

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 62-65

**ПОГОДЖЕНО**  
Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
т.в.о завідувача кафедри  
електротехніки, електромеханіки  
та електротехнологій

проф., д.т.н. /КАПЛУН В.В./  
вчене звання, науковий ступінь підпис

доцент., к.т.н. /ОКУШКО О.В./  
вчене звання, науковий ступінь підпис

” \_\_\_\_\_ ” 2023 р.  
число місяць рік

” \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.  
число місяць рік

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

на тему «Вдосконалення електромагнітної системи електротехнологічного  
пристрою з теплової обробки сипких матеріалів»

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**  
д.т.н., професор Заблюдський М.М.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ІПБ)

**Керівник магістерської роботи**  
к.т.н., доцент Березюк А.О.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ІПБ)

**Виконав** \_\_\_\_\_ Сангуров В.Г.  
(підпис) (ІПБ)

КИЇВ – 2023

НУБІП України

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**т.в.о завідувача кафедри  
електротехніки, електромеханіки та  
електротехнологій**

**к.т.н., доцент Окушко О.В.**  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ШБ)

”\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ  
Сангурову В.Г.**

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітня програма "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"  
Орієнтація освітньої програми – освітньо-наукова

Тема кваліфікаційної магістерської роботи: **«Вдосконалення електромагнітної системи  
електротехнологічного пристрою з теплової обробки сипких матеріалів»**

затверджена наказом ректора НУБіП України від «01» лютого 2021 р. № 175 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру до 15 травня 2023

Вихідні дані до кваліфікаційної магістерської роботи:

- Правила улаштування електроустановок (ПУЕ).
- Правила будови електроустановок (електрообладнання спеціальних установок).
- Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.
- Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- Аналіз існуючих методів та засобів термічної обробки сільськогосподарських матеріалів.
- Обґрунтування конструкції установки для сушіння зерна кукурудзи.
- Електромагнітний та тепловий розрахунок індукційного теплогенератора.
- Моделювання електромагнітних і теплових полів індукційного теплогенератора
- Охорона праці.

Дата видачі завдання “02” лютого 2021 р.

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи \_\_\_\_\_ Березюк А.О.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Сангуров В.Г.

(підпис) (прізвище та ініціали студента)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 67 сторінок, 19 рисунків, 2 таблиці, 15 джерел.

**Об'єктом дослідження** є циліндричний індуктор із завантаженням у вигляді пучка нещільнорозміщених феромагнітних стержнів.

**Предметом дослідження** є конструктивні, енергетичні та режимні параметри індукційного теплогенератора.

**Мета дослідження:** підвищення ефективності температурної та магнітної обробки сільськогосподарських матеріалів.

Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Проаналізувати існуючі методи та засоби термічної та магнітної обробки матеріалів сільськогосподарського призначення.
2. Обґрунтувати доцільність застосування електричних методів нагріву в технології температурної обробки зернового матеріалу.
3. Обґрунтувати конструктивні, енергетичні та режимні параметри індукційного теплогенератора.
4. Провести чисельне моделювання процесу температурної та магнітної обробки матеріалів сільськогосподарського призначення з використанням індукційного нагріву.

Розроблено математичну модель для розрахунку електромагнітних і теплових полів трифазного індукційного теплогенератора, який є складовою технологічної лінії з сушіння насіння кукурудзи. В результаті аналітичних розрахунків було встановлено взаємозв'язки між енергетичними, режимними та конструктивними параметрами індукційного теплогенератора.

Чисельно змодельований процес електромагнітних та теплових полів індукційного нагріву, в результаті якого було отримано розподіли складових електромагнітного і температурних полів вздовж індуктора.

## ЗМІСТ

# ВСТУП

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ СУШІННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ

### 1.1 Методи обробки зернового матеріалу

#### 1.1.1 Використання інфрачервоного випромінювання для сушіння зерна

#### 1.1.2 Сушіння зерна з використанням активної вентиляції

#### 1.1.3 Сушіння зерна з використанням електромагнітного поля НВЧ

#### 1.1.4 Сушіння зерна за допомогою індукційного нагрівання

### 1.2 Типи зерносушарок і технологія сушки зернового матеріалу

#### 1.2.1 Технологія сушіння зерна в шахтних зерносушарках

#### 1.2.2 Технологія сушіння зерна в барабанних зерносушарках

#### 1.2.3 Технологія сушіння зерна в рециркуляційних зерносушарках

## РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ ІНДУКЦІЙНОГО МЕТОДУ НАГРІВУ В ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ

### 2.1 Електромагнітні технології обробки зернового матеріалу

### 2.2 Сутність індукційного методу нагріву зернового матеріалу

## РОЗДІЛ 3. ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ, ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА

### 3.1 Обґрунтування конструкції індукційного теплогенератора

### 3.2 Електромагнітний та тепловий розрахунок індуктора із завантаженням у вигляді пучка феромагнітних стрижнів

## РОЗДІЛ 4. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ІНДУКЦІЙНОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА

### 4.1 Моделювання електромагнітних полів

### 4.2 Моделювання теплових полів

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

# НУБІП України

5.1 Загальні вимоги безпеки при обслуговуванні електротермічного обладнання.

5.2 Перелік запроектованих заходів для усунення виявлених небезпечних, шкідливих виробничих факторів.

# НУБІП України

5.3 Пожежна безпека.

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

ВСТУП

# НУБІП України

У багатьох районах України природно-кліматичні умови зумовлюють прибирання значної частини врожаю зернових, олійних та інших культур з підвищеною вологістю, при якій не може бути забезпечене їх тривале зберігання.

# НУБІП України

Основна ціль в сушінні сільськогосподарських продуктів полягає в зменшенні його вологості до рівня, коли продукти будуть зберігатись і не псуватись.

# НУБІП України

Проте сушіння використовують не лише для зменшення рівня вологи в продукті. Одночасно з цим в зерні проходить ряд фізичних і біохімічних процесів, що впливають на якість зерна. При сушінні роль повітря не обмежується функціями теплоносія і вологопоглинача. Кисень з повітря бере участь в біохімічних процесах в зародку, які посилюються при підвищенні температури. При цьому інтенсифікуються процеси фізіологічного дозрівання зерна, що має велике значення для поліпшення його якості. Вчасно і правильно проведена сушка підвищує стійкість зерна при зберіганні, покращує його насінневі та продовольчі властивості.

# НУБІП України

Сушка прискорює післязбиральне дозрівання зерна, вирівнює зернову масу за ступенем зрілості і вологості, покращує зовнішній вигляд зерна. Сушка робить позитивний вплив на якість продуктів переробки зерна. Сушка впливає на шкідників і патогенну мікрофлору зерна, дозволяє в деяких випадках поліпшити технологічні властивості дефектного зерна (пошкодженого). Таким чином, сушка дозволяє привести зерно в стійкий стан для зберігання і поліпшити його якість.

# НУБІП України

Підвищення врожайності сільськогосподарських культур та виробництво екологічно чистої сільськогосподарської продукції в достатній кількості є надзвичайно актуальною проблемою, як в Україні, так і в світі.

# НУБІП України

Проблема глобального зростання населення вимагає збільшення виробництва продуктів харчування, тоді як придатних сільськогосподарських земель

продовжує зменшуватися. Значна частина (приблизно 25-30%) врожаю культури втрачається через низьку якість посіву. Понад 30% насіннєвого матеріалу непридатне для посіву через низьку схожість і недостатню схожість. Частково вирішення цієї проблеми полягає у впровадженні сучасних, економічно вигідних, енергоефективних та екологічно безпечних технологій передпосівної стимуляції насіння.

Мета роботи – підвищення ефективності температурної та магнітної обробки сільськогосподарських матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи та засоби термічної та магнітної обробки матеріалів сільськогосподарського призначення.
2. Обґрунтувати доцільність застосування електричних методів нагріву в технології температурної обробки зернового матеріалу.
3. Обґрунтувати конструктивні, енергетичні та режимні параметри індукційного теплогенератора.
4. Провести чисельне моделювання процесу температурної та магнітної обробки матеріалів сільськогосподарського призначення з використанням індукційного нагріву.

**Об'єкт дослідження** – циліндричний індуктор із завантаженням у вигляді пучка нещільно розміщених феромагнітних стержнів

**Предмет дослідження** – конструктивні, енергетичні та режимні параметри індукційного теплогенератора.

# НУБІП України

## РОЗДІЛ I

### АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ СУШІННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ

## НУБІП України

### 1.1 Методи обробки зернового матеріалу

Для поліпшення якості насіння і активізації процесу їх росту в даний час використовуються наступні методи:

- обробка фунгіцидами;
- протруювання насіння плівкоутворюючими препаратами з використанням рідких добрив;
- протруювання насіння такими препаратами, як натрієва сіль ( $\text{NaNO}_3$ ).

Ці методи погіршують родючість ґрунтів, якість поверхневих і підземних вод, отруюють посіви та призводять до посилення захворювань рослин, тобто є екологічно небезпечними.

Для передпосівних обробок застосовують також термічні, термохімічні та хімічні обробки тривалістю від 2 до 72 годин. Ці методи є трудомісткими та енергоємними, а також неекологічними.

Існує також багато методів, заснованих на електротехнічних принципах передпосівної обробки зерна з використанням електричних полів коронного розряду, магнітних полів, лазерного випромінювання, гамма-випромінювання та ультрафіолетового випромінювання (УФБ). За даними Центрального інституту механізації, електрифікації, науково-дослідного проектування і технології тваринництва, дія ультрафіолетового випромінювання забезпечує підвищення врожайності продовольчих культур на 9-11%, збільшення вмісту білка в зеленій масі на 7-9%. зерно, цукор - 13-17%. Ефективність цього способу передпосівної обробки перевірено експериментально на дослідній насіннєвій станції.

## НУБІП України



Крім того, одними з найефективніших передпосівних обробок зерна є обробка низькочастотним електромагнітним полем, обробка імпульсним концентрованим сонячним світлом, обробка інфрачервоним випромінюванням, обробка водневою плазмою, обробка градієнтним магнітним полем.

До фізичних методів обробки зерна належать:

- термічні;
- фізико-механічні;
- фотоенергетичні;
- радіаційні;
- магнітні та електрофізичні.

Термічну обробку зерна застосовують, щоб збільшити його схожість і зменшити зараження шкідниками. До цього методу відноситься гідротермічна обробка і конвекційна обробка зерна. Метод теплового впливу - це тривалий спосіб обробки злакової сировини, що забезпечує підвищену схожість і схожість.

Завдяки термічній обробці зерна (1-2 години при температурі 70-80 °C) воно менше заражається різними інфекціями (фімоз, бактеріоз, альтернаріоз). Обробка гарячою парою при температурі 150 °C також підвищувала схожість насіння.

Основним недоліком методу теплового впливу є тривалість обробки зернового матеріалу та енергоємність процесу.

Конвективний спосіб сушіння - це спосіб, при якому тепло передається зерну конвекцією від рухомого агента сушіння (підігрітого повітря або суміші його з топковим газами). Агент сушіння поряд з передачею тепла поглинає і видаляє вологу з зерна.

При конвективному способі теплопередачі головною технологічною характеристикою є стан шару зерна в процесі його сушіння і охолодження. Шар зерна може перебувати в нерухомому і в рухомому станах. При сушінні в нерухомому стані швидкість руху зерна дорівнює нулю, а швидкість руху агента сушіння менше критичної швидкості частинок зернової маси. Цей принцип

використовують в жалюзійних, лоткові, стелажних, камерних сушарках періодичної дії і в установках для активного вентиляювання. Основні параметри таких сушарок: температура агента сушіння 35-40 ° С, тобто нижче гранично допустимої температури нагріву зерна і насіння, з'їм вологи 0,5-1,5% за 1 год, витрата теплоти 8000-20000 кДж на 1 кг випареної вологи.

Сушарки цього типу мають низький ККД і не забезпечують необхідну рівномірність сушіння. При сушінні в рухомому стані швидкість руху зерна більше нуля, а швидкість агента сушіння менше критичної швидкості частинок, що висушується зернової маси. Цей принцип покладено в основу роботи

пактних, рециркуляційних, барабанних сушарок безперервної дії. Температура агента сушіння в цих сушарках висока, а витрата теплоти становить всього 5000-6000 кДж на 1 кг испареної вологи. Вони забезпечують швидку і рівномірну сушку зерна і насіння.

Фізико-механічні методи включають зовнішню передпосівну обробку зернової сировини барботуванням насіння у водному середовищі з використанням повітря або кисню при температурі навколишнього середовища 18-20 ° С. При цьому підвищується проникність оболонки для кращого вбирання води, що призводить до підвищення схожості. Але, незважаючи на простоту, цей

спосіб досить тривалий (декілька годин) і складний для контролю - необхідна своєчасна ідентифікація розтрісканих зерен візуальним шляхом, щоб зменшити пошкодження паростків.

При такому підході до обладнання пред'являються особливі вимоги - підвищена надійність, автоматичне управління, вибухо- та пожежобезпечність.

Експерименти з ультразвуковою обробкою насіння проводили багато дослідників, які помітили, що вплив звукових коливань на внутрішньоклітинні процеси, що відбуваються в зернових матеріалах, є неясним. Висока вартість обладнання джерел ультразвукових коливань не сприяє їх поширенню.

*Радіаційний спосіб* сушіння полягає в тому, що теплота підводиться до зерна у вигляді променевої енергії від сонячних або інфрачервоних променів.

Прикладом є повітряно-сонячна сушка, коли волога випаровується тільки через поверхню насипу зернової маси під впливом сонячної радіації і вітру. Чим тонше шар зерна, тим інтенсивніше йде його висушування. Тому при сушінні зерна

пшениці та ячменю висота його шару повинна бути не більше 20 см, а для дрібнонасітних культур - 5-10 см.

*Метод магнітної обробки* – це вплив зовнішнього постійного магнітного поля (ЗМП) різної напруженості на зернові та зростаючі рослини, метою якого є

підвищення проникності клітинних структурних мембран, вплив на мембранний потенціал і прискорюють ферментативні процеси. Магнітну індукцію в зразку дослідного приладу регулюють зміною повітряного зазору між двома полюсами постійного магніту. Зерна, оброблені постійним магнітним полем, значно збільшують швидкість проростання.

Під час передпосівної обробки зерна в сильному електричному полі основними факторами, що впливають на зерна, є напруженість електричного поля та величина заряду, який відчують зерна.

### **1.1.1 Використання інфрачервоного випромінювання для сушіння зерна**

Процес інфрачервоного сушіння зернових має суттєві переваги порівняно з сушінням конвективним методом, через те, що не використовується органічне паливо. Інфрачервоні промені, знаходяться в спектральному проміжку між 760 нм та 420 мкм, та характеризуються високою тепловою дією, тому значно поширене використання ІЧ випромінювання в сільському господарстві для сушки зерна, теплової дезінсекції та ін.

