

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет аграрних технологій та екології

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

на тему: «Дослідження процесу сушіння зернового матеріалу озono-повітряною сумішшю з удосконаленням сушарки»

Виконав: студент 2 курсу, групи АІм-21  
спеціальності 208 Агроінженерія  
за освітньо-професійною програмою  
«Агроінженерія»

Харчук П.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Забродоцька Л.Ю.

(прізвище та ініціали)

Гарант ОП Сацюк В.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Дударєв І.М.

(прізвище та ініціали)

Луцьк 2023

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет	<i>аграрних технологій та екології</i>
Кафедра	<i>аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса</i>
Галузь знань	<i>20 Аграрні науки та продовольство</i>
Освітній ступінь	<i>магістр</i>
Спеціальність	<i>208 Агроінженерія</i>
Освітньо-професійна програма	<i>Агроінженерія</i>

## **ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Завідувач кафедри аграрної інженерії  
ім. проф. Г.А.Хайліса  
доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_ В.В.Сацюк  
«10» січня 2023 р.

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ**

Харчуку Павлу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження процесу сушіння зернового матеріалу озono-повітряною сумішшю з удосконаленням сушарки

керівник роботи Забродоцька Людмила Юріївна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом ЛНТУ від «10» січня 2023 р. № 11/01-02

2. Термін здачі студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Титульний аркуш .
2. Завдання на роботу магістра.
3. Реферат.
4. Зміст.
5. Вступ.
6. Основну частину.
7. Загальні висновки.
8. Перелік джерел посилань.
9. Додатки.

## 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

	к-сть листів
1. Вихідні дані .....	1 лист
2. Схеми машин аналогів	1 лист
3. Теоретичні положення .....	1 лист
4. Апаратура та обладнання для експериментальних досліджень	1 лист
5. Результати експериментальних досліджень	2 листи
6. Схема експериментальної установки чи досліджуваної машини (принципова)	1 лист

## 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Юхимчук С.Ф., доцент		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою, формування завдань досліджень	15.06. – 01.07.2023 р.	
2	Обґрунтування конструкції і теоретичні дослідження	22.08 – 31.08.2023 р.	
3	Розробка схеми експериментальної установки чи досліджуваної машини	01.09 – 30.09.2023 р.	
4	Розробка програми і методики експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2023 р.	
5	Реалізація та обробка результатів експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2023 р.	
6	Експериментальні дослідження з використанням математичного методу планування	15.10 – 01.11.2023 р.	
7	Розробка креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	01.11 – 15.11.2023 р.	
8	Узагальнення результатів та оформлення пояснювальної записки	15.11 – 25.11.2023 р.	
9	Оформлення ілюстративного матеріалу для захисту магістерської роботи	15.11 – 25.11.2023 р.	
10	Нормоконтроль	до 09.12.2023 р.	
11	Представлення кваліфікаційної роботи на перевірку на плагіат	09.12.– 19.12.2023 р.	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Харчук П.В.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Забродоцька Л.Ю.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Гарант ОПШ

\_\_\_\_\_ (підпис)

Сацюк В.В.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

ХАРЧУК П.В. Дослідження процесу сушіння зернового матеріалу озono-повітряною сумішшю з удосконаленням сушарки. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Агроінженерія» спеціальності 208 Агроінженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2023.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і пропозицій, списку використаних джерел, додатків.

Кваліфікаційну роботу присвячено вирішенню актуальної задачі інтенсифікації процесу сушіння зернової сировини та розробці нового віброозонуючого комплексу, що реалізує комплексний технологічний вплив на оброблюване середовище. Експериментально досліджено енергетичні параметри розробленого віброозонуючого комплексу в залежності від режимних параметрів досліджуваного процесу сушіння зернової сировини.

Ключові слова: зернова сировина, сушіння, вібрація, озон, віброозонуючий комплекс, показники якості, вологість зерна, схожість зерна, концентрація озону, віброприскорення, час обробки, енергетичні параметри.

## ABSTRACT

Kharchuk P.V. Study of the process of drying grain material with an ozone-air mixture with the improvement of the dryer. Manuscript.

Master's Degree Qualifying Research Paper in Programme Subject Area 0888 Inter-disciplinary programmes and qualifications involving agriculture, forestry, fisheries and veterinary under Agricultural Engineering Educational Program. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2023.

The master's qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions and proposals, a list of used sources, appendices.

The qualification work is dedicated to solving the actual problem of intensification of the grain drying process raw materials and the development of a new vibro-ozonation complex that implements complex technological impact on the treated environment. The energy parameters of the developed vibro-ozonation complex were experimentally investigated depending on the regime parameters of the investigated process of drying grain raw materials.

Key words: grain raw materials, drying, vibration, ozone, vibro-ozonating complex, indicators quality, grain moisture, grain similarity, ozone concentration, vibration acceleration, processing time, energy parameters.

## ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ. ....	2
АНОТАЦІЯ. ....	3
ВСТУП. ....	7
<b>1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ. ....</b>	<b>10</b>
1.1 Озонування – як ефективний, економічний та безпечний метод зnezараження зерна. ....	10
1.2 Устаткування для znezараження та сушіння зерна. ....	14
1.3 Аналіз вібраційних сушарок. ....	18
Висновки до розділу. ....	21
<b>2 ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ. ....</b>	<b>22</b>
2.1 Теоретичне дослідження процесу віброозонового сушіння сипкого матеріалу. ....	22
2.2 Дослідження енергетичних параметрів сушильної установки. ....	24
Висновки до розділу. ....	26
<b>3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. ....</b>	<b>30</b>
3.1. Лабораторне обладнання, прилади і апаратура для проведення експериментальних досліджень. ....	27
3.2 Методика проведення експериментальних досліджень визначення щільності. ....	29
Висновки до розділу. ....	30
<b>4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. ....</b>	<b>31</b>
Висновки до розділу. ....	36

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	39
ДОДАТКИ .....	41

## ВСТУП

**Актуальність теми.** При тривалому зберіганні зерна в силосі або буртах спостерігається розмноження в зерні різних мікроорганізмів та пліснявих грибків. Внаслідок їх життєдіяльності в зерновій масі накопичуються токсини, які призводять до швидкого псування зерна. При накопиченні токсинів більше 5 мг на 1 кг зерна заборонено його подальше використання.

Для запобігання мікробіологічному зараженню зерна здійснюється його знезараження. Як правило, для цього використовується метод хімічного знезараження за допомогою отрутохімікатів таких як: хлорпікрин, металілхлорид, фостоксин, Вітавакс та ін.

Проведені в останні десятиліття дослідження показали, що метод хімічного знезараження не завжди забезпечує необхідну ефективність дезінфекції зерна. Було виявлено, що деякі типи мікроорганізмів, присутніх в зерна, спостерігається збільшення стійкості до дії отрутохімікатів, що використовуються в процесі його знезараження. Тобто для досягнення необхідної ефективності знезараження необхідно застосовувати підвищені дози протруйників, або використовувати нові більш ефективні та дорогі хімічні препарати, які мають високу токсичність. Крім того, існує межа використання отрутохімікатів, після якого подальше їх використання стає небезпечним. Пошук альтернативних методів знезараження.

До найефективніших методів дезінфекції зерна на сьогоднішній день можна віднести різні електрофізичні методи знезараження, такі як: знезараження зерна прискореними електронами, потужним рентгенівським або гамма випромінюванням, струмами високої та надвисокої частоти, ультрафіолетовим опроміненням та ін, а також озонування. Усі ці методи характеризуються високою ефективністю знезараження, але мають свої особливості. Так за допомогою електрофізичних методів можна організувати безперервне знезараження зерна у потоці.

Електрофізичні методи пов'язані з досить великими капітальними витратами. Тому дуже гостро постало питання пошуку такого методу

зnezараження, який би мав високу ефективність та його впровадження не викликало б великих капітальних витрат. Одним із таких методів є зnezараження зерна озонуванням.

**Наукове та практичне значення одержаних результатів.** Запропоновано конструкцію сушарки сипких рослинних матеріалів.

**Мета роботи** – розробка процесу віброозонуючого сушіння сипких рослинних матеріалів та обґрунтування способу і засобу для підвищення ефективності її використання в АПК.

