлатоксини та інші токсичні речовини, що робить корми непридатними до використання.

Різноманіття видів комах і кліщів, які є шкідниками хлібних запасів, налічує кілька десятків. «Більшість із них характеризується коротким циклом розвитку від яйця до дорослої особини, що забезпечує можливість утворення кількох поколінь протягом року. При цьому одна самка окремих видів здатна відкласти сотні яєць за свій життєвий цикл» [6]. «Личинки деяких видів, зокрема довгоносиків і окремих метеликів, розвиваються безпосередньо всередині зерен, що значно ускладнює боротьбу з ними» [4]. Такі шкідники широко поширені та завдають істотної шкоди через високу інтенсивність розмноження і поширення.

Висока пристосованість до умов існування, значна плодючість і швидкі темпи розвитку забезпечують активне поширення шкідників зернових запасів. Дослідниками встановлено, що «серед численних показників якості зерна найбільш

чутливими до ураження комахами є вихід продукції, зольність, білизна та кислотне число жиру борошна, причому саме ці показники є найменш стабільними під впливом зараження» [2].

Під час переробки зерна, ураженого рисовим довгоноси́ком, спостерігається зниження загального виходу борошна, підвищення його зольності та погіршення кольору, що проявляється у потемнінні продукту. «За наявності у партії пшениці близько 19,2% уражених зерен загальний вихід борошна зменшується більш ніж на 4%, середньозважена зольність зростає з 0,50% до 0,56% при виході борошна 74%, а кислотне число жиру борошна вищих сортів підвищується у 1,2–1,6 рази» [3, 7–10].

Серед жуків найбільшою інтенсивністю живлення протягом доби характеризується зерновий точильник, тоді як найменшу активність проявляють мукоїди. За весь період розвитку найбільші втрати зерна спричиняє личинка комірного довгоносика. «Після завершення розвитку та виходу дорослих особин комірного і рисового довгоносиків, а також зернового точильника, маса зернівки відповідно зменшується приблизно на 41%, 24% і 28%» [9].

Усі сучасні способи знезараження зернової сировини умовно поділяють на механічні, фізичні, хімічні та біологічні.

Механічне очищення зараженого зерна та продуктів його переробки здійснюється із застосуванням стаціонарних і пересувних зерноочисних машин, оснащених аспіраційними системами, які запобігають поширенню пилу та шкідників у навколишньому середовищі. «Для видалення довгоносиків, мукоїдів, малого борошняного та булавовусого хрущаків, а також кліщів підбір сит здійснюється залежно від розмірних характеристик зерна, при цьому для пшениці використовують сита з довгастими отворами шириною 1,5–1,7 мм, а для жита – 1,2–1,4 мм» [6]. У разі необхідності очищення від більших шкідників, таких як великий борошняний хрущак, дорослі гусениці вогнівок і зернової совки, «застосовують металоткані сита, параметри яких визначають шляхом попереднього пробного очищення» [4].

Додатково знезараження зернової сировини може здійснюватися в машинах ударної дії, зокрема в ентолейторах-стерилізаторах типу РЗ-БЕЗ. «Водночас механічне очищення не забезпечує повного знищення шкідників, оскільки не впливає на їх розвиткові стадії, такі як яйця, личинки та лялечки» [11]. Незважаючи на екологічну безпечність, цей метод дозволяє лише тимчасово знизити рівень зараженості, іноді до стану, коли шкідники певний час практично не виявляються.

Ефективність механічного очищення значною мірою залежить від температурних умов, оскільки його доцільно застосовувати переважно в холодний період року. «У теплу пору використання цього способу може призводити до протилежного ефекту, коли чисельність комах зростає через їх більш рівномірне розподілення у зерновій масі. Загалом даний підхід характеризується обмеженою ефективністю та потребує поєднання з іншими методами обробки» [10].

Термічна дезінсекція базується на високій чутливості комах і кліщів до підвищених температур. Обробка зерна під час сушіння в зерносушарках може забезпечити позитивний результат лише за умов застосування жорстких режимів термообробки, що є допустимим переважно для продовольчого та кормового зерна.

Температури, за яких відбувається загибель шкідників, знаходяться поблизу гранично допустимих значень нагрівання зерна і потребують достатньо тривалого витримування. «Так, при нагріванні до 50°C рисовий довгоносик гине приблизно через 60 хвилин, тоді як рудий мукоїд – лише через 190 хвилин. У шахтних сушарках забезпечити режими, що гарантують повне знищення шкідників на всіх стадіях розвитку, є складним завданням через значну нерівномірність прогрівання зернової маси, внаслідок чого в окремих шарах температура залишається недостатньою для їх загибелі» [12]. Додатково ускладнює процес те, що «для багатьох культур, зокрема проса, гречки, рису, сої та гороху, допустимі температури нагрівання є значно нижчими і перебувають у межах 25–40°C» [8].

У процесі сушіння під дією високої температури агента більшість мікроорганізмів, локалізованих на поверхні зернівок, гине, що сприяє підвищенню стійкості зерна під час подальшого зберігання. «Водночас певна частина

мікрофлори, представлена термостійкими формами, зокрема спорами, зберігає життєздатність навіть після обробки» [12].

До основних недоліків термічної дезінсекції належить нерівномірність прогрівання зернової маси, що призводить до часткового знезараження та одночасного погіршення якісних показників окремих її фракцій. Крім того, «застосування суміші топкових газів із повітрям як сушильного агента супроводжується викидами в атмосферу, що негативно впливає на стан довкілля» [13].

Охолодження зерна здійснюють як пасивним способом шляхом провітрювання приміщень, так і активним із використанням стаціонарних і пересувних вентиляційних та холодильних установок, а також шляхом пропускання зерна через зерноочисні машини, конвеєри, охолоджувальні й сушильні камери зерносушарок, що обдуваються холодним повітрям. «Найбільш результативним вважається активне вентилявання із застосуванням стаціонарних вентиляційних систем, яке забезпечує більш рівномірне зниження температури зернової маси» [7, 9].

Дослідженнями встановлено, що окремі види шкідників здатні тривалий час зберігати життєздатність навіть за низьких температур. Зокрема, «комірний довгоносик може виживати до двох місяців при температурі близько 0°C, а суринамський мукоїд зберігає життєздатність протягом десяти тижнів у межах 5–10°C» [14]. Борошняний кліщ здатний витримувати температуру до -18°C протягом семи діб за умови попереднього перебування при температурі близько +6°C. Водночас встановлено, що «охолодження зерна є економічно вигіднішим і екологічно безпечнішим методом порівняно з фумігацією, при цьому для знищення більшості шкідників доцільно витримувати зерно при температурі близько -20°C упродовж 14–24 годин, а для повного знезараження необхідне зниження температури до -30°C» [15].

Ефективність цього методу суттєво залежить від кліматичних умов, оскільки його доцільно застосовувати переважно в регіонах із холодним кліматом і в холодний період року. У помірних і теплих кліматичних зонах досягнення

необхідного ефекту потребує використання холодильних установок, що значно підвищує енерговитрати та загальну вартість процесу.

Знезараження із застосуванням ультразвуку ґрунтується на здатності високочастотних звукових хвиль викликати загибель комах і мікроорганізмів унаслідок теплового ефекту, який виникає під час їх поширення. «Найвища ефективність досягається за умов підбору частоти, що забезпечує максимальне проникнення хвиль у біологічні об'єкти при мінімальному впливі на навколишні матеріали» [3]. Встановлено, що «ефективність обробки зростає зі зменшенням довжини хвилі, оскільки поглинання ультразвуку прямо залежить від квадрата частоти, а також від теплопровідності та в'язкості середовища» [15].

Експериментально підтверджено, що «обробка ультразвуковими хвилями з частотою близько 20000 Гц протягом 30 секунд забезпечує повну загибель борошняних хрущаків» [16]. Водночас наявність у деяких комах твердого хітинового покриву з високою відбивною здатністю обмежує ефективність і поширення цього методу. «Дослідження впливу ультразвуку на мікрофлору зерна показали, що обробка з частотою близько 15000 Гц протягом 30 секунд дозволяє зменшити кількість мікроорганізмів на поверхні зерна у кілька разів» [17].

Перші експерименти з використання променевої стерилізації були проведені наприкінці XIX століття, невдовзі після відкриття рентгеновського випромінювання. Встановлено, що іонізуюче випромінювання, проходячи крізь речовину, передає частину своєї енергії її молекулам, причому ця енергія значно перевищує енергію хімічних зв'язків, унаслідок чого відбувається їх руйнування.

Дослідженнями доведено, що «вплив іонізуючого випромінювання на біохімічні системи може відбуватися двома шляхами. Перший пов'язаний із прямою дією, коли іонізуюча частинка безпосередньо взаємодіє з молекулами клітини, зокрема з її генетичними структурами, викликаючи іонізацію або збудження» [18]. У разі наявності слабших зв'язків у молекулі відбувається їх руйнування, що призводить до змін у складі речовин, наприклад перетворення нуклеопротеїдів на ліпоїдні сполуки, що є характерним для продуктів із низьким вмістом вологи, таких як сухе зерно або жири.

Другий механізм полягає в непрямій дії, коли первинні процеси іонізації відбуваються не в самій молекулі, що зазнає ушкодження, а у воді, з утворенням вільних радикалів, які у присутності кисню формують високоактивні сполуки, зокрема пероксиди та гідропероксиди. «Ці речовини здатні взаємодіяти з біологічно важливими компонентами, такими як білки, ліпіди та вуглеводи, спричиняючи їх окиснення. У результаті утворюються хімічно активні сполуки, що характеризуються радіотоксичними властивостями» [19].

Встановлено, що стійкість різних організмів до дії іонізуючого випромінювання суттєво відрізняється і залежить від їх біологічних особливостей. Найбільш чутливими є клітини, які активно діляться, тому проростаюче насіння більш уразливе порівняно з насінням у стані спокою. «Значення летальних доз суттєво варіюють, зокрема для людини вони становлять близько 600 рад, для комах – у межах 60000–100000 рад, для кліщів – близько 300000 рад, тоді як для спороутворюючих бактерій цей показник може досягати 1500000–5000000 рад. Для забезпечення стерилізації дорослих комах необхідні дози на рівні 10000–12000 рад, а для кліщів – близько 60000 рад» [20].

«Для проведення дезінсекції зернових культур рекомендовано застосовувати дози іонізуючого випромінювання в межах 0,01–0,02 Мрад, що дозволяє ефективно знижувати рівень зараженості» [8].

Встановлено, що дія іонізуючого випромінювання у стерилізуючих дозах не призводить до миттєвої загибелі мікроорганізмів, оскільки отримані ушкодження стають фатальними лише з часом у процесі порушеного обміну речовин. Підкреслюється, що ефективність знищення мікрофлори значно підвищується за умов комбінованого впливу, зокрема при поєднанні опромінення з термічною обробкою або застосуванням антибіотиків.

Суттєве значення має залежність летальної дози для конкретного виду мікроорганізмів від умов опромінення, зокрема його безперервності та потужності. Встановлено, що «зі зростанням потужності дози підвищується радіочутливість мікроорганізмів, а безперервне опромінення є ефективнішим порівняно з переривчастим режимом» [13].

«Експериментальні результати свідчать, що застосування гамма-опромінення у дозі 2,5 млн рад дозволяє суттєво подовжити термін зберігання зерна із вологістю 16 та 20%, збільшуючи його відповідно на 120 і 111 діб, тоді як при вологості 25% ефект є мінімальним і становить лише одну добу» [21]. При цьому найбільш стійкими до опромінення виявляються плісняві гриби зберігання, зокрема представники родів *Aspergillus*, *Penicillium*, а також окремі сапрофітні форми *Alternaria* і *Cladosporium*, які можуть зберігати життєздатність навіть за таких доз.

Дослідження показують, що «при температурі близько 300 К спостерігається сигнал електронного парамагнітного резонансу, який зумовлений утворенням вільних радикалів із локалізацією неспареного електрона на атомі кисню» [22]. Встановлено, що «процеси променевої інактивації та загибелі клітин можуть реалізовуватися за різними механізмами, співвідношення яких визначається генетичними особливостями об'єкта, його фізіологічним станом під час опромінення та умовами післярадіаційного існування» [21].

Застосування іонізуючого випромінювання практично не супроводжується підвищенням температури оброблюваного матеріалу, що дозволяє зберігати основні властивості харчових продуктів. Додатковою перевагою є можливість організації безперервної обробки та стерилізації продукції безпосередньо в упаковці. Водночас до недоліків методу належать «необхідність використання спеціалізованих захисних споруд, залучення висококваліфікованого персоналу, ризик накопичення вільних радикалів і потенційно небезпечних сполук у зерні, а також неможливість застосування цього підходу для обробки насіннєвого матеріалу» [23].

Встановлено, що «серед різних методів боротьби зі шкідниками найбільш радикальними, ефективними та широко застосовуваними є хімічні засоби. На сьогодні відомо понад п'ятдесят препаратів, які використовуються для дезінсекції» [5]. Речовини, що застосовуються з цією метою, тією чи іншою мірою є токсичними для теплокровних тварин і людини, тому їх використання повинно здійснюватися

з суворим дотриманням вимог безпеки, спрямованих на захист персоналу, тварин і запобігання забрудненню довкілля.

«Для знезараження зерна та продуктів його переробки використовують різноманітні інсектициди, зокрема бромистий метил, хлорпікрин, метилхлорид, карбофос, ДДВФ, метатіон, а також препарати типу актелік, трихлорметафос, базудин, децис, перметрин та інші» [3, 12, 20]. Особливе місце займають засоби на основі фосфіну, такі як «фосфотоксин, магтоксин, деліція-газтоксин та інші, які являють собою суміші фосфідів алюмінію або магнію з домішками їх оксидів. У процесі взаємодії цих сполук із вологою повітря або зерна відбувається хімічна реакція з утворенням фосфористого водню, що і є активною діючою речовиною» [313].

Фосфін характеризується високою токсичністю щодо комах-шкідників, однак водночас є небезпечним для людини і теплокровних тварин, а також чинить корозійний вплив на мідні матеріали. «За підвищених концентрацій ця речовина є вибухонебезпечною, причому нижня межа займистості становить близько 1,79–1,89% за об'ємом. Гостре отруєння може виникати при концентрації у повітрі на рівні 568 мг/м³, тоді як гранично допустима концентрація в робочій зоні становить 0,1 мг/м³, а максимально допустимий вміст у зерні – 0,1 мг/кг» [18]. Важливою особливістю є здатність фосфіну активно сорбуватися зерном і продуктами його переробки з подальшою відносно легкою дегазацією. Препарати на його основі випускаються у різних формах, зокрема у вигляді гранул, таблеток, плит і стрічок.