Принцип роботи інфрачервоного методу полягає в тому, що волога, яка знаходиться всередині зернини, поглинає інфрачервоні промені, через це

відбувається її нагрівання. Іншими словами, енергію безпосередньо підводять до вологи, через це і вдалося досягти не лише високої ефективності, а й високої економічності. При використанні даного способу, відпадає потреба в перевищенні температури вологого зерна. Тому, процес випаровування можливо провести досить інтенсивно.

Одночасно, інфрачервона сушка зерна при температурі 40-60°C приводить до знищення шкідливої мікрофлори, що наявна на поверхні зерна, через це воно стає чистим. Окрім цього, низькі температури не нагрівають технічне обладнання, і через це втрати тепла через вентиляцію відсутні.

Завдяки інфрачервоному випромінюванню, є можливість передачі енергії коли відсутній контакт між зерном та джерелом випромінювання, так як повітря не створює перешкоди для проходження ІЧ променів.

Інфрачервоне випромінювання використовують для передпосівної обробки: впливом на насіння для зниження твердості насіння, а також для благотворного впливу на посівні якості. Інфрачервона обробка насіннєвих культур проходить протягом кількох хвилин, а сушка методом вентиляції потребує кількох днів. При інфрачервоному опроміненні потужністю 40...50 Вт/м<sup>2</sup> відбувається активація ферментів насіння, за 15...25с, температура зернини зростає до 30...50°C це позитивно впливає на якість, урожайність зерна, а також на швидкість проростання.

Інфрачервоне випромінювання також має дезінсекційну дію і є ефективним методом знезараження зернових культур і дозволяє захистити насіння від впливу шкідливої мікрофлори. При дезінсекції впливають потужністю 17 кВт/год. І при цьому якість зерна не погіршується.

Різні зернові культури по різному пропускають інфрачервоне випромінювання (рис. 1.1).

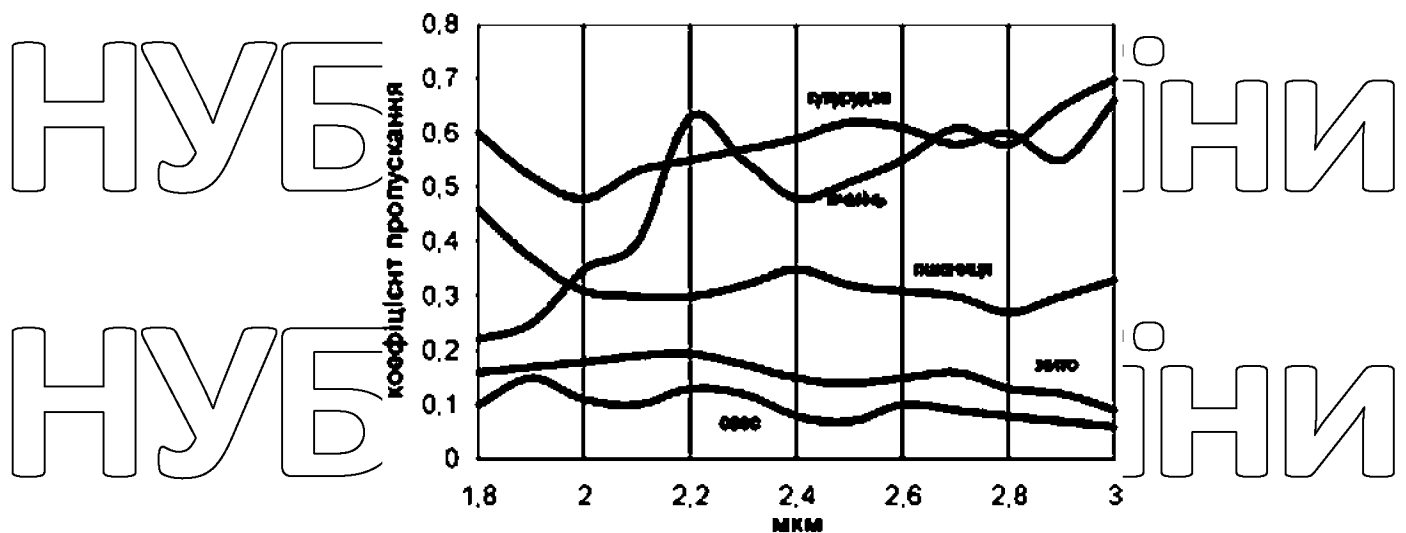


Рис. 1.1 — Залежність коефіцієнта пропускання ІЧ випромінювання для різних видів зерна

Під час опромінення зерна, відбувається його швидке нагрівання, проте зернина прогрівається не повністю, а лише верхні шари. Просушування верхніх шарів зерна ефективний особливо тоді, коли потрібно знімати оболонку (луску) і підвищує якість облушення насіння.

Метод інфрачервоної сушки потребує значних затрат енергії, через це часто використовують комбіновані методи комбінуючи, наприклад, з активною вентиляцією. Ще одним недоліком даного виду сушки полягає в тому, що волога всередині довго зберігається, а поглинання теплоти відбувається завдяки зовнішній поверхні зерна.

До переваг сушки інфрачервоним випромінюванням можна віднести простоту та високу продуктивність обладнання для сушки, яким можна випарувати близько 25% води із зерна протягом 90-100с, а потім, вже з прогрітого зерна протягом 5-6 хвилин випаровується залишкова волога. Використовуючи даний метод, можна досягнути високої якості зерна після сушіння, захистити від впливу шкідників, а також поліпшити передпосівні якості насіння різноманітних зернових культур.

### 1.1.2 Сушіння зерна з використанням активної вентиляції

Для проведення сушіння сільськогосподарської продукції, було розроблено багато методів та способів сушки за основу класифікації, яких зазвичай приймають способи передачі теплової енергії. У сучасних установках найчастіше тепло передають від агента сушіння, який рухається: нагрітого в калориферах повітря або гарячої суміші повітря з топковим газом. Таку сушку називають конвективною.

Сушка відбувається методом продувки гарячого повітря крізь шар зерна по відповідних і підвідних повітряних каналах. Зважаючи на велику кількість поперечних каналів відбувається рівномірний розподіл загального об'єму теплоносія в бункері зерносушарки, а також ефективніше його використання. Крім того, саме через велику кількість поперечних повітряних каналів в зерносушарці, шар зерна, що просушується, менший і продувка відбувається з обох сторін, що також впливає на ефективність енергетичного використання теплоносія, а це позначається на витраті енергетичних затрат.

Даний метод є неефективний та енергоємний. У випадку, якщо вологість зернової маси значна, то його не можна просушувати сильно нагрітим повітрям, тобто чим вологість зерна більша, тим необхідна менша температура при його сушінні і тим більше потрібно часу на виконання всього процесу.

Сушка відбувається нерівномірно — чим далі матеріал від каналу, по якому подають гаряче повітря, тим гірше відбувається просушування, а зерно, що знаходиться поряд може бути пошкоджене через значну температуру. Через це необхідно ретельно розраховувати розміщення повітряних каналів, а також забезпечення механізму для переміщення матеріалу. Волога, яка випаровується з нижніх шарів піднімається догори і конденсується у верхніх шарах, внаслідок чого відбувається підвищення вологості зерна в верхніх шарах і на його просушування необхідно буде затрати значно більше енергії.

При сушінні вентиляцією теплим або гарячим повітрям зменшується імовірність зараження зерна мікроорганізмами, проте значно збільшується кількість зерна з механічними пошкодженнями.

Під час проведення дослідів спостерігався певний вплив на якість насіння.

Одним з таких процесів є сушка матеріалу, під час проходженні якого теж спостерігався побічний вплив на зерно.

Сушка з використанням звичайного, не нагрітого повітря зазвичай триває близько 4-8 діб. При використанні даного способу особливо щадяться зародки насіння кукурудзи. Однак через тривале використання цього способу часто викликає ураження зернин мікроорганізмами.

Через це на практиці використовують комбіновані методи: комбінують сушку гарячим повітрям і сушку (за допомогою вентиляції) звичайним повітрям.

Таким чином можна уникнути ураження зернин шкідливими мікроорганізмами, а також запобігти значним механічним пошкодженням. Спочатку швидко зменшують вологість зерна з 40 до 20%, а після цього, за допомогою вентиляції, звичайним, не підігрітим повітрям досягають вологості 14%.

Одним з основних інтенсифікуючих факторів, що активно досліджується останніми роками це використанням в бункерах активного вентилявання озono-повітряних сумішей (ОПС) та іонізованого повітря. Однак застосування даного чинника викликає виникнення ряду проблем, таких як: нечітке знання фізичних законів (природи інтенсифікуючої дії), що дозволяє знижувати енергетичні витрати з використанням ОПС; складність пристрою каналу подачі озону до камери з матеріалом, бо озон є нестабільним з'єднанням і дуже швидко розпадається на іони, крім вищесказаного існує необхідність чітко стежити за концентрацією озону, який у великих концентраціях отруйний і може негативно впливати на матеріал, знижуючи його якість.

*Сушка в падаючому шарі.* Падаючий шар являє собою сильно розряджений гравітаційно-рухомий потік зерна, частково компенсований висхідним потоком

газу (аеродинамічне гальмування). Справжня концентрація зерна збільшується в процесі руху.

*Сушка в підвищеному шарі.* Підвищений стан зерна досягається при підйомі потоку газу при збільшенні швидкості подачі енергії. У процесі вся поверхня зерна бере участь у тепло- і вологообміні з газом. Час перебування зерна в пневмотрубі не перевищує декількох секунд; температура сушильного агента становить 350-400 °С. Однак зменшення вологи становить частку відсотка. Тому апарати із зваженими шарами зерна використовуються не як окрема сушарка, а як елемент багатокамерної комбінованої сушарки.

Важливою умовою якісної роботи зерносушарок є ефективно охолодження висушеного зерна. За планом охолоджувальні пристрої зерносушарок сконструйовані таким чином, що температура зерна на виході не повинна перевищувати температуру атмосферного повітря більш ніж на 10°C.

### 1.1.3 Сушіння зерна з використанням електромагнітного поля НВЧ

Для електромагнітних хвиль суха складова зернини не створює перешкод для проходження. Сушіння зерна з використанням імпульсного електромагнітного поля (ІЕМП) полягає в тому, що електромагнітні хвилі певної довжини активно поглинається водою в зерні, а суха частина матеріалу під час впливу електромагнітного випромінювання не нагрівається.

Волога, нагріта при впливі електромагнітного поля НВЧ, віддає частину теплоти сухій складовій матеріалу, проте кількість цієї енергії досить мала. Тому виготовлення сушарок, принцип роботи яких оснований на використанні електромагнітного поля, є досить перспективним.

В основі представленого способу сушіння зерна лежить вплив інтенсивного електромагнітного поля надвисоких частот на матеріал.

Під час впливу електромагнітного поля НВЧ на молекули води, включаючи



воду в зерніні, спостерігається ефект, що отримав назву «молекулярне тертя». В результаті даного ефекту, волога що зв'язана в матеріалі, виділяє теплову енергію, при цьому відбувається нагрів матеріалу «зсередини». При підвищенні температури, в шарах зернини виникає градієнт вологовмісткості і розпочинається випаровування води (рис. 1.2), волога рухається до поверхні зернини. Сушіння продукту не зупиняється навіть при зниженні вологості матеріалу, а на завершальних стадіях значно ефективніший порівняно з традиційними методами сушки.

Мікрохвильова обробка досить перспективна. НВЧ енергія виробляється генераторами, які працюють завдяки електричній енергії що являється екологічно чистою. Електромагнітне поле проникає крізь весь об'єм матеріалу, а інтенсивність опромінення залежить лише від діелектричних властивостей матеріалу та значення напруженості електромагнітного поля.

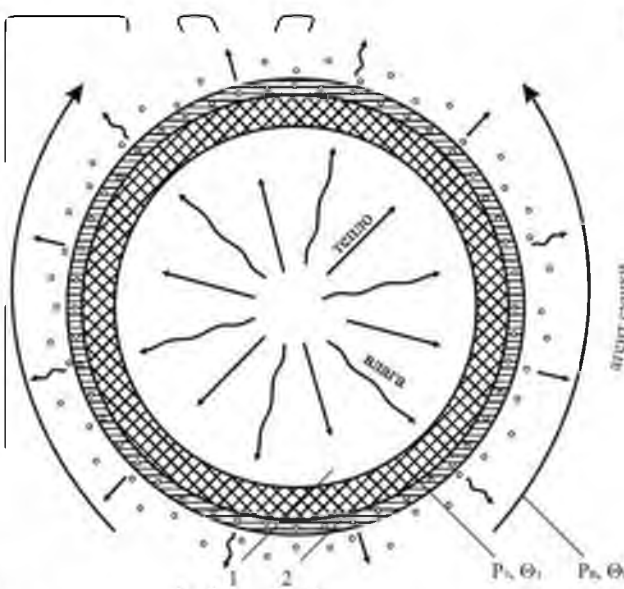


Рис. 1.2 Механізм видалення вологи із зерна при сушінні електромагнітним полем НВЧ

В основі нагрівання і подальшої сушки матеріалів за допомогою електромагнітного поля НВЧ лежить явище діелектричної поляризації, тобто переміщення зв'язаних електричних зарядів (діполів) в певних межах (об'ємі).

При впливі надвисокої частоти на матеріал, в ньому спостерігаються коливання та зміна положення зарядів, внаслідок чого з'являються струми провідності та струми зміщення.

Приведений спосіб не потребує затрат великої кількості енергії і являється більш ефективним порівняно з традиційними методами сушки. Наприклад, сушіння активною вентиляцією з використанням гарячого повітря потребує

значних затрат природного газу, який є не з дешевих, в порівнянні з електричною енергією, яка використовується в НВЧ-сушарках. До того ж, НВЧ-сушарки дозволяють затратити значно менше часу на просушування необхідного матеріалу.

При впливі електромагнітної енергії на зернину, сушіння розпочинається зсередини і тиск пари в зернині направлений до поверхні, що дозволяє рівномірно просушувати матеріал і зберегти зародок насінини.

Під час сушіння зерна електромагнітним полем, волога з середини матеріалу переноситься до поверхні через капілярну систему і, відповідно, швидкість сушіння залежить від розмірів капілярів. В зерні макрокапіляри (капіляри радіус яких перевищує  $10^{-7}$  м) відсутні.

Через велику швидкість нагріву матеріалу зернини виникає потужне джерело тепла всередині зернини та підвищення значення тиску водяної пари.

Спостерігається перенесення вологи на молекулярному рівні типу фільтрування газоподібної речовини крізь дисперсне середовище, так як інші види дифузійного перенесення вологи придушуються. Тому, використання електромагнітного поля НВЧ дозволяє суттєво зменшити енергетичні витрати, не погіршуючи якість.

