

**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 дипломної роботи  
освітнього ступеня «Магістр»  
на тему:

**Удосконалення технологічного процесу  
високотемпературної мікронізації зерна**

**Виконав:** здобувач вищої освіти 2 курсу,  
групи МгХТ-1-23  
освітньо-професійної програми «Харчові технології»  
зі спеціальності 181 «Харчові технології»

\_\_\_\_\_ Василь ІВАНЧУК

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Олександр ПІВОВАРОВ

**Рецензент:** \_\_\_\_\_

Дніпро 2024

**ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра харчових технологій  
Ступінь вищої освіти: «Магістр»  
Освітньо-професійна програма: «Харчові технології»  
Спеціальність: 181 «Харчові технології»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
харчових технологій,  
кандидат технічних наук, доцент  
Віталій КОШУЛЬКО

(підпис)

«12» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Іванчуку Василю Миколайовичу

1. Тема роботи: «Удосконалення технологічного процесу високотемпературної мікронізації зерна».  
Керівник роботи: Півоваров Олександр Андрійович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом закладу вищої освіти від «12» листопада 2024 року № 3785.
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи 13 грудня 2024 року
3. Вихідні дані до роботи: 1. Літературні джерела та періодичні видання. 2. Наукова та науково-технічна документація, що стосується питань теплової зернових матеріалів, зокрема інфрачервоним опроміненням. 3. Нормативно-технологічна документація. 4. Патентна документація.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Вступ. 1 Сучасні методи обробки і застосування зернового сорго. 2 Характеристика об'єктів, методів досліджень та дослідного устаткування. 3 Дослідна частина. 4 Якісні і структурно-механічні зміни зерна сорго при ІЧ-обробці. 5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6 Організаційно-економічна частина. Загальні висновки. Бібліографія.

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1 Аналіз стану питання. 2 Мета та задачі досліджень. 3 Характеристика об'єктів дослідження і дослідного устаткування. 4 Результати досліджень та їх аналіз. 5 Кошторис витрат на проведення досліджень. 6 Загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Посада, прізвище та ім'я консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 – 4	професор ПІВОВАРОВ Олександр	12.11.2024	13.12.2024
5	професор ПІВОВАРОВ Олександр	12.11.2024	13.12.2024
6	професор ПІВОВАРОВ Олександр	12.11.2024	13.12.2024

7. Дата видачі завдання 12 листопада 2024 року.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	12.11-13.11.24	виконано
2	Сучасні методи обробки і застосування зернового сорго	14.11-18.11.24	виконано
3	Характеристика об'єктів, методів досліджень та дослідного устаткування	19.11-20.11.24	виконано
4	Дослідна частина	20.11-29.11.24	виконано
5	Якісні і структурно-механічні зміни зерна сорго при ГЧ-обробці	02.12-03.12.24	виконано
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	04.12-05.12.24	виконано
7	Організаційно-економічна частина	06.12-09.12.24	виконано
8	Загальні висновки та список джерел посилання	10.12-11.12.24	виконано
9	Розробка та підготовка демонстраційного матеріалу	12.12.2024	виконано

**Здобувач вищої освіти**

\_\_\_\_\_ Василь ІВАНЧУК  
( підпис )

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ Олександр ПІВОВАРОВ  
( підпис )

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка магістерської роботи містить: 68 сторінок друкованого тексту, 18 рисунків та ілюстрацій, 20 таблиць та використано 52 літературних джерела посилань.

Метою роботи є дослідження процесу ІЧ-термообробки зерна сорго як альтернативного методу гідротермічної обробки, а також вибір, обґрунтування та реалізація варіантів удосконалення технологічних процесів термообробки зернового сорго на основі застосування ІЧ-випромінювання, що призводить до біохімічних змін.

Об'єкт дослідження – процес мікронізації продовольчого голозерного та півчастого сорго.

Предмет дослідження – закономірності та взаємозв'язок технологічного процесу мікронізації продовольчого зерна сорго, вплив його на структурно-механічні та фізичні характеристики зерна сорго.

Застосування ІЧ-випромінювання є ефективним напрямом інтенсифікації технологічних процесів у переробній промисловості, що дозволяє отримати продукти з високою поживною цінністю та покращеною якістю. ІЧ-обробка зерна і зернопродуктів може застосовуватися як самостійний вид обробки, так і як окрема операція в різних технологічних процесах. До основних результатів ІЧ-обробки можна віднести: зміна геометричних параметрів зерна, знезараження та інактивація в ньому шкідливих речовин, підвищення поживної цінності (трансформація крохмалю в легкозасвоювані декстрини), зміна фізико-механічних та технологічних властивостей.

*Ключові слова:* ЗЕРНО, СОРГО, ЗНЕЗАРАЖЕННЯ МІКРОНІЗАЦІЯ, ТЕМПЕРАТУРА, ТРИВАЛІСТЬ, ПРОЦЕС, ПОЖИВНА ЦІННІСТЬ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, ДОСЛІДЖЕННЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СУЧАСНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ І ЗАСТОСУВАННЯ ЗЕРНОВОГО СОРГО	10
1.1 Класифікація, фізичні та біохімічні властивості	10
1.2 Застосування зернового сорго	14
1.3 Класифікація сучасних методів гідротермічної обробки зерна	17
1.4 Науково-практичні основи ІЧ-обробки харчових середовищ	20
1.5 Зміна структурно-механічних, фізико-хімічних та біохімічних властивостей зерна при ІЧ-обробці	22
Висновки за розділом	24
2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ, МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ДОСЛІДНОГО УСТАТКУВАННЯ	26
2.1 Характеристика об'єктів дослідження	26
2.2 Характеристика експериментальної установки ІЧ-обробки зернової сировини	28
Висновки за розділом	30
3 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	31
3.1 Кінетика сушки зерна сорго при ІЧ-обробці з вологозмістом 5,3; 16,6 і 33,3 %	31
3.2 Визначення вологопоглинальної здатності зерна сорго	39
3.3 Методики зволоження та ІЧ-обробки зерна сорго	41
3.4 Аналіз кінетики ІЧ-обробки зволоженого зерна сорго	43
Висновки за розділом	45
4 ЯКІСНІ І СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ЗМІНИ ЗЕРНА СОРГО ПРИ ІЧ-ОБРОБЦІ	46
4.1 Органолептичні і біохімічні зміни зерна сорго при ІЧ-обробці	46
4.2 Структурно-механічні зміни зерна сорго	50
Висновки за розділом	52

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	53
5.1 Розробка карти безпеки праці	53
5.2 Шляхи утилізації відходів, які утворюються під час мікронізації зерна сорго	54
Висновки за розділом	56
6 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	57
6.1 Організація проведення дослідження	57
6.2 Витрати на проведення дослідження	58
6.3 Розрахунок вартості дослідження	60
Висновки за розділом	61
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	62
БІБЛІОГРАФІЯ	63

## ВСТУП

Для багатьох регіонів, що у зоні нестійкого землеробства і що характеризуються посушливим континентальним кліматом, стоїть завдання зробити виробництво сільськогосподарської продукції, особливо кормів, стабільнішим. У цьому увесь сенс сорго вигідно відрізняється від традиційних кормових культур. Крім виняткової посухостійкості, сорго має універсальність використання: із зернового сорго можна отримувати зернофураж, монокорм, крохмаль, крупу, пиво, спирт [3, 12, 14]. Останнім часом відзначається сприятлива тенденція збільшення виробництва соргової сировини, призначеного приготування цукру, крохмалю, борошна, крупи, тобто для використання на харчові та технічні цілі.

Наявність вітчизняних сортів харчового напряму дозволяють отримати дієтичні продукти високої біологічної цінності, з гарним смаком і тривалого зберігання [14, 16].

Розрахунок економічної ефективності підтвердив доцільність застосування зернового сорго у раціонах великої рогатої худоби, птиці та у рибному комбікормі.

Однак відсутність високоекономічних технологій переробки на післязбиральній стадії, таких як сушіння, відділення квіткових плівок у плівчастих сортів, дроблення, плющення та помел зерна сорго суттєво гальмує поширення цієї культури.

Застосування ІЧ-випромінювання є ефективним напрямом інтенсифікації технологічних процесів у переробній промисловості, що дозволяє отримати продукти з високою поживною цінністю та покращеною якістю. ІЧ-обробка зерна і зернопродуктів може застосовуватися як самостійний вид обробки, так і як окрема операція в різних технологічних процесах. До основних результатів ІЧ-обробки можна віднести: зміна геометричних параметрів зерна, знезараження та інактивація в ньому шкідливих речовин, підвищення поживної цінності (трансформація крохмалю в легкозасвоювані декстрини), зміна фізико-механічних

та технологічних властивостей.

Зерно, оброблене ІЧ-випромінюванням, підвищує ефективність використання комбікормів під час годівлі сільськогосподарських тварин. Термічний вплив ІЧ-випромінювання на різні види круп скорочують час приготування продукту, підвищують його поживну цінність, сприятливо впливають на споживчі якості виробу.

Однак високотемпературна ІЧ-термообробка різних видів зерна відбувається по-різному. Для отримання позитивних результатів потрібно ретельно підбирати режим термообробки. Детальний вибір раціональних режимів ІЧ-опромінення в технологічних процесах повинен проводитися на основі вивчення всіх властивостей об'єкта, що опромінюється, особливо його оптичних і терморадіаційних характеристик. Аналіз специфічних особливостей об'єкта опромінення, його фізичних та біохімічних властивостей накладають певні обмеження на параметри процесу обробки.

У цій роботі були проведені дослідження кінетики сушіння та температурні криві трьох сортів зерна сорго, що належать до двох різних типів, на підставі яких вироблені раціональні режими ІЧ-обробки, що дозволяють зробити лущення зерна та його зміцнення з найменшими енерговитратами та інтенсифікацією. Було проведено комплексне дослідження терморадіаційних та оптичних характеристик анатомічних частин зерна загалом. Розроблено "точкову" модель та проведено оцінку параметрів моделі нагріву зерна сорго за даними експерименту. Були проведені дослідження характеристик міцності зерна в залежності від ступеня термообробки.

Отже, метою роботи є дослідження процесу ІЧ-термообробки зерна сорго як альтернативного методу гідротермічної обробки, а також вибір, обґрунтування та реалізація варіантів удосконалення технологічних процесів термообробки зернового сорго на основі застосування ІЧ-випромінювання, що призводить до біохімічних змін.

Досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі основні задачі:

- визначити оптичні та терморадіаційні характеристики зерна сорго;

- дослідити процеси тепловологопереносу в зерні голозерного та плівчастого сорго при ІЧ-обробці;
- розробити моделі нагрівання зерна сорго та провести оцінку параметрів процесу ІЧ-нагріву;
- визначити структурно-механічні та фізичні характеристики зерна сорго при ІЧ-обробці;
- виконати розрахунок кошторису витрат на проведення досліджень.

Об'єкт дослідження – процес мікронізації продовольчого голозерного та плівчастого сорго.

Предмет дослідження – закономірності та взаємозв'язок технологічного процесу мікронізації продовольчого зерна сорго, вплив його на структурно-механічні та фізичні характеристики зерна сорго.

# 1 СУЧАСНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ І ЗАСТОСУВАННЯ ЗЕРНОВОГО СОРГО

## 1.1 Класифікація, фізичні та біохімічні властивості

Соргокультури (інакше сорго, джугара, гаолян) є найдавнішими культурами світового землеробства, батьківщиною яких вважають екваторіальну Африку. Сорго широко обробляється у Китаї, Кореї, Сирії, Лівані, Туреччині, Ірані, Іраку, Індії, Малі, Гвінеї. У Європі сорго вирощують в Італії, Угорщині, Румунії та на півдні України. Найбільшого розвитку виробництво сорго отримало США, що займає чільне місце у світі з вирощування сорго зерном. Нині сорго займає третє місце серед зернових культур (після кукурудзи та пшениці).

У світовому виробництві зерна сорго займає по посівних площах та валових зборах п'яте місце (після пшениці, рису, кукурудзи, ячменю), а серед зернофуражних культур – третє (після кукурудзи та ячменю). В Азії сорго посідає третє місце після рису та пшениці, в Африці – друге після кукурудзи.

Сорго (*Sorghum Moench*) – рід одно- та багаторічних трав сімейства злакових, що налічує близько двадцяти видів. Рід представлений бур'янами (гумай), кормовими рослинами (сорго цукрове, суданська трава) та зерновими культурами (сорго звичайне, джугара, дурня, гаолян). У нашому регіоні рід сорго представлений чотирма культурними видами: сорго звичайне (*S. Vulgare*), що обробляється для кормових, технічних та продовольчих цілей; джугара (*S. Ceruum Host*); гаолян (*S. Chinense Vakuschei*); суданська трава (*S. Sudanense Pers.*), що обробляється як кормова рослина [6, 8]. Залежно від використання, сорго ділиться на три групи: зернове сорго – рослини низькорослі, слабо куцисті; цукрове сорго – обробляють для отримання солодких стебел, які використовують для вироблення патоки та на силос; вінцеве сорго – обробляють для отримання мітлиць довжиною 40 – 90 см, що використовуються на віники.

Суцвіття сорго – волошка різної форми, колоски одноквіткові, на кінцях розгалужень волоті знаходиться по два-три колоски. Один з колосків обох статей,

інший – чоловічий, що опадає після цвітіння. У сорго переважає перехресне запилення.

Завдяки сильно розвиненій кореневій системі та своєрідній здатності листя та стебел рослини сорго скорочувати втрату вологи, серед зернових воно краще за інших пристосоване до посушливого клімату. Воно добре росте на чорноземах, супісках та суглинках, характерна можливість зростання на засолених ґрунтах.

Зерно сорго складається з оболонки, що покриває поверхню зерна, зародка та ендосперму. Під зовнішньою плодовою оболонкою розташовується підболочковий шар (перикарп), що складається з кількох тканинних шарів [17]. Зовнішній шар (епікарп) може містити віск та пігменти. Середній шар (мезокарп) містить гранули крохмалю, зацементовані білком; клітини цього шару товщі, ніж у першому. Внутрішня частина (ендокарп) містить хрестоподібні та цепевидні клітини. Під внутрішньою оболонкою знаходиться алейроновий шар, який складається з жиру та білка та розташований під перикарпом майже по всій поверхні зерна, поступово переходячи у склоподібний ендосперм. Останній є системою крохмаль – білок, в якій проміжний білок міцно з'єднаний з зернами крохмалю. При подрібненні його проміжний білок руйнується разом із міцно включеними до нього зернами крохмалю. Вміст білка в цій частині ендосперму, як правило, більший, ніж у борошністому. У борошністому ендоспермі зерна крохмалю слабо пов'язані з шаром прикріпленого до них білка та проміжним білком; при подрібненні його проміжний білок відокремлюється легко, звільняючи крохмальні зерна з прикріпленим до них білком. Для крохмального виробництва цікавий сорт сорго з високим вмістом борошністого ендосперму, з якого легше витягується крохмаль.

Зародок зерна сорго складається з щитка, який відокремлює його від ендосперму, нирки та зародкового корінця.

Кількісне співвідношення частин зерна сорго залежить від сорту сорго та кліматичних умов зростання. Від маси всього зерна частку зародка доводиться 9,5 – 11,0 %, ендосперма – 82 – 82 %, оболонки – 7,5 – 9,0 %. Частка зародка в зерні сорго менша, а частка оболонки більша, ніж у зерні кукурудзи.