Основним недоліком хімічного методу є ризик накопичення у зерні небезпечних концентрацій токсичних речовин, а також викиди отруйних сполук в атмосферу. «Додаткові труднощі пов'язані з необхідністю забезпечення герметичності ємностей під час обробки, складністю зберігання пестицидів і дотриманням вимог безпеки для обслуговуючого персоналу» [24]. Важливим негативним фактором є також формування у шкідників підвищеної стійкості до препаратів у разі їх неповного знищення.

Біологічний метод боротьби базується на використанні природних ворогів шкідників, зокрема хижаків, паразитів і збудників хвороб, які здатні ефективно

стримувати їх чисельність у природних умовах. Значна кількість видів комах виконує роль хижаків, що дозволяє зменшувати втрати врожаю без застосування хімічних засобів. «Особливо високі результати досягаються у випадках, коли шкідники були інтродуковані та не мають природних ворогів у новому середовищі. Застосування паразитичних комах, а також культур мікроорганізмів, які викликають захворювання і загибель шкідників, демонструє перспективність цього підходу та сприяє його поширенню» [25].

Водночас даний метод має обмеження, оскільки не забезпечує повного знезараження зернової маси і не гарантує стовідсоткового знищення шкідників.

«При інфрачервоній обробці зерна в діапазоні довжин хвиль 0,8–2,0 мкм із різною щільністю променистого потоку досягається значний знезаражувальний ефект. Зокрема, при щільності потоку 16 кВт/м² рівень внутрішньої зараженості знижується приблизно на 60%, а зовнішньої – до 80%, при цьому температура нагріву зерна досягає 170–180°C» [16]. Встановлено, що «стерилізуючий ефект обробки зумовлений переважно не максимальною температурою, а високою швидкістю нагрівання. За швидкості підвищення температури 8–10°C за секунду забезпечується повна стерилізація зерна, при 5–7°C за секунду ефективність становить близько 85%, а при 3–5°C за секунду – близько 60%» [6, 12]. Відповідно температура нагріву становить 165°C, 172°C і 178°C. За оптимальних параметрів інфрачервоне нагрівання перевершує традиційні методи знезараження, оскільки вже за 25–30 секунд відбувається руйнування структури зернівки та її повна стерилізація. Під дією випромінювання шкідники виходять на поверхню і гинуть, при цьому також знижується токсичність зерна. Основним обмеженням цього методу є його відносно низька продуктивність.

«Знезараження зерна ультрафіолетовим випромінюванням передбачає обробку дозою близько 125–146 Вт·год/м² протягом 30–35 хвилин» [15]. Перевагою цього способу є виражена бактерицидна дія щодо грибів, бактерій і вірусів, а також позитивний вплив на якісні показники зерна, зокрема підвищення вмісту вітамінів і ферментативної активності, що сприяє кращому засвоєнню поживних речовин. «У процесі обробки зерно зволожується, інтенсивно перемішується та підсушується,

при цьому температура в робочій камері може досягати 175–200°C, а саме зерно нагрівається до 40–120°C протягом 5–120 секунд» [25].

Встановлено, що «клітини значно чутливіші до імпульсного лазерного ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі 266 нм порівняно з безперервним монохроматичним випромінюванням 257 нм». Основний механізм інактивації пов'язаний із утворенням піримідинових димерів у ДНК, зокрема димерів тиміну, що призводить до порушення функціонування нуклеїнових кислот» [23].

До недоліків ультрафіолетової обробки належать значні енергетичні витрати та обмежена ефективність знезараження, особливо для зерен із великими геометричними розмірами, таких як кукурудза. Це пояснюється виникненням тіньового ефекту, коли зернівки частково екранують одна одну, що знижує загальний рівень впливу випромінювання.

Було проведено ґрунтовні дослідження дезінсекції із застосуванням струмів високої частоти, у межах яких вивчали вплив електромагнітного поля на різні види шкідників зерна, зокрема комірнього та рисового довгоносиків, зернового точильника, борошняного і капрового жуків. У результаті встановлено, що «ефективність знезараження визначається частотою та напруженістю високочастотного поля, при цьому підвищення вологості зерна знижує результативність обробки» [14]. Виявлено, що найменшу стійкість до дії поля проявляють комірний і рисовий довгоносики, тоді як зерновий точильник є більш стійким. «Електромагнітне поле негативно впливає на процеси розмноження всіх досліджених видів комах» [7]. У порівнянні з радіаційним методом відзначається вища ефективність щодо знищення дорослих особин, проте нижча щодо незрілих стадій розвитку. Водночас така обробка не погіршує хлібопекарські та посівні властивості зерна, а в окремих випадках навіть сприяє їх покращенню.

Розроблено спосіб дезінсекції та дезінфекції зернових матеріалів, що «передбачає їх зволоження до рівня 65–75% і подальшу обробку електромагнітним полем надвисокої частоти протягом 11–18 хвилин до досягнення дози поглинання 300–500 кДж/кг» [11]. Встановлено, що «вплив високочастотного поля здатний

спричиняти загибель мікроорганізмів навіть за температур, оптимальних для їх розвитку, що свідчить про специфічний механізм дії, не пов'язаний виключно з тепловим ефектом» [23]. Аналогічні результати отримано для різних бактеріальних культур, що підтверджує високий стерилізуючий потенціал методу.

Експериментально доведено, що під дією височастотного поля може відбуватися інактивація біологічно активних речовин, зокрема токсинів, що додатково розширює можливості його застосування. «Дослідження впливу НВЧ-енергії на шкідників показали, що при частоті 2,45 ГГц і потужності близько 1,2 кВт, за нагрівання зерна до 65°C, досягається повна загибель комах» [25]. Подібні результати отримано і при інших режимах обробки, зокрема при короткочасній експозиції та підвищених температурах, що забезпечують ефективне знищення шкідників.

Підтверджено також високу ефективність методу для дезінсекції інших продуктів рослинного походження, де за оптимальних параметрів обробки досягається повне знищення шкідників. Це свідчить про перспективність використання електромагнітних полів високої та надвисокої частоти як ефективного засобу знезараження зерна та суміжної продукції.

Даний метод характеризується екологічною безпечністю, однак його застосування пов'язане зі значними капітальними та експлуатаційними витратами. Узагальнення існуючих підходів свідчить, що жоден із методів окремо не забезпечує необхідного рівня ефективності, тому на практиці доцільним є використання комбінованих технологій. «Їх результативність зумовлена ефектом сенсibilізації, тобто підвищенням чутливості шкідників до одного чинника під впливом іншого, а також різною дією окремих факторів на різні види шкідників і стадії їх розвитку, що забезпечує взаємодоповнення впливів» [9].

На основі аналізу та систематизації існуючих способів знезараження зерна запропоновано їх класифікацію, яка відображає різноманіття підходів і механізмів дії (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Класифікація методів знезараження зерна

Досліджуваний спосіб обробки зерна в умовах низькотемпературної плазми передбачає комплексний вплив декількох факторів, зокрема високої температури плазмового середовища, потоку повільних електронів, жорсткого ультрафіолетового випромінювання, електромагнітного поля надвисокої частоти, іонізованого середовища та ультразвукових коливань, що забезпечує інтенсивне знезараження зернової маси завдяки одночасному поєднанню фізичних і електромагнітних впливів на шкідників та мікрофлору.

Відомі також технології стерилізації поверхні нехарчових матеріалів і очищення повітря із застосуванням низькотемпературної плазми, які забезпечують значне зниження кількості мікроорганізмів за дуже короткий час обробки, «порядку десятків мілісекунд, при температурі плазми в межах 2000–8000 К і незначному підвищенні температури оброблюваної поверхні» [20].

1.2 Методи обробки зернової сировини з метою підвищення його засвоюваності

Вуглеводи становлять основну частину зерна і виконують роль головних поживних та структурних компонентів рослинних клітин і тканин. «У зерні пшениці, ячменю, кукурудзи та інших злакових культур переважна частка вуглеводів представлена крохмалем, вміст якого коливається в межах 60–75%» [26]. Нативний крохмаль, що формує основну частину ендосперму, характеризується низькою засвоюваністю як для людини, так і для сільськогосподарських тварин, у раціоні яких присутні зернові компоненти, що пов'язано з обмеженою дією амілолітичних ферментів. «Ступінь перетравлення крохмалю визначається його фізико-хімічним станом та умовами, що формуються у травному тракті» [27].

Крохмальні полісахариди як високомолекулярні природні сполуки є чутливими до різних видів впливу, внаслідок чого можуть піддаватися деструкції на молекулярному рівні. «У процесі розщеплення відбувається розрив основних валентних зв'язків і утворюється широкий спектр продуктів, що є фрагментами вихідної структури, зокрема лінійні та розгалужені олігосахариди з різним ступенем полімеризації, а також глюкоза як базова структурна одиниця крохмалю» [26].

Деструкція крохмалю може відбуватися під дією різних факторів, зокрема внаслідок кислотного або ферментативного гідролізу, термічного впливу, радіаційного опромінення, механічної обробки, кріогенних умов чи дії лужного середовища. «Залежно від способу впливу та параметрів процесу формуються продукти, що відрізняються як ступенем розщеплення, так і молекулярною масою» [25]. Окрім декстринів і простих цукрів, у результаті перетворення крохмалю можуть утворюватися його похідні, зокрема сполуки, що виникають унаслідок взаємодії гідроксильних груп з органічними або неорганічними речовинами, утворюючи прості та складні ефіри.

«Підвищення засвоюваності крохмалю досягається завдяки процесам клейстеризації та декстринізації. Клейстеризація відбувається за температури вище 65–70°C за наявності достатньої кількості вологи, внаслідок чого структура крохмалю змінюється і він стає більш доступним для ферментативного гідролізу» [27]. Проте при повній клейстеризації спостерігається зниження загальної перетравлюваності порівняно зі станом, коли частка декстринів становить близько 30–35%, що пов'язано зі значним підвищенням в'язкості системи і ускладненням технологічного використання такої сировини у виробництві комбикормів. З огляду на це більш доцільним напрямом є декстринізація крохмалю, яка забезпечує оптимальне поєднання технологічних і поживних властивостей.

Декстринізацію крохмалю можна здійснювати різними способами, зокрема шляхом кислотної, ферментативної або термічної обробки, а також їх поєднання. «На відміну від процесу клейстеризації, декстринізація супроводжується незначним набуханням крохмальних гранул і частковим або більш глибоким їх руйнуванням залежно від умов термообробки» [28, 29]. У результаті цього процесу відбуваються зміни фізико-хімічних властивостей крохмалю, зростає частка водорозчинних речовин, зменшується вміст крохмалю та його молекулярна маса, а кінцевими продуктами перетворення є моносахариди.

Найбільш поширеним способом декстринізації є теплова обробка, яка спричиняє суттєві зміни не лише у крохмальному, а й у білковому комплексі зерна. «При цьому відбувається перерозподіл білкових фракцій, знижується вміст альбумінів і глобулінів, а також істотно зменшується кількість вільних амінокислот унаслідок реакцій меланоїдиноутворення» [30]. Встановлено, що «за помірних режимів обробки перетравлюваність білків підвищується, тоді як за жорстких умов вона, навпаки, знижується» [28].

Сучасні підходи передбачають широкий спектр методів зміни фізико-хімічного стану крохмалю, включаючи термічні, хімічні та ферментативні способи, а також вплив випромінювання високої енергії та інтенсивної механічної обробки. Зокрема, «при тонкому подрібненні у вібраційних млинах формується так званий

ушкоджений крохмаль, який характеризується підвищеною доступністю для ферментативного гідролізу та краще засвоюється організмом тварин» [31].

Для покращення технологічних і кормових характеристик зерна застосовують різноманітні методи обробки, серед яких найбільш поширеною є термічна дія. «Вона може реалізовуватися із використанням пари, гарячого повітря, кондуктивного, інфрачервоного, акустичного, височастотного та мікрохвильового нагріву, а також механічним шляхом, зокрема під час дроблення або екструзії» [32]. В основі всіх цих способів лежить вплив таких факторів, як температура, вологість, тиск, тривалість обробки та їх поєднання (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Класифікація найбільш поширених методів обробки зернової сировини з метою підвищення його засвоюваності

У процесі будь-якої обробки зернової сировини відбуваються зміни у складі та властивостях усіх поживних компонентів. «Оскільки між окремими речовинами

існує тісний взаємозв'язок у процесі їх засвоєння, зміни, що виникають в одній із них, неминуче впливають і на інші складові, що визначає комплексний характер трансформацій зерна» [33-35].

У табл. 1.1 систематизовано найбільш поширені методи обробки харчових продуктів із урахуванням їх взаємозв'язку з різними фізичними чинниками. На сучасному етапі у виробництві комбікормів переважно використовують два основні способи термічної обробки, а саме гранулювання та підсмажування.

Таблиця 1.1 – Найбільш поширені способи обробки зерна та продуктів його переробки

Способи обробки	Вміст вологи	Температура	Тиск	Тривалість
Гранулювання	Початкова волога	висока– низька	1 атм	коротка
Смаження	Початкова волога	200–220°C	нормальне	90–100 хв
Конвективне нагрівання	Початкова волога	висока– низька	нормальне	коротка– довга
Екструзія	Початкова волога	180°C	висока	5 хв–10 сек
Флакування	Висока	120°C	1 атм	4–6 хв
Мікронізація ІЧ- випромінюванням	Середня	150–180°C	нормальне	30–90 сек
Мікронізація при діелектричному нагріванні	Початкова волога	200–300°C	нормальне або з пониженням	20–30 сек
Варіння	Початкова волога/пар	100°C	1 атм	5–25 хв
Автоклавування	Висока	100°C	1 атм	3–10 хв
Плющення	Початкова волога	нормальна	висока	дуже коротка
Дроблення під тиском	Початкова волога	нормальна	висока	коротка
Помел	Початкова волога	змінна	різне	різна
Експандування	Середня	150°C	висока	30–60 сек

При гранулюванні та підсмажуванні зерна відбуваються складні фізико-хімічні процеси: механічний тиск і температура сприяють клейстеризації та декстринізації крохмалю, що підвищує його засвоюваність. «Вологий спосіб гранулювання забезпечує інтенсивніші зміни, завдяки чому засвоюваність гранульованих кормів на 10–12% вища порівняно з негранульованими» [36]. Однак «при оптимальних режимах клейстеризація крохмалю не перевищує 10–20%, оскільки подальше збільшення ступеня клейстеризації підвищує в'язкість продукту та погіршує його технологічні властивості» [37].