Для виконання поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести загальний аналіз використання озону в агропромисловому комплексі як засіб дії на технологічний об'єкт;
- розробити класифікацію загального використання технології озонування, виявити їх особливості і визначити основні вимоги до технологічного устаткування для озонування в сільському господарстві;
- розробити і обґрунтувати технологічні вимоги до устаткування для віброозонних технологій;
- розробити метод вібротехнологічного обробітку озоном;
- обґрунтувати принципову схему віброозонуючої сушарки.

Тому актуальним є пошук інтенсивних методів технологічної дії на сипку рослинну сировину зокрема при застосуванні віброозонуючого обладнання.

**Об'єкт дослідження** – процес сушіння сипкого рослинного матеріалу.

**Предмет дослідження** полягає у встановленні закономірностей в технологічному процесі сушіння сипких рослинних матеріалів, теоретичному обґрунтуванні раціональних параметрів віброозонуючої сушарки.

**Методи дослідження.** При виконанні теоретичних досліджень використовували структурний аналіз та синтез, методи теорії сушіння, математичного моделювання та класичної механіки, чисельні методи розв'язання систем диференційних та алгебраїчних рівнянь, методи постановки та обробки результатів досліджень.

Експериментальні дослідження проводились за галузевими та розробленими методиками на стандартному обладнанні і приладах у лабораторних умовах. При проведенні експериментальних досліджень застосовувалися математичні методи планування експерименту та їх обробка з використанням комп'ютерних технологій.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

- запропонована нова конструкція озонівібратиної сушарки сипких матеріалів;
- описано динаміку руху перфорованої газорозподільної решітки, сипучого матеріалу, особливості функціонування гідроприводу для збудження коливань.

**Апробація результатів роботи.** П. Харчук. Особливості віброозонового сушіння зерна: тези ІІІ студентської науково-технічної конференції «Сучасні технології у агровиробництві та природокористуванні». Луцьк: Факультет аграрних технологій та екології, ЛНТУ. – 2023. С. 45–47.

**Структура й обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 18 назв та 2 додатків. Основна частина викладена на 41 сторінці, містить 11 рисунків і 1 таблицю.

# 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ

1.1 Озонування – як ефективний, економічний та безпечний метод знезараження зерна

Озон має високу окислювальну здатність, що забезпечує його високу бактерицидну ефективність. Озонування дозволяє:

- продовжити термін безпечного зберігання зернового матеріалу у 1,25...2 рази;
- на 20...30% скоротити втрати зерна, що зберігається;
- запобігти псуванню та втраті зерна за рахунок знищення пліснявих грибків та паразитів, які розмножуються у зерні при його зберіганні;
- у багато разів уповільнити швидкість проростання зерна, що зберігається;
- покращити якість зерна за рахунок підвищення цукрового та амінокислотного складу;
- відмовитися від застосування токсичних хімічних протруйників, які використовуються для боротьби зі шкідниками та мікроорганізмами;
- зменшити витрати на зберігання зерна.

При застосуванні озонування слід прийняти до уваги, що для здійснення знезараження зерна не потрібно застосування жодних додаткових реагентів - озон утворюється безпосередньо з атмосферного повітря та для його утворення необхідно лише підключити установку до електромережі.

З метою розвитку вихідних даних за озонними технологіями складена класифікаційна схема використання озонування в сільському (рис.1.1): за галузевим призначенням та за видом технологічного процесу.

Для вирішенні поставленої задачі в даній кваліфікаційній роботі було проаналізовано різні типи озонуючих машин, які відрізняються за способом дії, режимом сушіння, способом підводу озono-повітряної суміші та іншим (див. табл. 1.1) та віброозонуючу сушарку [1].



Рисунок 1.1 – Застосування озонування в АПК

Таблиця 1.1 – Класифікація озонуючих машин

№	Ознака	Тип машини
1	Режим роботи	Періодичної дії
		Безперервної дії
2	Режим сушіння	З постійним режимом режимом
		З перемінним
		З циклічним режимом
3	Спосіб теплообміну	Конвективна
		Кондуктивна
		Радіаційна
		Індуктивна
4	Організація процесу сушіння	Сушильний агент – підігріте калорифером атмосферне повітря
		З підігріванням в камері сушіння
		Проміжне підігрівання
		Рециркуляція сушильного агента

5	Напрямок потоку матеріалу та агента сушіння	Прямотечійна
		Протитечійна
		Перехресний потік матеріалу на сушильного агента
6	Конструкційне виконання	Камерна
		Шахтна
		Стрічкова або конвеєрна
		Барабанна
		Шнекова
7	Механізм	Вібраційна
		Механічна
		Ультразвукова
		Електромагнітна

Процес озонування здійснюється шляхом продування озono-повітряною сумішшю силосів чи буртів. Тривалість озонування (експозиція) та концентрація озону залежать від культури, ступеня зараження продукту та його обсягу. У процесі обробки озон одночасно знищує як шкідників зерна (хрущак, мухоїд, довгоносик та ін комахи), так і патогенні мікроорганізми (пеніциліум, фузаріум, фомопсис тощо), а також руйнує продукти їх життєдіяльності (мікотоксини), тоді як у традиційних методах захисту для цих цілей використовуються окремо інсектициди та фунгіциди.

Обробка зараженого патогенною мікрофлорою та пліснявими грибами зерна озonom знижує вміст колоній цвілевих грибків у 2,5...3 рази, у стільки ж разів зменшується вміст вироблених цими грибами токсинів. При цьому гине більше 95% кліщів, жуків та комах-шкідників, які розмножуються у зерні. Повне їхнє вимирання настає через 2...3 тижні після озонування. Озонування зерна є економічно вигідним, ефективним та екологічно чистим, оскільки після обробки зерна озonom не залишається жодних хімічно небезпечних продуктів розпаду.



Рисунок 1.2 – Знезараження зерна озоном продуктивністю 600 гО<sub>3</sub>/год

Обробка зараженого патогенною мікрофлорою та пліснявими грибами зерна озоном знижує вміст колоній цвілевих грибків у 2,5...3 рази, у стільки ж разів зменшується вміст вироблених цими грибами токсинів. При цьому гине більше 95% кліщів, жуків та комах-шкідників, які розмножуються у зерні. Повне їхнє вимирання настає через 2...3 тижні після озонування. Озонування зерна є економічно вигідним, ефективним та екологічно чистим, оскільки після обробки зерна озоном не залишається жодних хімічно небезпечних продуктів розпаду.

Ефективність використання озону для знезараження зерна показано рисунку 1.3.

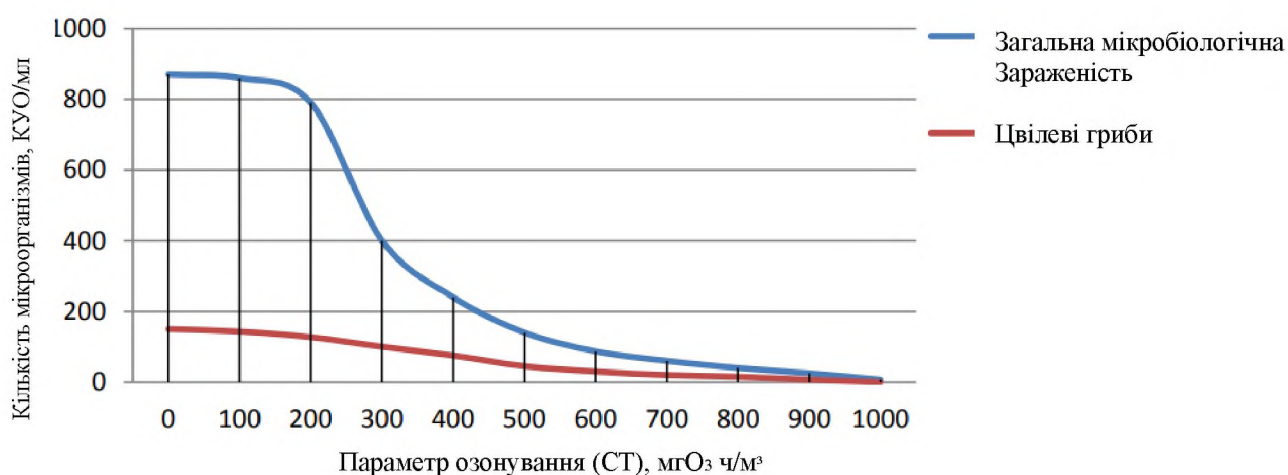


Рисунок 1.3 – Ефективність знезараження зерна озоном

Як видно з цього рисунка, при досягненні параметра озонування значення СТ 650 700  $\text{мгО}_3\cdot\text{год}/\text{м}^3$  кількість мікроорганізмів, що знаходяться в зерні, зменшується приблизно в 9...10 разів, у цвілевих грибів - у 6...7 разів. Стійкий ефект зберігається в протягом кількох тижнів, при цьому знижується сприйнятливість зерна до різних видів інфекцій та захворювань, у тому числі і до сажкових хвороб.