Хімічний склад зерна сорго проти деякими зерновими культурами представлений у табл. 1.1 [8].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад (%) зерна сорго проти іншими зерновими культурами

Компоненти	Рис	Просо	Кукурудза	Сорго
Білки	87	12,9	12	12,2
Жири	3	4,5	5,7	4,1
Крохмаль	64,2	63,2	66,2	67
Клітковина	10,5	9,1	2,4	4
Зола	4,5	3,4	1,4	2,5
Фосфор	0,38	0,37	0,35	0,34
Кальцій, мг	0,05	0,06	0,04	0,11
Вітаміни, мг/%				
В <sub>1</sub>	0,34	0,32	0,38	0,46
В <sub>2</sub>	0,08	0,07	0,14	0,16
РР	3,82	2,85	2,1	3,3
Е	1	2,3	5,5	2,7
В <sub>6</sub>	0,54	0,43	0,48	0,4
Вуглеводи			2,2 – 5,3	2,4 – 4,5
Таннін	-	-	-	0,2 – 3,5
Віск	-	-	-	0,3
Енергетична цінність, ккал	238	311	325	323

Дані таблиці 1.1 свідчать про сприятливий хімічний склад сорго. Так, вміст білка у сорго значно більше, ніж у рису, вміст крохмалю вищий, ніж у інших зернових, вміст кальцію та деяких вітамінів перевищує їхню кількість у порівнянні з представленими культурами. За хімічним складом зерно сорго наближається до зерна кукурудзи, проте вміст крохмалю і білка коливається в ширших межах, за вмістом жиру воно поступається їй. На відміну від кукурудзи сорго містить у невеликих кількостях танін та віск.

Окремі складові зерна сорго сильно відрізняються за хімічним складом. Приблизно 90 % крохмалю і 80 % всього білка знаходяться в ендоспермі. Основна кількість жиру та золи, а також близько 20 % всього білка – у зародку.

Хімічний склад анатомічно їх частин зерна сорго представлений відповідно [11] в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад анатомічних частин зерна сорго

Зерно та його частини	Вміст у зерні, %	Кількість, % до сухих речовин				
		Золи	Білка N <sub>x</sub> 6,25	Сирого воску	Жиру	Крохмалю
Зерно	100	1,65	12,3	0,32	3,6	73,8
Ендосперм	82,3	0,37	12,3	-	0,6	82,5
Оболонка	7,8	2,02	6,7	-	4,9	34,6
Зародок	9,8	10,36	18,9	-	28,1	13,4

Білки сорго не містять клейковини та містять три основні фракції (кафірин, глобуліни та глутеліни). Основним білком сорго є окупан, кількість якого досягає 7,9 % по відношенню до сухих речовин. За даними [46] у зерні сорго міститься 18 амінокислот, найбільше глютамінової, лейцину та аланіну.

До складу мінеральних речовин соргового зерна, як і кукурудзяного, входять, головним чином, солі калію, магнію, кальцію, натрію та заліза. Мінеральні речовини зерна сорго розподілені окремими частинами сорго неоднаково. Основна кількість їх зосереджена у зародку, менше – в оболонці.

Зерно сорго різних сортів має різне забарвлення: від білого до чорного. Це забарвлення обумовлюється наявністю пігментів у зовнішній квітковій оболонці та зовнішній оболонці ядра, частина яких здатна проникати в алейроновий шар та забарвлювати периферійні клітини ендосперму. Відповідно [22, 28] пігменти сорго діляться на дві широкі категорії: каротенаїди і з'єднання з фенолом. Останні розчиняються у воді та кислотах. Розрізняють прості фенольні сполуки та похідні багатоатомних фенолів (таніни). Перші забарвлюють зерно в рожевий, червоний, фіолетовий, синій кольори, з різними металами ці речовини утворюють пофарбовані комплекси. Таніни - безбарвні речовини, що легко окислюються під дією окислювальних ферментів, перетворюючись на речовини червоного та коричневого кольорів. З солями тривалентного заліза вони утворюють комплекси темно-зеленого і темно-синього кольорів.

За деякими даними у зерні сорго з білою оболонкою пігментів не міститься, у зерні коричневою оболонкою міститься дубильних речовин 3,93 – 6,14 мг/100 г сухих речовин. Іноді у зерні містяться безбарвні таніни, а також під білою плодовою оболонкою у деяких вітчизняних сортів виявлено пігментний шар фіолетового кольору. Вміст пігментів значно вищий у цукрових сортах сорго, ніж у зернових [45, 47].

## 1.2 Застосування зернового сорго

В даний час сорго вирощують в основному для отримання зернофуражу, силосу та зеленого корму. Нижче розглядатиметься лише напрями використання зернового сорго.

Зернове сорго чудовий концентрований корм. Зерно зернового сорго є гарним компонентом комбінованого корму та вдало замінює зерно кукурудзи та ячменю. Поживна цінність кормового зернового сорго визначається показниками, зазначеними у табл. 1.3 [44].

Таблиця 1.3 – Поживна цінність кормового зернового сорго у перерахунку на суху речовину, %

Показник поживної цінності	Вміст
Сирий протеїн	12 – 15
Сирий жир	2 – 4
Сира клітковина	6,1 – 6,86
Сирий попіл	2 – 2,1
Поживна цінність 1 кг корму, корм. од.	1,1 – 1,3

За своїм хімічним складом та кормовими перевагами сорго близьке до кукурудзи та ячменю.

Для деяких сортів зернового сорго [22] перетравність білка становить від 8,8 до 63,4 %, а за вмістом сирого білка (від 9 до 22 %) вони перевищують кукурудзу. Ступінь декстринізації крохмалю дуже низький від 0,8 до 1,84 %.

У табл. 1.4 вказано основні показники поживної цінності зразків харчового

сорго у перерахунку на суху речовину [24].

Таблиця 1.4 – Показники поживної цінності зерна сорго

Поживна цінність зразків сорго в перерахунку на суху речовину, %					
Зразок	Протеїн	Лізін	Лізін у білку	Крохмаль	Таніни
341X120	12,8	0,29	0,13	66,0	0,27
Спринт	13,2	0,29	0,99	71,4	0,28
Прайм	14	0,31	2,21	65,5	0,3

Слід зазначити, що вміст таніну відповідає нижній межі значень, наведених у табл. 1.4, що особливо важливе для харчового сорго.

В якості сировини для виробництва крупи (ядра) пропонується використовувати гібриди. Зернівка соризу має овальну або яйцевидну форму, покрита насінневою оболонкою білого (прозорого) жовтого, рожевого або іншого кольору. Вихід крупи (ядра) із зерна гібридів соризу коливається від 72,3 до 82,1 %. Результати біохімічних аналізів крупи, а також дані проведення дегустації крупи і зварених із неї страв у наукових та торгових установах показують, що вона за смаковими якостям близька до рису. Крупа рекомендована для приготування гарнірів, перших, других та солодких страв, що підтверджують успішне використання соризу при випіканні дріжджового хліба, пряників, бісквіту та приготування млинців. Придатний сориз і для пивоваріння.

Для виробництва крупи придатні лише зерна білого кольору, округлої форми, вирівняні без пігментних шарів. Зовні соргова крупа є матовими кульками білого кольору різної крупності і є ендоспермом майже повністю звільненим від плодової та насінневої оболонок і частково від зародка та алейронового шару. Проведена дегустація соргової каші, звареної на воді та молоці, дала позитивну оцінку каш, особливо на молоці. Дані щодо виходу крупи та побічних продуктів представлені в табл. 1.5; хімічний склад крупи – у табл. 1.6; склад вітамінів – у табл. 1.7. Дані таблиць свідчать про сприятливий хімічний склад крупи. Відсутність клітковини свідчить про легку засвоюваність крупи, низький вміст жиру – можливість тривалого зберігання її. За вмістом рибофлавіну (B<sub>2</sub>) крупа

сорго значно перевершує такі широко використовувані крупи, як рисова та пшоно. По поживності не поступається таким поширеним крупам, як кукурудзяна та пшоно, перевершує по поживній цінності рисову крупу. Однак до недоліків каш із крупи сорго слід віднести тривалий час варіння (45 хв).

Таблиця 1.5 – Вихід крупи із зерна сорго

Продукти переробки	Значення показника
Загальний вихід крупи, %	53,5
У тому числі крупа:	
№1 – прохід сита 04 мм і схід 03 мм	32,5
№2 – прохід сита 03 мм та схід 0 2,5 мм	12
№3 – прохід сита 0 2,5 мм і схід сита 0 2 мм	9
Дробленка	12
Борошно	31
Лузга	2,5
Дрібне зерно	1

Таблиця 1.6 – Хімічний склад крупи із зерна сорго, % на абсолютно суху речовину

Крупа	Білок	Жир	Сума вуглеводів	Клітковина	Зола	Кальцій	Фосфор
№1	9,19	0,51	89,86	0	0,44	0,23	0,12
№2	8,4	0,17	91,04	0	0,39	0,22	0,11

Таблиця 1.7 – Склад вітамінів у різних крупах, мг/кг

Продукт	Каротиноїди	Е	В1	В2	РР	В6	Холін
Крупа №1	0,1	28,6	3	0,9	18,1	3,4	550
Крупа №2	Сліди	24,4	2,8	0,63	14,4	3,1	510
Рисова крупа	0	4,5	0,8	0,4	16	1,8	780
Пшоно	0,15	26	4,2	0,4	15,5	5,2	-
Кукурудзяна крупа	2	27	1,3	0,7	11	2,5	-

Відомо, що борошно з сорго у чистому вигляді непридатне для хлібопечення, оскільки не утворюють клейковини. Тому багато авторів використовувати її в суміші з пшеничним борошном для поліпшення якості останньої.

Є дані використання муки із зерна сорго, проса, маніоки та різних видів пшениці для виготовлення макаронних виробів, що мають задовільну розварюваність [33].

### 1.3 Класифікація сучасних методів гідротермічної обробки зерна

При проведенні технологічних процесів одним із найпоширеніших методів обробки харчових продуктів є їх термообробка. Термічна обробка зерна може здійснюватися як за допомогою пари, гарячого повітря, термовипромінювання, так і механічним шляхом, як це відбувається в процесі дроблення або екструзії. На рис. 1.1 наведені способи термічної обробки, які застосовуються в борошномельній, круп'яній та комбікормової промисловості.

При виробництві комбікормів застосовуються в основному два методи теплової обробки – гранулювання та підсмажування. При гранулюванні під впливом механічного тиску і температури в зерні протікають фізичні та біохімічні процеси, які призводять до клейстеризації та декстринізації крохмалю, що міститься в зерні, що сприяє кращому на 10 – 12 % його засвоєнню [11, 19]. Підсмажування проводиться кондуктивним методом на обжарювальних агрегатах періодичної дії при температурі поверхні, що гріє 200 – 300 °С протягом 90 – 100 хв. В результаті обсмажування відбувається гідроліз крохмалю і перехід його в декстрини, проте значного збільшення декстринів та поживної цінності комбікорму не відбувається.

При сухому нагріванні обробка зерна проводиться потоком нагрітого до температури 300 – 315 °С повітря, зерно нагрівається до температури 160 – 190 °С, збільшується в об'ємі і розтріскується, після чого плющиться. Кормова цінність зерна збільшується на 10 % порівняно з подрібненим та необробленим

зерном [28].



Рисунок 1.1 – Класифікація сучасних методів ГТО зерна

При екструдванні відбувається комплексний вплив на зерно сил стиснення, тиску та температури. Температура екструдату на виході становить 120 – 130 °С. При екструдванні відбувається практично повне знезараження зерна, крохмаль частково розкладається на декстрини та цукру, проте метод потребує значних енергетичних витрат.

При ІЧ-обробці зерна, поширеної в США, Англії, Німеччині, Японії, Італії та відомої під назвою «мікронізація» відбувається знезараження, підвищення вмісту декстринів, більш істотне, ніж при інших способах обробки зміна крохмальних гранул, підвищення енергетичної цінності зерна [14, 16].

Пропарювання зерна роблять як при надмірному тиску, так і при тиску, близькому до атмосферного. Після пропарювання зерно піддається обов'язковому

плющенню. При пропарюванні при атмосферному тиску зерно нагрівається до 85 – 95 °С за 15 – 20 хв, вологість зерна підвищується до 20 – 28 %. Вологотеплова обробка з наступним плющенням підвищує поживну цінність вуглеводного та протеїнового комплексу зерна, знижує енергетичні витрати організму на переробку корму. Пропарювання зерна при надмірному тиску з подальшим плющенням покращує поживну цінність порівняно з обробкою парою при атмосферному тиску.

Для знезараження сировини та кормів використовуються ультрафіолетові промені (УФП). Перевагою УФП крім бактерицидної дії на гриби, бактерії та віруси є те, що при певних дозах та режимах в опромінених продуктах підвищується вміст вітамінів D, С, Е та ферментативна активність зерна, а на цій основі – засвоюваність поживних речовин. При УФП зернова сировина зволожується, піддається інтенсивному перемішуванню та сушінню. Температура в радіаційній камері досягає 175 – 200 °С, тому зерно може нагріватися до температури 40 – 120 °С час обробки в камері від 5 до 120 с [14, 18].

При електротермічній обробці попередньо зволоженої до 35 % вологості зернової сировини та кормів протягом 2 хв відбувається зниження вмісту мікроорганізмів до 0,01 %, причому при зберіганні протягом 2 місяців загальна кількість мікроорганізмів практично не зміниться. При електротермічній обробці відбувається часткова денатурація білків, що призводить до зменшення кількості водорозчинних білків, відзначається часткове руйнування амінокислот [1].

Ступінь впливу різних способів обробки на збільшення доступності ферментативному впливу на крохмаль і протеїни, а також на мікробіологічний стан продукту та антинутритивні фактори показують, що найбільший вплив на крохмаль, протеїни та мікробіологічний стан зерна надають такі способи обробки, як гранулювання за допомогою пари, мікронізація та екструзія. Найперспективнішим способом обробки зерна злакових є мікронізація, при цьому вирішальною умовою отримання високоякісного продукту є правильно обраний режим роботи.

#### 1.4 Науково-практичні основи ІЧ-обробки харчових середовищ

В даний час все більша увага приділяється термообробці зерна з інфрачервоним енергопідведенням, оскільки цей метод є екологічно чистим, що істотно інтенсифікує процеси гідротермообробки сировини і підвищує його поживні якості. Науково-практичними основами та технічною реалізацією методу займалися багато вчених вітчизняних та закордонних вчених.

Термообробка зерна ІЧ-випромінюванням дозволяє забезпечити швидке нагрівання зерна. Волога, що знаходиться в зерні та на його поверхні, починає переміщатися до центру. Завдяки високій температурі поверхневі шари зернівки зневоднюються та спікаються, утворюючи щільну оболонку без капілярів. Волога, перемістившись у центр зернівки, перетворюється на пару, градієнт загального тиску якого в міру підвищення температури зернівки різко збільшується. При досягненні температури 160 – 180 °С градієнт загального тиску пари настільки збільшується, що відбувається «вибух» зернівки, що супроводжується її деформацією і градієнт загального тиску знижується. Безпосередньо перед «вибухом» обсяг зернівки збільшується приблизно в 1,5 – 2 рази, відбувається зниження щільності та міцності зерна, зміна біохімічних та фізико-технологічних властивостей зерна [14].

Науковою основою ІЧ-опромінення харчових продуктів є теорія фізичних явищ поширення, поглинання та розсіювання електромагнітного випромінювання у вологих матеріалах рослинного та тваринного походження.

У фундаментальних роботах, присвячених теорії ІЧ-обробки харчових середовищ [35, 38], зазначається, що найбільша ефективність використання ІЧ-випромінювання при обробці тонкого шару матеріалу досягається в тому випадку, коли максимум випромінювання ІЧ-генератора припадає на область найбільшого поглинання. Помічено, що основна частина енергії світлого випромінювача посідає область спектру до 3 мкм, і темного – 2,5 – 10 мкм.

Зерно можна розглядати як модель, що складається з трьох шарів, що поглинають і розсіюють випромінювання: 1-й – верхня оболонка, 2-й – ендосперм і 3-й –

нижня оболонка. Експериментально [14] було встановлено, що при перенесенні випромінювання зерно не лише поглинає випромінювання, але й розсіює його, що дуже ускладнює дослідження поширення випромінювання.

При вивченні впливу ІЧ-випромінювання на об'єкт обробки необхідно забезпечувати рівномірне поле опромінення досліджуваного об'єкта. Останнього домагаються варіюючи наступними величинами: висотою розташування випромінювачів над поверхнею опромінюваного об'єкта  $h$ , кроком між випромінювачами  $s$ , відстанню між випромінювачами і відбивачами  $z$ , кількістю блоків випромінювання  $n$ , числом випромінювачів у кожному блоці  $i$  та напругою на клеммах випромінювача.