«Підсмажування кондуктивним методом на обжарювальних агрегатах при температурі 200–220°C протягом 90–100 хв викликає частковий гідроліз крохмалю та утворення декстринів, проте значного їх збільшення не відбувається» [31]. Зниження вологості зерна та помірне підвищення температури обробки покращують перетравлюваність крохмалю: наприклад, «обсмажування кукурудзи з вологістю 14% при 160°C забезпечує неповну клейстеризацію 57% крохмалю та підвищує вміст декстринів до 20–24%» [38].

Дослідження показують, що якість кінцевого продукту при будь-якому способі нагрівання зерна залежить від вихідної вологості, температури та тривалості обробки. «Максимальна кількість декстринів (30–36%) досягається при конвективному нагріванні зерна ячменю з вологістю 16–22% протягом 2 хв нагрітим повітрям до 300°C, при цьому коефіцієнт перетравлюваності протеїну практично не знижується» [39].

Крім гранулювання та підсмажування, застосовують флакування (плющення) зерна, при якому ступінь декстринізації крохмалю залишається дуже низьким – 3–4%, а також екструдкування, яке проводять в екструдерах за рахунок комбінації механічного стиснення, тиску та термічної обробки. «На виході екструдера температура зерна становить 120–130°C. У процесі екструдкування відбувається знезараження грибної флори на 99,5%, бактеріальної – на 99,9%, при цьому крохмаль частково розкладається на декстрини та цукри» [40]. Основним недоліком цього методу є значні енергетичні витрати.

Відомий також метод обробки крохмалю за допомогою УФ-опромінення та впливу швидких електронів. Дослідження показали, що одним із найбільш перспективних способів обробки злакових культур є мікронізація.

«Інфрачервона (ІЧ) обробка з довжинами хвиль 1,1–2,0 мкм, що відповідають частотам поглинання H_2O у зерні, викликає механічне руйнування крохмалю, значне збільшення об'єму зернівки та зменшення її щільності: при вологості зерна 10,5 % зменшення щільності досягає 41,6 %, а при щільності 14 кВт/м² становить 24 % за вологості 14,5 %» [41, 42].

Під мікронізацією розуміють глибокий вплив інфрачервоної термообробки на молекулярному рівні, що включає декстринізацію крохмалю, інші біохімічні зміни та руйнування структурного каркасу зернівки. Однак, за визначенням вчених, мікронізація включає також і мікрохвильову термообробку, яка може призводити до вибухового розширення зерна. «Мікрохвильова термообробка здійснюється електромагнітними хвилями надвисокочастотного діапазону, що змінює основні біохімічні показники зерна, руйнуючи полімерні молекули крохмалю та перетворюючи їх на легко засвоювані декстрини та цукри» [43].

Пріоритет застосування струмів високої частоти для нагрівання належить вітчизняним інженерам та дослідникам. Вченими було «вперше використано енергію поля струмів високої частоти для нагрівання електродів електронних ламп при відкачуванні з них газів» [44].

«При «вибусі» зерна в результаті швидкісного нагріву в ЕМП НВЧ, ІЧ-випромінюванням крім зміни біохімічних та мікробіологічних показників відбувається і зміна його об'ємної маси та міцності» [45]. З міцністю пов'язані такі показники роботи борошномельних і комбікормових заводів, як витрата енергії, режими кондиціонування, подрібнення та руйнування зерна. Так, «при дробленні «повітряного» зерна енерговитрати значно зменшуються за рахунок зниження характеристик міцності зерна» [46].

При підвищенні температури відбувається випаровування води, і тиск водяної пари всередині зернівки збільшується. Це призводить до «вибуху» зернівки

зсередини, внаслідок чого руйнується структурний каркас зерна і зменшуються його характеристики міцності, що сприяє зниженню енерговитрат при помелі.

«При діелектричному нагріванні «вибух» відбувається за рахунок дисипативного перетворення енергії ЕМП НВЧ-діапазону в тепло по всьому об'єму зерна. Ефект температури та тиску при «вибуху» зерна викликає механіко-хімічну деструкцію крохмалю з утворенням високоперетравних декстринів» [45].

Ступінь впливу різних способів обробки на поживні властивості оброблюваного продукту показує, що найбільший ефект на поживні речовини та мікробіологічний стан зерна мають гранулювання за допомогою пари, флакування, мікронізація під дією інфрачервоного випромінювання або при діелектричному нагріванні, експансія та екструзія.

Таблиця 1.2 – Вплив різних способів обробки перетравлюваність сухих речовин і протеїну у свиней

Спосіб обробки	Суха речовина	Протеїн
Експансія	+4–6%	+5–7%
Екструзія	+5–7%	+9–11%
Флакування	+7–8%	+12–17%
Мікронізація	+6–10%	+15–21%

З наведених даних видно, що «однією з перспективних методик обробки злакових культур є мікронізація, тобто вплив інфрачервоного опромінення або електромагнітного поля НВЧ-діапазону на зернову сировину комбікормів, при цьому вирішальним для отримання продукту високої якості є правильно обраний режим термообробки» [45, 47].

Більш ефективною є НВЧ-обробка, оскільки на відміну від традиційних способів, коли спочатку нагріваються периферійні шари зернівки, а потім теплота поширюється всередину за рахунок теплопровідності, відбувається дисипація енергії по всьому об'єму зернової маси в місцях локалізації вологи. «При цьому оскільки середня температура зерна не перевищує 60 °С, а вологовміст

периферійних шарів окремих зернівок більший, ніж у внутрішніх, виключається «закалювання» їх оболонки» [45].

«Завдяки екпандуванню та екструзії відбувається не лише збільшення вмісту сухих речовин і протеїну, а й часткове руйнування структурного каркасу зерна, що підвищує його засвоюваність у травному тракті тварин» [32]. Ці способи обробки сприяють зниженню мікробіологічної забрудненості зерна, зменшенню активності антипоживних факторів і поліпшенню технологічних властивостей комбікормів.

«Флакування та мікронізація дозволяють отримати продукт з високою біологічною цінністю завдяки більш інтенсивній декстринізації крохмалю та підвищенню вмісту водорозчинних речовин» [41]. Внаслідок цього комбікорми стають легше перетравними, що підвищує ефективність використання поживних речовин і зменшує енерговитрати на їх перетравлення тваринами.

Висновки по розділу.

У ході огляду літературних джерел було встановлено, що обробка зерна є важливим етапом підвищення його технологічних і кормових властивостей. Різноманітні методи, зокрема термообробка, гранулювання, підсмажування, флакування, екструзія та мікронізація, впливають на фізико-хімічний стан крохмалю, білків і інших поживних речовин. З аналізу даних видно, що одні методи забезпечують кращу перетравлюваність крохмалю, інші — зменшують мікробіологічне забруднення або підвищують вміст декстринів та водорозчинних речовин. Особливу увагу дослідники приділяють комбінованим методам, які дозволяють досягти синергійного ефекту за рахунок сенсibilізації шкідників або комплексного впливу на різні компоненти зерна.

Літературні дані показують, що мікронізація, особливо під впливом інфрачервоного або НВЧ-випромінювання, є перспективним способом обробки зерна, оскільки вона забезпечує глибоку декстринізацію крохмалю, руйнування структурного каркасу та покращення засвоюваності поживних речовин. Водночас гранулювання та екструзія ефективні для підвищення сухих речовин і протеїну, а

флакування і підсмажування – для часткової декстринізації та поліпшення технологічних властивостей.

Проміжні дослідження свідчать, що ефективність обробки зерна значною мірою залежить від вихідних характеристик сировини, таких як вологість, щільність та розмір зернівки, а також від режимів впливу – температури, тиску, тривалості обробки та поєднання фізичних факторів. Наприклад, при термообробці та гранулюванні оптимальна вологість зерна забезпечує помірну клейстеризацію крохмалю, що сприяє кращій перетравлюваності, тоді як занадто високі температури чи тривалість обробки можуть призвести до зниження засвоюваності білків і збільшення в'язкості продукту. Одночасно комбіновані методи, такі як мікронізація з подальшим експандуванням або екструзією, дозволяють синтезувати ефект декстринізації, знезараження та поліпшення технологічних властивостей, забезпечуючи більш стабільний і поживно цінний кінцевий продукт. Це підкреслює важливість індивідуального підбору режимів обробки для конкретних видів зерна та кінцевого призначення продукту.

Таким чином, узагальнення літератури свідчить, що сучасні способи обробки зерна комплексно впливають на його харчову цінність і мікробіологічний стан, а застосування комбінованих методів дозволяє оптимізувати якість кінцевого продукту для виробництва комбікормів та харчових продуктів.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика використаної сировини

Основним об'єктом експериментальних досліджень було зерно пшениці рядової, заражене шкідниками хлібних запасів – коморним та рисовим довгоносиками у III ступені зараженості. Крім того, для розширення експериментальної бази досліджувалися інші зернові культури, зокрема ячмінь, які були уражені різними видами комах та кліщів. Серед них – рудий мукоїд, млинова вогнівка, капровий жук (зернова трогодерма), малий борошняний хрущак, хлібний точильник, а також борошняний кліщ. Такий широкий спектр об'єктів дозволив оцінити ефективність обробки для різних біологічних форм шкідників і стадій їх розвитку.

Залучення кількох видів зернової сировини та різноманітних шкідників дало можливість комплексно дослідити вплив технологічних факторів на процес дезінсекції та визначити універсальність застосовуваного методу. Особлива увага приділялася пшениці як основній продовольчій культурі, що має найбільше практичне значення. Вихідні показники якості зерна пшениці, які використовувалися для подальшого аналізу змін під впливом обробки, наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Показники якості використаного зерна пшениці

Найменування показника	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4
Тип	I	III	IV	IV
Підтип	3	2	3	4
Рік урожаю	2024	2024	2025	2025
Склоподібність, %	56	48	60	42
Натура, г/л	775	810	760	764
Маса 1000 зерен, г	29,2	28,2	27,0	28,5
Вологість, %	12,8	12,2	13,6	14,4

Продовження табл. 2.1

Найменування показника	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4
Кількість клейковини, %	23,0	21,8	25,0	23,0
Якість клейковини, од. ІДК	61	65	90	95
Зольність, %	1,78	1,70	1,82	1,98
Прохід через сито 1,7×20, %	2,0	2,2	2,1	0,6
Зернова домішка, %	1,75	0,89	1,70	2,86
Сміттева домішка, %	1,0	0,51	1,12	1,0

Дані таблиці свідчать, що зерно пшениці в цілому відповідає вимогам ДСТУ за основними показниками якості. Склоподібність зерна варіює від 42 до 60 %, що відноситься до середнього рівня ендосперму. Натура зерна коливається в межах 760–810 г/л, що відповідає стандартним показникам щільності для рядових сортів пшениці. Маса 1000 зерен знаходиться в межах 27–29,2 г, що відповідає нормам для даного типу зерна.

Вміст клейковини складає 21,8–25 %, а її якість за ІДК коливається від 61 до 95 одиниць, що свідчить про придатність зерна для виготовлення борошна вищого та першого ґатунку. Зольність зерна перебуває в межах 1,70–1,98 %, що відповідає допустимим нормам чистоти та низькому вмісту мінеральних домішок.

Прохід через сито 1,7×20 % та наявність зернової і сміттевої домішки також не перевищують нормативних значень, хоча у деяких зразках спостерігається дещо більший вміст зернової домішки, що не суттєво впливає на загальні технологічні властивості.

Загалом, аналіз показників свідчить про відповідність зерна пшениці встановленим стандартам і його придатність для промислового використання, зокрема для помелу та виробництва хлібобулочних виробів.

2.2 Обладнання для НВЧ-обробки зерна

Процес знезараження зерна проводили на трьох установках: експериментальній УПДЗП-1, лабораторній «Пласт-0,5» та напівпромисловій «Пласт-5», які застосовують плазмову дезінсекцію для обробки зерна у потоці. Основні параметри кожної установки наведено в табл. 1.2.

Зерно обробляють, пропускаючи його вільно падаючим потоком через об'ємну низькотемпературну мікрохвильову плазму при атмосферному тиску, з температурою близько 300 °С. Час обробки дуже короткий – від 0,0 до 0,1 секунди. Ступінь іонізації плазми при температурі повітря 20 °С становить 10^{-5} , щільність частинок – 10^{19} см³, а електронна щільність – 10^{14} електронів на см³.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика установок плазмової дезінсекції зерна

Параметр	УПДЗП-1	Пласт-0,5	Пласт-5
Продуктивність установки, кг/год	90–500	90–400	5000
Кількість генераторів, шт.	2	1	1
Робоча частота, МГц	$2450 \pm 2\%$	$2450 \pm 2\%$	$2450 \pm 2\%$
Живлення генератора	50 Гц, 380 В	50 Гц, 380 В	50 Гц, 380 В
Живлення блоку живлення	50 Гц, 220 В	50 Гц, 220 В	50 Гц, 220 В
Середня потужність, кВт	–	0,5	2
Потужність у імпульсі, кВт	2	0,8	4–5,5
Максимальна споживана потужність, кВт	≤ 3	1,2	12
Час контакту зерна з плазмою, с	0,01–0,05	0,014–0,05	0,014–0,1
Витрата робочого газу, л/хв	16–40	16–40	100
Надлишковий тиск повітря на вході, атм	0,154–0,2	0,15–0,2	–
Розміри робочої камери, мм	100 × 110 × 120	100 × 110 × 120	700 × 600 × 300
Габаритні розміри установки, мм	2000 × 950 × 800	1500 × 950 × 800	2000 × 1000 × 3500

Усі установки для плазмової обробки зерна, такі як УПДЗП-1, «Пласт-5» та «Пласт-0,5», працюють на основі вихрового плазмотрону з радіально-променевою подачею енергії (рис. 2.1). Плазматрон являє собою металеву циліндричну камеру, в яку НВЧ-енергія подається від магнетрону через прямокутний хвилевід із вікном 90×45 мм, герметизованим тefлоновою вставкою. Розряд формується потоком повітря, що вводиться через чотири тангенціальні отвори, створюючи зону рециркуляції, при цьому більша частина повітря виходить через отвори в дні камери. Установки працюють при атмосферному тиску.