## 1.2 Устаткування для знезараження та сушіння зерна

Взаємодія озону з рослинним матеріалом викликає у ньому зниження енергетичного рівня в'язків вологи, прискорює процес його сушіння та підвищує його ефективність. Так сушіння зерна в озono-повітряному середовищі крім ефективного знезараження забезпечує та покращує якісні показники зерна, запобігає процесам самозігрівання, а також покращує показники схожості.

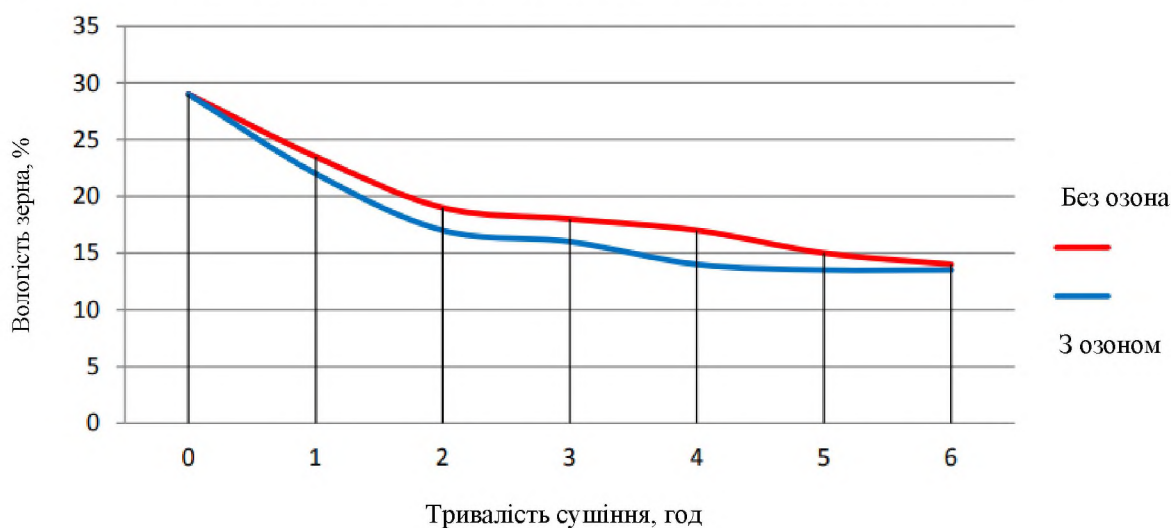


Рисунок 1.4 – Ефективність використання озонування при сушінні зерна

Насправді процес озонування зерна здійснюють спільно з його активним вентиляванням. Це дає можливість не тільки забезпечити високу ефективність знезараження, але й підтримувати оптимальну вологість зерна, що зберігається. Враховуючи, що зерно зберігається або у силосах (рис. 1.5), або в буртах у зерносховищах (рис. 1.6 і 1.7), можливо два варіанти здійснення процесу

озонування. Перший варіант зводиться до нагнітання озono-повітряної суміші в систему розподільних вентиляційних каналів, які вбудовані в конструкцію силосу або встановлені на підлозі зерносховища. Періодичність та тривалість озонування вибирається з урахуванням вологості зерна та його зараженості мікроорганізмами. Як правило, озонування зерна здійснюється протягом кількох діб один раз на два-три тижні. Що дає можливість за допомогою однієї установки здійснити озонування кількох зерносховищ. Технічні характеристики установки знезараження зерна озоном наведено у таблиці 1.2.



Рисунок 1.5 – Знезараження зерна озоном



Рисунок 1.6 – Система вентиляційних каналів у зерносховищі, через яку проводиться знезараження зерна озоном

Таблиця 1.2 – Основні технічні параметри установки обробки зерна озоном  
БОЗОН-Х.К

№	Параметр	Од. вим.	Значення				
			<b>20К</b>	<b>50К</b>	<b>100К</b>	<b>400К</b>	<b>600К</b>
1	Продуктивність по озону	гОЗ/год	20	50	100	400	600
2	Витрата повітря	м <sup>3</sup> /год	315	625	1250	3750	7500
3	Обсяг зерносховища	м <sup>3</sup>	≤ 50	≤ 125	≤ 250	≤ 1000	≤ 1500
4	Потужність	кВт	1,0	1,5	2,5	7,5	10,5
5	Габарити:						
	довжина	мм	1000	1500	1500	2500	3500
	ширина	мм	500	00	650	650	950
	довжина	мм	650	650	650	1425	1650
6	Маса	кг	54	65	85	460	525

Установка виконана в мобільному варіанті (рис. 1.7), що забезпечує можливість використання однієї установки для озонування кількох зерносховищ. Озон виробляється у процесі високовольтного електричного розряду безпосередньо з атмосферного повітря, що дозволяє використовувати установку практично у будь-яких умовах. Для отримання озону необхідно лише підключити установку до трифазної електричної мережі напругою 380 В та частотою 50 Гц. Жодних додаткових хімічних речовин установка не споживає. Враховуючи, що установка складається з кількох окремих модулів шляхом підключення чи відключення окремих модулів досить легко регулювати кількість виробленого установкою озону.



Рисунок 1.7 – Озонаторна установка продуктивністю 100 гО<sub>3</sub>/год

Другий варіант озонування зерна ґрунтується на використанні локальних генераторів озону, що побудовані на основі вентиляційних колон (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Озонування зерна у буртах

Озонування зерна здійснюється шляхом подачі озono-повітряної суміші всередину бурта. При цьому необхідно приймати увагу, що ефективне озонування зерна здійснюється на відстані не більше ніж 1 м від осі вентиляційної колони.

Тому для обробки зерна необхідно одночасно використовувати кілька таких колон, які мають бути розташовані на відстані 1,5...2 м один від одного. Крім того, необхідно брати до уваги, що озон дуже шкідливий організму людини. Хоча озон дуже швидко (протягом 20...30 хв) перетворюється на безпечний кисень, при використанні озонуючих колон необхідно дотримуватись відповідних заходів безпеки. Основні технічні параметри озонуючих колон наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні технічні параметри озонуючої колони БОЗОН-10Г

№	Параметр	Од. вим.	Значення
1	Продуктивність по озону	гОз/год	10
2	Витрата повітря	м <sup>3</sup> /год	100
3	Обсяг зерносховища	м <sup>3</sup>	250
4	Потужність	кВт	0,30
5	Рівень звукового тиску	дБ	61
6	Габарити:		
	довжина	мм	2000
	ширина	мм	450
	довжина	мм	350
7	Маса	кг	25

### 1.3 Аналіз вібраційних сушарок

Найефективнішим напрямом розвитку апаратів для зневоднення є створення агрегатів з вібраційним впливом на оброблювані середовища, що дозволяє інтенсифікувати тепло-і масообмін між частинками матеріалу та газом за рахунок турбулізації прикордонного шару та що забезпечує стійкий гідродинамічний режим [1]. Це пояснюється тим, що вібраційний вплив на оброблювані середовища легко піддається регулюванню шляхом зміни амплітуди та частоти

вібрації та дає можливість оптимізувати режими технологічних процесів. Тому вібраційна техніка знаходить все більш широке застосування в багатьох галузях промисловості для транспортування та дозування матеріалів, поділу сумішей за фракціями, фільтрування, гранулювання та ін.