НУБІП УКРАЇНИ

### 1.1.4 Сушіння зерна за допомогою індукційного нагрівання

Одним з перспективних методів сушіння зернового матеріалу в сучасних умовах дефіциту мінерального палива, є електричний метод заснований на індукційному способі передачі тепла до матеріалу, що нагрівається.

Принцип індукційного нагрівання полягає в перетворенні енергії електромагнітного поля, що поглинається електропровідним матеріалом, в теплову енергію.

В установках індукційного нагрівання електромагнітне поле створюють індуктором, який являє собою багатовиткову циліндричну котушку (соленоїд). Через індуктор пропускають змінний електричний струм, у результаті чого навколо індуктора виникає змінне в часі магнітне поле. Змінний (у часі) потік вектору магнітної індукції, створений індуктором, пронизує об'єкт нагрівання і індуктує електричне поле. Електричні лінії цього поля розташовані в площині, перпендикулярній до напрямку магнітного потоку, і замкнуті, тобто електричне поле в об'єкті нагрівання має вихровий характер. Під дією електричного поля виникають струми провідності (вихрові струми). У об'єкті, що нагрівається, енергія індукваного змінного електричного поля переходить у теплову.

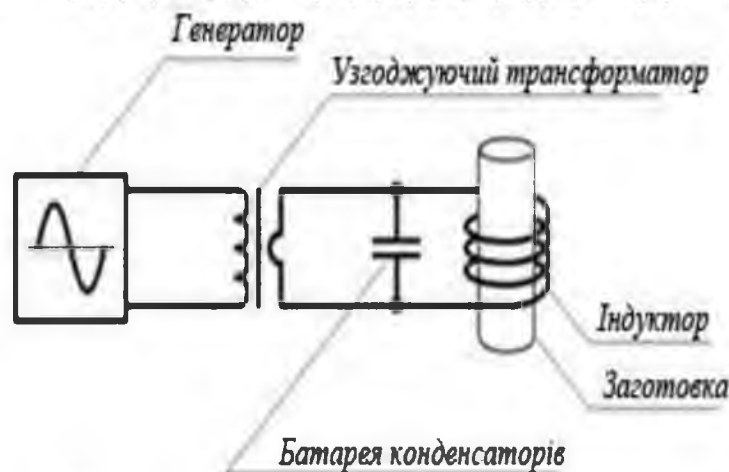


Рис. 1.3 - Загальна схема індукційного нагрівання

# НУБІП України

Індукційний нагрів являє собою швидкий, екологічно чистий вид нагріву, який можна використовувати для нагрівання сипких матеріалів або зміни властивостей провідного матеріалу.

# НУБІП України

Принцип дії такого електротехнічного комплексу (рис. 1.4) заснований на поглинанні енергії електромагнітного поля зернистими матеріалами, що надходять у робочу камеру. Матеріал рухається безперервним потоком у неекранований прохід через робочу камеру. Сипучий матеріал завантажується в

# НУБІП України

завантажувальний бункер розташований на початку живильної лінії. Привідний пристрій приводить в обертання шнековий вал, і в той же час гранульований матеріал у бункері змішується та переміщується до продуктопроводу, а потім виштовхується через продуктопровід і розвантажувальний трубопровід. Під час

# НУБІП України

проходження сипучих матеріалів у робочій камері вони піддаються електромагнітному та температурному впливу.

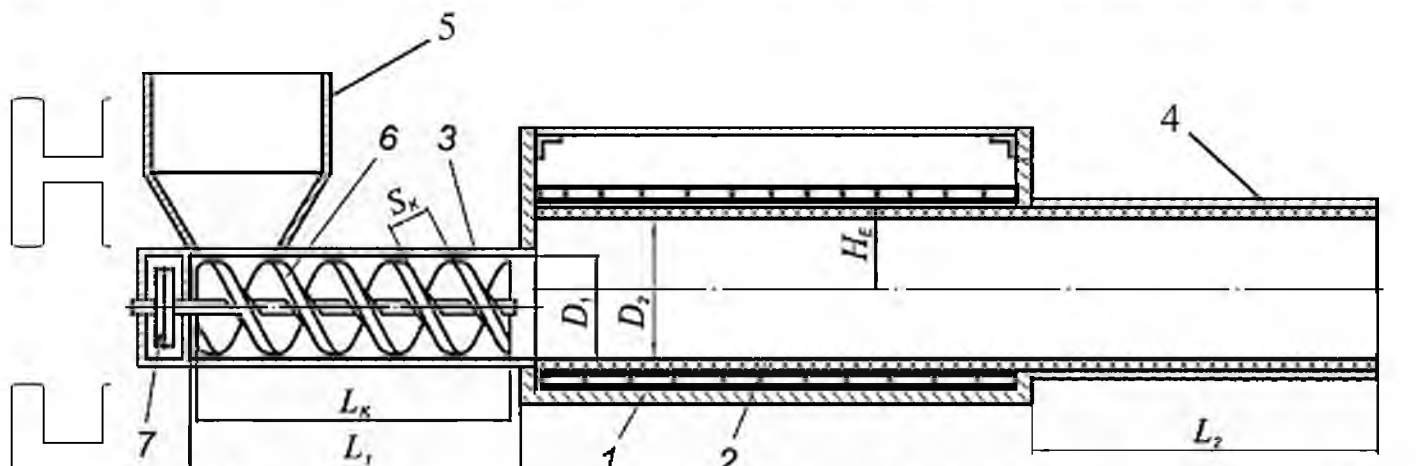


Рис. 1.4 - Схема індукційного пристрою безперервної дії для термічного впливу на сипкі матеріали:

- 1 – робоча камера, 2 – індуктор, 3 – завантажувальний трубопровід, 4 – випускний трубопровід, 5 – завантажувальний бункер, 6 – шнек, 7 – приводний вузол.

# НУБІП України



Індуктор, обернутий навколо завантажувальної труби, створює електромагнітне поле та індукує вихрові струми в шнеку та корпусі труби, нагріваючи та передаючи тепло сипкому матеріалу шляхом конвективного теплообміну (рис. 1.5).

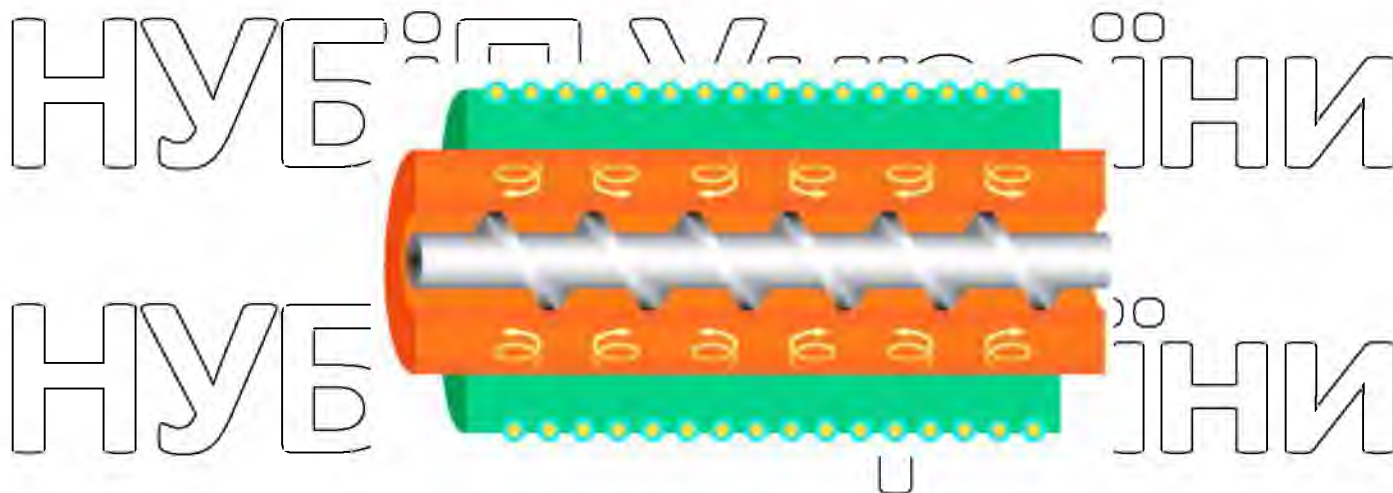


Рис. 1.5 - Індукційний нагрів екструдера

НУБІП України

## 1.2 Типи зерносушарок і технологія сушки зернового матеріалу

### 1.2.1 Технологія сушіння зерна в шахтних зерносушарках

У сільському господарстві в основному застосовуються шахтні і барабанні зерносушарки, які працюють як автономно, так і входять до складу зерносушильних комплексів КЗС.

Сушильна камера сушарок представляє собою вежу, у якій висота в кілька разів перевищує розміри сторін поперечного перерізу. Шахтні сушарки є установками безперервної дії. При сталому режимі роботи зерно безперервно надходить у верхню частину шахти і також безперервно закінчується з неї в нижній. Зерно рухається за рахунок сили тяжіння і сипучості зернової маси. Агент сушіння рухається поперек потоку зерна (рис. 1.6).

НУБІП України

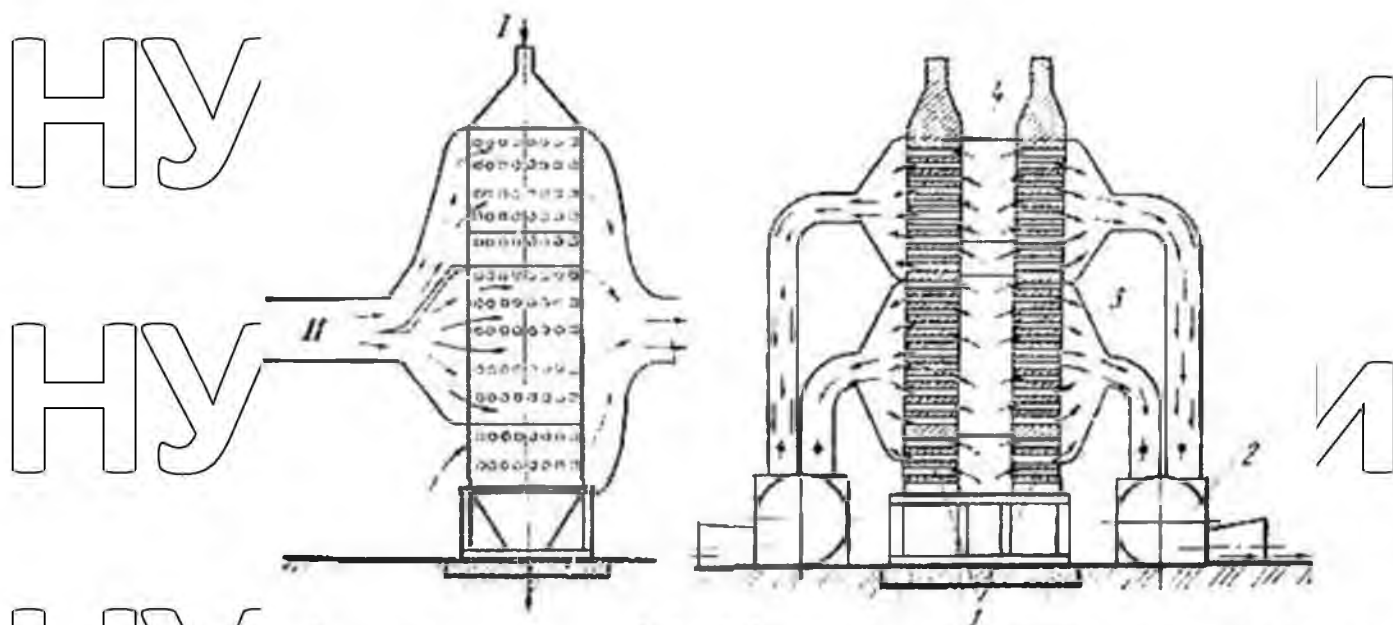


Рис. 1.6 - Технологічна схема шахтної зерносушарки

1 - шахти; 2 - вентилятор; 3 - дифузор; 4 - нагрітна камера агента сушіння; I - зерно; II - агент сушіння

Завдяки тому, що шар зерна в шахті трохи рознушений і зерно при русі повертається в різні напрямки, поліпшується його взаємодія з агентом сушіння і прискорюється вологообмін. Швидкість руху зерна і час знаходження його в шахті регулюють за допомогою випускного пристрою. Тривалість перебування зерна в шахті приблизно 40 хвилин, і за один пропуск його вологість знижується на 4-6%.

Щоб сушка зерна проходила у всьому обсязі шахти, її обладнають спеціальними каналами-коробами, які ніби поділяють насип на окремі пласти товщиною 100-150 мм, що відповідають товщині зони сушки. До кожного такого пласти підкодить свіжий агент сушіння і після насичення вологістю виводиться за межі шахти.

У найпростішому вигляді короб являє собою п'ятикутний канал з листового металу з відкритою нижньою межею. Короба встановлюють в шахті рядами (в шаховому порядку) по всій її висоті. Для кожного короба в стінах шахти вирізані

отвори, через які підводиться свіжий агент сушіння, і в цьому випадку короб називається підходящим, або відводиться відпрацьован агент сушіння - відвідний короб. Вхідні отвори підвідних коробів зазвичай виходять в бік топкового пристрою, а вихідні отвори відвідних коробів - в протилежну. У всіх підвідних і відвідних коробів один торець є глухим. Число підвідних і відвідних коробів зазвичай однакове, і вони чергуються або цілими рядами або в кожному ряду. Важливе технологічне підність шахтних сушарок полягає в тому, що в них можна в широких межах регулювати тривалість перебування зерна в сушильній камері і досить надійно забезпечувати підтримку заданого температурного режиму сушіння зернової маси.

Завдяки наявності коробів весь обсяг зерна в шахті є зоною сушки, в якій відбувається безперервний процес випаровування вологи, що викликає зниження температури зерна. Отже, в шахтних сушарках температура зерна практично завжди нижче, ніж температура надходить агента сушіння, і тому його можна нагрівати сильніше, ніж в найпростіших камерних сушарках.

В результаті з'являється можливість значно інтенсифікувати сушіння зерна без погіршення його якості. Залежно від виду зерна, його вологості, цільового призначення температуру агента сушіння в шахтних сушарках підтримують на рівні 60-120 °С.

У шахтних сушарках складно сушити зерно вологістю вище 25% і особливо вище 30%. Дана зернова маса має погану сипкість і схильна до зависання між коробами. Це збільшує тривалість обробки, перегрів і навіть псування зерна, а іноді загоряння легких органічних домішок. Для поліпшення проходження зерна через шахту його необхідно попередньо очистити від великих соломистого домішок і рослинних залишків.

Поліпшенню процесу сушіння сприяє також очищення зернової маси і від дрібних фракцій домішки, що закупорюють міжзернові простору.