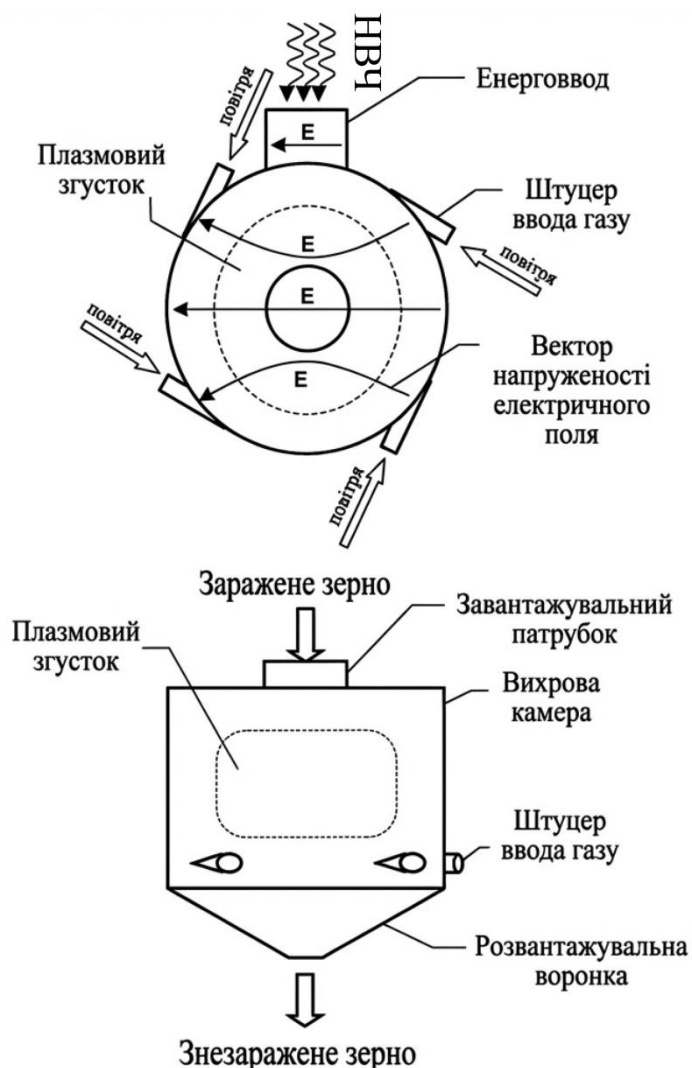


Рисунок 2.1 – Принципова схема обладнання для НВЧ-обробки

Діаметр внутрішньої зони вихрового потоку визначається розташуванням вихідних отворів у дні камери. Електродинамічний процес у мікрохвильовому діапазоні контролюється через проріз у бічній стінці камери, до якого приєднаний

стандартний хвилевід. На стиках секцій хвилеводу та точках підключення до генератора встановлені мідні прокладки для герметичності та стабільності передачі енергії.

Усередині камери збуджується хвиля Ні, що дозволяє автоматично регулювати температуру газового розряду: зростання електропровідності плазми при підвищенні температури зменшує електричне поле, запобігаючи перегріву.

Розміри плазмового розряду визначаються концентрацією мікрохвильової енергії, яка має становити близько 10^{20} Вт/см³ при заданій потужності. Амплітуда мікрохвильової потужності підбирається для стабільного збудження та підтримки плазмового розряду, а напруженість електричного поля в плазмі складає близько 500 В/см, що підтверджено спеціальними дослідженнями.

Ця конструкція забезпечує рівномірний вплив НВЧ-енергії на зерно та підтримку стабільного плазмового розряду в атмосферних умовах, що підвищує ефективність дезінсекції та обробки зерна в потоці.

2.3 Методики виконання досліджень

У спеціальних ємностях розводили різні види шкідників, зокрема амбарного довгоносика (*Sitophilus granarius* L), рисового довгоносика (*Sitophilus oryzae* L), малого борошняного хрущака (*Tribolium confusum* Duv.) та інші. Для цього в трилітрові ємності засипали 2,5–3 кг зерна, зволоженого до 22–24 %, і додавали кілька дорослих особин певного виду шкідників. Ємності накривали марлею та поміщали в термостат при температурі +24°C на 1–2 місяці для тривалого розмноження шкідників.

Перед засипанням зерна у ємності обов'язково визначали його основні показники: вологість, натуру, ступінь засміченості та наявність зараження. Це дозволяло контролювати вихідний стан сировини та забезпечувати стандартні умови для експериментального розведення шкідників.

Для дослідів відбирали навішення незараженого зерна масою 370 г, 740 г та 1480 г (0,5 л, 1 л і 2 л відповідно). Перед кожною серією експериментів визначали

основні показники зерна – вологість та рівень зараженості. У частині дослідів додатково оцінювали енергію проростання, схожість, кількість і якість клейковини.

Щоб досліджувати явну форму зараженості, у кожен зразок безпосередньо перед експериментом вносили 50, 100, 200, 500 або 1000 дорослих особин шкідників, попередньо відібраних із ємностей для розведення. Шкідників відсівали та обирали тільки живих комах із нормальною активністю.

Для визначення прихованої форми зараженості зразки з дорослими шкідниками витримували у термостаті протягом одного, двох, трьох або чотирьох тижнів. Після цього видаляли всіх шкідників у явній формі (імаго), і зерно піддавали обробці у НВЧ. Такий підхід дозволяв оцінити ефективність обробки як для явної, так і для прихованої форми зараженості.

Зразки зерна засипали у бункер завантаження або самопливну трубу над дозатором (живильником). Після цього підключали блок живлення та генератор до мережі й запускали повітряний компресор.

У деяких експериментах частина шкідників повністю знищувалася в камері плазмотрона, а решта трупів могла виходити з камери разом із повітряним потоком у приймальну ємність. Для розрахунків брали лише ті досліди, де частка невиявлених шкідників не перевищувала 5 %. 100 % приймалося за загальну кількість живих і мертвих комах, виявлених після плазмової обробки.

Оброблені та контрольні зразки утримували в термостаті та періодично перевіряли на наявність шкідників. Внутрішню зараженість оцінювали підрахунком живих жуків, що виходили з зернівок у контрольних і оброблених зразках.

Зараженість зерна шкідниками хлібних запасів визначали за ДСТУ ISO 16002:2014 «Зерно та продукти зернові. Методи визначення зараженості живими безхребетними (комахами та кліщами)».

Тип та підтип культур визначали за ДСТУ 4529:2006 «Зерно і продукти зернові. Терміни та визначення основних понять».

Натурну масу визначали за ДСТУ 10840:2015 «Зерно. Методи визначення натурної маси».

Вологість визначали основним стандартним методом висушування навішень у електричній сушильній шафі за ДСТУ ISO 712:2010 «Зерно. Метод визначення вологості».

Масу 1000 зерен визначали за ДСТУ 10842:2015 «Зерно. Методи визначення маси 1000 зерен».

Склоподібність зерна пшениці проводили за ДСТУ 10987:2015 «Зерно. Метод визначення склоподібності пшениці».

Вміст домішок, дрібних зерен та крупність зерна визначали за ДСТУ 10939:2015 «Зерно. Метод визначення засміченості, проходу дрібних зерен та крупності».

Кількість клейковини та якість клейковини визначали за ДСТУ 13586.4:2017 «Зерно. Методи визначення кількості та якості клейковини у пшениці» (на приладі ІДК-1).

Визначення змісту декстринів проводили методом Попова М.П.

Висновки по розділу.

У ході досліджень встановлено, що використана сировина відповідала чинним ДСТУ за показниками вологості, натурної маси, маси 1000 зерен, вмісту клейковини та склоподібності. Враховувалися різні ступені зараженості шкідниками хлібних запасів (амбарний та рисовий довгоносики, малий борошняний хрущак та інші). Всі показники контролювалися до початку експериментів, що забезпечувало достовірність отриманих результатів.

Для НВЧ-обробки застосовували експериментальні, лабораторні та напівпромислові установки, які працюють на вихрових плазмотронах з радіально-променевим введенням енергії. Параметри обробки включали потужність магнетрону, що дозволяло забезпечити знезараження зерна та вплив на його структурно-механічні властивості. Методики проведення досліджень передбачали визначення явної та прихованої форм зараженості, підрахунок живих шкідників, а також оцінку фізико-хімічних характеристик зерна, що дало можливість комплексно оцінити ефективність НВЧ-обробки.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Визначення впливу потужності магнетрону на ефективність знезараження зерна пшениці

Питома щільність теплової потужності в тілі дорослого шкідника у 25,25–40,75 разів перевищує аналогічний показник для зерна, а в тілі личинки цей показник є ще вищим і становить у 47,5–61,25 разів більше порівняно із зернівкою. Це зумовлює суттєву різницю у впливі електромагнітного поля на шкідників і зернову масу. Додатково слід враховувати високі швидкості нагрівання, які становлять близько 50 К/с для зерна та до кількох сотень градусів за секунду для комах, що значно інтенсивніше впливає на складно організований біологічний об'єкт, ніж на відносно просту структуру зернівки.

Результати експериментальних досліджень дезінсекції зерна, зараженого рисовим довгоносом у відкритій та прихованій формах, свідчать про зростання ефективності процесу зі збільшенням імпульсної потужності магнетрона (рис. 3.1).

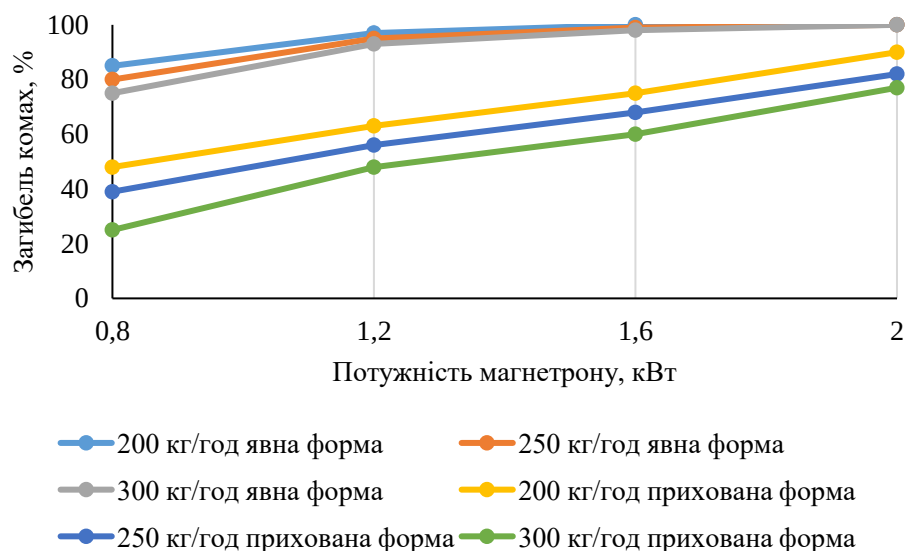


Рисунок 3.1 – Залежність дезінсекції зерна пшениці зараженої рисовим довгоносом від імпульсної потужності магнетрону

Зокрема, рівень загибелі жуків у міжзерновому просторі підвищується з 75–85 % при потужності 0,8 кВт до 99,8–100 % при 2 кВт. Водночас ефективність

знищення шкідників на преімагінальних стадіях розвитку зростає з 24–48 % до 76–89 % відповідно, що підтверджує доцільність використання більш високих енергетичних режимів обробки.

З аналізу графічних даних (рис. 3.1) встановлено, що за відносно невисокої продуктивності на рівні 200 кг/год повна дезінсекція відкритої форми зараження досягається при сумарній імпульсній потужності 1,5 кВт. У цих умовах забезпечується також знищення близько 75 % шкідників, які перебувають у прихованих стадіях розвитку, зокрема у вигляді яєць, личинок і лялечок.

Зі збільшенням продуктивності процесу, що супроводжується зростанням ступеня заповнення робочої камери плазмотрона, ефективність знезараження знижується. Для компенсації цього ефекту та забезпечення необхідної дози енергетичного впливу на зерно доцільним є підвищення потужності НВЧ-енергії. Так, при продуктивності 300 кг/год для досягнення повної дезінсекції відкритої форми зараження необхідна потужність магнетрона на рівні 2 кВт, при цьому ефективність знищення шкідників у прихованих стадіях розвитку становить близько 76 %.

Зі зростанням імпульсної потужності магнетрона чітко простежується підвищення ефективності процесу дезінсекції зернової маси. Це пояснюється збільшенням кількості енергії, що передається об'єкту обробки, внаслідок чого відбувається інтенсивніше нагрівання та деструкція біологічних структур шкідників. При цьому навіть незначне підвищення потужності призводить до суттєвого зростання рівня загибелі комах, особливо у відкритих формах їх існування, що підтверджує високу чутливість шкідників до енергетичного впливу НВЧ-поля.

Водночас збільшення імпульсної потужності позитивно впливає і на ефективність знищення шкідників, що перебувають у прихованих стадіях розвитку. Завдяки глибшому проникненню енергії в зернівку та локалізації теплового ефекту в зонах підвищеної вологості забезпечується більш рівномірна обробка всього об'єму зерна. Це дозволяє підвищити загальний рівень дезінсекції та зменшити

ймовірність повторного розвитку популяції шкідників, що є важливим для забезпечення тривалого зберігання зернової сировини.

Доцільність застосування НВЧ-обробки в імпульсному режимі з підвищеною потужністю обумовлена більш інтенсивним енергетичним впливом на шкідників при збереженні прийнятних умов для зернової сировини. У такому режимі енергія передається короткими імпульсами високої потужності, що забезпечує різке локальне підвищення температури та ефективне руйнування біологічних структур комах. Це дозволяє досягати високого рівня дезінсекції за короткий проміжок часу порівняно з безперервним режимом.

Водночас використання імпульсного режиму з більшою потужністю сприяє рівномірнішому розподілу енергії в об'ємі зерна та підвищенню ефективності впливу на приховані стадії розвитку шкідників. Завдяки цьому зменшується ймовірність виживання окремих особин та повторного зараження зернової маси. Такий підхід дозволяє оптимізувати процес обробки, поєднуючи високу ефективність дезінсекції з раціональним використанням енергетичних ресурсів.

Залежність впливу імпульсної потужності магнетрона на ефективність знищення відкритої форми зараження у часі демонструє чітку тенденцію до підвищення результативності процесу зі зростанням енергетичних параметрів (рис. 3.2).