Вчені [24, 26, 35], вивчаючи оптичні властивості та термодинамічні характеристики цілого зерна та його анатомічних складових (оболонки та ендосперму), дійшли висновку, що відмінність вмісту вологи в різних частинах зернівки обумовлює розбіжність цих характеристик. Відбивна здатність оболонки завжди вища, ніж цілого зерна. Це тим, що у спектральну відбивну здатність цілого зерна вносить свій вплив процес відбиття від системи ендосперм-нижня оболонка, тобто верхня оболонка опромінюється ще й потоком знизу. Присутність у зернівці колоїдних частинок, розміри яких можна порівняти з довжиною хвилі ІЧ-випромінювання, пояснює процес розсіювання, тому що колоїдні частинки є центрами розсіювання.

При вивченні спектральних терморадіаційних та оптичних характеристик ендосперму та оболонки зерна пшениці [28, 30] було відзначено, що найбільші значення пропускну здатності  $T_{\lambda}(0; 2\pi) = 38\%$  у оболонки лежать в інтервалі довжин хвиль від 0,9 до 2,0 мкм, причому  $T_{\lambda}$  оболонки більш ніж у 5 разів вище, ніж  $T_{\lambda}$  ендосперму. Для відбивної здатності  $R_{\lambda}(0; 2\pi)$  навпаки,  $R_{\lambda}$  ендосперму в 4 рази більше, ніж  $R_{\lambda}$  оболонки. Поглинальні здібності  $A_{\lambda}(0; 2\pi)$  оболонки та ендосперму мають однакову залежність. Максимальне значення коефіцієнта розсіювання  $S_{\lambda}$  збігається з мінімумами коефіцієнтів поглинання  $R_{\lambda}$  та ефективного ослаблення  $L_{\lambda}$  і посідає  $\lambda = 0,9 - 1,1$  мкм для ендосперму. Для оболонки відбувається зміщення характерних точок вліво та  $\lambda = 0,7 - 1,0$  мкм.

Ефективність термообробки зерна залежить не тільки від узгодження спектральних характеристик матеріалу, що опромінюється, але і від правильного вибору типу генератора ІЧ-випромінювання, а також температури, яку набуває випромінювач при роботі.

В [22] були встановлені закони перенесення енергії в процесі ІЧ-опромінення за різних умов обробки, отримані основні термодинамічні характеристики масопереносу вологи в зерні, визначено вплив термообробки ІЧ-випромінюванням на білковий та вуглеводний комплекси зерна.

### 1.5 Зміна структурно-механічних, фізико-хімічних та біохімічних властивостей зерна при ІЧ-обробці

Інтерес до структурно-механічних властивостей зерна внаслідок їх вирішального значення на поведінку зерна при переробці на витрату енергії, якість виробленої продукції виявляли багато вчених.

Досліджуючи процес деформації зерна при стисканні та впливу вмісту вологи на структурно-механічні властивості зерна [45] автори виділяють три фази деформації та руйнування зерна залежно від вологості. Перша фаза, при якій вміст вологи становить до 11 %, характеризується переважанням пружних деформацій, що підкоряються закону Гука і зерно є пружно пластичним; друга – з вологовмістом від 11 % до 13,5 % – залишкових деформацій, розвиток яких залежить від пластичних властивостей зернівки, яка є пружно пластичною; третя фаза з вмістом вологи вище 13,5 % свідчить про повне руйнування зернівки, яка є в даному випадку еластично пластичною. Вплив теплоти та вологи виявляється у зміні тривалості кожної фази [42].

Міцність зернівки є найважливішою характеристикою зерна, що оцінюється зусиллям, необхідним руйнування зерна. Міцні властивості зерна, що має однаковий вміст вологи, при статичних дослідженнях, вміст вологи значніше впливає на міцність, ніж температура і з одночасним підвищенням вмісту вологи і температури міцність зерна знижується. Значний вплив на структурно-механічні

властивості зерна має стан його оболонки. Другою найважливішою реологічною характеристикою зерна є пластичність. При підвищенні вмісту вологи пластичність збільшується, зростає незворотна деформація після зняття навантаження, чому сприяє і підвищення температури. З підвищенням пластичних властивостей зерна зростає швидкість релаксації напружень та зменшується період та час релаксації. Якщо до зерна прикласти деяке зусилля і зафіксувати його в цьому стані, то з часом напружень, що виникли в ньому, будуть зменшуватися за рахунок поступової зміни і взаємного розташування молекул білків і вуглеводів зерна таким чином, щоб напруга стала мінімальною [2].

При обробці зерна ІЧ-випромінюванням, основними параметрами якої є щільність падаючого потоку випромінювання і час дії, кінцевим результатом є деформація зерна, руйнування структури зернівки, появи великої кількості тріщин, розпушення ендосперму. Щільність зернівки зменшується на 85 – 100 %. Деформування зерна порушує зв'язок між молекулами та міцність зерна знижується [33], що є дуже суттєвим при переробці зерна.

Слід зазначити, що ІЧ-обробка зерна впливає на такі показники якості та властивості зерна, як натура, склоподібність, щільність, теплофізичні та масообмінні властивості.

Впливу ІЧ-випромінювання на біохімічні показники основних зернових присвячено роботу [44]. У ній наголошується, що при збільшенні падаючого потоку випромінювання зростає кількість декстринів, причому максимальна кількість декстринів зі збільшенням щільності потоку випромінювання зміщується у бік зменшення вологоотримання. Збільшення ступеня декстринізації призводить до збільшення цукрів, що вивільняються, що збільшує поживну цінність і засвоюваність зерна.

Перетравлюваність білка в зерні є важливим показником харчової та біологічної цінності зерна. Реакція денатурації обігу призводить до значного збільшення швидкості гідролізу протеолітичними ферментами і перетравлюваність білка пшениці збільшується з 83 до 94 %, а також змінюється

фракційний склад білка, що виражається в втраті розчинності білкових фракцій альбуміну і глобуліну і деякому збільшенні.

Зерно, як живий організм, має на своїй поверхні популяції мікроорганізмів та грибів, які можуть призвести до втрати зерном біологічної та поживної цінності. При ІЧ-обробці зерна в нерухомому шарі товщиною 1 – 1,5 зернівки відбувається знищення поверхневої мікрофлори при щільності потоку випромінювання 20 кВт/м<sup>2</sup>. Стерилізуючий ефект обробки зерна обумовлений не так високою температурою, як великою швидкістю нагрівання. При швидкості нагрівання 8 – 10 °С/с зерно стерилізується повністю, 5 – 7 °С/с – на 85 %, 3 – 5 °С/с – на 60 %. Температура нагріву зерна становить відповідно 165, 172, 178 °С [22]. Таким чином, застосування ІЧ-обробки зерна є ефективним і перспективним методом не тільки завдяки скороченню тривалості процесу, а й виникненню та розвитку біохімічних реакцій, у тому числі стерилізуючих, що сприяють підвищенню якості одержуваного продукту. Зміна структурно-механічних властивостей зерна (міцність, пластичність) суттєво знижує енерговитрати, необхідні його переробки.

#### Висновки за розділом

В даний відмічено зростаючий інтерес до зерновому сорго, використовуючи його як заміну традиційних компонентів комбікормів як і монокорм. У той же час спостерігається стійка тенденція збільшення виробництва зерна сорго, що використовується на харчові та технологічні цілі, причому використання зерна на харчові цілі носить характер науково-дослідних робіт і не впроваджено в промисловість.

Однак відсутність високоефективних технологій переробки соргопродукції гальмує поширення цієї культури, зокрема, завжди потребує післязбирального сушіння та видалення квіткових плівок. Зерно, яке застосовується у круп'яному, борошномельному та комбікормовому виробництві, необхідно обрушувати з метою відділення плодових оболонок, для отримання з сорго крохмалю його

необхідно дробити.

Для інтенсифікації технологічного процесу обробки зерна з метою надання йому необхідних технологічних та споживчих властивостей використовувалися різні методи сушіння та ГТО, проте, будучи доступними, дешевими та технологічними, вони не дозволяють досягти комплексних змін у біохімічних, фізичних та структурних властивостях зерна.

Обробка зерна сорго ІЧ-випромінюванням є екологічно чистим методом, що істотно інтенсифікує процес обробки та підвищує поживні, структурні та споживчі властивості зерна. Внаслідок ІЧ-дії на зерно відбувається комплексна зміна його біохімічних, фізичних та структурних властивостей.

Отже, метою роботи є дослідження процесу ІЧ-термообробки зерна сорго як альтернативного методу гідротермічної обробки, а також вибір, обґрунтування та реалізація варіантів удосконалення технологічних процесів термообробки зернового сорго на основі застосування ІЧ-випромінювання, що призводить до біохімічних змін.

Досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі основні задачі:

- визначити оптичні та терморадіаційні характеристики зерна сорго;
- дослідити процеси тепловологопереносу в зерні голозерного та півчастого сорго при ІЧ-обробці;
- розробити моделі нагрівання зерна сорго та провести оцінку параметрів процесу ІЧ-нагріву;
- визначити структурно-механічні та фізичні характеристики зерна сорго при ІЧ-обробці;
- виконати розрахунок кошторису витрат на проведення досліджень.

Об'єкт дослідження – процес мікронізації продовольчого голозерного та півчастого сорго.

Предмет дослідження – закономірності та взаємозв'язок технологічного процесу мікронізації продовольчого зерна сорго, вплив його на структурно-механічні та фізичні характеристики зерна сорго.

## 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ, МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ДОСЛІДНОГО УСТАТКУВАННЯ

### 2.1 Характеристика об'єктів дослідження

Як об'єкти дослідження та обробки було взято три сорти зернового сорго, представлені в табл. 2.1 відповідно до стандарту ДСТУ 4962:2008, що встановлює класифікацію зернового сорго за типами.

Таблиця 2.1 – Класифікація виділених сортів зернового сорго

Тип	Підтип	Сорт
I	-	Оганна
II	I	Голден
II	I	Понкі

Зразок сорту Оганна був лише частково звільнений від квіткових оболонки, які легко знімалися вручну та мали темно-фіолетове забарвлення з рідкісними білими вкрапленнями. Зернівка гладка, овальної форми, вирівняна. Колір зовнішнього шару плодової оболонки білий з рідкими рожевими та світло-коричневими вкрапленнями, що дозволило зарахувати цей сорт до групи голозерних сортів I типу. Пігментного шару між плодовою оболонкою та алейроновим шаром не виявлено. Ендосперм зерна представлений двома типами структур: склоподібним та борошністим. Склоподібний ендосперм розташовується відразу під алейроновим шаром і є монолітною системою крохмаль-білок, в якій проміжний білок міцно з'єднаний з зернами крохмалю. При подрібненні його проміжний білок руйнується разом із міцно включеними до нього зернами крохмалю. Вміст білка тут більше, ніж у борошністому ендоспермі. У борошністому ендоспермі зерна крохмалю слабо пов'язані з шаром прикріпленого до них білка та проміжним білком. Серед зерен навіть одного сорту вміст склоподібного та борошністого ендосперму по-різному. Подібне явище відзначалося також у роботі [46], де підкреслювалося, що в зернах навіть

одного зразка можливе різне відсоткове співвідношення склоподібного ендосперму до всього ендосперму. Скловидність зерна цього сорту дуже висока.

Зразок сорту Оганна врожаю 2024 року, зразок сорту Голден квіткової плівки не мало. Зерно гладке, овальне, вирівняне. Плодова оболонка має брудно-рожевий колір з темно-коричневими вкрапленнями, що дозволило віднести зерно до II типу I підтип. Шар склоподібного ендосперму, що знаходиться під алейроновим шаром, дуже тонкий, борошніста структура займає значний обсяг по відношенню до всього ендосперму. Слабке рожеве забарвлення периферійних оболонок зерна та зовнішньої області ендосперму свідчить про наявність пігментів не тільки у зовнішніх шарах плодової оболонки, а й у підболочковому шарі.

Зразок гібрида Понкі мав квіткову оболонку буро-червоного кольору, що легко знімається при ручному лущенні. Зовнішня плодова коричнева оболонка без вкраплень. Зерно також відноситься до II типу I підтипу. Зернівка витягнутої форми, в області зародка злегка витягнута. Пігментного шару під плодовою оболонкою не виявлено, чи домінує склоподібний ендосперм.

Деякі фізичні та технологічні характеристики об'єктів обробки наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Фізичні та технологічні характеристики об'єктів обробки

Характеристика	Оганна	Голден	Понкі
Вологий вміст з квітковими плівками, %	-	-	14,0
Вологовміст без квіткових плівок, %	9,6	11,4	16,4/14,7
Вологовміст квіток плівок, %	-	-	11,4/10,1
Товщина (висота) з квітковими плівками, мм	-	-	3,20
Товщина (висота) без квіткових плівок, мм	2,23	1,99	2,24
Забарвлення плодової оболонки	Біла, з рожевими вкрапленнями	Брудно-рожева	Коричнева
Наявність пігментів у підболочковому	Немає	Є	Немає

Вимірювання геометричних розмірів проводилися мікрометром з точністю 0,01 мм. За значення товщини зерна приймалося середнє значення серед 50 вимірів. Коефіцієнт варіації не перевищував 5 %.

Вимірювання вологості проводилося стандартним методом висушування навішування 5 г розмеленого зерна при температурі 130 °С протягом 40 хв. Для кожного виду зерна проводилося два паралельні визначення вологості. За вологість приймають середнє з цих термінів. Розбіжність між двома паралельними визначеннями не перевищувала 0,25%.

## 2.2 Характеристика експериментальної установки ІЧ-обробки зернової сировини

Експериментальна стаціонарна установка для ІЧ-обробки зернової сировини приведена на рисунку 2.1.

Для дослідження кінетики інфрачервоної обробки зерна сорго було сконструйовано експериментальну установку з джерелом інфрачервоного випромінювання (рис. 2.1 і 2.2).

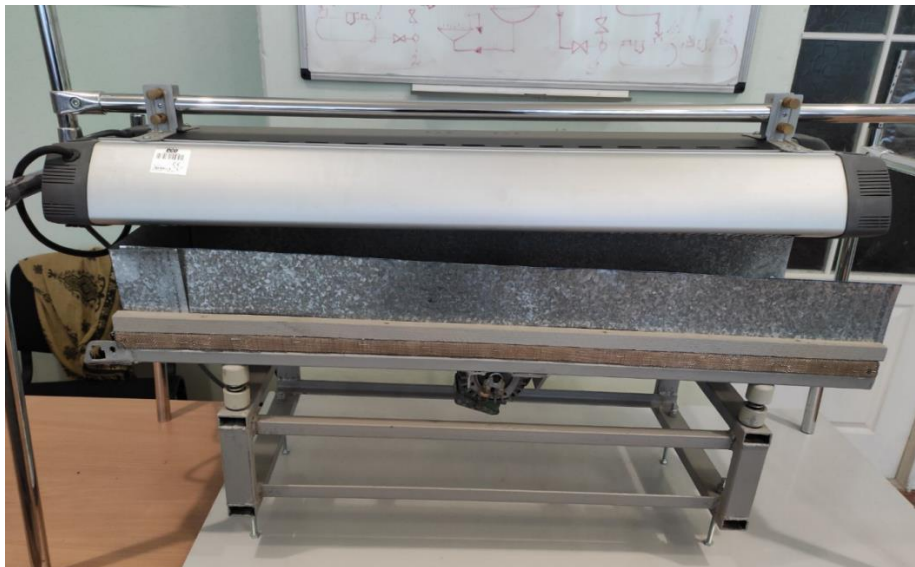


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд дослідного устаткування для мікронізації зерна сорго

Установка складається з зони для обробки матеріалів, в якій можна замінити

рефлектор. Положення випромінювачів (відносно рефлектора) можна плавно регулювати як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах, що дозволяє проводити дослідження просторового енергетичного опромінення з наступними конструктивними рішеннями:

- 1) від одного випромінювача та від декількох випромінювачів;
- 2) з можливістю використання рефлекторів різної форми;
- 3) з рівномірним та нерівномірним розміщенням випромінювачів у горизонтальній площині.

На рисунку 2.2 показано розташування випромінювачів над зоною обробки.