## 1.2.2 Технологія сушіння зерна в барабанних зерносушарках

Сушильна камера барабанних зерносушарок виготовляється у вигляді циліндра, що обертається (барабана), що дозволяє успішно сушити засмічений, сипкий матеріал (рис. 1.7).

Лопати барабана в процесі обертання захоплюють зерно і піднімають його вгору. Потім зерно вільно зсипається після досягнення певного кута ската. Агент сушіння переміщується вздовж осі барабана і активно взаємодіє з зерном в процесі його пересипання. Завдяки гарному контакту агента сушіння з зерном представляється можливим за більш короткий термін, ніж в шахтних сушарках, видалити 3-5% вологості, використовуючи для цього більш інтенсивний нагрів. Час перебування зерна в барабані 15-20 хвилин. Температура агента сушіння при сушінні зерна насінневого призначення повинна бути 100-110 °С, а при обробці продовольчого або фуражного зерна 180-250 °С.

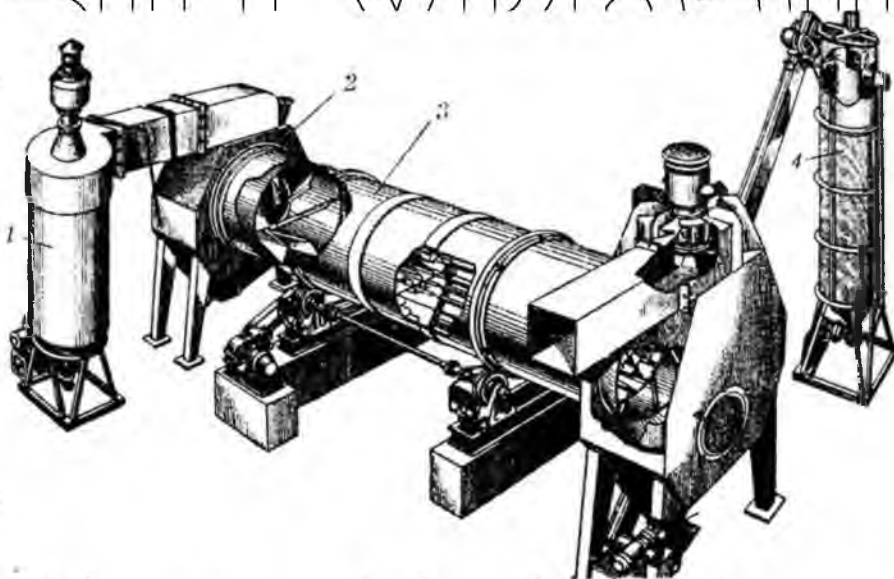


Рис. 1.7 - Технологічна схема барабанної сушарки

1 - топка; 2 - завантажувальна камера; 3 - сушильний барабан;

4 - охолоджувальна колонка



У барабанній сушарці практично не регулюється тривалість сушіння. Час перебування зерна в барабані і швидкість його переміщення по барабану визначаються інтенсивністю потоку агента сушіння і механічним підприєм шару зерна, що надходить в барабан. Це серйозний технологічний недолік барабанних сушарок. Для повного висушування зерна підвищеної вологості його пропускають через сушилку кілька разів або використовують послідовно декілька сушарок.

Так як зерно в барабані піддається підвищеним температурним і механічним впливам, ці сушарки не рекомендується використовувати для сушіння насіння, схильних до розтріскування (горох та інші бобові, кукурудза). Для сушіння насіннєвого зерна краще використовувати шахтні або камерні сушарки.

### 1.2.3 Технологія сушіння зерна в рециркуляційних зерносушарках

У цих сушарках зерно багаторазово проходить цикли нагріву, зволоження і проміжного охолодження, після чого частина рециркулюючого зерна остаточно охолоджують і направляють в склад. Одночасно з випуском просушеного і охолодженого зерна в сушарку надходить відповідне кількість сирого зерна, так що загальна маса рециркулюючого зерна залишається постійною. Число циклів, які має пройти просушують зерно, залежить від необхідного загального зниження вологості, а також від зниження вологості за один цикл.

У рециркуляційній сушарці зерно в камеру нагріву рівномірно надходить з бункера з завантажувальним пристроєм і падає у вигляді дощу в потоці агента сушіння, нагрітим до температури 250-350 ° С. При цьому зерно контактує з таким гарячим агентом сушки тільки протягом 2-3 с і тому нагрівається до температури не вище 55-60 ° С. Потім нагріте зерно надходить в бункер для зволоження на 10-12 хвилин, де відбувається вирівнювання температури і частковий перерозподіл вологи між окремими зернами. Після охолодження,

видалення частини висушеного зерна і додавання нових порцій сирого зерна нагрівання повторюється.

Внаслідок гарного перемішування зернової маси при рециркуляції зерно просушується рівномірно, якість його зберігається, а вологість може бути знижена на 10-12% і більше. І що особливо важливо, не слід перед сушінням формувати партії зерна по вологості, як в шахтних зерносушарках.

Таким чином, на даний час існує багато способів сушіння сипких матеріалів (в тому числі сільськогосподарських продуктів), таких як сушіння вентиляцією, з використанням гарячого повітря, інфрачервоного випромінювання та електромагнітного поля НВЧ.

З аналізу вищевизначених методів, можна стверджувати, що використання електромагнітного поля НВЧ, а саме – індукційний нагрів, є досить ефективним та продуктивним порівняно з іншими методами, який має наступні переваги:

- Передача електричної енергії безпосередньо в нагрівальний корпус (теплообмінник) дозволяє здійснювати безпосередній нагрів матеріалів за короткий час.
- Для передачі електричної енергії безпосередньо в нагрівальний корпус не потрібні контактні пристрої.
- Коли нагрівальний матеріал є діелектриком, наприклад, зерном, тоді потужність рівномірно розподіляється по обсягу нагрівального матеріалу.

## РОЗДІЛ 2

# ЗАСТОСУВАННЯ ІНДУКЦІЙНОГО МЕТОДУ НАГРІВУ В ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ

### 2.1 Електромагнітні технології обробки зернового матеріалу

Технологічні процеси обробки сільськогосподарської продукції передбачають її нагрів при переробці та зберіганні. Теплова обробка застосовується при підготовці посівного матеріалу, приготуванні різноманітних кормових сумішей, сушінні сільськогосподарської продукції перед закладанням на зберігання та ін.

Широко застосовується теплова обробка зернових культур. Процес переробки значним чином залежить від вологості та температури зернового матеріалу, що визначає ефективність механічного процесу видалення вологи. Тому дуже важливо правильно вибрати оптимальний технологічний режим теплової обробки, що визначається хімічним складом та теплофізичними властивостями зернового матеріалу, а також конструкцією теплообробної установки.

Якість термічної обробки та енергетична ефективність технологічного процесу теплової обробки визначаються, крім фізичних властивостей зерна, способом організації теплообміну в теплообмінних апаратах, серед яких вирізняють такі апарати:

- з рухомим гравітаційно-щільним шаром без подачі повітря;
- з рухомим шаром що переміщується (обертові барабани із пучками стержнів, ребрами, апарати з обертовими шнеками, лопатками);
- з зернистим проміжним теплоносієм, що використовується для нагрівання дрібнодисперсних матеріалів;

з спадним рухом шару матеріалу уздовж вібрутого лотка, який представляє собою поверхню нагріву.

Досить перспективними є апарати з рухомих шаром без подачі повітря, що контактує з нагрітими стержнями. Ці апарати характеризуються високою надійністю, простотою конструкції, компактністю та високою тепловою ефективністю.

Ефективність таких апаратів визначається:

1. Геометричними характеристиками поверхні нагріву (використання елементів невеликої довжини, вибір ефективних теплообмінних профілів, зменшення шорсткості поверхні, для пучків стержнів – вибір оптимального компонування, раціональної орієнтації, вибір розмірів каналів, що забезпечують вільне пересування дисперсних середовищ);

2. Розвиненням поверхонь (умови, за яких ребра дозволяють не лише збільшити теплообмін за рахунок збільшення контактуючої поверхні, але й забезпечити поліпшення тепловіддачі);

3. Динамічним впливом на потік: а) збільшення швидкості руху часток, при якому настає розпушення та розрив шару; б) вібрація шару; в) раціональний вибір взаємного напрямку руху компонентів;

4. Механічним впливом на поверхню нагрівання (вібрація або обертання);

5. Способом передачі енергії від джерела до поверхні теплообміну.

Методи роботи з сипучими матеріалами з використанням електромагнітних полів вимагають розробки відповідного електротехнічного обладнання.

Електромагнітна енергія має багато переваг для опромінення біологічних матеріалів і вже давно використовується в сільськогосподарській галузі. Зокрема, опромінення зерна перед посівом сприяє підвищенню біоенергетики проростання, завдяки чому рослини швидше проростають, інтенсивніше розвиваються, виявляють більшу стійкість до хвороб і патогенних мікроорганізмів. Крім того, вплив електромагнітних полів має дезінфікуючий

ефект, який пригнічує та знищує шкідливу мікробну флору (бактерії та комах) без введення будь-яких хімікатів, що дуже актуально на сьогоднішній день.

Сушка сипучих матеріалів енергією електромагнітного поля має багато переваг. Оскільки електромагнітні хвилі проникають в середину окремих частинок сировини, вони нагріваються зсередини, і чим інтенсивніше нагрівання, тим вище випаровування вологи. При цьому виділення вологи відбувається інтенсивніше за рахунок підвищення внутрішнього тиску пари, що особливо актуально для твердлушчих зерен.

У різних наукових установах проводяться фундаментальні дослідження з розробки нових пристроїв для обробки діелектричних сипучих матеріалів з використанням електричних і електромагнітних полів надвисокої частоти (до 2,45 ГГц). Особливістю існуючого обладнання є висока ефективність і рівномірність обробки сировини, завдяки конструктивним рішенням, які забезпечують однорідний вплив електромагнітного поля на об'єм сировини.

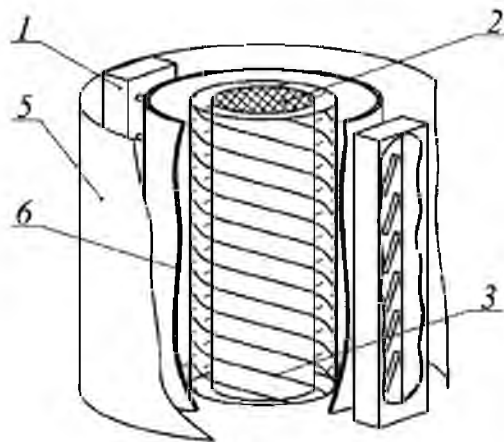
З розроблених дослідних зразків обладнання вдалося виділити конструкції з вісе-вертикальними та горизонтальними конвексними конструкціями.

Перший тип пристрою заснований на вісесиметричному характері пристрою для опромінення сировини НВЧ полями. Камера, в якій сировина 5 взаємодіє з полем, має вигляд циліндричної діелектричної трубки 3, по якій рухається потік 2 сипучого матеріалу і навколо якої розташовані опромінювачі 1, виконані у вигляді решітки елементарних елементів щільних антен, Антени-вібратори або рупорні антени, які живляться від джерела електромагнітної енергії - магнетрона.

НУБІП України

НУБІП України

НУБ



їни

НУБ

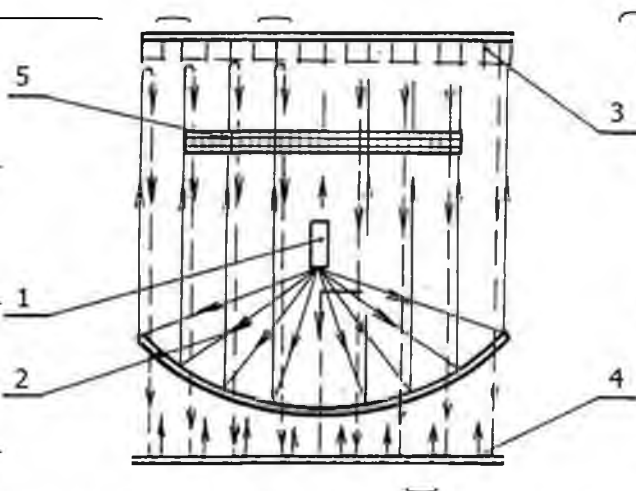
їни

Рис. 2.1 - Конструкція опроміювача з осовою вертикальною структурою.

НУБІП України

Інша конструкція передбачає переміщення зерна на плоскому конвеєрі, над яким розташовані такі ж самі, як у першому підході, опроміювачі.

НУБІ



їни

НУБІ

їни

Рис. 2.2 - Конструкція опроміювача з горизонтально-конвеєрною структурою.

НУБІП України

Устаткування для надвисокочастотної переробки сировини може мати модульну структуру, тому на основі одного модуля потужністю 10-20 кВт може

бути створена система з продуктивністю переробки зернової сировини понад 100 т/год. Крім використання ультрависокочастотної енергії, також досліджується

НУБІП України

промислове застосування високочастотних електричних полів для дезінфекції харчових матеріалів. Однією з установок, що втілює технологію високочастотної обробки зерна, є циліндричний індуктор, в якому рухається зерно. Фаза живлення кожної частини індуктора зміщена на величину його кутового положення навколо конструктивної осі, тому вектор напруженості електричного поля в об'ємі зерна постійно обертається з частотою напруги живлення та струму провідності, сировина нагрівається таким чином, що зерно з нижньою вологістю, ніж шкідники, отримує менше тепла, забезпечуючи вибіркове нагрівання та знищення живих організмів.

Одним з ефективних методів передачі енергії, при якому густина потоку енергії набагато перевищує потік енергії теплопровідністю, є індукційний спосіб передачі енергії.

## 2.2 Сутність індукційного методу нагріву зернового матеріалу

**Індукційний нагрів** - це процес нагрівання електропровідного об'єкта електромагнітною індукцією, де вихрові струми (також звані струмами Фуко) генеруються всередині металу, опір якого призводить до нагрівання зернового матеріалу.

Індукційний нагрів є однією з форм безконтактного нагрівання для струмопровідних матеріалів, коли змінюється струм в індукованій котушці, змінюється електромагнітне поле встановлене навколо котушки, в оброблюваній деталі (провідний матеріал) генерується циркуляційний струм (вихровий струм), у об'єкті, що нагрівається, енергія індукованого змінного електричного поля переходить у теплову.

Індукційний нагрів застосовується в різноманітних технологічних процесах (від термообробки та сушки матеріалів до машинобудування та металообробки) і має ряд переваг.

- висока щільність потоку електромагнітної енергії;
- можливість досягнення необхідних температур в тілі, що нагрівається (в досить широкому діапазоні);
- процес нагріву є екологічно безпечним;
- можливість керування розподілом температури за рахунок конструктивних рішень, зміни режимів роботи індукційного обладнання (частоти, напруги живлення);
- відносно високі енергетичні показники (коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності).

До недоліків можна віднести компенсацію реактивної потужності.