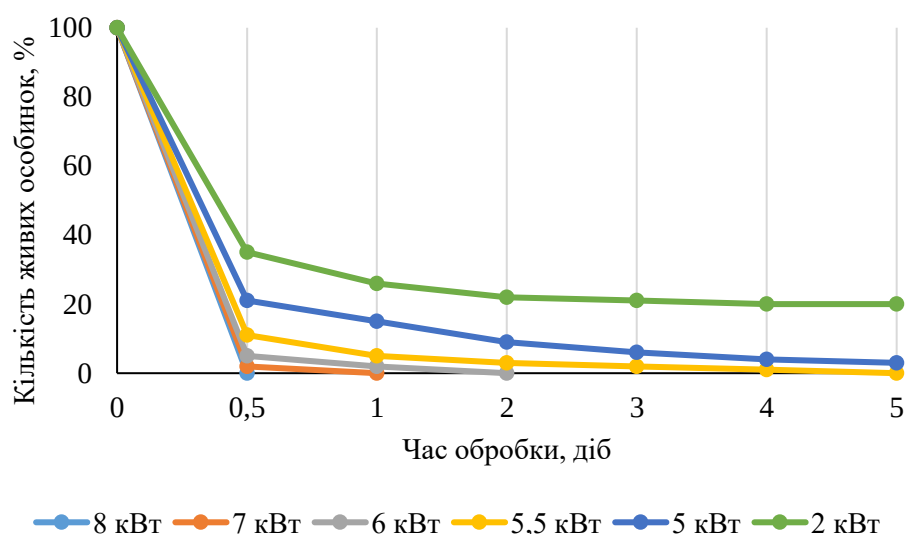


Рисунок 3.2 – Вплив потужності магнетрону в імпульсі на динаміку відмирання жуків амбарного довгоносика

Встановлено, що за потужності магнетрона 8 кВт і вище досягається практично миттєва дезінсекція зерна, зараженого комірним довгоносом. При зменшенні потужності до 7, 6 і 5,5 кВт спостерігається збільшення тривалості повного відмирання жуків, яка становить відповідно 1, 2 і 5 діб.

Подальше зниження потужності негативно впливає на ефективність процесу, що проявляється у збереженні частини життєздатних шкідників. Так, при потужності 5 кВт близько 3,5 % комах не гинуть навіть протягом тижня спостережень, тоді як при 2 кВт їх кількість зростає до 20,5 %. Водночас у процесі обробки фіксується вихід жуків із внутрішніх порожнин зернівок у міжзерновий простір, що свідчить про інтенсивний вплив енергетичних факторів на приховані форми зараження та їх часткову міграцію під дією температурного і електромагнітного навантаження.

3.2 Визначення впливу імпульсного режиму магнетрону на ефективність знезараження зерна пшениці

Вплив НВЧ-поля на шкідників при роботі магнетрона в імпульсному режимі за наявності накопичувача енергії є більш інтенсивним порівняно з безперервним режимом за однакової середньої потужності. Це пояснюється тим, що в імпульсному режимі енергія подається у вигляді короткочасних, але більш потужних імпульсів, які забезпечують вищу локальну щільність енергетичного впливу на біологічні об'єкти.

Важливою характеристикою такого режиму є шпаруватість, яка визначається як величина, обернено пропорційна добутку частоти імпульсів на їх тривалість. Саме цей параметр значною мірою впливає на ефективність процесу, оскільки визначає співвідношення між тривалістю подачі енергії та паузами, що дозволяє оптимізувати умови нагрівання і підвищити результативність дезінсекції.

Імпульсна потужність магнетрона під час НВЧ-обробки визначається тривалістю імпульсу за умови сталого періоду: зі зменшенням тривалості імпульсу її значення зростає. За відсутності накопичувача енергії у схемі живлення

імпульсна потужність залишається практично сталою і не залежить від тривалості імпульсу, тоді як сумарний вплив НВЧ-поля на зернову масу визначається співвідношенням між тривалістю періоду та імпульсу, що безпосередньо впливає на загальну дозу підведеної енергії.

Аналіз залежності ефективності дезінсекції від тривалості імпульсу показує, що за однакової імпульсної потужності та періоду підвищення тривалості імпульсу сприяє зростанню результативності обробки, однак найбільш суттєвий ефект спостерігається в діапазоні 20–100 мс (рис. 3.3).

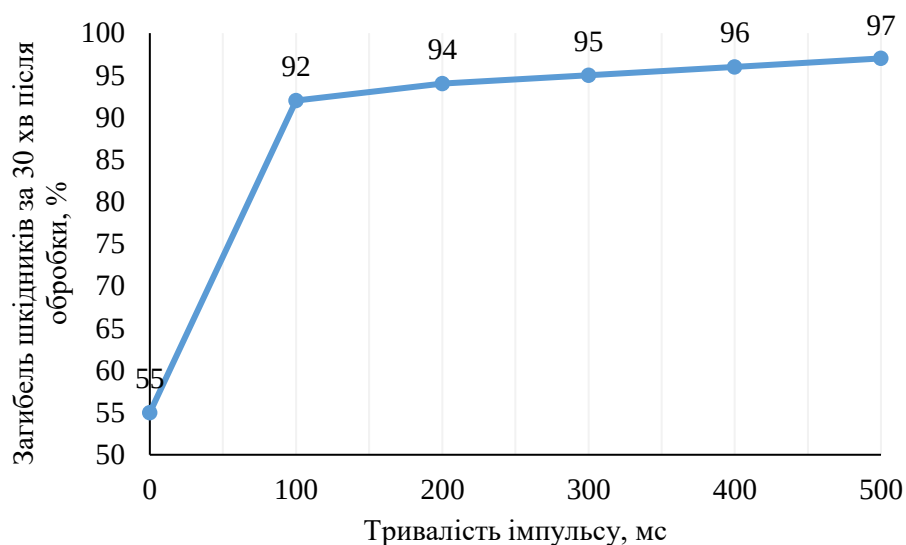


Рисунок 3.3 – Загибель комірного довгоноса при імпульсній потужності магнетрону 5 кВт та часу періоду 1000 мкс

Саме в цьому інтервалі відбувається інтенсивне підвищення ефективності, тоді як подальше збільшення тривалості імпульсу не забезпечує значного покращення результату. Це свідчить про існування оптимального режиму НВЧ-обробки, за якого досягається максимальний ефект при раціональних енергетичних витратах.

За даними з рис. 3.4 встановлено, що зі збільшенням шпаруватості, тобто відношення тривалості періоду до тривалості імпульсу, ефективність дезінсекції знижується. Це пояснюється зменшенням сумарної кількості НВЧ-енергії, яка надходить у зернову масу при сталому рівні імпульсної потужності.

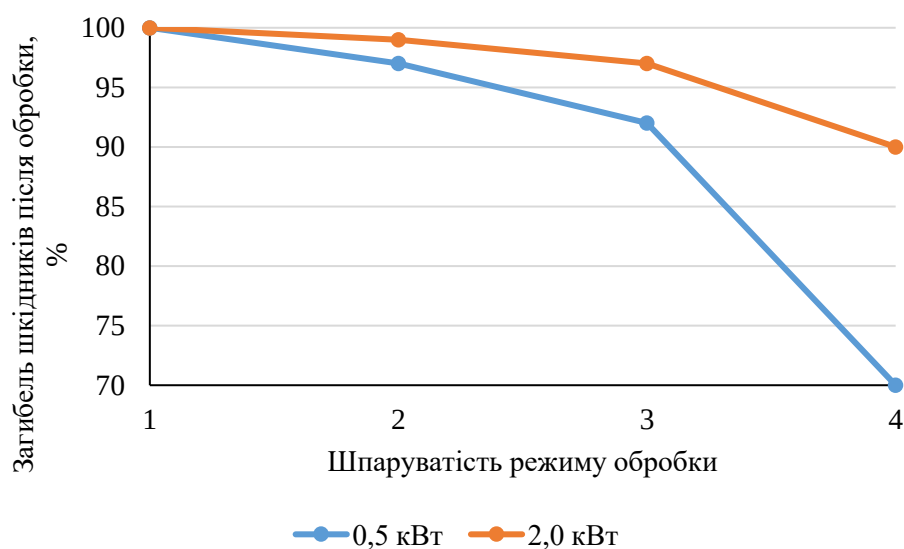


Рисунок 3.4 – Залежність ефективності знезараження від шпаруватості режиму роботи магнетрона

Водночас підвищення середньої потужності дозволяє частково компенсувати цей ефект і зменшити вплив шпаруватості на кінцевий результат обробки.

Регулювання режимів роботи магнетрона під час НВЧ-обробки може здійснюватися шляхом зміни параметрів електроживлення, зокрема сили анодного струму, що впливає на тривалість періоду імпульсів (рис. 3.5).

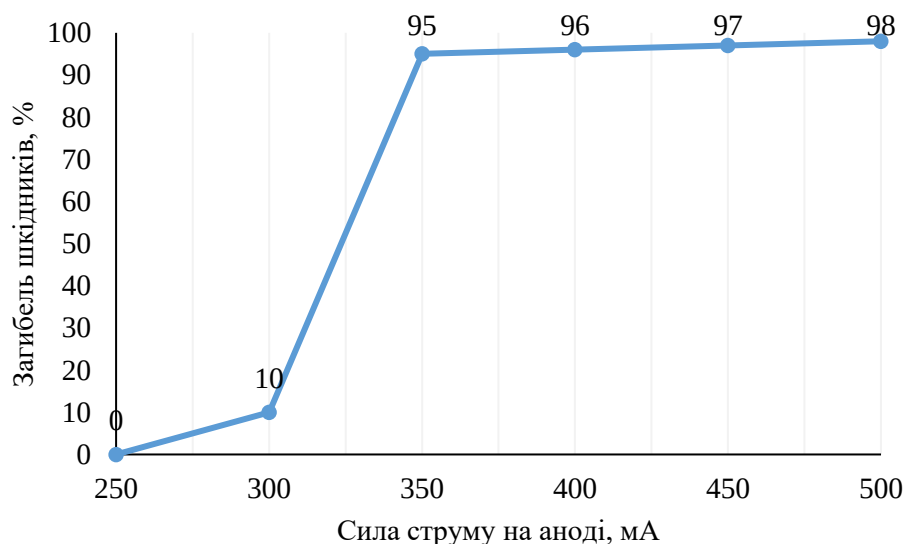


Рисунок 3.5 – Залежність ефективності знезараження зерна пшениці від сили струму на аноді магнетрону

Як видно з рис. 3.5 при зменшенні сили струму спостерігається скорочення періоду та зниження ефективності дезінсекції, особливо за значень нижче критичного рівня, що пов'язано з нестабільністю енергетичного впливу. Це підкреслює необхідність підтримання оптимальних електрофізичних параметрів для забезпечення стабільної та ефективної НВЧ-обробки зерна.

3.3 Вплив НВЧ-обробки на структурно-механічні властивості зерна

У процесі «вибуху» зерна під дією НВЧ-обробки відбуваються істотні зміни геометричних параметрів зернівок, що зумовлено різким підвищенням внутрішнього тиску водяної пари. Найбільші деформації характерні для товщини зерна пшениці та ячменю, тоді як зміни довжини є найменш вираженими (табл. 3.1).

Це пояснюється особливостями анатомічної будови зернівки та напрямком найменшого опору при розширенні внутрішніх структур. У результаті таких перетворень формується пориста структура, що супроводжується зменшенням щільності та зміною насипної маси зерна.

Таблиця 3.1 – Зміна лінійних розмірів зерна пшениці під дією НВЧ-обробки при перепаді тиску

Параметр	До обробки	Після обробки
Довжина, мм	7,0	7,1
Ширина, мм	3,5	4,0
Товщина, мм	2,8	3,3

Дослідження впливу НВЧ-нагріву (за імпульсної потужності 5,5 кВт, тривалості обробки 10–60 с і температури 150–200 °С) показують, що найбільш інтенсивні зміни лінійних розмірів зернівок відбуваються у проміжку 15–25 с обробки (рис. 3.6).

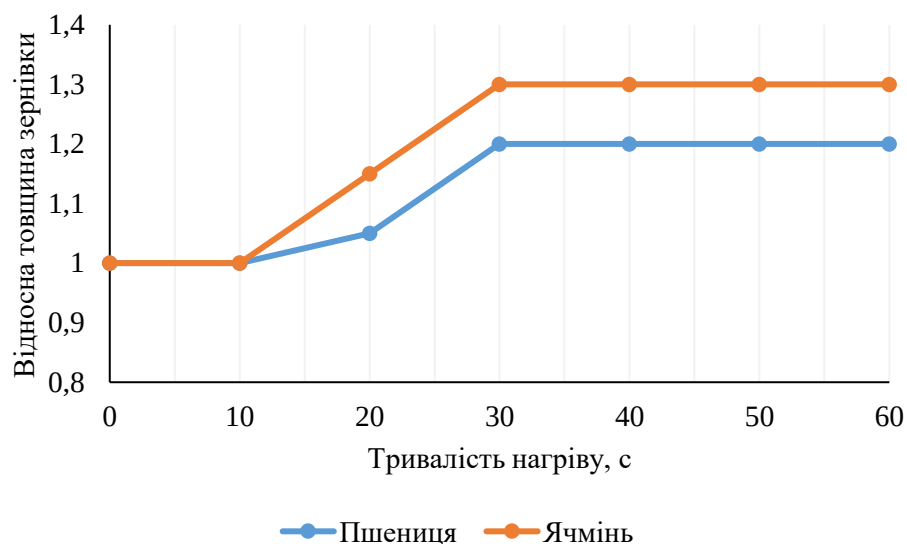


Рисунок 3.6 – Вплив тривалості НВЧ-нагріву на відносну товщину зернівки

Саме в цей період спостерігається максимальне наростання внутрішнього тиску, що призводить до руйнування структурного каркасу зерна. Подальше збільшення тривалості обробки не дає пропорційного приросту деформацій, що свідчить про досягнення граничного рівня структурних змін.

Оцінка структурно-механічних властивостей зерна, проведена шляхом стискання одиничних зернівок при динамічному навантаженні, показала, що зміна товщини тісно пов'язана зі зростанням податливості матеріалу (рис. 3.7 та 3.8).