В даний час широко застосовуються різні конструкції пристроїв для зневоднення сипких рослинних матеріалів [2]. Однак ці пристрої мають ряд суттєвих недоліків: малу площу теплообмінної поверхні, великі втрати тепла з тими, що відходять газами та високу відносну вологість готового продукту.

Загалом дослідниками напрацьовано великий теоретичний та дослідницький досвід з вирішення ряду актуальних проблем віброзневоднення та віброосушки, в основі яких лежать фундаментальні розробки в області вивчення вібров'язкості, тепло та масообміну [3].

В даний час існують різні види сушіння сипких матеріалів, такі як конвективна; контактна; радіаційна; сублімаційна; хімічна; за допомогою струмів високої частоти; сушіння в електромагнітних установках та ін. Кожен з цих способів має свої переваги та недоліки, але необхідно відзначити, що для сушіння насіння найбільш кращий спосіб конвективної сушіння [7]. Конвективне сушіння передбачає висушування матеріалу (насіння) через агент сушіння (теплий повітря) при безпосередньому їхньому дотику. Вона є випаровуванням вологи з поверхні насіння в середу сушильної камери. Теплота, що підводиться агентом сушіння, витрачається не тільки випаровування вологи, але й нагрівання насіння. Сьогодні існує багато різних серійно випускаються сушарок насіння, далі розглянемо деякі з них.

Вібраційні сушарки серії DF компанії PETKUS (DF 090, DF 120, DF 150) виконують сушіння сировини за принципом вібраційного псевдорозрідження. Рівномірна вібрація, створювана вібраційними моторами, і теплий, що виробляється теплогенератором, нагнітається вентилятором повітря подається через два регульованих канали в бічній частині і рівномірно продує сировину знизу вгору. Сировина проходить через зигзагоподібні сушильні рівні. Компактна, зигзагоподібна конструкція сушарок дозволяє заощаджувати робочий

простір, експлуатацію на вибір з безперервним, порційним або напівпорційним завантаженням сировини. Крім цього, на двох робочих рівнях можливе встановлення різних температурних режимів [5].

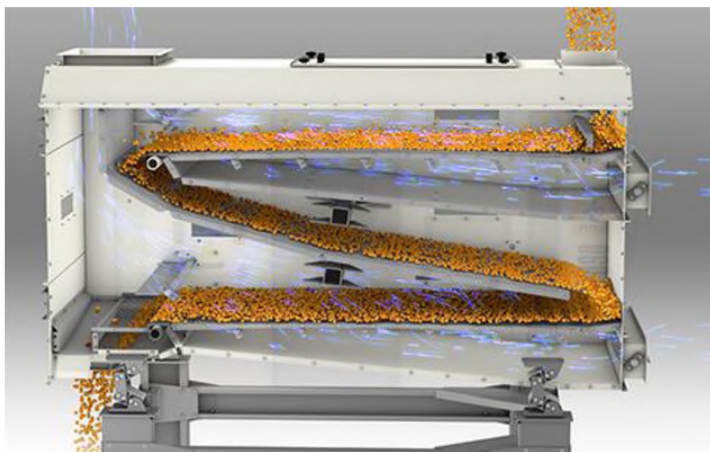


Рисунок 1.9 – Вібраційної сушарки PETKUS

Вібраційні сушарки Scolari (рис. 1.10) можуть працювати як на звичайному паливі, так і на альтернативних джерелах тепла. Для підвищення ефективності процесу сушіння, вібраційні сушарки оснащені системою рекуперації тепла (повторного використання тепла).

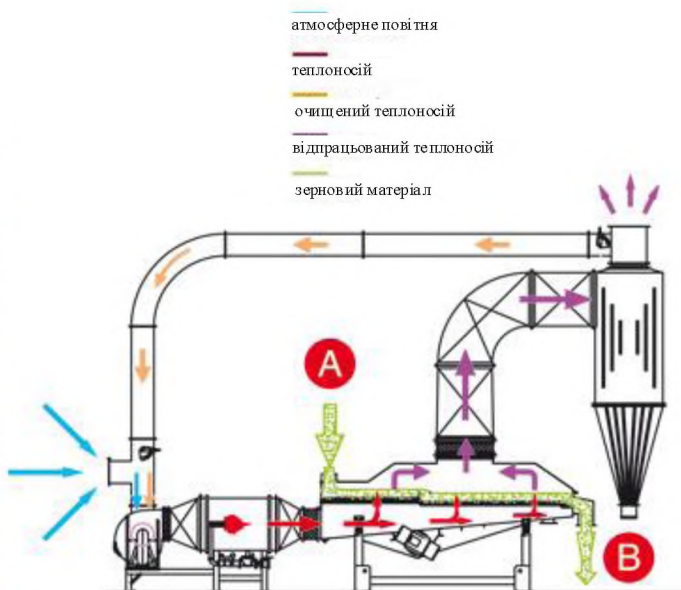


Рисунок 1.10 – Вібраційної сушарки Scolari (серія LFV)

## Висновки до розділу

Процес конвективного сушіння насіння включає ряд складових: приготування агенту сушіння (нагрівання повітря); випаровування вологи (подача агенту в сушильну камеру на насіння), видалення вологи з сушильної камери (відведення сушильного агента з камери).

При цьому необхідно враховувати низку факторів для якісного виконання технологічного процесу сушіння насіння:

- тепловий потік поширюється з місць сушильної камери з високою температурою у місця з низькою температурою;

- швидкість сушіння штучно зволоженого насіння більша в порівнянні зі швидкістю сушіння насіння тієї ж вологості, що сформувалася природним шляхом;

- перевищення гранично допустимої температури агента сушіння може викликати загартування насіння – утворення на його поверхні твердої кірки, що заважає подальшому виділенню вологи з середини насіння;

- швидкість сушіння залежить від швидкості сушильного агента, стану та товщини шару, характеру взаємодії насіння та агента сушіння, ступеня механічного перемішування насіння, температури сушильного агента, вологості насіння, виду насіння (культури), цільового призначення насіння, температури зерна та ін.

Враховуючи вищевикладене, можна дійти невтішного висновку, що у процес сушіння насіння впливають безліч факторів, тому до розрахунку сушарок потрібно підходити ретельно та обґрунтовано.

## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Теоретичне дослідження процесу віброозонового сушіння сипкого матеріалу

Схожість насінневого матеріалу є одним з найважливіших показників продуктивності і якості насіння. За схожості можна прогнозувати врожайність. Тому основною задачею є визначення впливу озоноповітряної суміші на схожість насіння. Припустимо, що внутрішня енергія зернини є функцією від енергетичного балансу:

$$Y = f(E), \quad (1)$$

де  $Y$  – схожість насіння досліджуваного зразка;

$E$  – енергетичний баланс насіння.

Серед основних критеріїв оцінювання процесу сушіння насіння взято кінцеву вологість матеріалу  $W$ , %, та енергетичні витрати на привод віброозонуючої сушарки  $N$ , кВт·год, які характеризуються впливом 4-ьох найвагоміших факторів, що визначають кінетику цієї обробки:

- 1) віброприскорення  $a$ , м/с<sup>2</sup>;
- 2) температура теплоносія, °С;
- 3) концентрацію озону  $N_{O_3}$ , мг/м<sup>3</sup>;
- 4) час сушіння  $t$ , с

$$W = f(a, T_{CA}, N_{O_3}, t), \quad (2)$$

Вплив озону при обробці сипких рослинних матеріалів залежить від характеру розподілу та поглинання озону по всьому об'єму матеріалу, що обробляється.

При пропусканні через шар насінневого матеріалу озоноповітряної суміші частина озону буде поглинатися, у зв'язку з чим вміст озону

зменшиться. Відповідно частина насіння може бути необроблена при заданій концентрації озону. Отже, для достовірного визначення впливу озоноповітряної суміші на обробку насіння потрібно виявити закономірності поглинання озону.