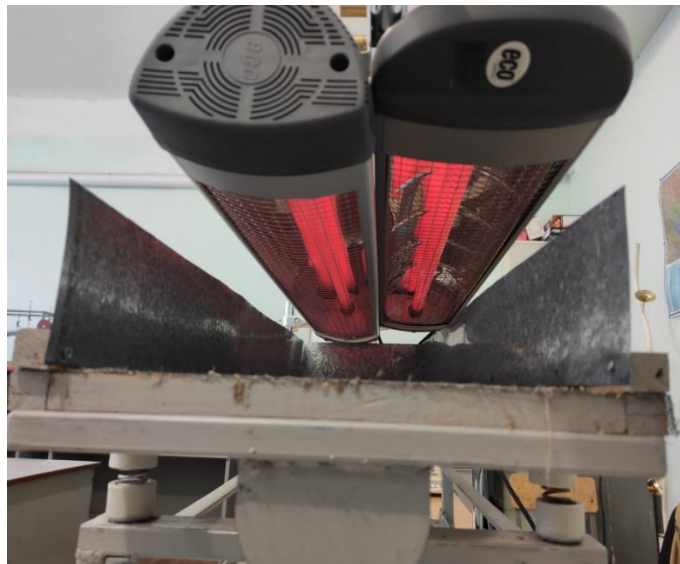


Рисунок 2.2 – Положення випромінювачів на дослідному устаткуванні

В електричному ланцюзі використовується тиристорний блок для зміни напруги на клеммах ІЧ-випромінювача в діапазоні 0-250 В і генерації коливальних режимів ІЧ-опромінення. Температура поверхні опромінюваного матеріалу вимірюється за допомогою дистанційного безконтактного ІЧ-термометра Raytek MiniTemp FS. Експериментальна установка також оснащена вібратором для поступового переміщення дослідного матеріалу.

Використання ламп КГТ – 220 – 1000 призводить до зменшення критерію ефективності, але вони мають найменшу одиничну потужність, що спрощує вирішення питання розміщення їх у робочій камері мікронізатора. Наявність

параболічних відбивачів з великим коефіцієнтом відбиття (0,6 – 0,9) збільшує щільність падаючого променистого потоку та знижує його нерівномірність, що підвищує ефект ІЧ-установки. Величина щільності падаючого потоку випромінювання на поверхню, що опромінюється, змінювалася в залежності від висоти робочої камери  $h$ , що визначається відстанню поверхні опромінення до нитки розжарення ламп випромінювачів. Варіація висоти відбувалася за рахунок переміщення поверхні, що опромінюється у вертикальному напрямку за допомогою гвинта переміщуючого пристрою.

Поверхня являла собою предметний столик, на якому знаходився об'єкт, що опромінюється. У середній частині предметного столика розташовувався отвір для подачі термоелектричних перетворювачів температури (ТЕПТ). Всі вузли та механізми були жорстко скріплені між собою та змонтовані на станині.

Щільність потоку випромінювання  $E$  визначалася висотою робочої камери (мм) і кількістю ламп випромінювачів та становила значення, зазначені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Значення щільностей падаючого потоку випромінювання в залежності від висоти робочої камери  $h$  та числа випромінювачів  $n$

$n$	9	9	9	7	3	3	3
$h$ , мм	50	60	85	100	70	85	100
$E$ , кВт/м <sup>2</sup>	37,2	35	30,8	26,5	22,4	18,8	16,6

### Висновки за розділом

Приведено коротку характеристику об'єктів досліджень, розглянуто будову та принцип роботи дослідного устаткування, вказано значення щільностей падаючого потоку випромінювання в залежності від висоти робочої камери та числа випромінювачів.

### 3 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Кінетика сушки зерна сорго при ІЧ-обробці з вологозмістом 5,3; 16,6 і 33,3 %

Для побудови кривих сушіння як залежності вологості (вологовмісту) опромінюваного зерна від часу обробки бралися навішування 5 г зерна сорго сорту Оганна без квіткових плівок. Для отримання зразка зерна з вмістом вологи 16,6 і 33,3 % до навішування в 200 г вихідного зерна додавали відповідно 10,8 і 32,4 г води з подальшим вистоюванням протягом 24 годин при температурі 20 °С. Зразок зерна з вмістом вологи 5,3 % отримували шляхом висушування в сушильній шафі протягом трьох діб при температурі 40 °С, з контролем втрати вологи кожні 12 годин. Зерно розташовувалося в один шар на металевій чашці, зернівки щільно прилягали один до одного. Щільність потоку випромінювання становив 18,8, 26,5 та 37,2 кВт/м<sup>2</sup>. Зразок містився у включену ІЧ-установку. Граничний час ІЧ-обробки  $\tau_r$  встановлювався експериментально з умов ознак горіння верхньої поверхні зерна.

Оскільки при значенні вологоотримання 16,6 і 33,3 % зерно починало активно вибухати при всіх значеннях щільності потоку випромінювання, ІЧ-обробку проводили за наявності захисної металевої сітки з діаметром прутів 0,5 мм і розмірами комірки 4×4 мм.

В процесі обробки проводилося визначення маси наступних наважок зерна шляхом зважування на автоматичних електронних технічних вагах ВКЛТ-500:

$m_1$  – маса чашки із зерном до ІЧ-обробки, г;

$m_2$  – маса чашки із зерном відразу після ІЧ-обробки, г;

$m_3$  – маса чашки із зерном охолодженим до кімнатної температури, г.

На підставі цих вимірів було визначено значення:

$m_4$  – маса води, що залишилася у зерні після ІЧ-обробки, г;

$m_5$  – маса води, що випарувалася з зерна при його охолодженні до кімнатної температури, г;

$m_6$  – маса води, поглиненої з повітря обробленим продуктом при охолодженні, г.

У табл. 3.1, 3.2 та 3.3 вказані значення  $m_4$ ,  $m_5$ ,  $m_6$ , а також значення вологовмісту  $W_{CB}$ , % на кожному кроці обробки, обчислені за формулою:

$$W_{CB} = \frac{m_4}{m_{CB}} \cdot 100\%$$

де  $m_{CB}$  – маса сухої речовини в зразку, що обробляється масою 5 г.

Таблиця 3.1 – Кінетика сушіння зерна сорго сорту Оганна при початковому вмісті води 5,3 %

Е, кВт/м <sup>2</sup>	$\tau_0$ , с	$m_4$ , г	$m_5$ , г	$m_6$ , г	$W_0$ , %
18,8	0	0,25	-	-	5,3
	10	0,25	-	0,01	5,3
	20	0,23	-	0,01	4,8
	30	0,17	-	0,02	3,6
	40	0,07	-	0,02	1,5
	50	0	-	0,02	0
26,5	0	0,25	-	-	5,3
	10	0,23	-	0,02	4,8
	20	0,20	-	0,01	4,2
	30	0,1	-	0,03	2,1
	40	0	-	0,06	0
37,2	0	0,25	-	-	5,3
	5	0,22	-	0,01	4,6
	10	0,23	-	0,01	4,8
	15	0,17	-	0,02	3,6
	20	0,12	-	0,01	2,5
	25	0	-	0,02	0

Таблиця 3.2 – Кінетика сушіння зерна сорго сорту Оганна при початковому вмісті вологи 16,6 %

Е, кВт/м <sup>2</sup>	$\tau_0$ , с	$m_4$ , г	$m_5$ , г	$m_6$ , г	$W_0$ , %
18,8	0	0,71	-	-	16,6
	10	0,69	0,03	-	16,1
	20	0,63	0,04	-	14,7
	30	0,52	0,05	-	12,1
	40	0,41	0,08	-	9,6
	50	0,20	-	0,01	4,7
	60	0,09	-	0,03	2,1
26,5	0	0,71	-	-	16,6
	10	0,66	0,04	-	15,4
	20	0,62	0,07	-	14,5
	30	0,34	0,02	-	7,9
	40	0,17	-	0,01	4,0
37,2	0	0,71	-	-	16,6
	5	0,67	0,01	-	15,6
	10	0,62	0,05	-	14,5
	15	0,58	0,04	-	13,7
	20	0,46	0,04	-	10,7
	25	0,24	0,01	-	5,6
	30	0,13	-	0,02	3,0

На рис. 3.1, 3.2 і 3.3 показані залежності втрати вологи оброблюваними зразками масою 5 г і початковим вмістом вологи 5,3, 16,6 і 33,3 % при трьох значеннях щільності потоку випромінювання 18,8, 26,5 і 37,2 кВт/м<sup>2</sup> відповідно.

Зерно за своїми колоїдно-фізичними властивостями є колоїдним капілярно-пористим тілом [2]. Рідина в таких тілах пов'язана переважно капілярними силами, крім того переважає і пов'язана волога. Як мікрокапіляри в зерні сорго переважають міжклітинні проміжки.

Таблиця 3.3 – Кінетика сушіння зерна сорго сорту Оганна при початковому вмісті вологи 33,3 %

Е, кВт/м <sup>2</sup>	$\tau_0$ , с	$m_4$ , г	$m_5$ , г	$m_6$ , г	$W_0$ , %
18,8	0	1,25	-	-	33,3
	15	1,16	0,09	-	30,9
	30	1,02	0,12	-	27,2
	45	0,71	0,06	-	18,9
	60	0,36	0	-	9,6
	70	0,11	-	0,04	2,9
26,5	0	1,25	0,06	-	33,3
	10	1,18	0,13	-	31,5
	20	1,05	0,04	-	28
	30	0,68	0,05	-	18,1
	40	0,29	-	0,05	7,7
37,2	0	1,25	-	-	33,3
	5	1,21	0,09	-	32,3
	10	1,15	0,12	-	30,7
	15	0,98	0,10	-	26,1
	20	0,78	0,05	-	20,8
	25	0,55	0,03	-	14,7
	30	0,3	-	0,05	8,0

Ендосперм є колоїдним (квазікапілярно-пористим) тілом. Оболонки належать до категорії капілярно-пористих тіл. Подібна будова зерна обумовлює наявність різних видів зв'язку вологи, причому на різних етапах термообробки, в тому числі і ІЧ-випромінюванням, волога змінює форму зв'язку з матеріалами та основну роль відіграє той чи інший вид зв'язку вологи. Відповідно до класифікації форм зв'язку вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах (зерно) [22] необхідно враховувати як природу утворення різних форм, так і енергію зв'язку вологи з матеріалами. Видалення адсорбційно-пов'язаної вологи в мікрокапілярах пов'язане з перетворенням її на пару всередині матеріалу.

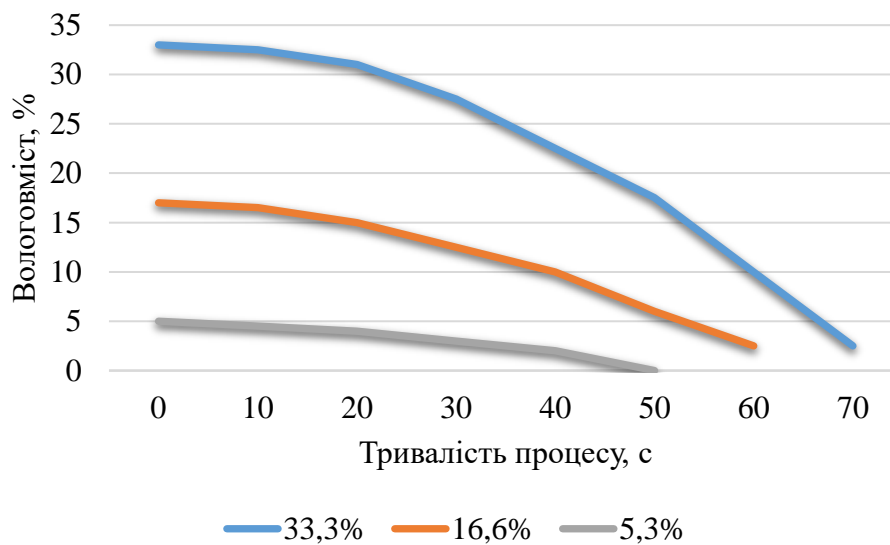


Рисунок 3.1 – Криві сушіння зерна сорго сорт Оганна при щільності потоку випромінювання 18,8 кВт/м<sup>2</sup> при початковому вмісті вологи

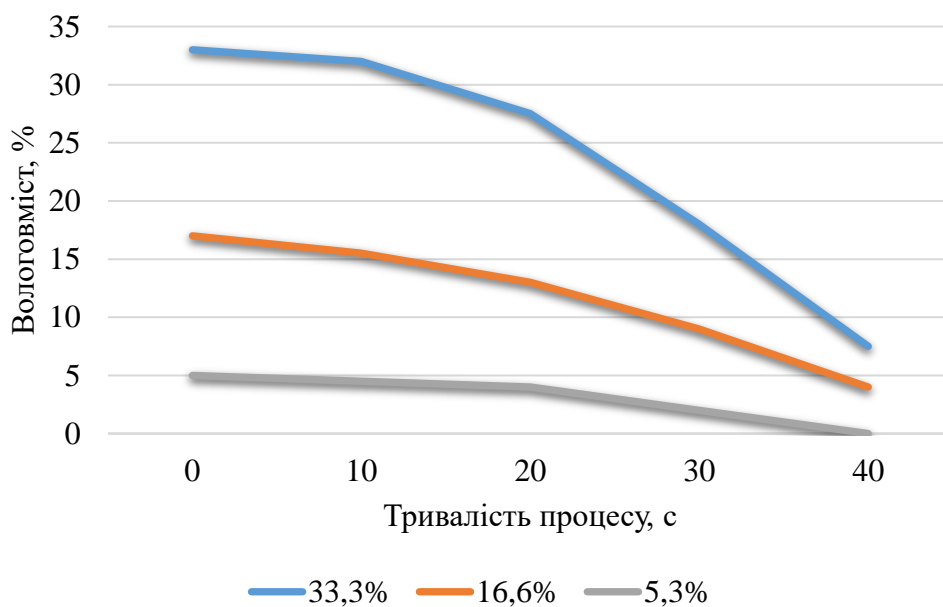


Рисунок 3.2 – Криві сушіння зерна сорго сорт Оганна при щільності потоку випромінювання 26,5 кВт/м<sup>2</sup> при початковому вмісті вологи:

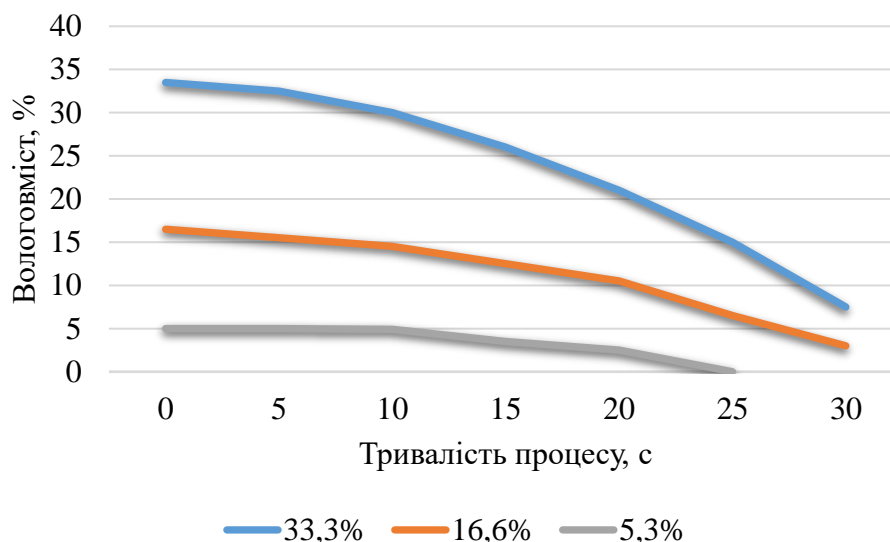


Рисунок 3.3 – Криві сушіння зерна сорго сорт Оганна при щільності потоку випромінювання 37,2 кВт/м<sup>2</sup> при початковому вмісті вологи:

Осмотично зв'язана волога міститься всередині матеріалу у вигляді рідини і видаляється з нього у тому ж вигляді. Капілярна волога може видалятися з матеріалу, переміщаючись у вигляді рідини або пари.