Залежно від застосовуваних частот установки індукційного нагріву розділяються таким чином:

- а) низькою (промислової) частоти (50 Гц);
- б) середньої (підвищеної) частоти (до 10 кГц);
- в) високої частоти (понад 10 кГц).

Настота робить істотний вплив на інтенсивність і характер нагріву. При частоті 50 Гц і напруженості магнітного поля 3000–5000 А/м питома потужність нагріву не перевищує 10 Вт / см<sup>2</sup>, а при височастотному (ВЧ) нагріванні потужність досягає сотень і тисяч Вт / см<sup>2</sup>. При цьому розвиваються температури, достатні для плавлення тугоплавких металів. Разом з тим, чим вище частота, тим менше глибина проникнення струмів в метал і, отже, тонше нагрівається шар, і навпаки.

На високих частотах здійснюють поверхневий нагрів. Знижуючи частоту і збільшуючи тим самим глибину проникнення струму, можна здійснити глибинний або навіть наскрізний нагрів, однаковий по всьому перетину тіла. Таким чином, вибираючи частоту, можна отримати необхідний за технологічних умов характер нагріву і його інтенсивність.



**Індуктор** – це робочий елемент установки індукційного нагріву. Ефективність нагрівання тим вище, чим ближче від вихідної індуктором електромагнітної хвилі до форми поверхні, яка нагрівається.

Конструктивне оформлення індукторів залежить від форми тіл, що нагріваються, цілей і умов нагрівання. Найпростіший індуктор є ізольованим провідником, який поміщений всередину металевої труби, витягнутий або згорнутий в спіраль. При пропусканні по провіднику струму промислової частоти в трубі наводяться вихрові струми, які гріють її (рис. 3.2).

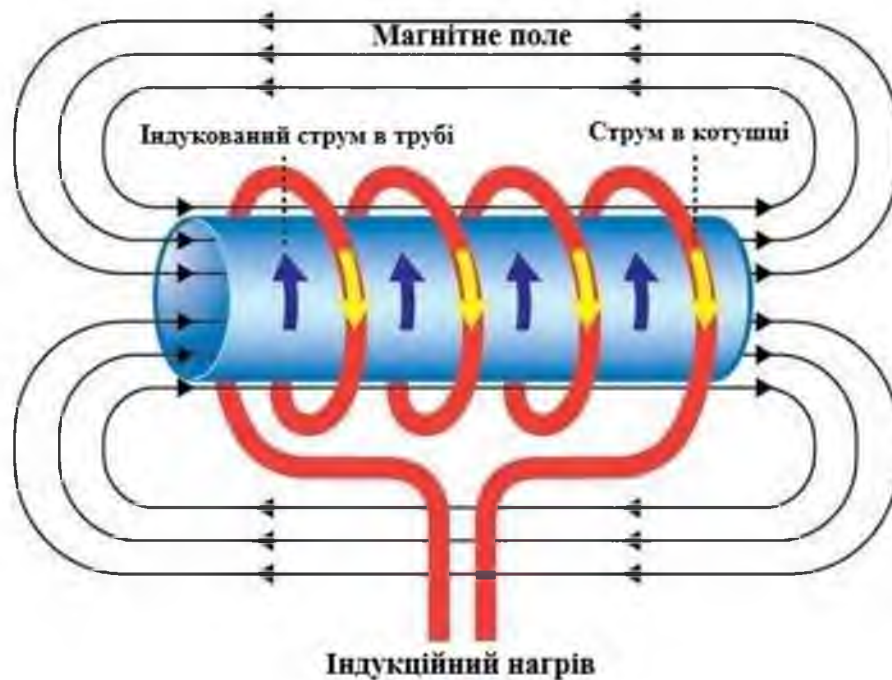


Рис. 2.3 – Схема індукційного нагріву

В конструкції індуктора з циліндричною обмоткою і внутрішнім завантаженням нагрівальних елементів електромагнітний потік проходить всередині циліндра обмотки через нагрівальні елементи і замикається ззовні індуктора через повітряний простір. Оскільки нагрівальні елементи виготовляються із сталі, то вони одночасно виступають магнітопроводом.

## РОЗДІЛ 3

# ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ, ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА

### 3.1 Обґрунтування конструкції індукційного теплогенератора

Термічна сушка сипкого матеріалу (зерна), яка відбувається на мінеральному паливі потребує в середньому 8-12 МДж енергії на випаровування

1 кг вологи, що відповідає енергії від спалення природного газу об'ємом

приблизно  $0,133 \div 0,323 \text{ м}^3$  (в грошовому еквіваленті відповідає орієнтовно 3,5 - 6 грн), залежно від категорії споживача.

Застосування теплогенератора індукційного типу в складі сушильного комплексу для забезпечення випаровування тієї ж кількості вологи із зерна

відповідає орієнтовно 1,5 - 3,5 кВт·год, що відповідає приблизно такому ж грошовому еквіваленту. Проте, сушарки, які для отримання гарячого теплоносія

спалюють мінеральне паливо є пожежо-небезпечними та екологічно небезпечними для навколишнього середовища.

В роботі запропоновано оригінальний підхід до електромагнітної і теплової обробки зернового матеріалу, який передбачає, що зерновий матеріал проходить через сушильну шахту, де піддається електромагнітній і тепловій обробці.

Індукційний теплогенератор складається з завантажувальної камери та сушильної камери. У верхню частину сушарки зерно завантажується ковшовими

транспортерами, потім зерно потрапляє в сушильну башту. У камері сушильної башти індуктор, підключений до перетворювача частоти, створює

електромагнітне поле високої частоти.

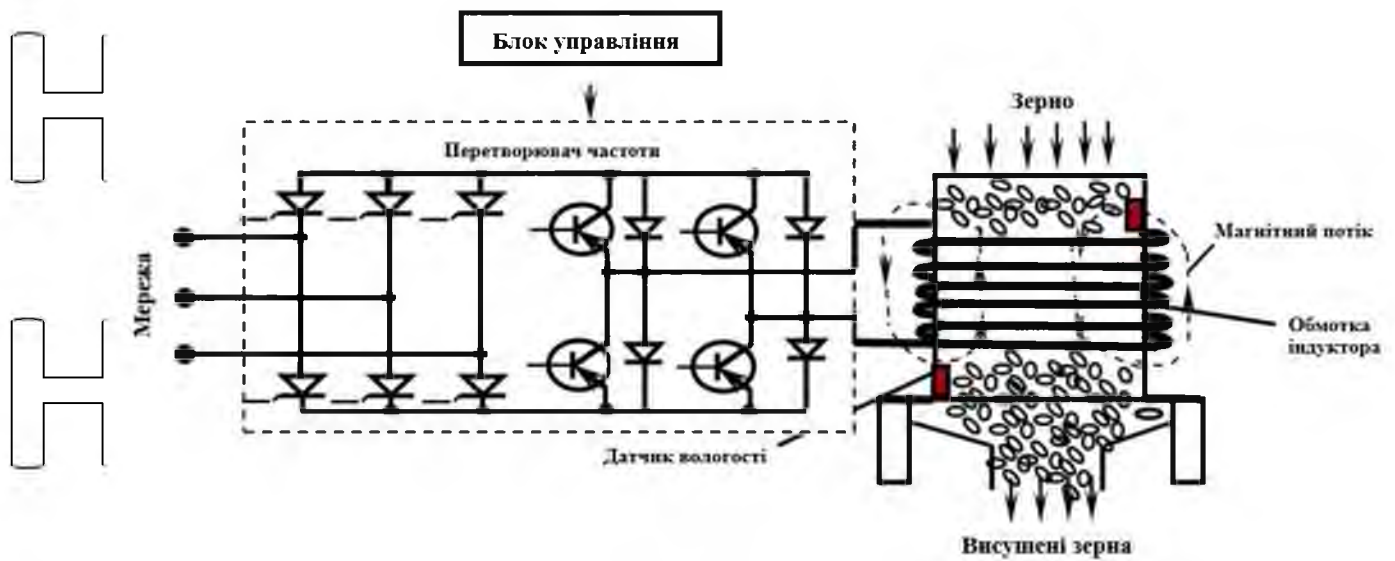


Рис. 3.1 – Технологічна схема установки для сушіння зерна

Індукційний нагрівач складається з індукційної котушки, через яку проходить високочастотний змінний струм. Тепло може генеруватися також втратами магнітного гістерезису в матеріалах, які мають значну відносну проникність. Частота використовуваного змінного струму залежить від розміру об'єкта, типу матеріалу, потокозчеплення (між робочою котушкою і об'єктом, що підлягає нагріванню) і глибиною проникнення електромагнітної хвилі.

Зважаючи на вищесказане, **актуальним завданням** є розробка електротехнологічного комплексу, що є складовою частиною технологічної лінії з теплової обробки зерна кукурудзи з використанням теплогенератора індукційного типу, який відрізняється від зазначених вище відсутністю шкідливих факторів.

Застосування електротехнологічного комплексу для сушіння, наприклад зерна кукурудзи на базі теплогенератора індукційного типу, потужністю 35 кВт дозволить отримати річний прибуток до 500 тисяч грн/рік із строком окупності біля 5 місяців при продуктивності установки до 500 кг/год.

НУБІП України

Заміна мінерального палива у технологічному процесі сушіння зерна, яке необхідне для створення гарячого теплоносія, на електричну енергію може забезпечити ресурсоенергозбереження до 25 % та, з іншого боку, забезпечити дотримання екологічних норм процесу сушіння. Враховуючи, що електротехнологічний комплекс для сушіння зерна на базі теплогенератора індукційного типу має значно менший час виходу на номінальний режим роботи порівняно з установками на основі горіння мінерального палива, це сприятиме збільшенню обсягів виробництва та зменшенню людино-годин на виробництво одиниці продукції.

Під час проектування індукційних систем важливим є встановлення взаємозв'язків між режимними та геометричними параметрами індуктора і завантаження. Також необхідно зазначити, що ефективність роботи пристроїв індукційного нагріву, в основному, визначається величиною їх коефіцієнта корисної дії (ККД). ККД пристроїв індукційного нагріву визначається електрофізичними властивостями та геометричними параметрами завантаження та індуктора, а саме: довжиною намотки, кількістю витків обмотки, числом шарів, конфігурацією індукуючого проводу, кількістю елементів у завантаженні тощо.

Для ефективного нагріву дисперсних матеріалів, наприклад зерна пшениці чи кукурудзи, важливим є розгалужена поверхня теплообміну. Розгалужена поверхня теплообміну може бути реалізована в циліндричному індукторі з завантаженням у вигляді пучка стержнів чи труб. В такому випадку поверхня теплообміну, у порівнянні з завантаженням однієї труби або стержня великого діаметру, в 3...5 разів може бути більшою, при збереженні металоемності виробу. Розміщуючи стержні на такій відстані один від одного, за якої забезпечується вільне пересування дисперсного матеріалу, можна забезпечити необхідні параметри нагріву (рис.3.2).



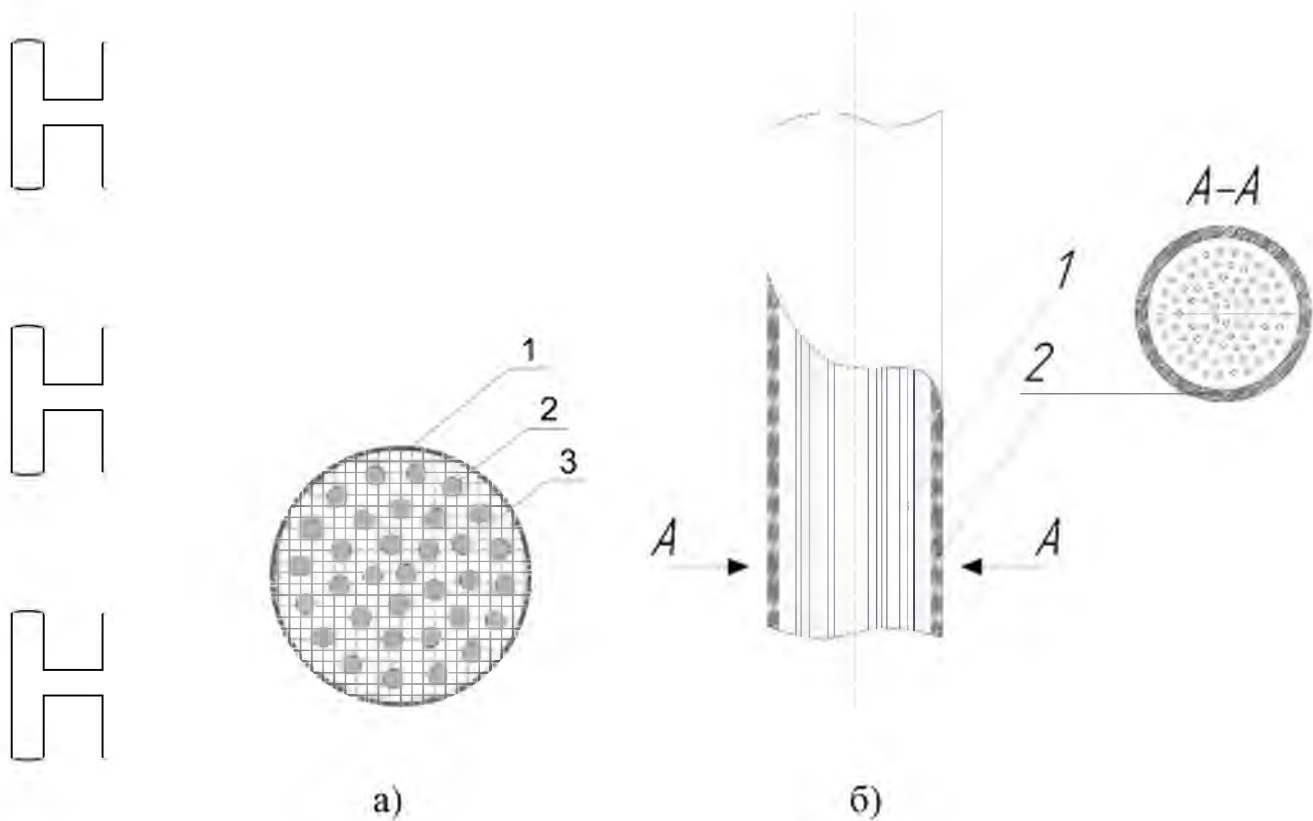


Рис. 3.2 – Циліндричний індуктор із завантаженням у вигляді багатострижневої системи: а) 1 – індуктор; 2 – феромагнітні стрижні; 3 – сипучий матеріал (насіння кукурудзи); б) 1 – феромагнітні стержні; 2 – циліндричний індуктор

Геометричні параметри індуктора вибирались з умов необхідної продуктивності пристрою нагріву. Для установки видалення всього з насіння кукурудзи, продуктивність складає 500 кг/год. Необхідний об'єм насіння може

бути нагріто в каналі діаметром; зовнішній  $d_{\text{КАН}} = 300$  мм при безперервній

подачі матеріалу. За таких умов, для досягнення необхідної ефективності теплової обробки насіння кукурудзи, розроблений індукційний нагрівач має наступні геометричні параметри: довжина індуктора  $a = 800$  мм, внутрішній

діаметр індуктора  $d_{\text{ІНД}} = 320$  мм, кількість витків обмотки  $w = 180$ . При таких

діаметрах циліндричних індукторів, може бути застосовано струм промислової

частоти (50 Гц). Живлення індукційного пристрою здійснювалось від джерела змінного струму напругою 220 В.