Швидкість поглинання озону насіннєвим матеріалом з озоноповітряної суміші визначається сорбуючою активністю насіння та значенням концентрації озону. Цю залежність можна описати таким рівнянням виду:

$$\frac{dC}{dt} = -K_c \cdot C \cdot S_3, \quad (3)$$

де  $C$  – концентрація озону, мг/м<sup>3</sup>;

$K_c$  – коефіцієнт, який показує швидкість розповсюдження концентрації озону в шарі сипкого матеріалу за глибиною, 1/м<sup>2</sup>·с;

$S_3$  – площа насіннєвої маси, м<sup>2</sup>;

Для визначення константи швидкості поглинання озону через шар матеріалу озоноповітряна суміш пропускалась з визначеними параметрами та через певні проміжки часу вимірювалась концентрація озону на вході та виході шару матеріалу.

При початкових умовах:  $t=0$ ,  $C=C_0$  зміну концентрації озону в озоноповітряній суміші описано рівнянням:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{S_3}{V} [V_{ca}(C_0 - C) - K_c C V], \quad (4)$$

де  $V_{ca}$  – швидкість подачі агенту сушіння, насиченого озоном, м/с;

$V$  – об'єм оброблюваного насіння, м<sup>3</sup>;

$C_0$  – концентрація озону на вході, мг/м<sup>3</sup>;

$C$  – концентрація озону на виході, мг/м<sup>3</sup>.

Розв'язок рівняння (4) має вигляд:

$$C = \frac{C_0 \cdot V_{ca}}{V_{ca} + K_c \cdot S_3 \cdot V} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{V_{ca} + K_c \cdot S_3 \cdot V}{V} \cdot t\right) \right]. \quad (5)$$

Під час продування озоноповітряною сумішшю шару насіння деякої товщини відбувається поглинання озону.

Математичний опис проникнення озону за глибиною шару зерна може бути оснований на прикладі руху озоноповітряного потоку в вигляді плоского фронту. Рівняння розповсюдження озону матиме вигляд:

$$\frac{dC}{dX} = \frac{K_c \cdot S(a) \cdot C}{V_{ca}}, \quad (6)$$

де  $C$  – концентрація озону, мг/м<sup>3</sup>;

$K_c$  – коефіцієнт, який показує швидкість розповсюдження концентрації озону в шарі зерна по глибині, 1/м<sup>2</sup>·с.

Коефіцієнт  $S(a)$  площі взаємодії поверхні зернини з озоном можна збільшити в результаті розрихлення шару матеріалу за рахунок використання вібраційного впливу. Стан розрихлення шару зернової сировини в свою чергу залежать від інтенсивності коливання камери сушіння, а саме від її віброприскорення  $a$ .

Коефіцієнт  $S(a)$  площі взаємодії поверхні зернини з озоном:

$$S(a) = n \exp\left(-\frac{m}{a}\right), \quad (7)$$

де  $n$ ,  $m$  – емпіричні коефіцієнти, які залежать від параметрів процесу.

Наведені залежності дають змогу визначити інтенсивність розподілу концентрації озону за глибиною шару під дією вібрації в залежності від віброприскорення камери сушіння та швидкості руху агенту сушіння.

## 2.2 Дослідження енергетичних параметрів сушильної установки для його реалізації

До енергетичних параметрів віброозонуючої сушарки можна віднести:

- 1) електричну потужність, яка витрачається на нагрів сушильного агенту з допомогою електричних калориферів  $N_1$ ;
- 2) потужність електродвигуна приводу дебалансного валу  $N_2$ ;
- 3) потужність електродвигуна для приводу вентилятора  $N_3$ ;
- 4) потужність, яка витрачається електропристроєм синтезу озону  $N_4$ .

Електрична потужність, яка витрачається на нагрів сушильного агенту  $N_1$  (кВт) визначаємо за формулою:

$$N_1 = k \cdot \left( \frac{Q}{t_p} + P_{em} \right) \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

де  $k$  – коефіцієнт оцінки запасу потужності (приймаємо  $k = 1.2 \dots 1.3$ );

$Q$  – сумарна кількість тепла, необхідна для забезпечення сушіння, Дж;

$t_p$  – тривалість сушіння, с;

$P_{вт}$  – сумарна потужність втрат тепла, Вт.

Потужність для приводу дебалансного валу  $N_2$  (кВт) визначаємо за формулою:

$$N_2 = \frac{M \cdot n}{9550}, \quad (9)$$

де  $M$  – крутний момент, Н·м;

$n$  – частота обертання валу електродвигуна, об/хв.

Потужність для приводу вентилятора  $N_3$  (кВт) визначаємо за формулою:

$$N_3 = \frac{9.81 \cdot L_v \cdot H}{3600 \cdot \eta_v \cdot \eta_{п}}, \quad (10)$$

де  $L_v$  – продуктивність вентилятора, м<sup>3</sup>/год;

$H$  – повний тиск, Па;

$\eta_v$  – ККД вентилятора (приймаємо  $\eta_v = 0.4 \dots 0.6$ );

$\eta_{п}$  – ККД передачі (приймаємо  $\eta_{п} = 0.85 \dots 0.99$ ).

Потужність, яка витрачається електропристроєм синтезу озону  $N_4$  (кВт) визначається за формулою:

$$N_4 = 4fC_d e_0 \left( e_{\max} - \frac{C_a}{C} e_0 \right) \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

де  $f$  – частота струму, Гц;

$C_d$  – ємність діелектрика, Ф;

$C_a$  – ємність розрядного зазору, Ф;

$C$  – середня ємність установки, Ф;

$e_0$  – потенціал розряду через зазор, Ф;

$e_{\max}$  – максимальна напруга струму, що проходить через електроди, В.

Основним критерієм енергетичних характеристик віброозонуючої сушарки є енерговитрати на привод віброозонуючої сушарки  $N$ , кВт·год, які характеризуються впливом 4-ьох факторів, що визначають кінетику цієї обробки: віброприскорення  $a$ , м/с<sup>2</sup>; температура агента сушіння  $t_{ca}$ , °С; концентрація озону  $N_{O_3}$ , мг/м<sup>3</sup>, час сушіння  $t$ , с.

$$N = f(a, t_{ca}, N_{O_3}, t). \quad (12)$$

## Висновки до розділу

У даному розділі кваліфікаційної роботи магістра:

1) розроблена математична модель розподілу концентрації озону за глибиною шару насінневого матеріалу під дією вібраційного впливу;

2) отримано теоретичні залежності, які дають змогу визначати продуктивність озонатора та інтенсивність розподілу концентрації озону за глибиною шару під дією вібрацій в залежності від віброприскорення камери сушіння та швидкості руху агента сушіння.

### 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

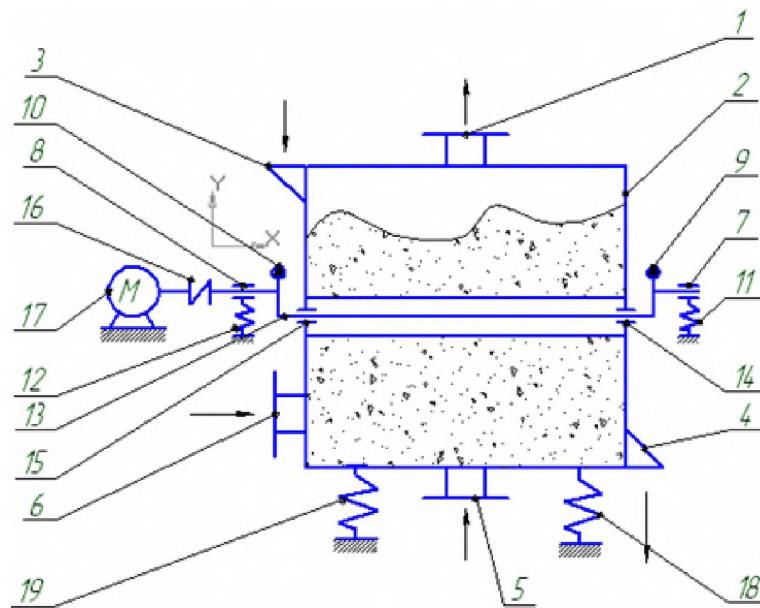
Лабораторне обладнання, прилади і апаратура для проведення експериментальних досліджень

Запропоновано дослідну модель віброозонуючої сушарки зображена на рис. 3.1. Дана установка складається з електродвигуна, муфти, механічного віброзбуджувача, перфорованого барабану, патрубків для підведення та відведення матеріалу та агенту сушіння. Регулювання частоти обертання валу двигуна постійного струму дозволяє змінювати інтенсивність коливань платформи і розміщеного на ньому перфорованого барабану.