Криві сушіння зерна сорго представлені на рис. 3.1, 3.2 та 3.3, які відображають особливості процесу сушіння, зумовлені властивостями матеріалу, що обробляється. Як бачимо, видалення вологи у часі у процесі сушіння відбувається нерівномірно. Типові криві сушіння мають два періоди сушіння та період прогріву матеріалу. Період прогріву характеризується постійним або слабким значенням вологовмісту. Потім починається приблизно лінійне в часі зменшення вмісту вологи, що триває до першого критичного вмісту вологи. Цей період називається першим періодом сушіння, бо сушка відбувається з постійною швидкістю, то періодом постійної швидкості. Далі і до кінця процесу зниження вмісту вологи відбувається по деякій кривій аж до повного припинення вологовидалення. Після першої критичної точки швидкість сушіння різко зменшується і відбувається складною кривою.

Однак особливості процесу сушіння сорго при ІЧ-опроміненні, що характеризуються можливим підгорянням верхнього шару оболонки зерна, коли нижні шари не остаточно зневоднені, не дозволяють довести процес до повного

зневоднення зерна і отримати криві сушіння з явно вираженим другим періодом. За даними експерименту процес переміщення вологи всередину зерна за рахунок градієнта температур, що утворився, не виявлено, проте явно простежуються два періоди сушіння, що характеризуються різними швидкостями. Умови експерименту при інтенсивному процесі сушіння, до яких відноситься сушка ІЧ-випромінюванням, не дозволяють суворо встановити критичну точку в другому періоді швидкості сушіння, тому швидкість сушіння в другому періоді також слід вважати постійною. Швидкість сушіння, яка визначається збільшенням вмісту вологи матеріалу в одиницю часу будують методом графічного диференціювання по кривим сушіння кожного виділеного періоду. Значення швидкостей сушіння в першому і в другому періодах, а також тривалість кожного періоду у відсотках від загальної тривалості сушіння при різних показниках вологи і значеннях щільності потоку випромінювання  $E$  (кВт/м<sup>2</sup>) вказані у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Залежність швидкості сушіння в кожному періоді від вмісту вологи зерна і щільності потоку випромінювання

$E$ , кВт/м <sup>2</sup>	$W$ , %	$dW_{CB.1}/dt$	$dW_{CB.2}/dt$	$\tau_1$ , с	$\tau_2$ , с
18,8	33,3	0,34	1,1	41	59
	16,6	0,2	0,78	43	57
	5,3	0,07	0,36	40	60
26,5	33,3	0,51	1,9	48	52
	16,6	0,25	1,2	50	50
	5,3	0,12	0,47	50	50
37,2	33,3	0,51	2,3	43	57
	16,6	0,45	1,5	50	50
	5,3	0,19	0,68	50	50

З наведених даних видно, що зі зростанням вмісту вологи швидкість сушіння і в першому і в другому періодах зростає. Тривалість першого періоду коливається від 40 до 50 % від усього сушіння, другого – від 50 до 60 %, тобто другий період дещо триваліший за перший, або вони однакові.

Результати експериментальних досліджень процесу сушіння були оброблені

чисельними методами та отримані наступні аналітичні залежності, що описують процес відносної втрати вологості зерна при ІЧ-обробці.

$$\frac{\Delta W_{CB,0}}{W_{CB,0}} = 8,514 \cdot 10^{-4} \cdot (H - 216), \quad \text{при } H > 216$$

$$\frac{\Delta W_{CB,0}}{W_{CB,0}} = 6,98 \cdot 10^{-6} \cdot H^{1,656}$$

де  $\Delta W = W_{CB,0} - W_{CB}$  – зміна вмісту вологи, %;

$W_{CB,0}$  – початковий вологовміст, %;

$W_{CB}$  – поточний вміст вологи, %;

$H = E \cdot \tau$  – значення енергетичної експозиції, кВт/м<sup>2</sup> · с.

Вирази визначені для зерна сорго в діапазоні вологовмісту 5,3 < W < 33,3 %, в діапазоні щільності потоку випромінювання 18,8 < E < 37,2 кВт/м<sup>2</sup> і часу обробки 0 < τ < 50 с. Коефіцієнти кореляції у першому випадку дорівнює 0,96, у другому – 0,95, що свідчить про задовільну відповідність отриманих аналітичних функцій експериментальним значенням.

Таблиця 3.5 – Значення коефіцієнтів лінійної регресії вираження відносної втрати вологи

E, кВт/м <sup>2</sup>	W, %	A	B	R
18,8	33,3	-0,173	0,001	0,95
	16,6	-0,100	0,001	0,97
	5,3	- 0,092	0,001	0,97
26,5	33,3	- 0,122	0,001	0,96
	16,6	- 0,098	0,001	0,95
	5,3	- 0,102	0,001	0,95
37,2	33,3	-0,114	0,001	0,92
	16,6	- 0,101	0,001	0,96
	5,3	- 0,101	0,001	0,97

### 3.2 Визначення вологопоглинальної здатності зерна сорго

Метою дослідження вологопоглинальної здатності було визначення кількості вологи, що поглинається зерном сорго при короткочасному (від 1 до 5 хв) контакті з водою, що є важливим для визначення кількості вологи, втраченої (випаровується) при ІЧ-обробці зволоженого зерна в початкові моменти.

Визначення вологопоглинальної здатності проводилося для зерна сорго II типу I підтипу (сорт Голден, без квіткової плівки; гібрид Понкі з квітковою плівкою) та I типу (сорт Оганна без квіткової плівки).

Для промивання зерна застосовувалась водопровідна проточна вода. Десять грам зерна без квіткової плівки промивалися в ситі протягом 10 с. В процесі промивання відбувався рівномірний розподіл вологи по поверхні зерна та поглинання вологи верхніми шарами зернівок. Після струшування зайвої вологи з сита проводилося вимірювання маси зерна з поглиненою і утримуваною вологою. Утримуваною вологою вважалася та волога, яка залишилася на зерні після багаторазового струшування сита, а поглинена волога визначалася після промокування зерна фільтрувальним папером та видалення утримуваної вологи. На звожене зерно, що має поглинену вологу, розпорошувався її води, і зразок залишався на час 1, 3, 5, 10 і 15 хв, накритий фільтрувальним папером, після чого зерно промелювалося фільтрувальним папером, видалялася волога, що утримується, і зважувалося.

Маса розпиленої вологи встановлювалася рівною масою води, що утримується поверхнею зерна, при короткочасному контакті з водою, по не поглиненій зерном, яка волога у вигляді крапель або плівки покриває поверхню зерна, але не поглинається ним при контакті до 1 хв. В результаті численних експериментів значення утримуваної вологи для зерна сорго встановили 1 г. Розпорошення вологи над поверхнею зерна проводилося з метою забезпечення максимального контакту зерна з водою.

У процесі обробки вироблялося визначення маси наступних наважок зерна шляхом зважування на автоматичних електронних технічних вагах ВКЛТ-500.

$m_1$  – маса вихідної наважки зерна, г;

$m_2$  – маса зерна з поглиненою його поверхнею водою до напилення 1 г води, г;

$m_3$  – маса зерна з розпорошеною на його поверхні 1 г води до вистоювання, г;

$m_4$  – маса зерна з поглиненою його поверхнею водою після вистоювання, г.

Маса зерна з поглиненою його поверхнею водою визначалася після видалення вологи, що утримується, фільтрувальним папером.

На підставі цих вимірювань та алгебраїчних обчислень було визначено такі значення:

$m_p$  – маса розпорошеної на поверхні зерна води, г;

$m_{по}$  – маса поглиненої поверхнею зерна води у процесі зволоження до напилення 1 г води, г;

$m_{п}$  – маса води, поглиненої зерном після напилення та вистоювання, г.

Час, протягом якого проводилося видалення поверхневої вологи фільтрувальним папером та час напилення води на поверхню зерна склали відповідно 2 та 1 хв. Протягом цих проміжків часу поглинання поверхнею зерна води тривало, отже, контрольні значення тимчасових проміжків при визначенні вологопоглинаючої здатності зерна склали 2, 5, 12, 15 і 18 хв.

Кінетика вологопоглинаючої здатності зерна сорго як залежності кількості поглиненої вологи десятьма грамами зерна від часу при першому способі зволоження представлена на рис. 3.4. Звертає на себе увагу суттєва різниця між вологопоглинальною здатністю ядра сорго без квіткової оболонки та з квітковою плівкою. Зерно сорго з квітковою плівкою гібрид Понкі після відволажування протягом 10 хв має вологопоглинальну здатність у 2 рази нижче, ніж ядра сортів Голден та Оганна. Це пов'язано зі структурою і хімічним складом квіткової плівки, що має у своєму складі віск і дубильні речовини, що закупорюють пори і макрокапіляри плівки і заважають проникненню вологи в поверхневі шари зернівки.

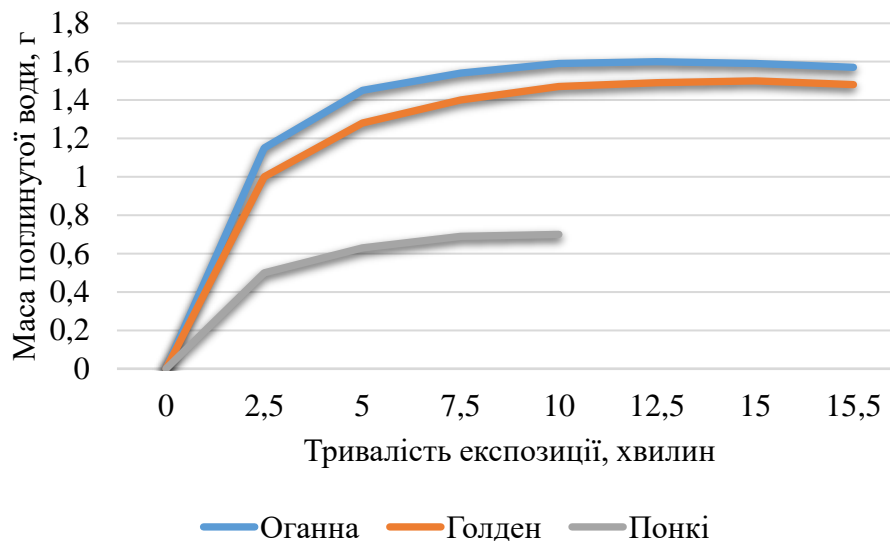


Рисунок 3.4 – Кінетика вологопоглинальної здатності (кількість води, поглиненої

Для виявлення випадкової складової погрішності маси вологи, поглиненої поверхнею зерна при зволоженні, були проведені багаторазові вимірювання маси зерна з поглиненою водою при промиванні нею протягом 10 с. Обробка експериментальних даних проводилася і відповідно до загальноприйнятих статистичних методів.

З метою виявлення впливу тривалості промивання зерна на ступінь поглинання зерном води, наважка зерна 10 т промивалася в ситі протягом 60 с зерно промокувалося фільтрувальним папером, потім проводилося розпилення води та витримування протягом 3, 5, 10,15 с. Після цього надлишки вологи видалялися фільтрувальним папером. Експеримент проводився лише на зерні сорту Голден. Істотних змін порівняно з наведеною методикою зазначено не було.

### 3.3 Методики зволоження та ІЧ-обробки зерна сорго

Зволоження наважки в 10 г зразків зерна сорго трьох наявних типів з метою дослідження кінетики термовологої обробки проводилося кількома способами.

I спосіб: обробка зерна, що має лише поглинену вологу. Цьому способу обробки піддавалися:

1.1 Ядро зерна сорго II типу I підтипу сорт Голден, вихідне

вологоутримання 11,4 %.

1.2 Зерно сорго II типу I підтипу гібрид Понкі з квітковою плівкою, вихідне вологоутримання 14,0 %.

II спосіб: обробка зерна, що має і поглинену і утримувану вологу. Цьому способу обробки піддавалися:

2.1 Ядро зерна I типу сорт Оганна, вихідне вологоутримання 9,6 %.

2.2 Ядро зерна II типу I підтипу гібрид Понкі, вихідне вологоутримання 16,4 %.

2.3 Зерно сорго I типу I підтипу гібрид Понкі з квітковою плівкою, вихідне вологоутримання 14,0 %.

Поверхнева волога наноситься промиванням зерна в ситі протягом 10 с з подальшим промочуванням фільтрувальної паперу.

Волога, що утримується, наносилася у випадку 2.1 напиленням 1 г води на поверхню зерна після промивання і промокання фільтрувальним папером; у разі 2.2 шляхом промивання в ситі та видалення зайвої вологи струшуванням, при цьому залишалася втримувана волога; у разі 2.3 вироблялося зволоження зерна 1 грамом води розпиленням і наступним перемішуванням.

Час від зволоження до приміщення в установку становив 2 хв для випадків 1.1, 1.2, 2.2 та 2.3, У разі 2.1, коли на зерно, що має лише поверхневу вологу, розпилявся 1 г води, час зволоження від промивання до приміщення та експериментальну установку становив 5 хв.

Зволожене зерно розташовувалося рівномірним шаром, одне зерно на металевій чашці діаметром 8, чашка встановлювалася на предметному столику експериментальної установки. Зволожене зерно піддавалося ІЧ-обробці, щільність потоку випромінювання була постійна по всій поверхні предметного столика. Час обробки становило 5, 10, 15, 20, 25, 35, 45, 55, 65 с.

Щільність потоку випромінювання випадків 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 2.3 становила 26,5 кВт/м<sup>2</sup>.

В процесі експерименту для випадків 1.1, 2.1, 2.2 та 2.3 визначалися маси наступних наважок зерна шляхом зважування на технічних електронних вагах

ВКЛТ-500 з точністю 0,01 г:

$m_1$  – маса вихідної наважки зерна, г;

$m_2$  – маса зерна з поглиненою його поверхнею водою до опромінення, г;

$m_3$  – маса зерна з розпорошеною на його поверхні водою до опромінення, г;

$m_4$  – маса зерна з поглиненою його поверхнею вологою, г;

На підставі цих вимірів та алгебраїчних обчислень було визначено такі значення;

$m_p$  – маса розпорошеної на поверхні зерна води, г;

$m_{пч}$  – маса води, що залишилася у зерні після ПЧ-обробки протягом часу.

Кількість вологи, поглиненої зерном до приміщення в установку, визначалося для певного часу відволікання.

Для випадку 1.2 і проводили лущення обробленого зерно вручну протягом 1 години з метою відділення квіткової оболонки від ядра з подальшим визначенням вологості ядра і оболонки окремо. Визначення вологості проводилося стандартним методом висушування навішування в електричній сушильній шафі СЕШ-3М при температурі 130 °С протягом 40 хв. Перед висушуванням ядро розмелювалося в зерновому лабораторному млині ЛЗМ протягом 20 с, крупність подрібнення характеризувалося вмістом прохідних частинок через сито № 08. Результати визначення не перевищували встановлених стандартом норми допустимих відхилень. Подрібнення оболонки не проводилося.

Отримані значення вологості ядра та квіткової оболонки переводилися на значення вмісту вологи  $W_{св}$  за таблицею, наведеною [22].

#### 3.4 Аналіз кінетики ПЧ-обробки зволоженого зерна сорго

У роботах, присвячених гідротермообробці методом ПЧ-опромінення та основ теорії тепло і масоперенесення [3, 13, 15]. зазначалося, що волога, що знаходиться на поверхні зернівки (в даному випадку волога була поглинена плодовою оболонкою ядра або квітковою плівкою) під дією ПЧ-опромінення і градієнта, що утворився, температур, спрямованого до центру зернівки,

вбирається в поверхневий шар зерна і транспортується глибше, по мікрокапілярам і мікропорам проходить всередину облучуваного об'єкта, частково випаровуючись із поверхні. Під дією градієнта температури вступає в дію транспортна здатність і виникає градієнт вмісту вологи. Обидва градієнти спрямовані в ту саму сторону від поверхні до центру зернівки. Відбувається процес зволоження і завдяки нанесеній на поверхню зерна шару води зернівки інтенсивно вбирають вологу. Подальше зволоження ведеться за рахунок осмотично пов'язаної вологи колоїдного зерна. Поки відбувається зволоження зерна, одночасно випаровується волога поверхні, яка в силу швидкоплинності процесу не встигає вбиратися в поверхню зернівки. Водночас випаровування вологи та з поверхні зернівки зменшується і процес зволоження закінчується. За відсутності води на поверхні зерна в тонкому шарі зволоження закінчується і починається процес сушіння. Подальша термообробка є процесом сушіння з супутніми їй явищами структурно-механічних, біохімічних та фізико-хімічних змін. Градієнт температури направлений від поверхні до центру зернівки, а вміст вологи йому назустріч, тобто з центру до поверхні.