Геометричні параметри завантаження вибирались з міркувань вільного просипу зерен кукурудзи між стержнями. Використовуючи подальші розрахунки, було встановлено, що характерна відстань між стержнями складає 10 мм, необхідна кількість стержнів для технологічного процесу термообробки зерен кукурудзи при заданій продуктивності устаткування становить 80 шт, діаметр кожного стержня –  $d_{ст} = 8$  мм

### 3.2. Електромагнітний та тепловий розрахунок індуктора із завантаженням у вигляді пучка феромагнітних стрижнів

При розрахунку індукційних систем основну увагу необхідно звертати на електромагнітні та теплові явища, що виникають усередині індуктора. У зв'язку з цим, при дослідженні таких систем, дуже важливим фактором є встановлення взаємозв'язків між електромагнітною та тепловою складовими.

Електромагнітний розрахунок індукторів із завантаженням у вигляді пучка феромагнітних стрижнів може бути реалізований на основі методики, в якій електромагнітне поле циліндричного індуктора розраховувалося на основі системи рівнянь Максвелла:

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{j}, \operatorname{div}\mathbf{B} = 0, \operatorname{rot}\mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t, \quad (3.1)$$

та матеріальних рівнянь:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}, \quad (3.2)$$

де  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{j}$  – вектори магнітної індукції, напруженості магнітного та електричного поля, щільності струму,  $\sigma$ ,  $\mu$  – питома електропровідність та

магнітна проникність матеріалу стрижня, які для цього завдання прийняті постійними.

Для обліку нелінійного характеру магнітної проникності можна скористатися відомою концепцією Л.Р.Неймана, коли магнітна проникність матеріалу приймалася постійною по всьому обсягу феромагнітного середовища та розраховувалася за середнім значенням напруженості магнітного поля на поверхні стрижня –  $\mu_e$ .

Розглянемо нагрів одиничного феромагнітного стрижня в циліндричному індукторі.

Для циліндричної системи координат, виділяючи три області (рисунок 2): 1 - область над індуктором, 2 - область повітряного зазору (між індуктором і стрижнем), 3 - область, яка зайнята стрижнем, векторний магнітний потенціал за прийнятих умов (індуктор і стрижень мають ідеальну форму кола та кулонівського калібрування електромагнітного поля  $B = -\partial A/\partial t$ ,  $\text{div}A = 0$ ) має одну складову за координатою  $\varphi$  і для амплітудних значень описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial \rho^2} + \frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \rho} - \left( \frac{1}{\rho^2} + i\mu_j \sigma_j \omega \right) A_\varphi = 0 \quad (3.3)$$

Струм індуктора зосереджується в межах реальної довжини індуктора у вигляді нескінченно тонкого шару струму на внутрішній поверхні індуктора. Таким чином, лінійна щільність струмового навантаження відповідає щільності реального струму:

# НУБІП України

$$I_m = I_{0m} \cdot \frac{w}{a} \quad (3.4)$$

де  $w$  - число витків;  $a$  - довжина намотування індуктора;  $I_{0m}$  - амплітудне значення струму у витках обмотки.

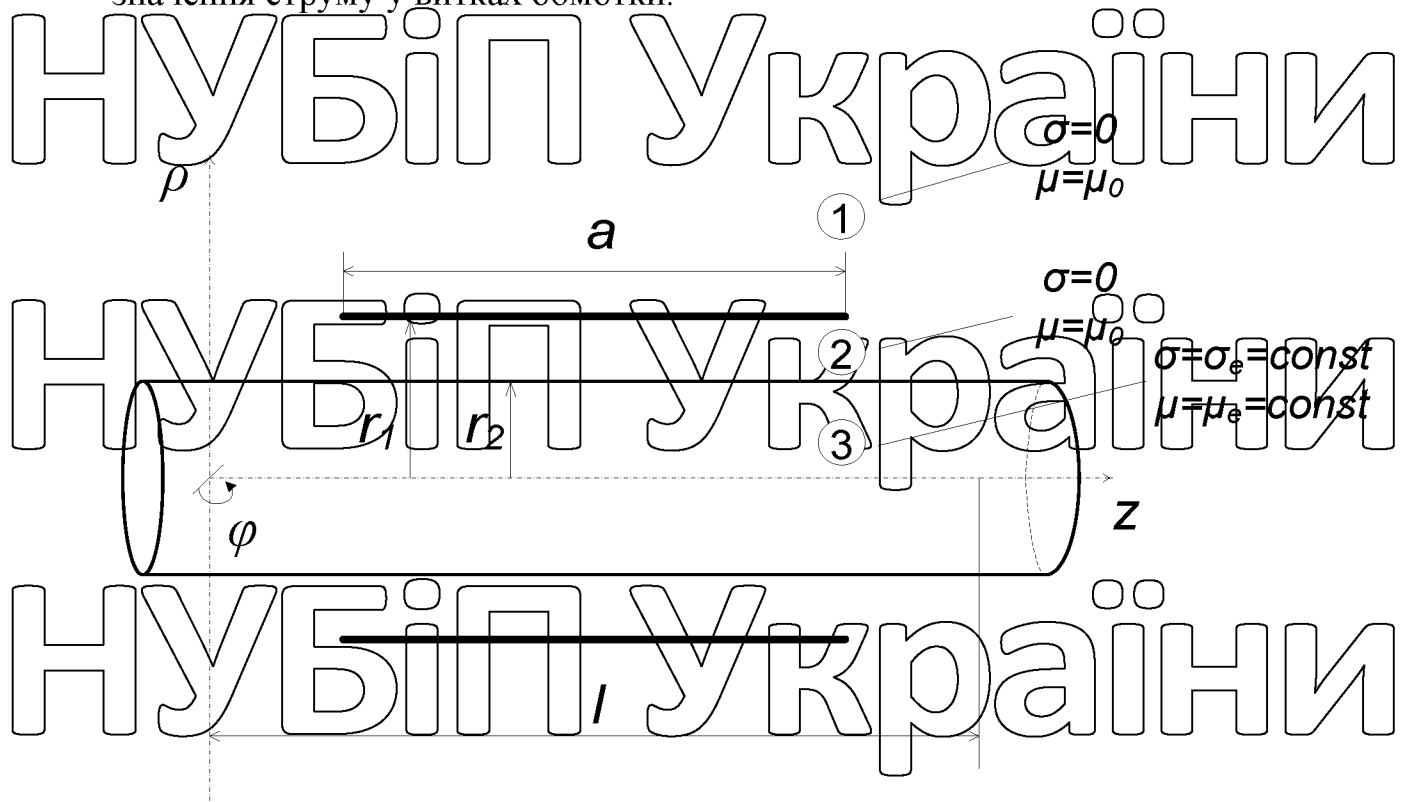


Рисунок 3.2 - Розрахункова модель циліндричного індуктора

Для вирішення рівняння (3) використовуємо інтегральне перетворення в кінцевих межах  $0 \leq z \leq l$  ( $l = a + 2,5r_1$  з ядром  $(2/l)\sin(pz)$  та граничними умовами на кінцях інтервалу  $A_\varphi|_{z=0} = A_\varphi|_{z=l} = 0$ . Такі граничні умови повністю відповідають реальним умовам.

Після інтегрального перетворення рівняння (3) набуде наступного вигляду:

# НУБІП України



$$\frac{d^2 \bar{A}}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\bar{A}}{d\rho} - \left( \frac{1}{\rho^2} + i\mu\sigma\omega + p^2 \right) \bar{A} = 0 \quad (3.5)$$

де  $\bar{A} = \frac{2}{l} \int_0^l A \sin(pz) dz$

З урахуванням рівності нулю векторного магнітного потенціалу на обох кінцях та його обмеженості на нескінченності, рішення рівняння (3) для виділених на рисунку 2 областей мають вигляд:

$$A_1 = C_1 K_1(p\rho), \quad \rho \geq r_1;$$

$$A_2 = C_2 I_1(p\rho) + C_3 K_1(p\rho), \quad r_1 \geq \rho \geq r_2;$$

$$A_3 = C_4 I_1(\eta\rho), \quad r_2 \geq \rho \geq 0;$$

де  $I_1(\cdot)$  та  $K_1(\cdot)$  – модифіковані функції Бесселя першого та другого роду першого порядку;

$C_1, C_4$  – постійні, що визначаються з граничних умов.

На межах розділу областей при прийнятих раніше припущеннях виконуються такі умови сполучення:

- рівність нормальних складових магнітної індукції ( $B_\rho^- = B_\rho^+$ );

- рівність різниці тангенціальних складових напруженості магнітного поля на кордоні з струмовим шаром лінійного струмового навантаження  $H_z^+ - H_z^- = I_0$

;

НУБІП України

- рівність тангенціальних складових напруженості магнітного поля на кордоні без струмового шару  $H_z^- = H_z^+$ .

У перетвореному вигляді струмове навантаження індуктора подається у вигляді:

$$\bar{I}_{0m} = \frac{I_m w}{a} \frac{4}{pl} \left[ \sin\left(p \frac{l}{2}\right) \cdot \sin\left(p \frac{a}{2}\right) \right] \quad (3.6)$$

З урахуванням зворотного перетворення, що здійснюється за такою формулою:

$$A = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{A} \sin(p_k z), \quad p_k = (2k-1)\pi/l, \quad k=1,2,\dots, \quad (3.7)$$

Розподіл векторного магнітного потенціалу в стрижні набуде наступного вигляду:

$$A_3 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_{0m} \mu_0 r_1 K_1(p_k r_1)}{p_k r_2 \left[ I_1(\eta_k r_2) K_0(p_k r_2) + \frac{\mu_0 \eta_k}{\mu_e p_k} I_0(\eta_k r_2) K_1(p_k r_2) \right]} \times I_1(\eta_k \rho) \cdot \sin(p_k z) \quad (3.8)$$

де  $\eta = \sqrt{\rho^2 + i\mu_e \sigma \omega}$ .

# НУБІП УКРАЇНИ

На основі отриманого розподілу векторного магнітного потенціалу можна знайти розподіл решти компонентів електромагнітного поля, наприклад, щільності струму в стрижні:

# НУБІП УКРАЇНИ

$$j_\varphi = -\sigma i \omega A_3 \quad (3.9)$$

Зважаючи на те, що величина магнітної проникності стрижня нелінійно залежить від напруженості магнітного поля, компоненти електромагнітного поля визначаються в ітераційному обчислювальному процесі. Для цього розроблений метод передбачає визначення параметрів послідовної схеми заміщення  $Z_m$ , як

# НУБІП УКРАЇНИ

відношення електрорушійної сили, що наводиться, до величини струму індуктора. У цьому значення належить відомим. На цьому ж етапі вводимо нове значення комплексного опору, що вноситься  $Z_{mn} = n \cdot Z_{m1} = Z_{xx} \cdot (n - 1)$ , де

$Z_{xx}$  - вноситься комплексний опір індуктора без завантаження.

# НУБІП УКРАЇНИ

За знайденим значенням  $Z_{mn}$  з урахуванням активного опору обмотки  $r_w$  індуктора знаходимо величину струму при заданій напрузі живлення індуктора. Визначається середнє значення напруженості магнітного поля та відповідне йому значення магнітної проникності стрижнів. Ітераційний процес завершується при

# НУБІП УКРАЇНИ

досягненні заданої точності розрахунку магнітної проникності. Наступним етапом дослідження є розробка та вирішення теплової частини завдання. Виходячи з того, що лінійні розміри феромагнітного завантаження (стрижня) більше довжини індуктора і довжина індуктора більше його діаметра

# НУБІП УКРАЇНИ

як мінімум втричі ( $a > 3 \cdot d_1$ ) та експериментальних досліджень, можна

стверджувати, що поле всередині індуктора розподілено рівномірно. Тому для вирішення теплової задачі, з усього обсягу завантаження, можна виділити одиничний стрижень з прилеглою областю, які знаходяться в тих же умовах, що й інші стрижні (рисунок 3.3). Таким чином, розв'язання такого завдання зводиться до визначення розподілу температурних полів в області з одиничним стрижнем та подальшим розповсюдженням рішення на весь обсяг завантаження.

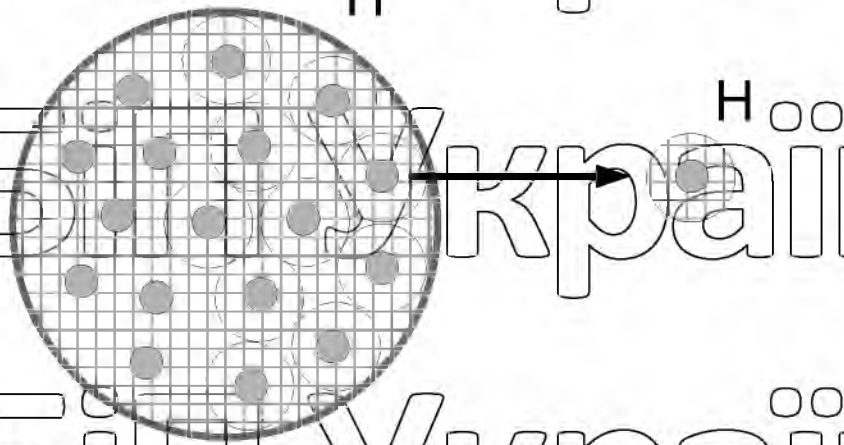


Рисунок 3.3 – Одиничний стрижень в індукторі

Вирішення такої задачі зводиться до вирішення рівняння нестационарної теплопровідності, яке має вигляд:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \lambda \nabla T = \begin{cases} Q - \text{стрижень} \\ -\rho c_p \nabla T - \text{зерно} \end{cases} \quad (3.10)$$

де  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$  – щільність, питома теплоємність та теплопровідність матеріалу відповідного середовища;  $Q$  – питома потужність джерел теплоти,  $t$  – час.

Для теплової задачі було прийнято такі граничні умови:

• на осі симетрії – умова симетрії  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ ;

• на межі зіткнення двох середовищ (стрижня та насіння) – умова 4-го

роду  $\frac{k \partial T}{\partial r}$   
де  $k = 100 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  - експериментальний коефіцієнт теплопередачі на стінці стрижня;

• на зовнішній границі області – умова рівності нулю теплового потоку  $\mathbf{n}(\lambda \nabla T) = 0$ ,  
де  $\mathbf{n}$  - вектор зовнішньої нормалі.