Віброозонуюча сушарки працює в наступним чином. Агент сушіння із теплогенератора надходить в перфорований барабан 2 через патрубок 5,6 (рис. 3.1, б). Декілька час відбувається прогрівання барабану, після чого завантажується вологий матеріал через патрубок 3 і вмикається в мережу електродвигун 17. Розпочинається процес озono-сушіння, під час якого відпрацьований агент сушіння виводиться через патрубок 1. Вологість сипкого насіння при сушінні контролюється вологоміром при короткочасних зупинок сушарки. Після закінчення озонування та сушіння матеріал, доведений до кондиційної вологості, вивантажується через патрубок 4.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Віброозонуюча сушарка: загальний вид (а) та схема установки (б):

1, 5, 6 – патрубки відведення і подачі агенту сушіння; 2 – перфорований барабан; 3, 4 – патрубки подачі та вивантаження матеріалу; 11, 12, 18, 19 – пружинні елементи; 7, 8, 14, – підшипники; 9, 10 – зрівноважені маси; 13 – вал; 16 – муфта; 17 – електродвигун

В якості теплоносія використовується суміш підігрітого повітря та озону певної концентрації, який генерується за допомогою коронного розряду у електронному пристрої синтезу озону (рис. 3.2)



а

б

Рисунок 3.2 – Електронний пристрій синтезу озону:

а – загальний вигляд; б – робоча камера синтезу озону

Віброозонуюча сушарка (рис. 3.1, а) встановлену на рамі за допомогою пружин. Збоку сушильної камери розміщений вал з двома дебалансами, який приводиться в рух через еластичну муфту з допомогою трифазного електродвигуна.

1. Автотрансформатор (рис. 3.3) - призначений для роботи зі змінним струмом. Використовували для зміни частоти обертання валу електродвигуна

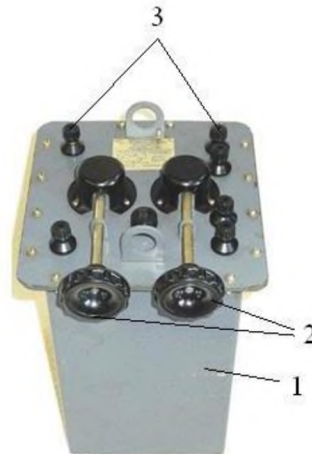


Рисунок 3.3 – Лабораторний автотрансформатор: 1 – зовнішній кожух;  
2 – регулятори напруги; 3 – вхідні та вихідні клеми

2. Електронний ватметр (рис. 3.4) для вимірювання споживаної потужності; електронні лабораторні ваги для визначення маси матеріалу.



Рисунок 3.4 – Електронний ватметр: 1 – корпус; 2 – панель керування;  
3 – дисплей

4. Електронні лабораторні технічні ваги ВТА-60 для визначення ваги насіння на сушіння (рис. 3.5)



Рисунок 3.5 – Електронні лабораторні і ваги: 1 –деко; 2 – панель калібрування;  
3 –дисплей

### Висновки до розділу

У даному розділі описано розроблену модель віброозонуючої сушарки. подано методики проведення, обробки і аналізу результатів експериментальних досліджень.

Було розроблено електронний пристрій синтезу озону, для його генерації та наступної подачі до складу сушильного агенту, підібрано ряд експериментального оснащення для виявлення кількісної картини енерговитрат, чіткого контролю та регулювання параметрів сушіння зернової сировини з використанням віброозонуючої сушарки, а також визначення основних параметрів даного процесу.

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В якості енергетичних параметрів розробленого віброозонуючої сушарки досліджували: електричну потужність, яка витрачається на нагрів агенту сушіння за допомогою електричних елементів  $N_1$ ; потужність, яка витрачається на привод дебалансного валу  $N_2$ ; потужність, яка витрачається електродвигуном приводу нагнітаючого вентилятора  $N_3$  та електронним пристроєм синтезу озону  $N_4$ .

На рис. 4.1 зображено зміну споживаної потужності електричним нагрівальним елементом в залежності від температури агенту сушіння за швидкості руху 1,5 м/с.

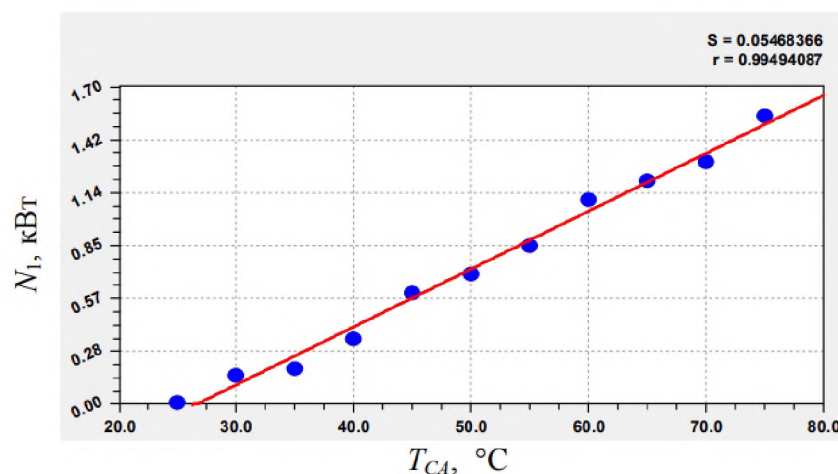


Рисунок 4.1 – Зміна споживаної потужності електричним нагрівальним елементом в залежності від температури теплоносія

Регресійне рівняння, яке отримано на основі аналізу експериментальних даних зміни споживаної потужності електричним нагрівальним елементом в залежності від температури агенту сушіння (рис. 4.1), має вигляд:

$$N_1 = -0.8209 + 0.0309 \cdot T_{CA}. \quad (4.1)$$

З наведеної залежності видно, що із зростанням температури агенту сушіння споживана потужність  $N_1$  нагрівальним електричним елементом збільшується, практично, пропорційно.

Під час аналізу енергетичних характеристик віброозонуючої сушарки було виявлено збільшення споживаної потужності електродвигуном приводу дебалансного валу залежно від загального об'єму завантаження камери сушіння, що за робочої кутової швидкості  $\omega = 90$  рад/с становить:  $N_2 = 480$  Вт за 75 % завантаження (рис. 4.2, а);  $N_2 = 450$  Вт за 50 % завантаження (рис. 4.2, б).

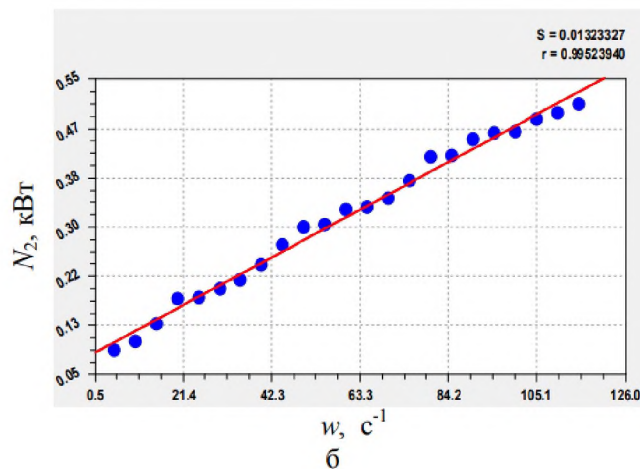
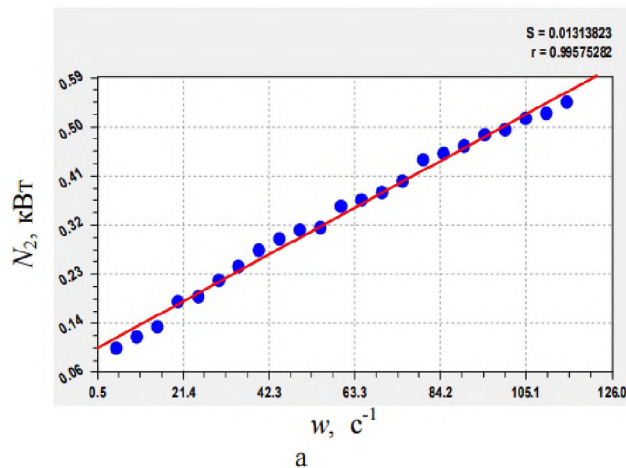