ІЧ-обробка зволоженого зерна сорго трьох сортів при різній структурі поверхні зернівки мала на меті експериментального підтвердження можливості зволоження зерна в перші секунди обробки, про що можна було б судити за зростанням вмісту вологи.

На рисунку 3.5 представлені криві кінетики ІЧ-сушки зволоженого зерна сорго трьох сортів зернового сорго при щільності потоку випромінювання  $26,5 \text{ кВт/м}^2$  та встановлення зразка у включену установку та при установці зразка одночасно з включенням ІЧ-установки.

Крива кінетики сушіння є залежністю кількості води, що міститься в 10 г зерна сорго від часу ІЧ-обробки. Всі зразки, що обробляються, крім сорту Оганна до ІЧ-обробки мали як поглинену, так і утримувану вологу, нанесену згідно з методикою, викладеною вище. Зразок сорго сорту Оганна мав лише поглинуту вологу. ІЧ-обробка проводилася до моменту випаровування лише нанесеної вологи.

З поданих залежностей видно, що волога, що знаходиться на поверхні зернівки, як поглинена так і утримувана, під впливом ІЧ-опромінення випаровується з поверхні, не проникаючи у зернівку та не призводячи до її зволоження. Процес втрати нанесеної на поверхню зерна вологи йде більш інтенсивно, якщо зразок збожеволіє в заздалегідь включену установку.

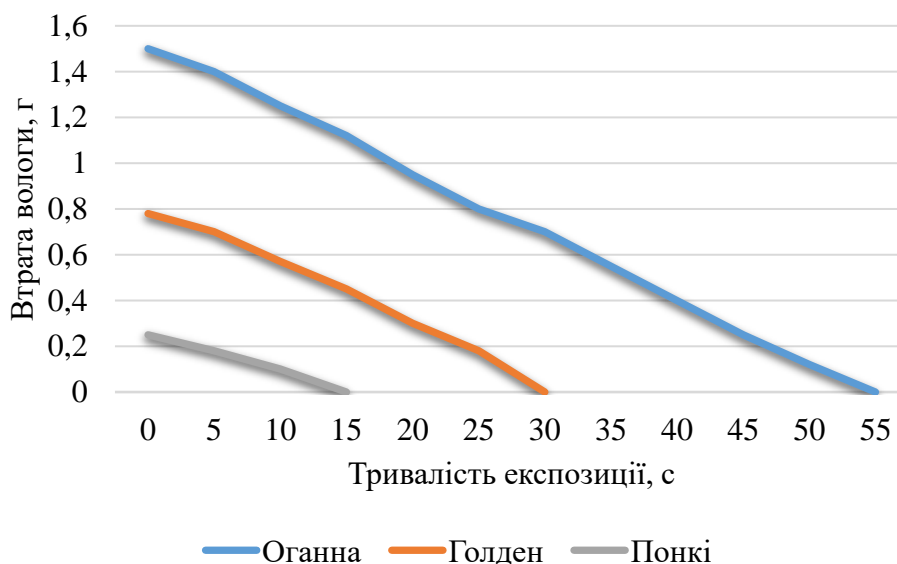


Рисунок 3.6 – Кінетика сушіння (втрата вологи 10 г зерна) зволоженого зерна сорго при щільності потоку випромінювання  $26,5 \text{ кВт/м}^2$

#### Висновки за розділом

Встановлено, що поставлений експеримент не дозволив виявити процес проникнення вологи всередину зерна зволоженої оболонки. Оболонка також не поглинала нанесену на її поверхню вологу, яка і у вигляді плівок знаходилася на її поверхні. Процесу транспортування вологи всередину зерна, можливо, перешкоджала повітряна оболонка між ядром і квітковою плівкою.

## 4 ЯКІСНІ І СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ЗМІНИ ЗЕРНА СОРГО ПРИ ІЧ-ОБРОБЦІ

### 4.1 Органолептичні і біохімічні зміни зерна сорго при ІЧ-обробці

Органолептичні характеристики визначались для зерна сорго сорту Понкі при ІЧ-обробці спільно з квітковою плівкою без зволоження при вихідній вологості 12,3 % при включенні установки після розміщення в ній зразка. Такий режим можна віднести до режиму роботи мікронізатора періодичної дії. Як критерії оцінки якості зерна сорго після ІЧ-обробки були виділені наступні показники:

- колір квіткової плівки, зовнішньої поверхні ядра, зародка та ендосперма, смак, запах;
- наявність зовнішніх і внутрішніх тріщин, спучування, зерен, що вибухнули.

Метою оцінки зерна сорго після ІЧ-обробки за якісними показниками було визначення гранично-допустимого часу обробки, після чого зерно буде визнано непридатним до використання внаслідок його згоряння та критичних біохімічних змін та виявлення структурних змін усередині ядра та на його зовнішній поверхні. За гранично-допустимий час обробки при даному значенні щільності потоку випромінювання приймаємо час, при якому спостерігаються наступні явища: явне потемніння ділянки зовнішньої поверхні ядра; внутрішня частина ядра (ендосперм набуває пального відтінку, зародок при цьому внаслідок високої концентрації в ньому ліпідів стає гумово-коричневим і легко викрашується); зерно набуває запаху пересмаженого зерна; зерна, що вибухнули, мають потемнілі краї; квіткова оболонка стає темно-коричневою.

Під час ІЧ-обробки 50 штук зернівок сорго розташовувалися на рухомому металевому піддоні двома способами: щільно один до одного та вільно, на відстані від 1 до 3 мм. Включення ІЧ-установки проводилося після поміщення в неї зразка, що обробляється. Утворення тріщин і набухання зерен відбувається

вкрай не інтенсивно, а зерен, що вибухнули, не спостерігається зовсім.

Дослідження поздовжніх та поперечних зрізів на мікроскопі МБІ-15 при збільшенні в 20 крат показали, що набухання та утворення зовнішніх та поздовжніх тріщин з боку потоку випромінювання на поверхні ядра супроводжується утворенням значної внутрішньої поздовжньої тріщини з яскраво вираженими порожнинами та порожнечами навколо неї. Таким чином, обробка зерна сорго дозволила суттєво змінити його органолептичні та текстурні властивості. Найбільш ефективними є режими щільності потоку випромінювання 26,5 кВт/м<sup>2</sup>. Це дозволяло отримати яскраво виражений ефект набухання і розтріскування всього об'єму зерна, що обробляється. У збільшення щільності потоку випромінювання до 30,8 кВт/м<sup>2</sup> призводить до швидкого підгорання поверхні ядра при тій же самій мірі змін (можливо, при цьому режимі виявляється більше зерен, що вибухнули, але незначно). При зниженні щільності випромінювання до 16,6 кВт/м<sup>2</sup> структурні зміни проходять вкрай мляво та слабо виражені, а у 40 % оброблених зерен вони не спостерігалися зовсім. Наявність квіткової оболонки у чорного сорго цього типу дозволяє збільшити час обробки до появи ознак підгорання, що призводить до більш значних структурних змін, а отже, до сильніших змін у біохімічних та структурно-механічних властивостях.

Якісний аналіз органолептичних змін проводився також при обробці голозерного сорго сорт Оганна при початковому вологовмісті 5,3, 16,6 і 33,3 % при трьох значеннях щільності потоку випромінювання 18,8, 26,5 і 37,2 кВт/м<sup>2</sup>. Включення установки проводилося після поміщення в неї зразка з 50 зернівок (гранично допустимий час обробки  $\tau_1$ ) і при встановленні зразка в попередньо включену установку (гранично допустимий час обробки  $\tau_2$ ), що відповідало роботі мікронізатора в періодичному та безперервному режимі.

Оцінка органолептичних показників зерна сміття сорт Оганна при включенні установки після приміщенні в неї зразка показала, що внутрішніх тріщин на зерні не утворюється, а зовнішні слабо виражені і носять характер поверхневого розтріскування (відлущування) плодової оболонки. При підвищенні вмісту вологи процес вибуху йде більш активно. Найбільш продуктивним з точки

зору отримання зерна, що розтріскалося і вибухнуло, має режим при щільності потоку випромінюванні  $26,5 \text{ кВт/м}^2$ . При більш жорсткому режимі відбувається псування продукту внаслідок стрімкого підгорання, а при м'яких режимах деформація зерна вкрай незначна.

Однак, процес обробки зразка зерна при поміщенні його у включену установку, що близько по режиму до мікронізатора безперервної дії, істотно відрізняється від процесу, при якому включення установки проводиться після приміщення в неї зразка. По-перше, значно скорочується гранично допустимий час обробки і становить від 25 до 60 с. причому при жорсткому режимі обробки ( $E = 37,2 \text{ кВт/м}^2$ ) перші ознаки горіння зерен, що вибухнули, наступають ще до вибуху більшості зерна, що є неприйнятним. Зі зростанням вологості кількість зерен, що вибухнули, збільшується, і максимальний обсяг зерен, що вибухнули, становить 50 %. При вмісті води 5,3 % зерна не вибухають зовсім не при яких значеннях щільності потоку випромінювання. При м'якому режимі обробки ( $E = 18,8 \text{ кВт/м}^2$ ) відбувається вибух 50 % оброблюваних зерен сорго, причому основний процес вибуху закінчується до настання перших ознак обгорання. Даний режим є найбільш вигідним з точки зору отримання якісного матеріалу, що вибухнув, однак, час обробки в порівнянні з жорстким режимом збільшується вдвічі.

При обробці зерна в умовах, близьких до безперервного процесу обробки, деформація зерна у вигляді вибуху відбувається більш інтенсивно, становить 50 % від обсягу всього оброблюваного зерна і при менших витратах часу.

Для оцінки змін якісних властивостей зерна було проведено визначення вологопоглинальної здатності (ВПЗ) зерна сорго сорт Оганна при обробці при щільності потоку випромінювання  $18,8 \text{ кВт/м}^2$  при початкових значеннях води 16,6 і 33,3 % зразок поміщався у включену установку.

Наважки зерна масою 3 г необробленого, обробленого 20, 30 і 40 с поміщалися в бюкси з водою, причому остання наважка складалася повністю з зерен, що вибухнули. Через проміжки часу, що дорівнює 0,25, 0,5, 1 та 2 години проводилося видалення зайвої води фільтрувальним папером та зважування

зерна з метою визначення кількості поглиненої води. На рис. 4.1 представлені кінетики ВПЗ зерна сорго у вигляді залежності вологоутримання від часу поглинання води для зазначених вище зразків зерна сорго.

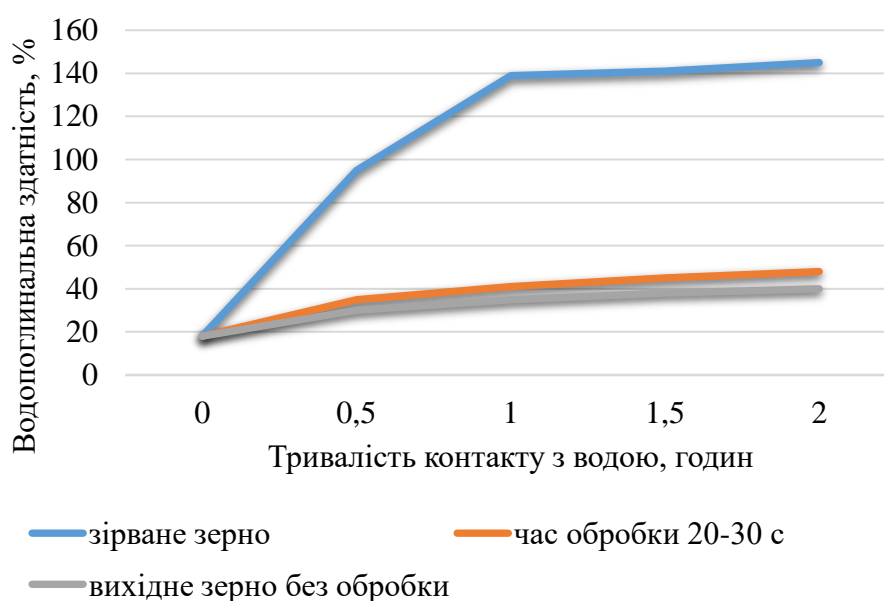


Рисунок 4.1 – Залежність вологопоглинальної здатності зерна сорго сорту Оганна при початковому вмісті 16,6 % від часу контакту з водою для зерна, обробленого при щільності потоку випромінювання 18,8 кВт/м<sup>2</sup> протягом 20, 30 с і для зерна, яке лопнуло

З наведених залежностей видно, що ВПЗ необроблених та розірваних зерен практично не відрізняється, що пояснюється відсутністю внутрішніх тріщин та пористої структури зерна сорго при розтріскуванні. Однак для ВПЗ, що вибухнуло, зростає приблизно в 2,5 рази, що пов'язано з істотними структурними та текстурними змінами зерна. При збільшенні вологовмісту до 33,3% характер і абсолютні значення ВПЗ зерна сорго не змінилися.

Для визначення впливу ІЧ-обробки на біохімічні властивості зерна сорго було проведено визначення вмісту водорозчинного білка та редукуючих цукрів у вихідних зразках з вмістом води 16,6 та 33,3 % при обробці при густині потоку

випромінювання  $18,8 \text{ кВт/м}^2$ , при 10, 20, 30 та 40 с. Вміст водорозчинного білка проводилося за методом Лоурі в трьох повторюваності, а вміст цукрів, що редукують, за методом Бертрана. Вміст водорозчинного білка у вихідному зразку становив  $0,77 \%$ . На рис. 4.2 представлені залежності концентрації водорозчинного білка від часу обробки.

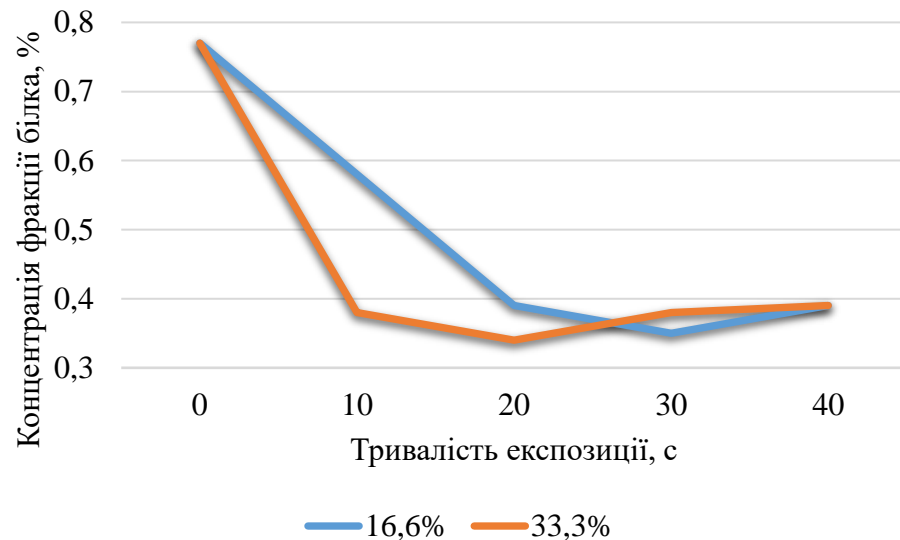


Рисунок 4.2 – Залежність концентрації водорозчинної фракції білка від часу ІЧ-обробки зерна сорго сорту Оганна при щільності потоку випромінювання  $18,8 \text{ кВт/м}^2$  та різним вологовмістом

З залежності видно, що вміст водорозчинної фракції білка знижується вдвічі вже на початку термообробки, що свідчить про інтенсивні біохімічні процеси, пов'язані з денатурацією білка, що призводять до підвищення поживної цінності продукту.