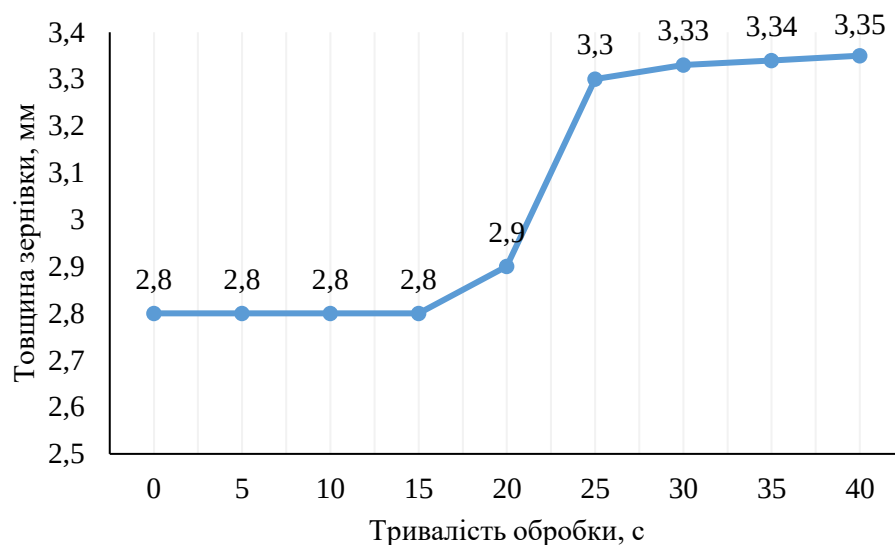


Рисунок 3.7 – Залежність товщини зернівки від тривалості НВЧ-обробки

Це означає, що зі збільшенням розмірів зернівки знижується її міцність, а отже, полегшується процес подрібнення. Встановлено, що зміни податливості корелюють також із такими показниками, як щільність, натура та насипна маса, що є важливими для технологічних процесів переробки зерна.

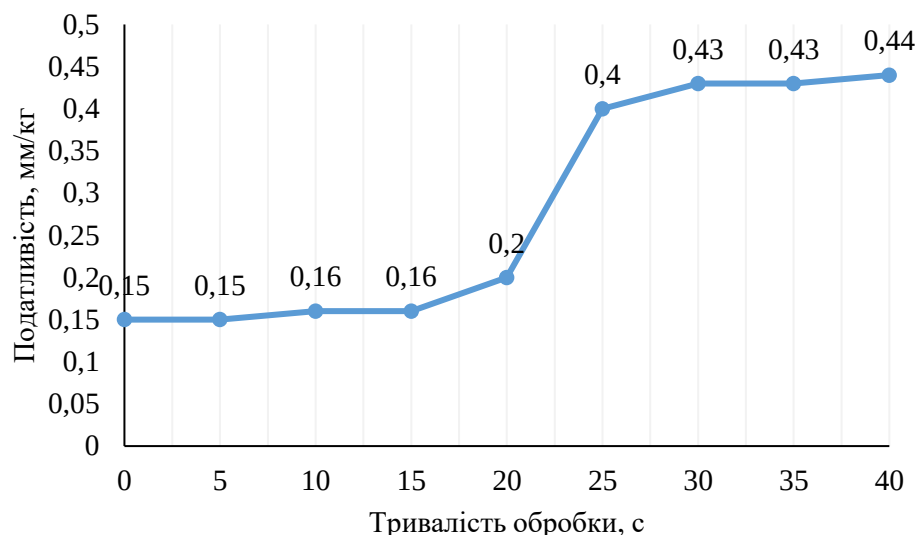


Рисунок 3.8 – Залежність податливості зернівки від тривалості НВЧ-обробки

Додатково встановлено, що створення перепаду тиску (зниження з 2 до 1 атм) у кінцевій стадії НВЧ-нагріву значно інтенсифікує процес руйнування зернівок. За таких умов «вибух» відбувається швидше і потребує менших енергетичних витрат, що підвищує ефективність обробки (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Вплив НВЧ обробки з вибухом при перепаді тиску в 1 атмосферу на міцність зерна пшениці вологістю 12%

Показник	Вихідний зразок	Дослід №1	Дослід №2	Дослід №3
Тривалість роботи, с	0	1	5	10
δ/T (мм/кг)	0,14	0,20	0,24	0,41
T/δ (кг/мм)	6,50	4,89	3,75	2,45

Це відкриває перспективи оптимізації режимів НВЧ-обробки з метою зниження енерговитрат і підвищення технологічної ефективності підготовки зерна до подальшої переробки.

Як видно з наведених даних, в умовах створення перепаду тиску навіть за короткочасної обробки міцність зерна знижується приблизно у 1,43 рази, що свідчить про інтенсивне послаблення його структурного каркасу.

Таким чином, можна припустити, що подальше збільшення перепаду тиску разом із підвищенням підведеної потужності створює передумови для реалізації процесу обробки зерна з «вибухом» у потоці, зокрема в режимі вільного падіння, що відкриває можливості для інтенсифікації технологічного процесу.

3.4 Вплив НВЧ-обробки на вуглеводний склад зерна

За умов інтенсивної НВЧ-обробки зерна, що здійснюється при імпульсній потужності магнетрона 5,5 кВт, тривалості впливу близько 20 с і температурі нагрівання в межах 150–200 °С, у поєднанні зі створенням перепаду тиску (зниження з 2 до 1 атм), відбуваються глибокі фізико-хімічні перетворення вуглеводного комплексу. Насамперед це проявляється у деструкції нативного крохмалю, який під дією високошвидкісного нагріву та внутрішнього парового тиску розщеплюється до більш простих і легкозасвоюваних сполук – декстринів і глюкози. Такий ефект пояснюється інтенсивним внутрішнім нагріванням зернівки, що призводить до руйнування кристалічної структури крохмальних гранул і переходу їх у аморфний стан.

Для підтвердження встановлених закономірностей було проведено серії паралельних експериментів із зерном пшениці та ячменю. Для кожного значення вологості виконували по 10 дослідів, що забезпечило достатню достовірність отриманих результатів. Вихідні показники свідчать, що у необробленому зерні пшениці вміст декстринів становив близько 0,7%, а глюкози – 10,2%, тоді як у зерні ячменю ці значення були відповідно нижчими – 0,2% і 8,0%. Після НВЧ-обробки

спостерігалось суттєве зростання частки продуктів гідролізу крохмалю, що підтверджує ефективність даного способу модифікації вуглеводного складу.

Отримані результати (табл. 3.3) свідчать, що поєднання НВЧ-нагріву з перепадом тиску є перспективним напрямом інтенсифікації технологічної обробки зерна. Такий підхід дозволяє не лише підвищити ступінь декстринізації, але й покращити засвоюваність поживних речовин, що є особливо важливим у виробництві комбікормів і функціональних харчових продуктів.

Таблиця 3.3 – Ступінь декстринізації та вивільнення глюкози при мікрохвильовій обробці пшениці та ячменю при різній вологості

Умови обробки	Вологість, %	Декстрини, %		Глюкоза, %	
		пшениця	ячмінь	пшениця	ячмінь
НВЧ-нагрів без спучування зерна ($\tau = 30$ с)	12	1,2	1,1	14,5	13,2
	14	2,8	2,7	16,7	15,9
	16	3,2	3,1	17,1	16,3
НВЧ-нагрів при перепаді тиску зі спучуванням зерна ($\tau = 20$ с)	12	27,2	28,5	47,8	43,4
	14	28,6	30,2	49,6	45,9
	16	29,3	31,6	51,1	46,8

Як свідчать наведені дані, визначальним фактором підвищення поживної цінності та засвоюваності крохмалю при даному способі обробки є процес спучування зерна, або так званий «вибух». Його суть полягає у миттєвому руйнуванні внутрішньої структури зернівки внаслідок різкого вивільнення пароповітряної суміші, що утворюється під час інтенсивного НВЧ-нагріву. Такий механізм забезпечує глибоку деструкцію крохмальних гранул, переведення їх у більш доступні для ферментативного гідролізу форми та суттєве підвищення частки водорозчинних вуглеводів.

Аналіз впливу вологості зерна показує, що її підвищення в межах досліджуваного діапазону не має вирішального значення порівняно з ефектом спучування. Зі збільшенням вологості спостерігається лише незначне зростання вмісту декстринів і цукрів після обробки. Зокрема, для пшениці з початковою

вологістю 12% вміст декстринів підвищується приблизно з 0,7% до 27,2%, а глюкози – з 10,2% до 47,8%. При підвищенні вологості до 16% ці показники зростають до 29,3% і 51,1% відповідно. Аналогічна тенденція характерна і для ячменю: при вологості 12% спостерігається значне збільшення вмісту декстринів і цукрів, а при 16% – їх подальше, але вже менш інтенсивне зростання.

Отримані результати підтверджують, що ключову роль у модифікації вуглеводного комплексу зерна відіграє саме інтенсивність термомеханічного впливу, а не лише початкова вологість сировини. Це дозволяє зробити висновок про доцільність оптимізації режимів НВЧ-обробки з акцентом на забезпечення ефекту «вибуху», що є основним чинником підвищення біодоступності поживних речовин.

Висновки по розділу.

У результаті виконання експериментальних досліджень встановлено основні закономірності впливу параметрів НВЧ-обробки на ефективність знезараження та зміну фізико-хімічних властивостей зерна пшениці. Доведено, що використання електромагнітного поля надвисокої частоти є перспективним напрямом інтенсифікації технологічних процесів обробки зернової сировини, оскільки забезпечує комплексний вплив на шкідників і внутрішню структуру зернівки.

У ході дослідження впливу потужності магнетрона встановлено, що зі збільшенням імпульсної потужності чітко зростає ефективність дезінсекції. При підвищенні потужності до рівня 2 кВт досягається практично повне знищення шкідників у міжзерновому просторі, тоді як при менших значеннях ефективність істотно знижується. Для шкідників, що знаходяться у прихованих стадіях розвитку, також спостерігається позитивна динаміка, хоча їх знищення потребує більш високих енергетичних витрат.

Встановлено, що продуктивність установки суттєво впливає на ефективність знезараження. Зі збільшенням витрати зерна знижується доза підведеної енергії на одиницю маси, що призводить до зменшення ступеня дезінсекції. Це зумовлює

необхідність підвищення потужності магнетрона або оптимізації режимів обробки для забезпечення стабільного технологічного ефекту.

Дослідження імпульсного режиму роботи магнетрона показали його переваги порівняно з безперервним режимом. Встановлено, що при однаковій середній потужності імпульсний режим забезпечує вищу ефективність знезараження завдяки більш інтенсивному впливу на організми шкідників. Важливим параметром є шпаруватість імпульсів, зменшення якої сприяє підвищенню ефективності процесу за рахунок збільшення підведеної енергії.

Визначено, що збільшення імпульсної потужності магнетрона до високих значень дозволяє досягати практично миттєвої загибелі шкідників явної форми зараженості. При зниженні потужності час їх повного відмирання суттєво зростає, а частина особин може виживати протягом тривалого періоду, що підтверджує доцільність застосування високопотужних імпульсних режимів.

Дослідження впливу НВЧ-обробки на структурно-механічні властивості зерна показали, що внаслідок інтенсивного нагріву та внутрішнього тиску відбувається «вибух» зернівки, який супроводжується збільшенням її лінійних розмірів, зниженням щільності та міцності. Встановлено, що найбільші зміни спостерігаються за товщиною зерна, що пов'язано з особливостями його будови.

Показано, що зниження міцності зерна після НВЧ-обробки сприяє зменшенню енерговитрат на подальші процеси подрібнення. Додаткове створення перепаду тиску значно інтенсифікує процес руйнування зернівок і дозволяє реалізувати ефект «вибуху» при менших енергетичних витратах, що має важливе технологічне значення.

Встановлено, що НВЧ-обробка суттєво впливає на вуглеводний склад зерна. Внаслідок деструкції крохмалю відбувається значне збільшення вмісту декстринів і глюкози, особливо при реалізації ефекту спучування. Це забезпечує підвищення засвоюваності поживних речовин і підтверджує доцільність застосування даного методу у виробництві комбікормів і харчових продуктів функціонального призначення.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Особливості охорони праці на елеваторах

Охорона праці на елеваторах має специфічні особливості через поєднання складних технологічних процесів, значної механізації та роботи з сипучими зерновими матеріалами. «Основними ризиками на таких підприємствах є механічні травми, небезпечні умови при переміщенні зерна, вибухи пилу, ураження електричним струмом, падіння з висоти, а також шкідливий вплив шуму та пилу на органи дихання» [48].

Одним із ключових факторів безпеки є правильна організація робочих місць і дотримання технологічної дисципліни. «Працівники повинні проходити обов'язкові інструктажі з охорони праці, мати навички поводження з зерновими потоками, механізмами, транспортними засобами та елеваторним обладнанням. Всі підйомні механізми, транспортери, норії, шнеки та конвеєри повинні мати надійні захисні огороження, запобіжні пристрої та системи аварійної зупинки» [48].

Особливу увагу приділяють контролю за запиленістю повітря у приміщеннях, оскільки зерновий пил є вибухонебезпечним і токсичним. Для зниження концентрації пилу застосовують системи аспірації, регулярне вологе прибирання та провітрювання. «Працівники повинні користуватися індивідуальними засобами захисту: респіраторами, касками, захисними окулярами, рукавицями та спеціальним взуттям» [48].

Ще однією важливою особливістю є робота на висоті. «Працівники, які обслуговують силоси, норії та підйомні установки, повинні використовувати страхувальні пояси, канати та інші захисні системи» [48]. Обов'язковим є наявність чітких інструкцій щодо переміщення по конструкціях, особливо в умовах негоди або зниженої видимості.

Систематичний технічний контроль обладнання дозволяє своєчасно виявляти зношення деталей, несправності електромереж та автоматичних систем, що значно зменшує ризик аварій та травм. Крім того, велике значення має навчання

працівників алгоритмам дій у надзвичайних ситуаціях, включаючи пожежі, вибухи пилу та аварії підйомного обладнання.

Особливу увагу приділяють електробезпеці на елеваторах, оскільки значна частина обладнання працює під високою напругою. «Регулярне обстеження електропроводки, заземлення всіх металевих конструкцій і механізмів, перевірка автоматичних вимикачів та сигналізацій є обов'язковими заходами. Працівники повинні мати чіткі знання про порядок дій у разі короткого замикання або виходу обладнання з ладу, а також проходити інструктаж з правил користування електроінструментом» [48].

Ще однією специфічною проблемою є небезпека самозаймання зернового пилу та зерна в силосах. «Для зменшення цього ризику застосовують температурний контроль, системи вентиляції та контроль вологості зернової маси» [48]. Важливим є регулярне очищення обладнання та силосів від накопиченого пилу, оскільки його запалення може призвести до серйозних вибухів і пошкодження конструкцій.