Рисунок 4.2 –Зміна споживаної потужності електродвигуном приводу дебалансного валу в залежності від кутової швидкості та ступеня технологічного завантаження камери сушіння: а – за завантаження 75 % від повного об'єму сушильної камери; б – за завантаження 50 % від повного об'єму камери сушіння

Отримані рівняння на основі регресійного аналізу експериментального дослідження зміни споживаної потужності електродвигуном приводу

дебалансного вала в залежності від кутової швидкості та ступеня завантаження камери сушіння, мають вигляд:

– за завантаження 75 % від повного об'єму камери (рис. 4.3, а)

$$N_2 = 0.0982 + 0.0040 \cdot \omega; \quad (4.2)$$

– за завантаження 50 % від повного об'єму камери (рис. 4.3, б)

$$N_2 = 0.0838 + 0.0038 \cdot \omega. \quad (4.3)$$

При визначенні енергетичних характеристик віброозонуючої сушарки досліджувались зміни спожитої потужності в залежності від частоти обертання електродвигуна приводу вентилятора (рис. 4.3).

Висновок: із збільшенням частоти обертання електродвигуна зростає споживана ним потужність. Крім того, на максимальних обертах електродвигуна  $n = 3000$  об/хв споживана ним потужність становить  $N_3 = 0.116$  кВт за швидкості агенту сушіння 3,0 м/с і завантаженні камери 50 % від повного об'єму та за швидкості агенту сушіння 2,6 м/с і завантаженні камери 75 % від ушильної камери.

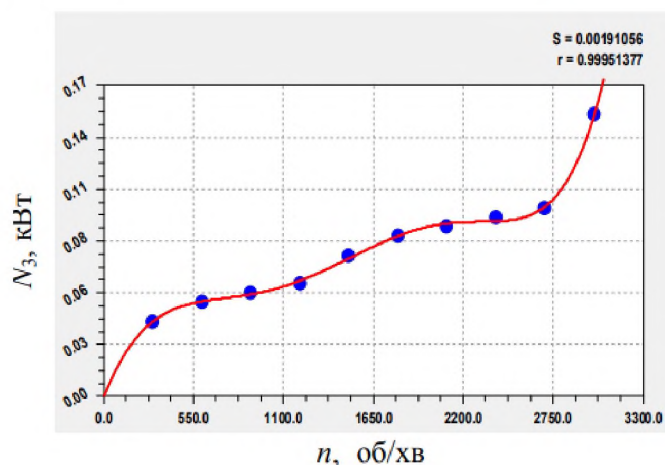


Рисунок 4.3 – Залежність зміни спожитої потужності електродвигуна приводу вентилятора від частоти обертання

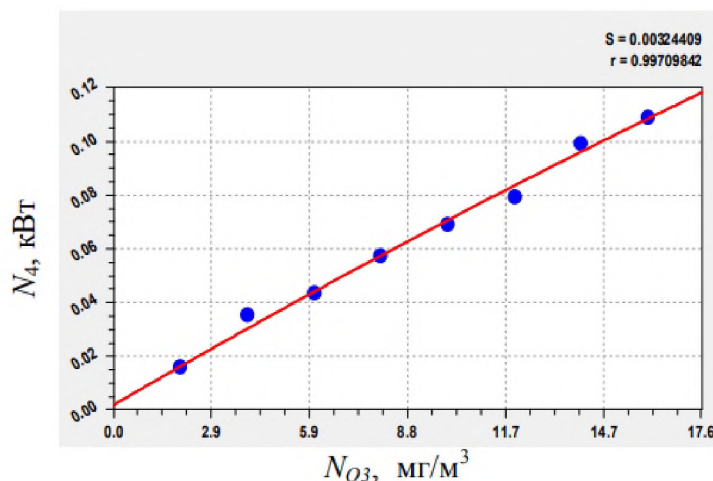


Рисунок 4.4 – Зміна спожитої потужності електронним пристроєм синтезу озону в залежності від концентрації озону

Отримано рівняння на основі регресійного аналізу експериментальних даних зміни спожитої потужності електродвигуна приводу вентилятора від частоти обертання (рис. 4.3):

$$N_3 = 5.1419 \cdot 10^{-5} + 0.0002 \cdot n - 3.4807 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 2.5394 \cdot 10^{-10} \cdot n^3 - 6.5128 \cdot 10^{-14} \cdot n^4 - 2.8901 \cdot 10^{-18} \cdot n^5 + 2.4095 \cdot 10^{-21} \cdot n^6. \quad (4.4)$$

На рис. 4.4 зображено зміну спожитої потужності електронним пристроєм синтезу озону  $N_4$  в залежності від згенерованої ним концентрації озону  $N_{O_3}$ .

Отримано також рівняння на основі регресійного аналізу експериментальних даних зміни спожитої потужності електронним пристроєм синтезу озону в залежності від концентрації озону (рис. 4.4):

$$N_4 = 0.0020 + 0.0072 \cdot N_{O_3} - 3.6255 \cdot N_{O_3}^2. \quad (4.5)$$

На основі визначених енергетичних характеристик розробленого віброозонуючої сушарки отримаємо залежність загальних енерговитрат  $N$  від тривалості обробки  $t$  без озону в складі агенту сушіння (рис. 4.5) та з озоном в складі теплоносія (рис. 4.6).

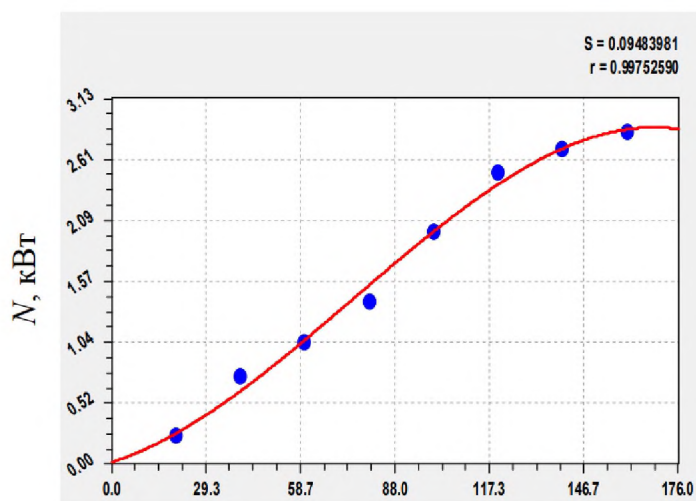


Рисунок 4.5 –Зміна загальних енерговитрат розробленою машиною без озону в складі теплоносія

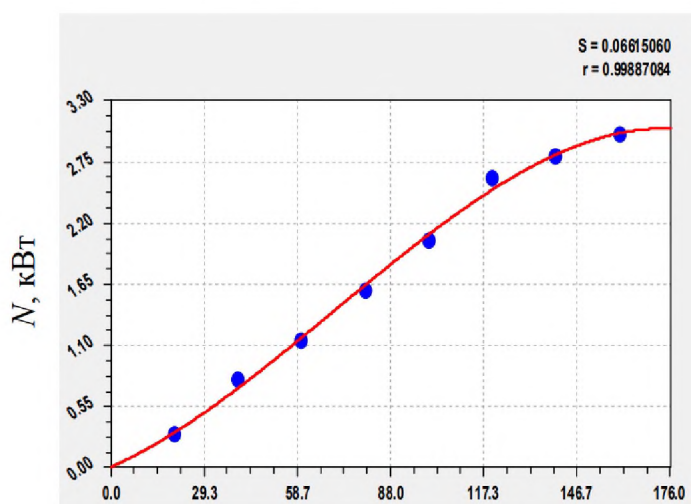


Рисунок 4.6 –Зміна загальних енерговитрат розробленою машиною з озоном в складі теплоносія

Рівняння, які отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних зміни загальних енерговитрат розробленою сушаркою, мають вигляд:

– без озону в складі теплоносія (рис. 4.5)

$$N = 0.0080 + 0.0127 \cdot t + 0.0001 \cdot t^2 - 7.3653 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (4.6)$$

– з озоном в складі теплоносія (рис. 4.6)

$$N = 0.0196 + 0.0086 \cdot t + 0.0002 \cdot t^2 - 8.9962 \cdot 10^{-7} \cdot t^3. \quad (4.7)$$

Аналіз рис. 4.5 та рис. 4.6 свідчить про те, що питомі енерговитрати на одиницю готової продукції з вологістю 14, % при початковій вологості 21 % становлять: за використання класичної технології з подачею теплоносія температурою 51 °С за тривалості обробки 240 хв. – 113 Вт·год/кг; за використанням комплексного теплофізичного впливу за тривалості обробки 160 хв. – 91 Вт·год/кг.