Вибір режимів і способів ІЧ-обробки дозволяє отримати зерно з необхідними технологічними, органолептичними та біохімічними властивостями і з меншими енергетичними витратами проводити такі технологічні операції, як лущення, дроблення, а також поліпшити поживну цінність зернового сорго.

#### 4.2 Структурно-механічні зміни зерна сорго

Визначення структурно-механічних характеристик проводиться на тестовій

установці шляхом здавлювання одиничного зерна при динамічному навантаженні.

Для оцінки структурно-механічних характеристик зерна за різної вологи використовувалися залежності висоти ядра зерна сорго сорт Оганна при трьох значеннях густини потоку випромінювання, рис. 4.2, 4.3 та 4.4.

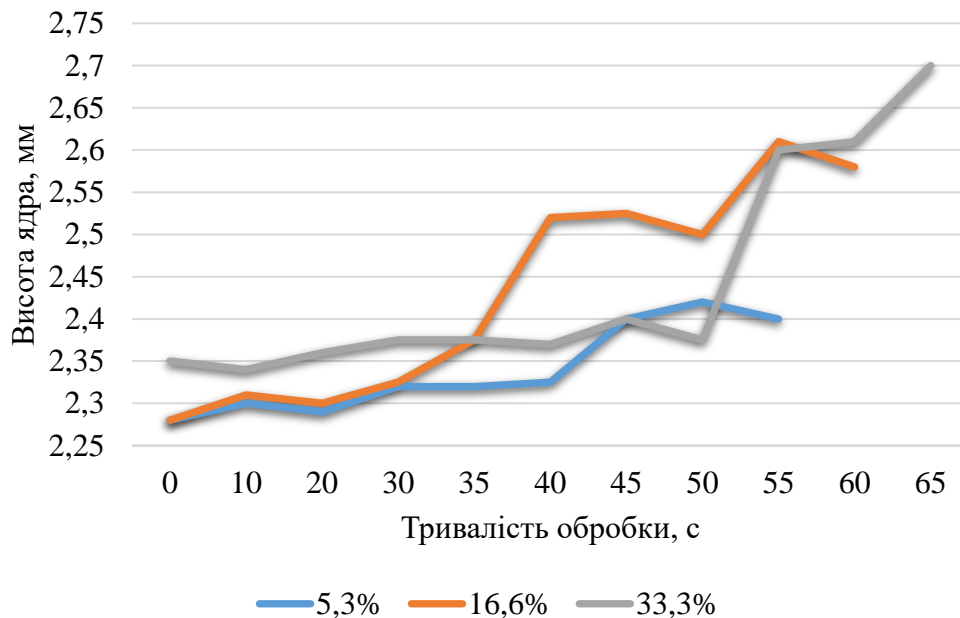


Рисунок 4.2 – Залежність висоти ядра зерна сорго сорт Оганна від часу обробки при щільності потоку випромінювання 37,2 кВт/м<sup>2</sup> при різних значеннях вмісту ВОЛОГИ

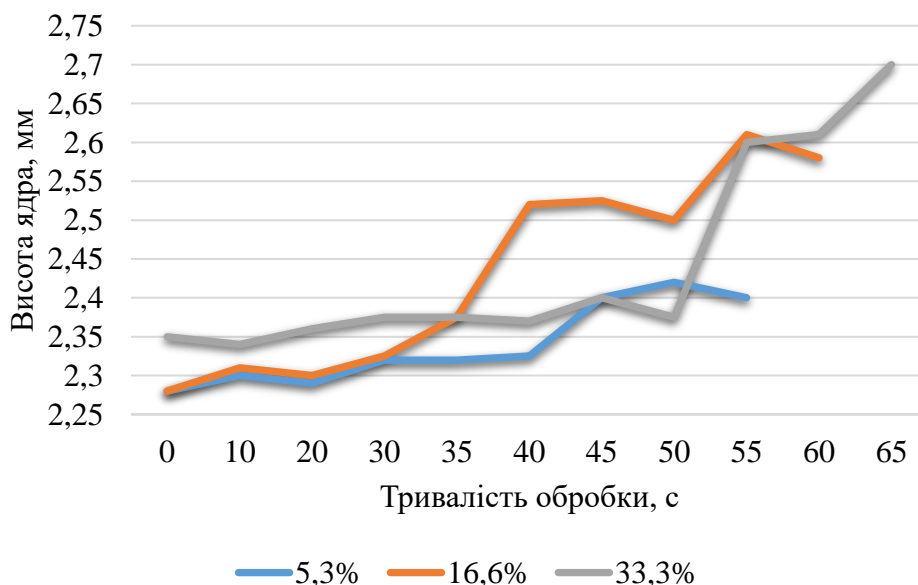


Рисунок 4.3 – Залежність висоти ядра зерна сорго сорт Оганна від часу обробки при щільності потоку випромінювання 26,5 кВт/м<sup>2</sup> при різних початкових

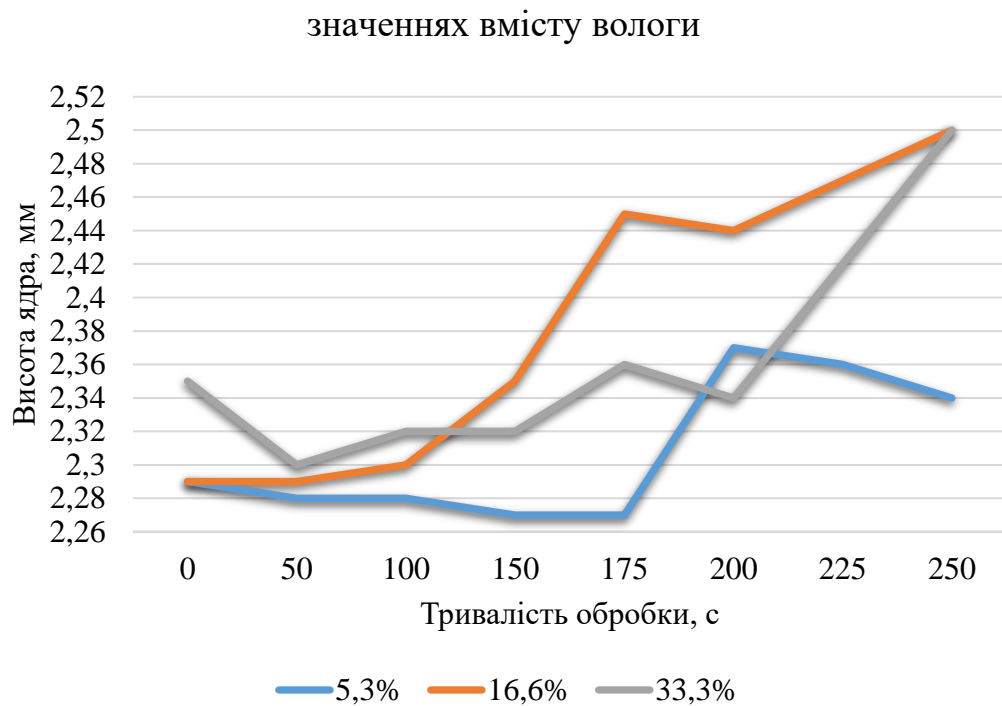


Рисунок 4.4 – Залежність висоти ядра зерна сорго сорт Оганна від часу обробки при щільності потоку випромінювання 18,8 кВт/м при різних початкових значеннях вмісту вологи

#### Висновки за розділом

Встановлено, що вибір режимів і способів ІЧ-обробки дозволяє отримати зерно з необхідними технологічними, органолептичними, біохімічними та структурно-механічними властивостями і з меншими енергетичними витратами проводити такі технологічні операції, як лущення, дроблення, а також поліпшити поживну цінність зернового сорго.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### 5.1 Розробка карти безпеки праці

Карта безпеки праці для операції мікронізації зерна сорго забезпечує здоров'я і безпеку працівників та зменшує ризики травм. Вона містить рекомендації щодо безпечного виконання робіт на кожному етапі виробництва, а також основні вимоги до використання обладнання, санітарних норм та аварійних дій (рис. 5.1).

<p style="text-align: center;"><i>I. Загальні положення</i></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Вимоги картки поширюються на всіх працівників всіх підрозділів;</li><li>2. Термін дії картки: 5 років (до <b>05.06.2028</b>);</li><li>3. Проходження інструктажу працівником: кожні <b>6 місяців</b>;</li><li>4. Відповідальність за невиконання положень цієї картки: дисциплінарна, матеріальна, адміністративна, кримінальна;</li><li>5. До роботи допускаються особи, яким не менше <b>18 років</b> та які мають відповідну кваліфікацію, пройшли медичний огляд та відповідний інструктаж.</li></ol>
<p style="text-align: center;"><i>II. Обов'язки працівника</i></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку;</li><li>2. Користуватися спецодягом та засобами індивідуального захисту;</li><li>3. Працювати тільки на справному обладнанні;</li><li>4. Не допускати сторонніх осіб на робоче місце;</li><li>5. Утримувати робоче місце в чистоті, не захаращувати його.</li></ol>
<p style="text-align: center;"><i>III. Основні ризики</i></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Теплове випромінювання: можливі опіки або перегрів через прямий контакт із гарячими поверхнями чи випромінюванням.</li><li>2. Інфрачервоне випромінювання: тривала дія може пошкодити очі та шкіру.</li><li>3. Електробезпека: небезпека ураження електричним струмом через несправність обладнання.</li><li>4. Механічні ризики: травми від рухомих частин обладнання.</li><li>5. Пожежна небезпека: можливе займання зерна або пилу під час роботи на високих температурах.</li><li>6. Вдихання пилу: пил від зерна сорго може викликати алергічні реакції або проблеми з диханням.</li></ol>
<p style="text-align: center;"><i>IV. Правила безпечної роботи</i></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Перед початком роботи:<ul style="list-style-type: none"><li>- перевірити справність обладнання, ізоляцію електромережі та заземлення;</li><li>- переконатися у відсутності залишків пилу та сміття поблизу нагрівальних елементів.</li></ul></li><li>2. Під час роботи:<ul style="list-style-type: none"><li>- не допускати перевантаження обладнання зерном;</li><li>- уникати прямого контакту з нагрітими поверхнями;</li><li>- слідкувати за показниками датчиків температури та аварійними сигналами.</li></ul></li><li>3. Після закінчення роботи:<ul style="list-style-type: none"><li>- вимкнути обладнання, дочекатися його охолодження перед очищенням;</li><li>- очистити робочу зону від пилу та залишків зерна.</li></ul></li></ol>
<p style="text-align: center;"><i>V. Дії у разі надзвичайних ситуацій</i></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. При опіках або травмах:<ul style="list-style-type: none"><li>- надати першу допомогу, використовуючи аптечку;</li><li>- у разі серйозних травм викликати медичну допомогу.</li></ul></li><li>2. При займаннях:<ul style="list-style-type: none"><li>- вимкнути обладнання з електромережі;</li><li>- використати вогнегасник (вуглекислотний або порошковий) для гасіння пожежі;</li><li>- викликати пожежну службу.</li></ul></li><li>3. При ураженні електричним струмом:<ul style="list-style-type: none"><li>- знеструмити обладнання;</li><li>- надати першу допомогу постраждалому, викликати швидку допомогу.</li></ul></li></ol>
<p style="text-align: center;"><i>VI. Додаткові рекомендації</i></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Регулярно проводити технічний огляд обладнання.</li><li>2. Контролювати рівень пилу в приміщенні та використовувати системи вентиляції.</li><li>3. Зберігати пожежний інвентар у доступному місці.</li><li>4. Встановити попереджувальні знаки про небезпеку теплового та ІЧ-випромінювання.</li></ol>
<p style="text-align: center;"><b>Ця карта повинна бути адаптована до конкретного підприємства з урахуванням використовуваного обладнання та місцевих умов!!!</b></p>

Рисунок 5.1 – Карта безпеки праці під час інфрачервоної (ІЧ) обробки зерна сорго

## 5.2 Шляхи утилізації відходів, які утворюються під час мікронізації зерна сорго

Утилізація відходів, які утворюються під час мікронізації зерна сорго (процесу теплової обробки з метою підвищення його поживних і технологічних властивостей), потребує екологічно безпечних і економічно ефективних методів. Основними шляхами утилізації є:

### 1. Використання у сільському господарстві.

Годівля тварин:

- відходи (наприклад, оболонки зерна або дрібні частки) можуть бути використані як додатковий корм для худоби, якщо вони не містять шкідливих домішок;

- перед використанням слід провести аналіз на вміст токсичних речовин та харчову цінність.

Компостування:

- органічні відходи змішуються з іншими біомасами для виробництва органічних добрив;

- мікронізація може покращити біодоступність поживних речовин, що сприятиме кращій ферментації в компості.

### 2. Енергетичне використання.

Виробництво біогазу:

- відходи можуть бути використані як сировина для біогазових установок;
- анаеробна ферментація відходів дозволяє отримувати метан, який можна використовувати для генерації енергії, а залишкову масу – як добриво.

Спалювання для отримання тепла:

- сухі відходи можуть використовуватися як паливо в котельнях для обігріву або виробництва пари;

- для цього слід організувати спеціалізоване спалювання з мінімізацією викидів.

### 3. Переробка у побічні продукти.

Виробництво кормових добавок:

- відходи можуть бути висушені, подрібнені та використані як компонент комбікормів для тварин або птиці.

Сировина для виготовлення пелет:

- подрібнені залишки можуть пресуватися у пелети для опалення чи промислового використання.

4. Використання у промисловості.

Виробництво біоматеріалів:

- відходи можна використовувати у виробництві біорозкладних упаковок, композитів чи інших матеріалів.

Ферментація для отримання цінних речовин:

- використання відходів як субстрату для виробництва етанолу, органічних кислот або інших біохімічних сполук.

5. Екологічна утилізація.

Захоронення на спеціалізованих полігонах:

- якщо відходи не можуть бути використані жодним із зазначених способів, вони можуть бути безпечно утилізовані на полігонах, обладнаних для прийому органічних залишків.

Виведення у природне середовище:

- у разі повної органічної безпеки (за відсутності токсичних речовин) відходи можна використовувати для покращення ґрунтів як мульчу.

Рекомендації щодо утилізації відходів:

- перед вибором методу утилізації провести аналіз складу відходів, зокрема на вміст небезпечних речовин;

- дотримуватися екологічних стандартів і місцевих вимог до поводження з відходами;

- впроваджувати сучасні технології для переробки відходів з максимальним відновленням цінних компонентів.

Застосування комплексного підходу до утилізації дозволяє знизити витрати на поводження з відходами, зменшити екологічний вплив і отримати додаткову

економічну вигоду.

### Висновки за розділом

Була розроблена карта безпеки для операторів лінії мікронізації зерна сорго під час виробництва харчових продуктів та кормових сумішей та визначені основні шляхи утилізації відходів, які утворюються під час мікронізації зерна сорго.

## 6 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 6.1 Організація проведення дослідження

Проведення досліджень включає у себе складання переліку робіт, визначення їх взаємозв'язків, тривалості та розрахунок бюджету для здійснення експерименту.

У таблиці 6.1 представлено перелік завдань, які включає в себе обґрунтування процесу та технологічних параметрів обробки бобів сої за допомогою ІЧ-випромінювання з метою підвищення їх якісних характеристик.

Таблиця 6.1 – План проведення дослідження

Шифр робіт $i-j$	Найменування робіт	Тривалість робіт $t_{ij}$ , днів
1-2	Вибір та обґрунтування обраного напрямку досліджень	2
2-3	Пошук літературних джерел за обраним напрямком	8
3-4	Визначення послідовності проведення досліджень	2
4-5	Знайомство з методиками проведення досліджень	4
5-6	Підготовка дослідного матеріалу	3
6-7	Підготовка лабораторного та дослідного устаткування	8
7-8	Дослідження кінетика сушки зерна сорго при ІЧ-обробці з вологозмістом 5,3; 16,6 і 33,3 %	5
7-9	Визначення вологопоглинальної здатності зерна сорго	6
7-10	Аналіз кінетики ІЧ-обробки зволоженого зерна сорго	4
7-11	Дослідження органолептичних, біохімічних та структурно-механічних змін зерна сорго при ІЧ-обробці	8
8-12	Обробка отриманих даних	1
9-12		1
10-12		1
11-12		1
12-13	Робота над підготовкою матеріалу для публічного оприлюднення	10
Всього		64

Отже, для виконання всіх завдань та реалізації цілей магістерської роботи знадобиться 64 дні.