а також початкові умови:

• початкова температура середовищ -  $T_0 = 293,15 K$ ;

• швидкість руху матеріалу (насіння), яке розглядається як суцільне середовище –  $v = 0,004 m/s$ .

Таким чином в роботі представлено комбінований метод розрахунку температурних полів та електромагнітних характеристик теплообмінного апарату, виконаного у вигляді циліндричного індуктора із завантаженням пучком феромагнітних стрижнів. Розроблений метод заснований на аналітичному розрахунку густини тепловиділень та апроксимації отриманих результатів добутком поліномів, які описують розподіл густини тепловиділень в теплообмінному пристрої (стержнях).

НУБІП України

Також потрібно відмітити, що теплова частина задачі вирішувалась чисельно в програмному середовищі COMSOL в осесиметричній постановці. Детальний опис процесу моделювання представлено в розділі 4.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 4

# ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ІНДУКЦІЙНОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА

### 4.1 Моделювання електромагнітних полів

Для аналізу енергетичних показників індукційних нагрівачів різного призначення необхідно проводити математичне моделювання електромагнітних і теплових полів. При аналізі електромагнітного поля в феромагнітному середовищі з нелінійною магнітною проникністю найбільшого розповсюдження сьогодні набув чисельний метод скінченних елементів, на основі якого існує чимало комп'ютерних програм для моделювання електромагнітного поля і інших фізичних процесів.

Для розрахунку електромагнітного поля використовується метод скінченних елементів і тривимірна постановка задачі.

Рівняння електромагнітного поля.

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{B}, \quad \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad} \varphi, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (4.1)$$

де  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{j}$  – вектори магнітного векторного потенціалу, магнітної індукції, напруженості магнітного поля, густини струму відповідно;  $\sigma$  – електрична провідність;  $t$  – час,  $\varphi$  – електричний скалярний потенціал,  $\mu$  – магнітна проникність.

Для гармонічних струмів рівняння (4.1) змінюються наступним чином:

$$\operatorname{div} \hat{\mathbf{B}} = 0, \quad \operatorname{rot} \hat{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{j}}, \quad \operatorname{rot} \hat{\mathbf{A}} = \hat{\mathbf{B}}, \quad \hat{\mathbf{E}} = -i\omega \hat{\mathbf{A}} - \operatorname{grad} \varphi, \quad \hat{\mathbf{B}} = \mu \hat{\mathbf{H}}, \quad \hat{\mathbf{j}} = \sigma \hat{\mathbf{E}}$$

(4.2)

де  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$ ,  $\hat{H}$ ,  $\hat{j}$  – комплексні амплітуди магнітного векторного потенціалу, магнітної індукції, напруженості магнітного поля, густини струму відповідно,  $\omega$  – кутова частота,  $i$  – уявна одиниця.

Рівняння електромагнітного поля для тривимірної моделі із системи рівнянь:

$$\text{rot} \left( \frac{\text{rot} \hat{H}}{\sigma} \right) = -i\omega \hat{B} + \text{rot} \left( \frac{\hat{j}_s}{\sigma} \right) \quad (4.3)$$

де  $\hat{j}_s$  – комплексна амплітуда густини струму джерела живлення, яка присутня в поперечному перерізі обмотки. Величина  $\hat{j}_s$  розраховується із заданої напруги на виводах обмотки і комплексного опору індукційної системи.

В конструкції індуктора з циліндричною обмоткою і внутрішнім завантаженням нагрівальних елементів електромагнітний потік проходить всередині циліндра обмотки через нагрівальні елементи і замикається ззовні індуктора через повітряний простір (рис. 4.1, а). Оскільки нагрівальні елементи виготовляються із сталі, то вони одночасно виступають магнітопроводом. Для того, щоб покращити енергетичні показники індуктора, пропонується використовувати нагрівальні феромагнітні елементи ззовні індуктора (рис. 4.1, б-д). Отже, пропонується розмістити нагрівальні елементи і в середині циліндричної обмотки і ззовні, що може вплинути на покращення енергетичних показників.

НУБІП України

НУБІП України



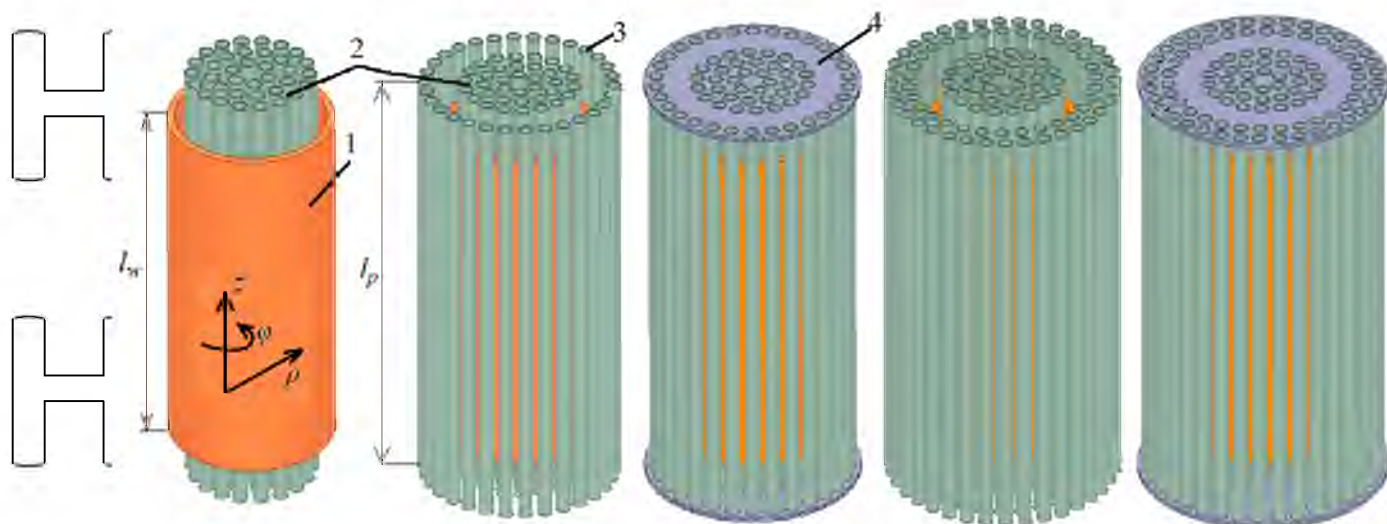


Рис. 4.1 – Тривимірні моделі індукційної системи

На рис. 4.1 представлено рисунки тривимірних моделей індукційної системи для моделювання параметрів і енергетичних показників методом скінченних елементів.

На рис. 4.1 представлено такі моделі: індукційна система з розміщенням феромагнітних стрижнів усередині циліндричної котушки (рис. 4.1, а); з розміщенням феромагнітних стрижнів і всередині, і ззовні циліндричної котушки (рис. 4.1, б-д); з наявністю феромагнітних дошок на кінцях індукційної системи (рис. 4.1, в, д).

Отже, досліджуються параметри та енергетичні показники п'яти конструкцій індукційної системи (рис. 4.1), а також шоста конструкція (рис. 4.1, в) з шихтованими феромагнітними дошками.

На рис. 4.1 є такі позначення: 1 – обмотка індуктора; 2 – пучки феромагнітних стрижнів (нагрівальні елементи), що знаходяться всередині обмотки; 3 – пучки феромагнітних стрижнів що знаходяться поза обмоткою; 4 – феромагнітні дошки з отворами для розміщення стрижнів.

# НУБІП України

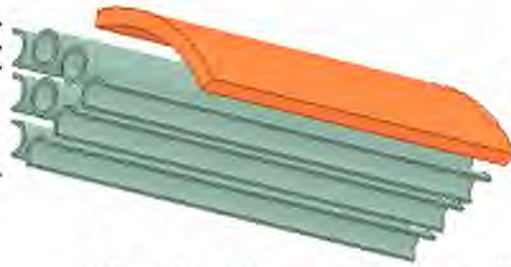


Рисунок 4.2 – 1/12 частина індукційної системи

# НУБІП України

Для того, щоб зменшити розмір обчислень, виконується розрахунок симетричної 1/12 частини індукційної системи, як це показано на рис. 4.2 (рис.

4.1, а), а потім після розрахунку електромагнітного поля параметри (потужність,

опір та індуктивність) множаться на 12. При цьому задається електрорушійна сила  $E_m$  на виводах обмотки в 12 разів меншою. На границях симетрії з нормаллю

по координаті  $\varphi$  циліндричної системи координат  $(\rho, \varphi, z)$  (рис.4.1) задано

граничну умову симетрії з тангенціальним магнітним потоком, а на границі

симетрії з нормаллю по координаті  $z$  – з нормальним магнітним потоком.

Для дослідження задано розміри індукційної системи: довжина циліндричної обмотки  $l_w$  – 800 мм; довжина феромагнітних стержнів  $l_p$  – 1000 мм

(рис. 4.1); внутрішній і зовнішній діаметри обмотки – 320 мм і 352 мм; зовнішній

діаметр феромагнітних стержнів – 8 мм; діаметри феромагнітних дошок – 480

мм (з одним шаром зовнішніх стрижнів, рис. 4.1, б–в) і 560 мм (з двома шарами

зовнішніх стрижнів, рис. 4.1, г–д); товщина феромагнітних дошок  $l_{pp} = 10$  мм.

Провідники обмотки виконані з прямокутних мідних стрижнів  $14 \times 16$  мм з

товщиною стінки 2 мм, поперечний переріз  $104 \text{ мм}^2$ . Задано 180 витків (3 шари

по 60 витків), опір постійному струму обмотки при заданій електропровідності

$58 \text{ МСм/м}$  складає  $R_w = 8,4 \text{ мОм}$ . Коефіцієнт опору змінного струму обмотки з

провідниками трубками і частотою струму  $50 \text{ Гц}$  не буде мати суттєвого впливу

на результат дослідження і тому він не враховується для спрощення

електромагнітної задачі. Феромагнітні стержні виконані з сталі

електропровідністю  $2,1 \text{ МСм/м}$ , з урахування кривої намагнічування. Крива

# НУБІП України



намагнічування для розрахунку вибрана такою, як у сталі JFE Steel 35JNE250. Феромагнітні дошки мають такі параметри, як феромагнітні стержні.

При моделюванні вихрові струми наводяться в феромагнітних стрижнях і дошках. В обмотці присутня лише задана густина струму, а тому тут рівняння має

вигляд:

$$\operatorname{rot} \left( \frac{\operatorname{rot} \hat{\mathbf{H}}}{\sigma} \right) = \operatorname{rot} \left( \hat{\mathbf{J}}_s \right) \quad (4.4)$$

В феромагнітних деталях індукційної системи рівняння має такий вигляд:

$$\operatorname{rot} \left( \frac{\operatorname{rot} \hat{\mathbf{H}}}{\sigma} \right) = -i\omega \hat{\mathbf{B}} \quad (4.5)$$

В повітрі:

$$\operatorname{rot} \left( \frac{\operatorname{rot} \hat{\mathbf{H}}}{\sigma} \right) = 0 \quad (4.6)$$

На внутрішніх границях розділу середовищ прийнята гранична умова рівності нормальних складових індукції і тангенціальних складових напруженості магнітного поля. На зовнішній границі – гранична умова рівності нулю нормальної складової напруженості магнітного поля.

Починається розрахунок електромагнітного поля в моделі, що представлена на рис. 1, а. Тут задається амплітудне значення напруги  $U_m=311$  В (діюче значення 220 В, 50 Гц). При моделюванні 1/12 частини індукційної системи напруга та опір обмотки задаються як 1/12 частина:  $U_m/12=25,92$  В,  $R_w/12=0,7$  мОм. Результати розрахунку занесені в таблицю 1 із позначенням стовпця «рис. 1, а».

В таблиці показано наступні параметри індукційної системи:  $U_m$  – амплітудне значення напруги на індукційній системі;  $E_m$  – електрорушійна сила

на виводах обмотки;  $I_m$  – амплітудне значення струму в обмотці;  $P_2$  – потужність в трубах,  $P_p$  – потужність в дошках;  $P_w$  – потужність в обмотці;  $P$  – сумарна потужність;  $S$  – сумарна повна потужність;  $\cos(\phi)$  – коефіцієнт потужності;  $R$  – активний опір індукційної системи;  $L$  – індуктивність індукційної системи;  $\Psi$  – потокозчеплення;  $B_{m1}$  – середнє амплітудне значення індукції магнітного поля в внутрішніх нагрівальних елементах;  $B_{m2}$  – середнє амплітудне значення індукції магнітного поля в зовнішніх нагрівальних елементах;  $B_{m3}$  – середнє амплітудне значення індукції магнітного поля в дошках. Назва стовпця «Рис. 1, в\*» означає наявність шихтованих феромагнітних дошок.

При виконанні розрахунку в усіх випадках було задано однакове значення електрорушійної сили  $E_m$  для того, щоб одержати максимально однакову величину магнітного поля в індукційній системі. Оскільки електричні втрати в обмотці набагато менші, ніж в нагрівальних елементах, тому в усіх варіантах напруга живлення  $U_m$  коливається в межах 1 В (таблиця 4.1). Величини потокозчеплення  $\Psi$  та індукції магнітного поля в внутрішніх нагрівальних елементах відрізняються не більше 10%.

Всередині обмотки знаходиться 36 феромагнітних труб (рис. 1, а). Поза обмоткою представлено два варіанти – 30 труб (рис. 1, б, в) і 66 труб (рис. 1, г, д).

Як показано в таблиці 1, наявність нагрівальних елементів навколо обмотки дозволяє значно знизити струм в обмотці при використанні одного ряду труб поза обмоткою (рис. 1, б) струм знизився на 31%, а при наявності двох рядів труб (рис. 1, г) – на 38%. При наявності масивних феромагнітних дошок (рис. 1, в, д) струм знизився на 40% і на 48% відповідно порівняно з рис. 1, а. При порівнянні індуктора з масивними феромагнітними дошками (рис. 1, в) і з шихтованими (рис. 1, в\*) струм з шихтованими дошками менший на 17%. А індуктор з шихтованими дошками (рис. 1, в\*) в порівнянні з варіантом без зовнішніх труб (рис. 1, а) має на 50% менший струм.

Порівнюючи втрати в обмотці (таблиця 4.1), використання додаткових зовнішніх нагрівальних елементів привело до зменшення втрат на 52...75% (рис. 1, б-д).