Управління транспортними потоками зерна також потребує підвищеної уваги. «Робота з норіями, транспортерними ланцюгами та шнеками пов'язана з ризиком затягування одягу або кінцівок, тому всі рухомі частини повинні мати огороження та аварійні стопи» [48]. Необхідно дотримуватися правил чергування працівників і обмеження одночасного перебування кількох осіб у зоні ризику для зменшення ймовірності травм.

Окрему роль відіграє психологічний та організаційний фактор безпеки. Регулярні навчання, тестування знань з охорони праці та впровадження систем мотивації до дотримання правил безпеки сприяють формуванню дисципліни серед персоналу. «Важливо підтримувати культуру безпечної праці, де кожен працівник усвідомлює ризики і відповідальність за власну безпеку та безпеку колег» [48].

Таким чином, охорона праці на елеваторах ґрунтується на комплексному підході, який поєднує механічний захист, контроль шкідливих факторів, інструктажі та використання засобів індивідуального захисту. Дотримання цих

вимог є ключовим для забезпечення безпеки працівників і безперебійної роботи підприємства.

4.2 Розробка картки охорони праці на елеваторі

Охорона праці на елеваторах має особливе значення через специфіку виробничого процесу та наявність численних потенційних джерел небезпеки. Робота з великими об'ємами зерна, рухомим механізованим обладнанням, високовольтними електромережами, а також підвищена запиленість створюють складні умови праці, що вимагають комплексного підходу до організації безпеки. Своєчасне визначення категорій ризику, джерел небезпеки та можливих наслідків дозволяє розробити ефективні заходи запобігання травматизму та аварій, підвищити продуктивність праці та зберегти здоров'я працівників.

Для більшого привернення уваги працівників елеватору до проблем охорони праці було розроблено картку охорони праці, до складу якої було включено основні небезпеки на елеваторі (рис. 4.1).

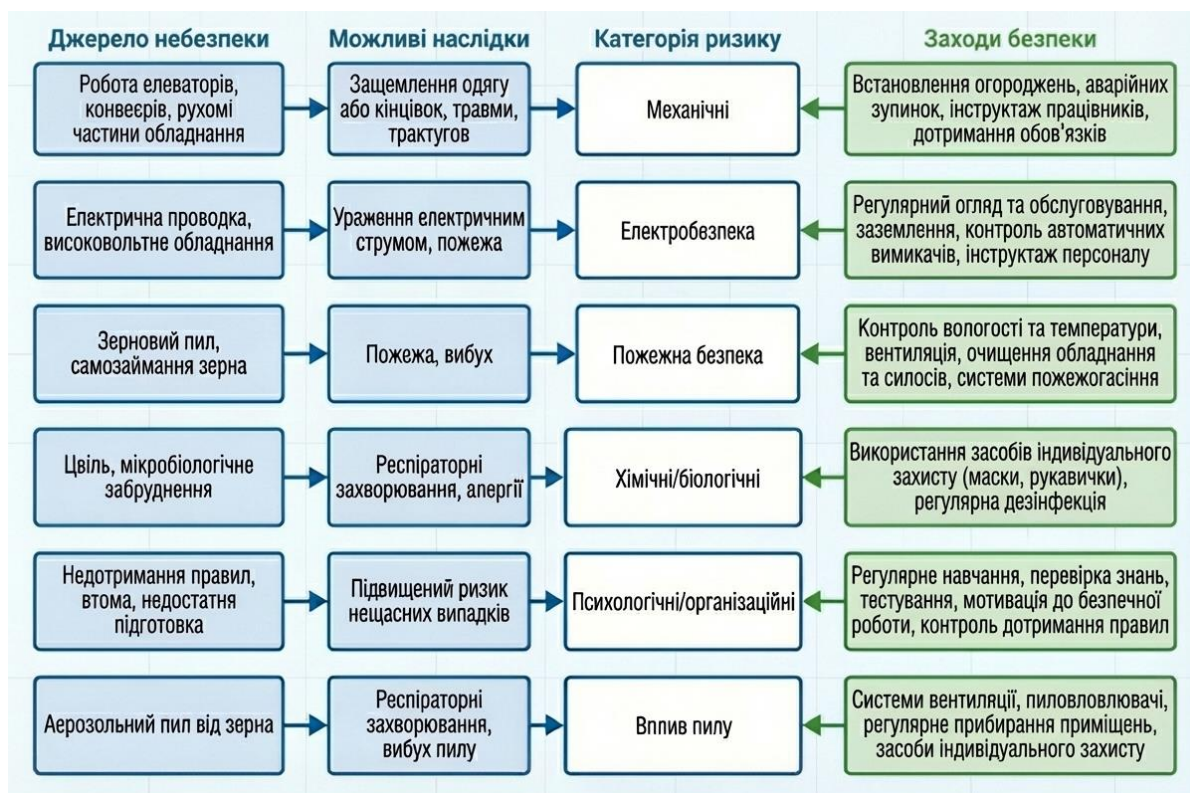


Рисунок 4.1 – Картка охорони праці на елеваторі

Аналіз факторів з рис. 4.1, тобто основних ризиків та заходів безпеки показує, що забезпечення охорони праці на елеваторах потребує системного підходу, що охоплює технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні аспекти. Важливою є координація заходів безпеки з регулярним навчанням персоналу, контролем за станом обладнання та використанням засобів індивідуального захисту. Такий комплексний підхід дозволяє значно знизити ризик травмування, запобігти аварійним ситуаціям і забезпечити стабільну та безпечну роботу елеваторного підприємства.

Висновки по розділу.

У результаті проведеного аналізу стану охорони праці можна зробити висновок, що специфіка роботи з зерном та обладнанням створює підвищений рівень професійного ризику для працівників. Основними небезпечними факторами є рухомі механізми, підвищена запиленість, висота робочих платформ, електричні мережі та наявність горючих матеріалів. Для мінімізації травматизму та профілактики аварій необхідне дотримання комплексних заходів безпеки, що включають технічне оснащення, правильну організацію робочого простору та постійний контроль за станом обладнання.

Також важливу роль відіграє підготовка та навчання персоналу, забезпечення засобами індивідуального захисту та суворе дотримання технологічних інструкцій. Розробка та впровадження карток охорони праці, що поєднує технічні, організаційні та гігієнічні заходи, дозволяє знизити професійні ризики, підвищити продуктивність праці та забезпечити безпечне функціонування елеваторного комплексу в цілому. Комплексний підхід до безпеки є необхідною умовою стабільної та ефективної роботи підприємства.

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Розрахунок кошторису витрат на дослідження

«Витрати, пов'язані з проведенням дослідження, охоплюють кілька складових, серед яких витрати на матеріали, електроенергію, оплату праці залученого персоналу, амортизаційні відрахування обладнання та накладні витрати, необхідні для організації лабораторного процесу» [49].

Вартість використаних матеріалів обчислюється шляхом множення кількості кожного компонента на його одиничну ціну, що дозволяє визначити загальну суму витрат на сировину та допоміжні речовини, які застосовувалися під час експериментальної роботи. Цей підхід дає змогу точно оцінити економічну складову експерименту та планувати подальші витрати на аналогічні дослідження.

$$M = \sum m_i \cdot C_i, \quad (5.1)$$

де m_i – кількість витраченого i -го матеріалу;

C_i – ціна одиниці i -го матеріалу, грн.

Результати розрахунків зводимо до табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Матеріали та їх вартість

Найменування матеріалу, одиниці	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Зерно пшениці, кг	50	3,00	150,00
Зерно ячменю, кг	10	3,50	35,00
Магнетрон, од.	2	1222,50	2445,00
Всього			2630,00

Оплата праці персоналу розраховується шляхом множення середньогодинної заробітної плати на фактичну кількість відпрацьованих годин, із

врахуванням обов'язкових нарахувань єдиного соціального внеску. Деталі розрахунку наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Витрати на заробітну плату

Посада	Середньо-місячний заробіток, грн	Середньо-годинний заробіток, грн	Кількість людино-годин	Сума, грн
Дипломний керівник	12000	75,00	10	750
Всього				750

Нарахування на заробітну плату виконавців дослідження становлять 22 % єдиного соціального внеску:

$$H = \frac{750 \cdot 22}{100} = 165,00 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію визначаються за формулою (5.2), що «включає потужність обладнання, коефіцієнт його використання, фактичний час роботи та тариф на кВт·год, що дозволяє об'єктивно оцінити енергетичні витрати експерименту» [49].

$$E = M \cdot K \cdot T \cdot a, \quad (5.2)$$

де M – потужність встановленого обладнання, кВт;

K – коефіцієнт використання потужності, ($K=0,9$);

T – час роботи на обладнанні, год;

a – тариф на електроенергію, грн/(кВт/год.).

$$E_{\text{НВЧ1}} = 2,0 \cdot 0,9 \cdot 20 \cdot 4,32 = 328,32 \text{ грн;}$$

$$E_{\text{НВЧ2}} = 1,2 \cdot 0,9 \cdot 24 \cdot 4,32 = 111,97 \text{ грн;}$$

$$E_{\text{ІВЧЗ}} = 12,0 \cdot 0,9 \cdot 24 \cdot 4,32 = 1119,74 \text{ грн.}$$

Отже загальні витрати на електроенергію становлять 1560,03 грн.

Амортизаційні витрати обладнання враховують його первісну вартість, річну норму амортизації та тривалість використання в рамках дослідження, що дає змогу розподілити витрати на обладнання пропорційно часу його задіяння (формула 5.3).

$$A = \frac{\Phi \cdot H \cdot t}{100 \cdot 365}, \quad (5.3)$$

де A – амортизаційні відрахування, грн.

Φ – вартість обладнання, грн.;

H – річна норма амортизації, %;

t – тривалість проведення дослідження на даному обладнанні, (місяців, днів);

365 – кількість днів у році.

$$A_{\text{ІВЧ1}} = \frac{25000 \cdot 20 \cdot 1}{100 \cdot 365} = 13,69 \text{ грн.};$$

$$A_{\text{ІВЧ2}} = \frac{78000 \cdot 20 \cdot 1}{100 \cdot 365} = 42,73 \text{ грн.};$$

$$A_{\text{ІВЧ2}} = \frac{211000 \cdot 20 \cdot 1}{100 \cdot 365} = 115,62 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.3 – Витрати на амортизацію обладнання

Устаткування	Вартість, грн	Річна норма амортизації, %	Час роботи, днів	Витрати на амортизацію, грн
Установка УПДЗП-1	25000,00	20	1	13,69
Установка «Пласт-0,5»	78000,00	20	1	42,73
Установка «Пласт-5»	211000,00	20	1	115,62
Всього				172,04

«Накладні витрати включають витрати на опалення, освітлення, вентиляцію лабораторних приміщень, діяльність навчально-допоміжного та адміністративного персоналу, а також інші господарські витрати, необхідні для підтримки робочого процесу» [49]. Вони розраховуються як певний відсоток від нарахованої заробітної плати учасників дослідження, що дозволяє комплексно оцінити економічну складову виконаного експерименту.

$$HB = \frac{750 \cdot 80}{100} = 600,00 \text{ грн.}$$

На основі цих розрахунків формується повний кошторис витрат (табл. 5.4), який забезпечує не лише прозору фінансову звітність. Такий підхід дозволяє «системно оцінити фінансову сторону дослідження, врахувати всі прямі та непрямі витрати, оптимізувати використання ресурсів та планувати подальші наукові роботи з урахуванням їх економічної ефективності, забезпечуючи повну прозорість витрат і можливість обґрунтувати бюджет наукового проєкту» [49].

Таблиця 5.4 – Кошторис витрат на проведення дослідження

Витрати	Сума, грн
Основні матеріали	2630,00
Заробітна плата	750,00
Нарахування на заробітну плату	165,00
Електроенергія	1560,03
Амортизація	172,04
Накладні витрати	600,00
Всього	5877,07

Аналіз даних із табл. 5.4 показує, що найбільшу частку витрат під час проведення дослідження займають основні матеріали – 2630 грн, що становить близько 45 % від загальної суми. Значну частку складає також електроенергія –

1560,03 грн, або близько 26,5 %, що відображає високі енергетичні витрати, пов'язані з роботою лабораторного обладнання. Витрати на оплату праці становлять 750 грн, а нарахування на заробітну плату – 165 грн, що разом дає близько 15,7 % від загальної суми, демонструючи відносно помірний вплив людського фактора на загальний бюджет.

Амортизація використаного обладнання становить 172,04 грн, або приблизно 2,9 % від загальних витрат, що є найменшою статтею витрат, а накладні витрати – 600 грн, або 10,2 %, відображають додаткові адміністративні та господарські витрати.

5.2 Розрахунок ціни дослідження

Як вказано вище, загальна сума витрат на проведення дослідження становить 5877,07 грн, причому розподіл витрат показує, що пріоритетним у фінансовому плануванні є забезпечення матеріальної бази та електропостачання, тоді як інші статті витрат мають менший вплив на загальний бюджет. Але виникає необхідність у визначенні ціни дослідження з урахуванням нормативної рентабельності (формула 5.4).

$$Ц = C + \frac{P \cdot C}{100}, \quad (5.4)$$

де $Ц$ – ціна дослідження, грн.;

C – витрати на дослідження, грн.;

P – нормативна рентабельність ($P = 30\%$).

$$Ц = 5877,07 + \frac{30 \cdot 5877,07}{100} = 7640,19 \text{ грн.}$$

Отже, вартість проведеного дослідження становить 7640,19 грн.

Висновки по розділу.

Аналіз показує, що основні витрати під час проведення дослідження становлять матеріали – 2630 грн (34 % від загальної суми) та електроенергію – 1560 грн (20 %). Витрати на заробітну плату та нарахування складають 915 грн (12 %), а амортизація і накладні витрати – 772 грн (10 %). Загальна вартість проведеного дослідження становить 7640,19 грн, при цьому найбільший фінансовий вплив мають матеріальні ресурси та енергопостачання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті аналізу літературних джерел встановлено, що обробка зерна є ключовим фактором підвищення його технологічних і кормових властивостей. Різні методи, зокрема термообробка, гранулювання, підсмажування, флакування, екструзія та мікронізація, по-різному впливають на фізико-хімічний стан крохмалю, білків та інших компонентів. Одні способи сприяють підвищенню перетравлюваності крохмалю, інші – зменшують мікробіологічне забруднення або збільшують вміст водорозчинних речовин. При цьому найбільш ефективними є комбіновані методи, що забезпечують комплексний вплив і підсилюють дію окремих факторів.