## 6.2 Витрати на проведення дослідження

Вартість основних і допоміжних матеріалів визначається шляхом розрахунку витрат за формулою:

$$M = \sum m_1 \cdot C_1, \quad (6.1)$$

де  $m_1$  – кількість витраченого  $i$ -го матеріалу;

$C_1$  – ціна одиниці  $i$ -го матеріалу, грн.

Результати розрахунку витрат на матеріали наведені в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Кількість і вартість основних матеріалів

Найменування, одиниці	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Зерно сорго, кг	50	8,20	410,00
Всього			410,00

Витрати на оплату праці учасників досліджень представлені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Розрахунок витрат на заробітну плату

Посада	Середньомісячний заробіток, грн	Середньочасовий заробіток, грн	Кількість людино-годин	Сума, грн
Дипломний керівник	8000	50,00	20	1000,00
Всього				1000,00

Нарахування на заробітну плату складають:

$$H = \frac{1000,00 \cdot 22}{100} = 220,00 \text{ грн.}$$

Витрати на спожиту електроенергію розраховуються за наступною формулою:

$$E = M \cdot K \cdot T \cdot a, \quad (6.2)$$

де  $M$  – потужність встановленого електрообладнання, кВт;

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

$T$  – час роботи на установці, год;

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

Витрати енергії на роботу мікронізатора:

$$E_{\text{мікр}} = 2,5 \cdot 0,9 \cdot 24 \cdot 4,68 = 252,72 \text{ грн.}$$

Витрати електроенергії, витрачені комп'ютером:

$$E_{\text{комп}} = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 112 \cdot 4,68 = 424,56 \text{ грн.}$$

Загальні витрати електроенергії:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{мікр}} + E_{\text{комп}} = 252,72 + 424,56 = 677,28$$

Витрати на амортизацію обладнання визначаються за формулою:

$$A = \frac{\Phi \cdot H \cdot t}{100 \cdot 12}, \quad (6.3)$$

де  $A$  – амортизаційні відрахування, грн;

$\Phi$  – вартість устаткування, грн;

$H$  – річна норма амортизації, %;

$t$  – тривалість проведення дослідження на устаткуванні, днів;

12 – кількість місяців у році.

Результати обчислень витрат на амортизацію представлені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Витрати на амортизацію

Устаткування	Вартість, грн	Річна норма амортизації, %	Тривалість роботи, днів	Витрати на амортизацію, грн
Мікронізатор	6341,00	24	3	12,50
Персональний комп'ютер	11001,00	20	14	84,39
Всього				96,89

Накладні витрати становлять:

$$\frac{(1000,00 \cdot 80)}{100} = 800,00 \text{ грн.}$$

В таблиці 6.5 наведено кошторис витрат на проведення дослідження.

Таблиця 6.5 – Зведений кошторис витрат

Витрати	Сума, грн.
Основні матеріали	410,00
Заробітна плата	1000,00
Нарахування на заробітну плату	220,00
Електроенергія	677,28
Амортизація	96,89
Накладні витрати	800,00
Всього	3204,17

Згідно аналізу, найбільшу частку витрат становлять заробітна плата та накладні витрати.

### 6.3 Розрахунок вартості дослідження

Ціна досліджень визначається за формулою:

$$Ц = C + \frac{P \cdot C}{100}, \quad (6.4)$$

де  $Ц$  – вартість дослідження, грн;

$C$  – витрати на дослідження, грн;

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

$$Ц = 3204,17 + \frac{30 \cdot 3204,17}{100} = 4165,42 \text{ грн.}$$

Витрати на проведені дослідження становлять 4165,42 грн.

Висновки за розділом

Основні статті витрат під час дослідження включають заробітну плату та накладні витрати, які становлять 1000,00 грн і 800,00 грн відповідно. Загальна вартість дослідження з урахуванням 30 % нормативної рентабельності складає 4165,42 грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведений аналіз перспектив використання зерна сорго на кормові, харчові та технічні цілі, а також необхідних технологічних операцій переробки зерна показав переваги використання ІЧ-випромінювання в якості комплексної технологічної операції, що забезпечує економічно доцільні режими післязбирального сушіння зерна, лушення і зрощення.

Певні терморадіаційні характеристики зерна сорго плівчастого та голозерного дозволили виявити найбільш переважний тип генератора ІЧ-випромінювання та виявити відмінності в оптичних властивостях досліджуваних сортів. Знайдені режими ІЧ-обробки зерна сорго плівчастих сортів дозволили значно інтенсифікувати процес відділення квіткової плівки від ядра та обрушення зерна, а також здійснити післязбиральне сушіння зерна сорго до базисної вологості.

Експериментальні дослідження кінетики нагріву та сушіння зерна сорго дозволили виявити та оцінити особливості кінетики нагріву, пов'язані зі збільшенням внутрішнього тиску, встановити наявність суттєвих градієнтів температури за обсягом зернівки.

Проведений аналіз органолептичних, біохімічних, структурно-механічних та фізичних змін зерна при ІЧ-обробці дозволяє зробити висновок про комплексний характер впливу ІЧ-опромінення на властивості зерна сорго та запропонувати оцінку характеристики обраних режимів.

Розроблена карта безпеки для операторів лінії мікронізації зерна сорго під час виробництва харчових продуктів та кормових сумішей та визначені основні шляхи утилізації відходів, які утворюються під час мікронізації зерна сорго.

Основні статті витрат під час дослідження включають заробітну плату та накладні витрати, які становлять 1000,00 грн і 800,00 грн відповідно. Загальна вартість дослідження з урахуванням 30 % нормативної рентабельності складає 4165,42 грн.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Полєвода Ю.А., Рєвва В.Ю., Попов І.І. Методи термічної обробки зерна. Вібрації в техніці та технологіях. 2022. № 2 (105). с.122- 129.
2. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Степаненко С.П., Швидя В.О., Лісецький В.О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження). Монографія: Ніжин. Видавець ПП Носенко Н.Н. 2017. 552 с.
3. Калініченко Р.А., Солоня О.В., Твердохліб І.В. Дослідження радіаційноконвективної термообробки зерна у віброкиплячому шарі. Вібрації в техніці та технологіях. 2017. № 2 (58). С. 95-98.
4. Солоня В.О., Котов Б.І., Спирін А.В., Калініченко Р.А. Обґрунтування параметрів поєднаних процесів мікронізації і подрібнення із застосуванням вібраційних технологій при переробці зерна на корм. Вібрації в техніці та технологіях. 2016. № 3 (83). С.213-218.
5. Паламарчук І. П., Цуркан О. В., Присяжнюк Д. В., Полєвода Ю. А. Обґрунтування схеми віброозонуючої сушарки для післязбиральної обробки зерна. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2016. № 6. Т. 22. С. 151-156.
6. Ємчик В. В., Полєвода Ю. А., Рєвва В. Ю. Обґрунтування конструктивної схеми установки для обробки зернистого матеріалу інфрачервоним випромінюванням. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2022. № 3 (118). С. 43-52.
7. Полєвода Ю. А. Патент на корисну модель. Інфрачервона вібросушарка. № 136236. Публікація відомостей 12.08.2019. Бюл. № 15.
8. Bandura V., Kalinichenko R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4. № 8 (94), 50-58.

9. Kotov B., Spirin A., Kalinichenko R., Bandura V., Polievoda Y., Tverdokhlib I. Determination the parameters and modes of new heliocollectors constructions work for drying grain and vegetable raw material by active ventilation. Research in Agricultural Engineering. 2019. Vol. 65. № 1. P. 20-24.

10. Kotov B., Spirin A., Tverdokhlib I., Polyevoda Y. Theoretical researches on cooling process regularity of the grain material in the layer. INMATEH – Agricultural Engineering. 2018, Vol. 54. № 1. P. 87-94.

11. Півоваров О.А., Ковальова О.С., Кошулько В.С. Інноваційний інжиніринг в окремих галузях харчового виробництва. Дніпро: ФОП Обдимко О.С., 2022. 407 с.

12. Землеробська механіка. Інноваційні технології харчових виробництв / А.С. Кобець, С.П. Сокол, А.М. Пугач, Ю.О. Чурсінов, О.А. Півоваров, С.Ю. Миколенко, О.С. Ковальова, В.С. Калина, В.С. Кошулько, Д.О. Тимчак, Н.А. Сова, К.А. Худайбердієва. Дніпро: «Свідлер А.Л.». 2022. Том 4. 460 с.

13. Калініченко Р. А., Войтюк В. Д. (2017). Математичне моделювання тепломасообмінних процесів високотемпературної термообробки зернових матеріалів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК, (275), 59-67.

14. Плавинський В. І., Плавинська С. В., Плавинська О. В. (2016). Проблеми мікронізації бобів сої. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, (10 (2)), 126-131.

15. Калініченко Р. А., Войтюк, В. Д. (2017). Mathematical modeling of teplomass-exchange processes of high-temperature thermo-processing of grain materials. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК, (275), 5-5.

16. Полевода Ю. А., Ревва В. Ю., Попов І. І. Методи термічної обробки зерна. Вібрації в техніці та технологіях. 2022. № 2 (105). С. 122-129.

17. Deera C., Hebbar H. U. (2016). Effect of high-temperature short-time 'micronization' of grains on product quality and cooking characteristics. Food engineering reviews, 8, 201-213. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9132-0>.

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

19. Правила охорони праці для працівників, зайнятих на роботах зі зберігання та переробки зерна. Київ: Мін.Соц.Політики. 2017. 74 с.

20. Станкевич Г.М. Сушіння зерна: навч. посіб. / Г. М. Станкевич, Т. В. Страхова, В. І. Атаназевич – Київ: Либідь, 1997. – 352 с.

21. Маковецька Ю. Сучасне керування відходами відповідно до принципів циркулярної економіки. Посібник курсу ZWA deep level, 2021. 140 с. Режим доступу: <https://zerowastekharkiv.org.ua/wp-content/uploads/2021/12/posybnic-lekciye-book-5.pdf>.

22. Відходи та безвідходне виробництво в харчовій промисловості : наук.-допом. бібліогр. покажч. двома мовами 1956 – 2020 рр. / [упоряд. І. М. Мельничук]; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2021. 110 с. Режим доступу:

[http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/34268/1/Waste\\_and\\_waste-free\\_production\\_in\\_the\\_food\\_industry.pdf](http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/34268/1/Waste_and_waste-free_production_in_the_food_industry.pdf).

23. Моделювання процесу ІЧ-обробки насіння соняшнику в стаціонарному шарі при композиційному плануванні експерименту [Електронний ресурс] / А. В. Купченко, К. О. Мельников, Ю. О. Чурсінов // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія : Технічні науки. – 2010. – № 1. – С. 142–147.

24. Кирпа М. Я., Кулик В. О. Енергоощадні прийоми у технологіях сушіння насіння кукурудзи. Бюл. Ін-ту сільськ. госп-ва степової зони НААН. 2016. № 11. С. 82–87.

25. Півоваров О.А., Ковальова О.С., Кошулько В.С. Інноваційні методи визначення показників якості зерна: Навчальний посібник / О.А. Півоваров, О.С. Ковальова, В.С. Кошулько. Дніпро: ДДАЕУ, 2023. 325 с.

26. Кошицька Н.А. Удосконалення елементів технології режимів сушіння насіння // Інститут сільського господарства Полісся НААН. Житомир, 2013. С. 278–281.

27. Матус Ю. В. Інформаційна підтримка технологічного процесу інфрачервоного сушіння зерна / Ю. В. Матус, В. А. Лахно, Т. Ю. Осіпова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2019. – № 7(255). – С. 43-49.

28. Паламарчук І. П., Цуркан О. В., Паламарчук В. І. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми інфрачервоної віброхвильової конвеєрної сушарки для післязбиральної обробки сипкої сільськогосподарської продукції. Зб. наук. пр. ВНАУ. Серія: Технічні науки. Вінниця, 2015. №1 (89) Т.1 С.117–123.

29. . Бандура В., Ярошенко Л. Обґрунтування параметрів процесу сушіння насіння соняшнику у вібросушарці на основі інфрачервоного опромінення. Scientific Works. 2019. Vol. 83 (1). P. 110–116.

30. Chua K.Y. and Shaw S.K. (2003). Low cost drying methods for developing countries. Trends in Food Science and Technology 14: 519—528.

31. Bualuang, O., Onwude, D. I., & Pracha, K. (2017). Microwave drying of germinated corn and its effect on phytochemical properties. Journal of the Science of Food and Agriculture, 97(9), 2999 – 3004.

32. Onwude, D. I., Hashim, N., & Chen, G. (2016a). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. Trends in Food Science & Technology, 57, 132–145.

33. Kovalova O.S., Chursinov Yu.O., Kofan D.D. Research of hydrothermal processing of dry barley malt // Grain Products and Mixed Fodder's. 2018. Vol.18, Issue 4. P.13-18. <https://doi.org/10.15673/gpmf.v18i4.1190>.

34. Бандура В., Ярошенко Л. Обґрунтування параметрів процесу сушіння насіння соняшнику у вібросушарці на основі інфрачервоного опромінення. *Scientific Works*. 2019. Vol. 83 (1). P. 110–116.
35. Pivovarov O., Kovaliova O. Features of grain germination with the use of aqueous solutions of fruit acids. *Food Science and Technology*. 2019. Volume 13 Issue 1. P.83-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/fst.v13i1.1334>
36. Zarkadas, L. N., & Wiseman, J. (2001). Influence of processing variables during micronization of wheat on starch structure and subsequent performance and digestibility in weaned piglets fed wheat-based diets. *Animal feed science and technology*, 93(1-2), 93-107.
37. [http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/34268/1/Waste\\_and\\_waste-free\\_production\\_in\\_the\\_food\\_industry.pdf](http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/34268/1/Waste_and_waste-free_production_in_the_food_industry.pdf).
38. <https://www.syngenta.ua/>
39. <https://ohoronapraci.com.ua/interviews/67355-vymohy-bezpeky-pid-chas-pererobky-ta-zberihannya-zerna>.
40. <https://agronomy.com.ua/statti/515-suchasni-tekhnohii-sushinnia-zerna.html>.
41. <https://agroexpert.ua/sposoby-ta-obladnannia-dlia-sushinnia-zerna/>.
42. <https://agro-business.com.ua/agro/zberihannia/item/19814-tekhnohiiia-komfortnoho-sushinnia-zerna.html>.
43. <https://kmzindustries.ua/elevators/osoblivosti-sushinnya-riznih-kultur>.
44. Яковенко А.І., Борта А.В. Технологія зберігання та сушіння зерна: Кількісно-якісний облік зерна: Навчальний посібник – Одеса: 2016. – 174 с.
45. <https://corelamps.com/yak-obraty-svityllyk-chy-lampochku/infrachervone-vyprominiuvannia/>.
46. <https://bilux.ua/infrared-radiation-directory-ukr/>.
47. <https://ten24.com.ua/ua/blog/sovremennye-tipy-infrakrasnykh-izluchateley/>.
48. Півоваров О.А., Ковальова О.С. Сучасні методи інтенсифікації солодощення: монографія. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2020. - 242 с.

49. Ковальова О.С., Кошулько В.С. Інноваційна технологія дезінфекції технологічного обладнання харчових виробництв. The 5th International scientific and practical conference “Prospects of modern science and education” (February 07 – 10, 2023) Stockholm, Sweden. International Science Group. 2023. P. 609-612. <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.5>

50. Sesikashvili, O., Mardaleishvili, N., Gamkrelidze, E., & Tsagareishvili, S. (2021). The study on the process of dehydrating legumes during high-temperature micronization with infrared rays. *Slovak Journal of Food Sciences*, 15.

51. Shaimerdenova, D. A., Chakanova, Z. M., Iskakova, D. M., Sarbassova, G. T., Bekbolatova, M. B., & Yesmambetov, A. A. (2020). JT Effective method of grain processing using in grain bases for foods: Methods of grain bases' production. *EurAsian Journal of BioSciences*, 14(2).