Після обробки експериментальних даних було отримано коефіцієнти комплексних рівнянь множинної регресії 2-го порядку та побудовані такі залежності:

– кінцева вологість насіння від віброприскорення камери, температури агенту сушіння, концентрації озону та часу обробки:

$$W_k = 33.23 + 0.22 \cdot a - 0.134 \cdot T_{CA} - 0.627 \cdot N_{O_3} - 0.074 \cdot t - 0.001 \cdot a^2 - 0.001 \cdot T_{CA}^2 - 0.015 \cdot N_{O_3}^2 - 0.011 \cdot a \cdot N_{O_3} + 0.01 \cdot T_{CA} \cdot N_{O_3} + 0.002 \cdot N_{O_3} \cdot t; \quad (39)$$

– енерговитрати на привод віброозонуючої сушарки від віброприскорення сушильної камери, температури агенту сушіння, концентрації озону та часу сушіння:

$$\bar{N} = 11.828 - 0.005 \cdot a - 0.303 \cdot T_{CA} - 0.335 \cdot N_{O_3} - 0.011 \cdot t + 0.001 \cdot a^2 + 0.003 \cdot T_{CA}^2 + 0.01 \cdot N_{O_3}^2 + 0.001 \cdot N_{O_3} \cdot t. \quad (40)$$

## ВИСНОВКИ

1. Сучасні технології не повністю вичерпують можливості використання вібрації і озону, хоча свідчать про доцільність їх застосування і поєднання не тільки в сільському господарстві, а й у інших галузях з метою інтенсифікації процесів і отримання якісної агропродукції.

2. Розроблено математичну модель розподілу концентрації озону за глибиною шару насіння під дією вібраційного впливу.

3. Запропоновано та розроблено віброозонуючу сушарку для реалізації технологічного процесу сушіння рослинної сировини, в якій продукція, що обробляється, піддається вібраційному впливу з одночасною подачею агенту сушіння, який є сумішшю підігрітого повітря та озону певної концентрації.

4. У ході експериментальних досліджень отримали технологічні параметри досліджуваного процесу сушіння насінневої сировини, які становлять: віброприскорення  $a = 15 \dots 20 \text{ м/с}^2$ , температура теплоносія  $50 \dots 55^\circ\text{C}$ , концентрація озону  $N_{O_3} = 8 \dots 10 \text{ мг/м}^3$ , час обробки  $t = 7700 \dots 9500 \text{ с}$  за швидкості руху теплоносія  $1.5 \text{ м/с}$ .

5. У ході виконання експериментальних досліджень енергетичних параметрів віброозонуючої сушарки:

– встановлено, що із зростанням температури теплоносія споживана потужність  $N_1$  нагрівальними електричними елементами збільшується, пропорційно;

– виявлено збільшення споживаної потужності електродвигуном приводу дебалансного валу залежно від загального об'єму завантаження і камери ссушіння, що заробочої кутової швидкості  $\omega = 90 \text{ рад/с}$  становить:  $N_2 = 480 \text{ Вт}$  за 75 % завантаження та  $N_2 = 450 \text{ Вт}$  за 50 % завантаження;

6. Питомі енерговитрати на одиницю готової продукції з вологістю 14,5 % за початкової вологості 20 % становлять:

– під час використання класичної технології з подачею теплоносія температурою  $50^\circ\text{C}$  за тривалості обробки 240 хв –  $113 \text{ Вт}\cdot\text{год/кг}$ ;

– під час використання комплексного теплофізичного впливу за тривалості обробки 160 хв – 91 Вт·год/кг.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Берник П. С. Оптимізація ресурсозберігаючої технології вібраційного сушіння високовологого насіння / П. С. Берник, О. В. Цуркан, О. О. Герасимов // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – 2006. – Вип. 44. – С. 3 – 10.
2. Гапонюк І. І. Удосконалення технології сушіння зерна : монографія / І. І. Гапонюк. – Одеса : Поліграф, 2009. – 182 с.
3. Цуркан О. В. Аналіз вібраційних технічних засобів для сушіння насіння гарбуза / О. В. Цуркан // Вібрації в техніці та технологіях. – 2021. – № 4 (103). – С. 5 – 14.
4. Цуркан О. В. Обґрунтування раціонального способу та обладнання для сушіння високовологого насіння баштанних культур / О. В. Цуркан // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки». – 2022. – № 1 (103). – С. 240 – 246.
5. Determination the parameters and modes of new heliocollectors constructions work for drying grain and vegetable raw material by active ventilation / В. Kotov, А. Spirin, R. Kalinichenko [et al.] // Research in Agricultural Engineering. – 2019. – № 1 (65). – P. 20 – 24.
6. Цуркан О. В. Інтенсифікація сушіння зерна у процесі його післязбиральної обробки / О. В. Цуркан, В. М. Пришляк, Д. В. Присяжнюк // Техніка енергетика, транспорт АПК. – 2017. – № 2 (97). – С. 99 – 104.
7. Станкевич Г. М. Сушіння зерна : підручник / Г. М. Станкевич, Т. В. Страхова, В. І. Атаназевич. – К. : Либідь, 1997. – 352 с.
8. Енергетичні ресурси і потоки / А. К. Шидловська, Ю. О. Віхорєєв, В. О. Гінайло [та ін.] ; під заг. ред. А. К. Шидловського. – К. : Українські енциклопедичні знання, 2003. – 472 с.
9. Research of the process of vibroozone drying of grain / O. Tsurkan, D. Prysiazhniuk, A. Spirin [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2022. – № 12. – P. 329 – 333.

10. Research of the energy parameters of the vibro-ozonation complex / O. Tsurkan, D. Prysiashniuk, A. Spirin [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2023. – № 6. – P. 39 – 44.
11. Ткаченко С.Й. Сушильні процеси та установки : навчальний посібник / С.Й. Ткаченко, О.Ю. Співак – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 76 с.
12. Бондар О. Сушильне та очисне обладнання для зерна // Агроексперт практичний посібник аграрія – 2009. – №11(16). – С.102–105.
13. Гайвась Б. Сушіння зерна в імпульсному режимі агента сушіння з врахуванням шаруватості структури зернини / Б. Гайвась, В. Дмитрук // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2015. – Вип. 22. – С. 7–22. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Fmmit\\_2015\\_22\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Fmmit_2015_22_3).
14. Берник П.С. Конвеєрні вібраційні машини для оздоблювально-зміцнювальної обробки / П.С. Берник, І.П. Паламарчук. – К., «Вища школа», 1996. – 237с.
15. Ярошенко Л.В. Нові сільськогосподарські вібраційні машини звертикальним привідним валом / Вибрации в технике и технологиях. – 2002. – № 4 (25) –С.97 – 105.
16. П. Харчук. Особливості віброозонового сушіння зерна: тези ІІІ студентської науково-технічної конференції «Сучасні технології у агровиробництві та природокористуванні». Луцьк: Факультет аграрних технологій та екології, ЛНТУ. – 2023. С. 45–47.
17. Русанов С.А. Моделювання гідродинаміки віброкиплячих шарів [Текст] / С.А. Русанов, К.В. Луняка, В.Д. Михайлик // Вісник Тернопільського державного університету. – 2006. – № 3. – С. 188-195.
18. Русанов С.А. Дослідження процесу віброкипіння дисперсних середовищ [Текст] / С.А. Русанов, К.В. Луняка, П.В. Смагін // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – №1. – С.132-141.

# ДОДАТКИ