Встановлено, що мікронізація під дією НВЧ-випромінювання є одним із найперспективніших способів обробки, оскільки забезпечує глибоку декстринізацію крохмалю та покращення засвоюваності поживних речовин. Водночас гранулювання та екструзія сприяють підвищенню вмісту сухих речовин і протеїну, а флакування та підсмажування забезпечують часткову модифікацію крохмалю та покращення технологічних властивостей зерна.

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що НВЧ-обробка є ефективним методом знезараження зерна пшениці, при цьому вирішальним фактором є потужність магнетрона. Зі збільшенням імпульсної потужності до 2 кВт забезпечується 99,8–100% загибелі шкідників у міжзерновому просторі, тоді як при 0,8 кВт цей показник становить лише 75–85%. Для прихованих стадій розвитку ефективність зростає з 24–48% до 76–89% при аналогічному підвищенні потужності.

Встановлено, що продуктивність процесу суттєво впливає на ефективність дезінсекції: при витраті 200 кг/год повне знезараження досягається при потужності 1,5 кВт, тоді як при 300 кг/год необхідно вже 2 кВт. При зниженні потужності до 5 кВт близько 3,5% шкідників виживає, а при 2 кВт – до 20,5%, що підтверджує необхідність забезпечення достатньої енергетичної дози для стабільного результату.

Доведено перевагу імпульсного режиму роботи магнетрона над безперервним. При потужності 8 кВт досягається миттєва загибель шкідників, тоді як при 7, 6 і 5,5 кВт повне відмирання настає відповідно через 1, 2 та 5 діб. Оптимальний діапазон тривалості імпульсу становить 20–100 мс, при якому ефективність зростає з 55% до 92%, а подальше збільшення до 200–500 мс підвищує її лише до 94–96,5%.

Встановлено, що НВЧ-обробка при потужності 5,5 кВт, тривалості 15–25 с і температурі 150–200 °С викликає «вибух» зернівки, що супроводжується збільшенням її товщини з 2,8 до 3,3 мм, ширини з 3,5 до 4,0 мм та незначною зміною довжини (з 7,0 до 7,1 мм). При цьому міцність зерна знижується у 1,43 раза, а створення перепаду тиску (2→1 атм) дозволяє інтенсифікувати процес руйнування та зменшити енерговитрати.

Досліджено, що НВЧ-обробка суттєво змінює вуглеводний склад зерна: при спучуванні вміст декстринів у пшениці зростає з 0,7% до 27,2–29,3%, а глюкози – з 10,2% до 47,8–51,1%; для ячменю відповідно до 28,5–31,6% і 43,4–46,8%. Без ефекту «вибуху» ці показники значно нижчі (декстрини 1,1–3,2%, глюкоза 13,2–17,1%), що підтверджує визначальну роль інтенсивного термомеханічного впливу у підвищенні засвоюваності зерна.

Встановлено, що основними небезпечними факторами на елеваторі є рухомі механізми, підвищена запиленість, висота робочих платформ, електричні мережі та наявність горючих матеріалів. Розробка та впровадження карток охорони праці, що поєднує технічні, організаційні та гігієнічні заходи, дозволяє знизити професійні ризики, підвищити продуктивність праці та забезпечити безпечне функціонування елеваторного комплексу в цілому.

Аналіз показує, що основні витрати під час проведення дослідження становлять матеріали – 2630 грн (34 % від загальної суми) та електроенергію – 1560 грн (20 %). Витрати на заробітну плату та нарахування складають 915 грн (12 %), а амортизація і накладні витрати – 772 грн (10 %). Загальна вартість проведеного дослідження становить 7640,19 грн, при цьому найбільший фінансовий вплив мають матеріальні ресурси та енергопостачання.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Мерко, І. Т. Наукові основи і технологія переробки зерна : підручник / І. Т. Мерко, О. В. Моргун. Одеса : Друк, 2001. 348 с.
2. Подпратов Г.І., Рожко В.І., Скалецька Л.Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. К. : Аграрна освіта, 2014. 393 с.
3. Богомолів О. В., Верешко Н. В., Сафронова О. С. та ін. Зберігання та переробка сільськогосподарської продукції. Х. : Еспада, 2008. 544 с.
4. Зберігання і технологія сільськогосподарських продуктів / Б. В. Лесик, Л. О. Трисвятський, В. Л. Снежко та ін. К. : Головне вид-во ВО “Вища школа”, 1980. 338 с.
5. Подпратов Г.І., Скалецька Л.Ф., Сеньков А.М. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва : практикум. К. : Вища освіта, 2004. 271 с.
6. Осокіна Н.М, Гайдай. Г.С. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва: підручник. Умань, 2005. 614 с.
7. Тертишний О.О., Півоваров О.А., Кошулько В.С. Механічні процеси та обладнання харчових виробництв. Навчальний посібник. Дніпро: ДДАЕУ, 2022. 351 с.
8. Подпратов Г. І., Скалецька Л. Ф. Технологія виробництва борошна, крупи та олії. К. : Вид-во НАУ, 2000. 202 с.
9. Шемав'янов В. І., Лазарева О. М., Грекова Н. В. та ін. Овочівництво. – Дніпропетровськ, 2001. 387 с.
10. Кириленко Л.В. Технологія зберігання і переробки зерна. Методичні вказівки для проведення лабораторних робіт для студентів факультету технології виробництва та переробки продукції тваринництва денної та заочної форми навчання ОКР «бакалавр» галузі знань 0517 «Харчова промисловість та переробка сільськогосподарської продукції» напрямку підготовки 6.051701 «Харчові технології та інженерія». – Вінниця: Видавничий центр ВНАУ. 63 с.
11. Гапонюк, І. І. Удосконалення технології сушіння зерна / І. І. Гапонюк ; НУХТ. Одеса : Поліграф, 2009. 182 с.

12. Тертишний О.О., Півоваров О.А., Кошулько В.С. Теплові процеси та обладнання в харчових виробництвах. Навчальний посібник, 2023. 360 с.
13. Гідротермічна обробка круп із використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом : монографія / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін ; Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків : ХДУХТ, 2014. 170 с.
14. Технологія зберігання і переробки сільськогосподарської продукції / А. Я. Маньковський, Л. Ф. Скалецька, Г. І. Подпратов та ін. – К. : ВКП “Аспект”, 1999. 286 с.
15. Півоваров О.А., Ковальова О.С., Кошулько В.С. Інноваційний інжиніринг в окремих галузях харчового виробництва / О.А. Півоваров, О.С. Ковальова, В.С. Кошулько. Дніпро: ФОП Обдимко О.С., 2022. 407 с.
16. Мерко І.Т. Технології мукомельного і круп'яного виробництва [Текст]: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Вид. 2-ге, перероб. та допов. Одеса: Друк. дім, 2010. 472 с.
17. Жемела Г. П., Шемавньов В. І., Маренич М. М., Олексюк О. М. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва. Дніпропетровськ, 2005. 248 с.
18. Землеробська механіка. Інноваційні технології харчових виробництв / Кобець А.С., Сокол С.П., Пугач А.М., Чурсінов Ю.О., Півоваров О.А., Миколенко С.Ю., Ковальова О.С., Калина В.С., Кошулько В.С., Тимчак Д.О., Сова Н.А., Худайбердієва К.А. Колективна монографія. Дніпро: «Свідлер А.Л.», 2022. Том 4. 460 с.
19. Інноваційні методи обробки продовольчої сировини / С.Ю. Миколенко, О.В. Гончарова, А.М. Пугач, А.В. Купченко, В.С. Кошулько, Я.В. Гезь: Монографія. Дніпро: Журфонд, 2017. 224 с.
20. Подпратов Г.І., Сеньков А.М., Войцехівський В.І. Технологія виробництва, зберігання та оцінка якості кормів.: Навчальний посібник. – К.: Видавничий центр НАУ, 2003.

21. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв : навч. посібник / О. В. Дацишин, А. І. Ткачук, О. В. Гвоздев та ін.; ред. О. В. Дацишин. Вінниця : Нова Книга, 2009. 488 с.

22. Шутенко, Є. І. Технологія круп'яного виробництва : навч. посібник / Є. І. Шутенко, С. М. Соц. – Київ : Освіта України, 2010. – 272 с.

23. Інноваційні технології зберігання і переробки зерна». Розділ 1. Інноваційні технології зберігання зерна: навчально-методичний посібник для здобувачів спец. 181 «Харчові технології» другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Технологія зернопродуктів та зернові ресурси»; уклад.: І. М. Фоміна, Т. В. Гавриш, О. М. Шаніна, Н. О. Боровікова. Харків: ДБТУ, 2025. 134 с.

24. Пузік Л. М., Пузік В. К. Технологія зберігання і переробки зерна : навчальний посібник. Харків : ХНАУ, 2013. 312 с.

25. Малинін, О. О., та ін. Вивчення бактерицидної та фунгіцидної дій фізико-хімічних способів знезараження зерна, штучно контамінованого тест-культурами. *Ветеринарна медицина* 94 (2010): 307-310.

26. Усенко С. М. Дослідження дози обробки зернових в сильних електричних полях //Енергетика і автоматика. 2017. №. 3. С. 122-134.

27. Хомик Н.І. Механізація переробки та зберігання сільськогосподарської продукції : курс лекцій / Н.І. Хомик, В.П. Олексюк, О.П. Цьонь. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2016. – 288 с.

28. Мардзявко В. А., Руденко А. Ю. Теоретичні та практичні аспекти застосування генераторів НВЧ для знезараження зернових культур //Вісник Херсонського національного технічного університету. 2024. №. 3 (90). С. 85-94.

29. Сабадаш Д. В. Вплив надвисокочастотного випромінювання на властивості зерна пшениці : пояснювальна записка до дипломної роботи ОС «Бакалавр» : 181, Харчові технології / Сабадаш Дарина Віталіївна; наук. керівник Тимчак Дмитро; Дніпровський держ. аграр.-економ. ун-т, Інженерно-технологічний факультет, Кафедра харчових технологій. Дніпро, 2025. 66 с.

30. Турянчик В. Чинники, що впливають на якість і безпечність зерна. УЗА. URL: <https://uga.ua/meanings/chinniki-shho-vplivayut-na-yakist-i-bezpechnist-zerna/>
31. Кунденко М. П., Мардзявко В. А., & Руденко А. Ю. Аналіз технології генерації НВЧ випромінювання з визначенням адаптивного типу діодів для подальшого конструювання апаратів для знезараження. Інтегровані технології та енергозбереження. 2023. No 3. С. 24–37. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.3.03>
32. Effect of an ultra-high frequency electromagnetic field on the physical properties of spelt grain / N. Osokina et al. Scientific horizons. 2024. Vol. 27, no. 3. P. 64–72. URL: <https://doi.org/10.48077/scihor3.2024.64>
33. Ruiz-Canales A., García M. F.-V. Sustainable applications in agriculture. Sustainability. 2021. Vol. 13, no. 8. P. 4136. URL: <https://doi.org/10.3390/su13084136>
34. Потапов В. О., Жила В. І. Теоретичні та практичні аспекти застосування мікрохвильового й інфрачервоного випромінювання в харчових технологіях: монографія. Харків: ДБТУ, 2024. 136 с.
35. Сидорук Ю. К. Електромагнітні технології обробки зерна. URL: https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/kivra_science_turovskyi.pdf
36. Development of a Model of Cell Functioning to Measure the Interaction of Low-Energy EMF / M. Kundenko et al. 2022 XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 7–11 September 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/mma55579.2022.9993093>
37. Кунденко М. П., Мардзявко В. А., Руденко А. Ю. Вирішення питання якості обробки зерна за рахунок електромагнітного впливу. Інноваційно-інвестиційний розвиток аграрної сфери – запорука продовольчої безпеки країни : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 26 травня 2022 р., м. Миколаїв / Міністерство освіти і науки України ; Миколаївський національний аграрний університет. Миколаїв : МНАУ, 2022. С. 12–14.
38. Фізико-математична модель електричних властивостей біологічних тканин насіння пшениці та їх зміна під впливом електромагнітного випромінювання

високочастотного діапазону / О.М. Петровський та ін. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2019. Т. 2, No 54. С. 139–143. DOI: <https://doi.org/10.26906/sunz.2019.2.139>

39. Microwave generators, transmission, and interaction with different materials. Microwave chemistry. 2017. P. 31–52. URL: <https://doi.org/10.1515/9783110479935-003>

40. Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery / P. Fernández-Yáñez et al. Applied thermal engineering. 2021. Vol. 196. P. 117291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117291>

41. Стійкість робочих режимів автономних асинхронних генераторів із самозбудженням / Н. Красношопка та ін. Технічна електродинаміка. 2024. No(3). С. 47–53. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.047>

42. Application of microwave energy in agriculture / M. Tuhvatullin et al. Mathematical modelling of engineering problems. 2023. Vol. 10, no. 2. P. 412–418. URL: <https://doi.org/10.18280/mmep.100204>

43. Thermal and electromagnetic stator vent design optimisation for synchronous generators / K. Bersch et al. IEEE transactions on energy conversion. 2020. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tec.2020.3004393>

44. Abdelaal A. A. A., B. M. E.-D. Effect of Noionizing Electromagnetic Waves on Some Stored Grain Pests. Journal of Entomology. 2014. Vol. 11, no. 2. P. 102–108. URL: <https://doi.org/10.3923/je.2014.102.108>

45. Гавриленко О. С., Хоміцька О. А., Загорулько О. В. Оцінка впливу мікробіологічних процесів під час зберігання зерна ярої пшениці. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2016. No 4. С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.31210/visnyk2016.04.05>

46. Ковалишин А. Б. Знезараження насіння пшениці озимої //Карантин і захист рослин. 2012. №. 1. С. 6-8.

47. Кунденко М. П., Руденко А. Ю. Аналіз сучасних методів обробки зернових за критерієм ефективності //Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. 2020. №. 41. С. 136-144.

48. Голінько В.І. Основи охорони праці: підручник. М-во освіти і науки України; Нац. гірн. ун-т. 2-ге вид. Д.: НГУ, 2014. 271 с.

49. Павленко О.С. Методичні рекомендації до виконання розділу «Організаційно-економічна частина» дипломної роботи для здобувачів вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Харчові технології» зі спеціальності 181 «Харчові технології» денної та заочної форми навчання. Дніпро: ДДАЕУ. 2020. 40 с.