Таблиця 4.1

Параметр	рис. 1, а	рис. 1, б	рис. 1, в	рис. 1, в*	рис. 1, г	рис. 1, д
$U_m, В$	311,00	311,27	311,68	311,33	311,15	311,55
$E_n, В$				310,52		
$I_m, А$	548,25	377,67	326,10	269,58	342,51	282,64
$P_2, Вт$	8213,5	13543,2	15569,8	14679,6	11245,2	12946,8
$P_{\phi}, Вт$			5580,24	-	0	5954,4
$P_w, Вт$	1262,4	599,1	446,63	305,24	492,73	335,52
$P, Вт$	9575,9	14142,3	21596,6	14984,8	11737,9	19236,7
$ S , ВА$	85254,2	58779,1	50819,0	41964,1	53285,8	44029,1
$\cos(\varphi)$	0,112	0,241	0,425	0,357	0,220	0,437
$R, мОм$	63,71	198,29	406,20	412,38	200,09	481,61
$L, мГн$	1,79	2,55	2,75	3,43	2,82	3,16
$ \Psi , Вб$	0,984	0,962	0,898	0,926	0,966	0,892
$B_{mn1}, Тл$	1,81	1,78	1,87	1,90	1,78	1,87
$B_{mn2}, Тл$	-	1,61	1,79	1,77	1,23	1,42
$B_{mn3}, Тл$	-	-	1,57	1,31	-	1,40

При використанні зовнішніх нагрівальних елементів з одним рядом труб (рис. 1, б) потужність виросла на 65%, а з двома рядами труб (рис. 1, г) – на 37% (таблиця 1). При використанні феромагнітних масивних дошок – відповідно на 89% і 57%. Крім того в феромагнітних масивних дошках також виділяється значна потужність, яка відповідно на 64% (рис. 1, в) і на 54% (рис. 1, д) менша, порівняно з потужністю в нагрівальних елементах (таблиця 1). Це показує те, що є оптимальна кількість труб, яку можна встановити ззовні обмотки для максимального зростання потужності індукційної системи. В цьому випадку

більша сумарна потужність в нагрівальних елементах одержується при одному ряді зовнішніх феромагнітних труб (рис. 1, в і в\*).

При використанні шихтованих феромагнітних дошок (рис. 1, в\*) потужність в нагрівальних елементах стала на 5,7% меншою (рис. 1, в і в\*), але при цьому струм зменшився на 17,3%. При цьому дошки не гріються і виконують роль магнітопроводу (рис. 1, в\*). Для забезпечення вільного просипу зерна в феромагнітних дошках необхідно виконати отвори.

Таким чином, при використанні додатково зовнішніх нагрівальних елементів у конструкції індукційної системи з циліндричною обмоткою для сушіння зерна кукурудзи можна досягти зростання корисної потужності на 65... 89 %, знизити струм в обмотці на 31... 50%.

Використання додатково феромагнітних суцільних торцевих дошок з отворами для нагрівальних елементів дозволяє збільшити корисну потужність додатково на 15%, але при цьому в дошках присутні значні втрати (36-46% від втрат в нагрівальних елементах).

Використання шихтованих феромагнітних суцільних дошок дозволяє збільшити корисну потужність на 8% (у порівнянні без дошок) і у шихтованих дошках втрати будуть невисокі, проте така конструкція суперечить умовам вільного просипу зерен кукурудзи між нагрівальними елементами.

#### **4.2 Моделювання теплових полів**

В конструкції індуктора з циліндричною обмоткою і внутрішнім завантаженням нагрівальних елементів електромагнітний потік проходить всередині циліндра обмотки через нагрівальні елементи і замикається ззовні індуктора через повітряний простір (рис. 4.3, а). Оскільки нагрівальні елементи виготовляються із сталі, то вони одночасно виступають магнітопроводом. Для того, щоб покращити енергетичні показники індуктора, пропонується

використовувати нагрівальні феромагнітні елементи ззовні індуктора (рис. 4.3, б-д). Отже, пропонується розмістити нагрівальні елементи і в середині циліндричної обмотки і ззовні, що може вплинути на покращення енергетичних показників.

Вирішення такої задачі може бути реалізовано чисельно у програмному середовищі COMSOL в осесиметричній постановці (рисунок 4.3), за допомогою модуля Heat Transfer Module у розділі General Heat Transfer з урахуванням часу Transient analysis (time dependent).

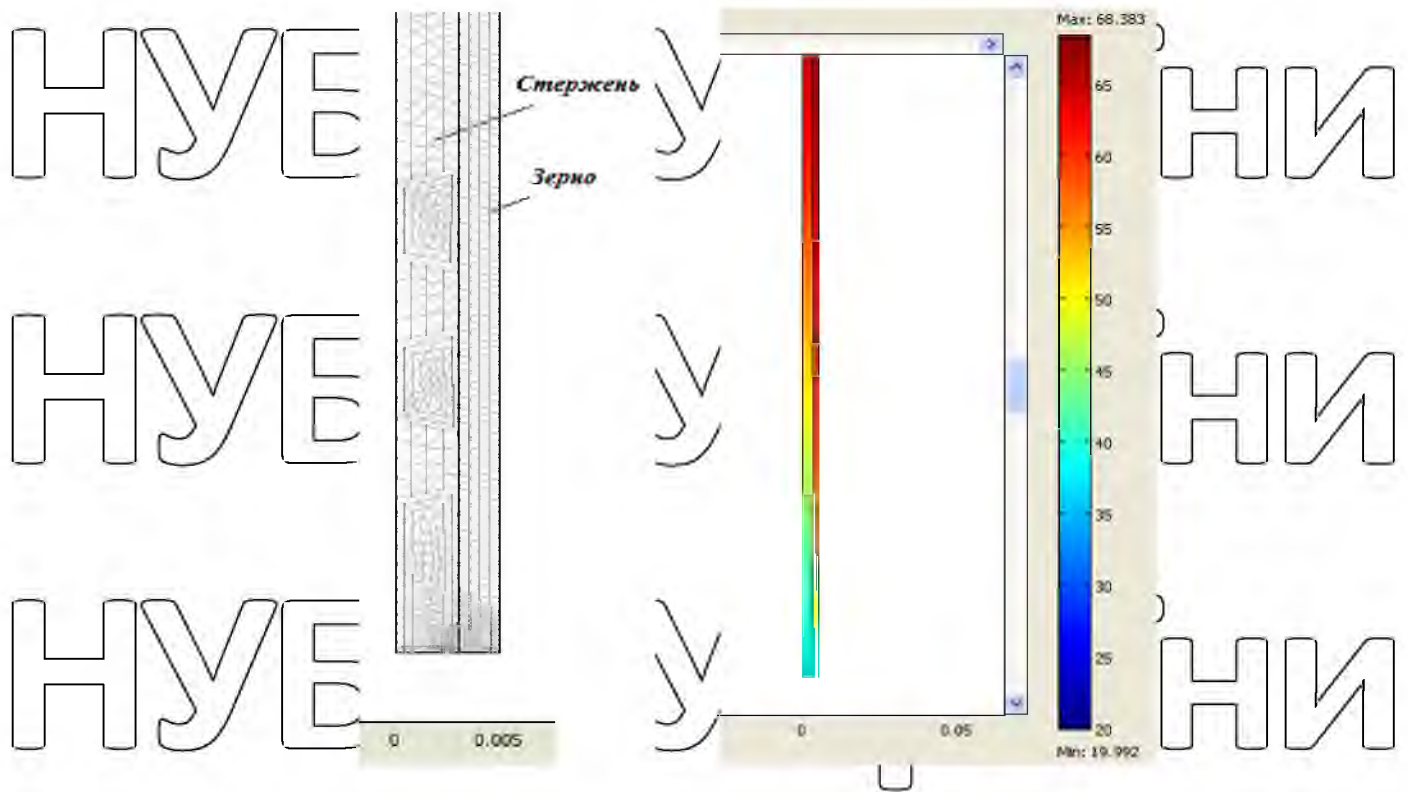


Рисунок 4.3 - Чисельне вирішення теплової частини завдання у програмному середовищі COMSOL

Крім того така задача може бути реалізована шляхом виділення одиничного елемента (стержня) з усього об'єму завантаження (рис. 4.3) та визначення розподілу температурних полів в об'ємі стержня.

Для коректного вирішення теплової задачі, спочатку необхідно було розрахувати чистому потужність джерел теплоти, що обумовлює нагрів стрижня наведеними струмами, яка визначається на основі аналітичного розрахунку (розділ 3):

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{j \cdot j}{\sigma} \quad (4.7)$$

Розподіл потужності джерел теплоти в розрахунковій області ставився у вигляді добутку двох поліномів, отриманих при апроксимації графіка розподілу щільності джерел теплоти (рисунок 4.4), отриманих при вирішенні електромагнітного завдання:

$$Q_w = Q_z \cdot Q_r \quad (4.8)$$

де  $Q_z = -3,59 \cdot 10^5 + 1,83 \cdot 10^7 \cdot z + 9,62 \cdot 10^7 \cdot z^2 - 2,95 \cdot 10^8 \cdot z^3 + 1,83 \cdot 10^8 \cdot z^4$  - поліном, що описує

розподіл джерел теплоти на стінці стрижня по координаті  $z$ ;

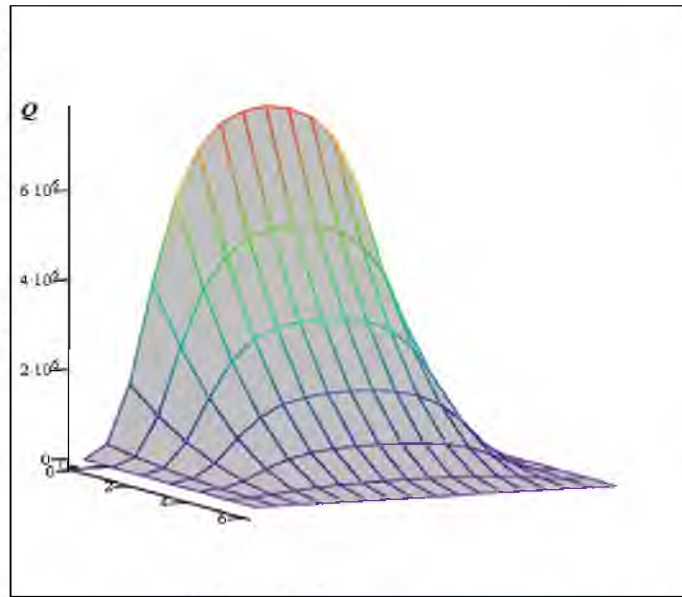
$Q_r = 0,037 \cdot r + 0,783 \cdot r^2 + 0,18 \cdot r^3$  - поліном, що описує розподіл джерел теплоти по радіусу стрижня в зоні максимальних тепловиділень.



НУБІ

НУБІ

НУБІ



НИ

НИ

НУБІП УКРАЇНИ

Рисунок 4.4 - Розподіл джерел теплоти у стрижні

Динаміка нагріву стрижня (у точці, яка розташована в центрі завантаження)

і насіння на виході з каналу, залежить від величини швидкості руху матеріалу

(продуктивності) представлена на рисунку 4.5, з якого видно, що чим вище швидкість пересування насіння, тим раніше настає режим, що встановився роботи індукційної установки

НУБІП УКРАЇНИ

Підтримка необхідної температури насіння на виході з індуктора, при зміні продуктивності установки, можна здійснити за рахунок зміни потужності тепловиділень в стрижнях, що досягається зміною напруги живлення, або числа витків індуктора

НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

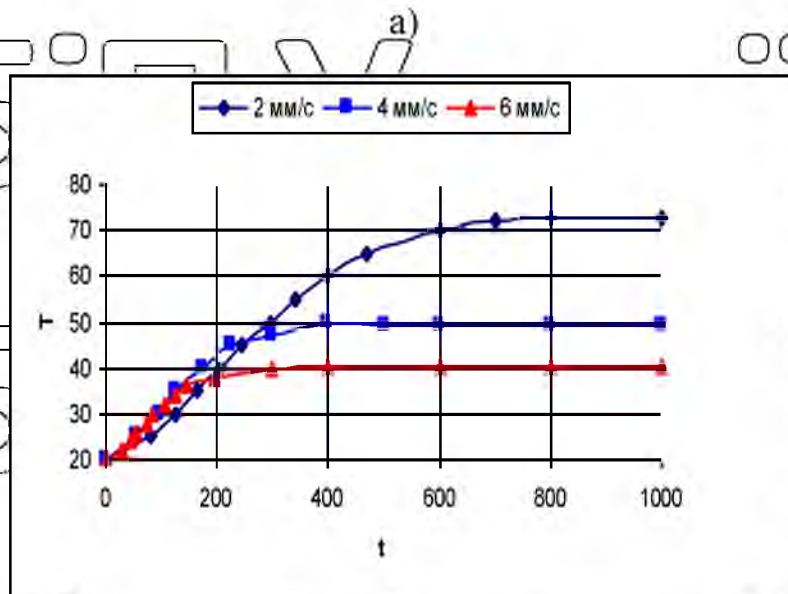
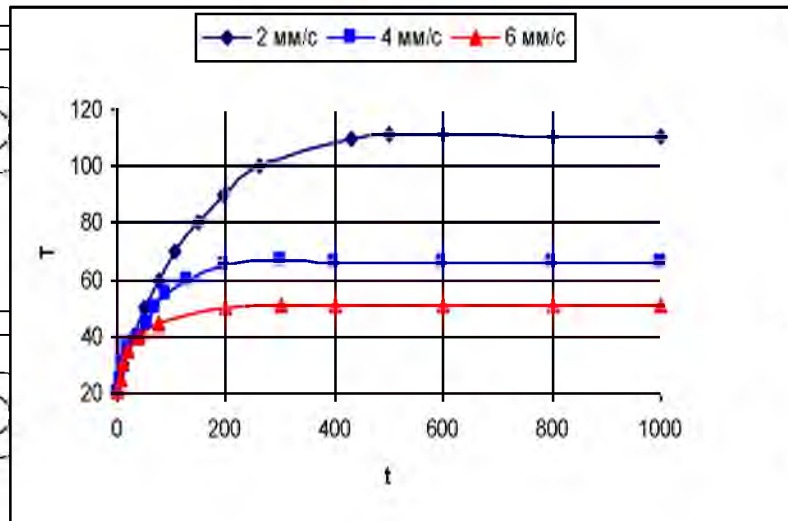


Рисунок 4.5 - Динаміка нагріву а) стрижня, б) насіння кукурудзи

Встановлено, що режим роботи індуктора, встановленої потужністю 35 kW, настає через 350-400 с з моменту нагрівання, максимальна температура стрижнів у центральній зоні становить 68 °С, температура матеріалу що нагрівається — 48 °С, що задовольняє технологічному процесу нагріву насіння перед зберіганням.

## РОЗДІЛ 5

# ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

# НУБІП України

### 5.1 Загальні вимоги безпеки при обслуговуванні електротермічного обладнання

# НУБІП України

Технічна робота зерносушильних установок повинна проводитися відповідно до правил пожежної безпеки, ДНАОП 0.00-1.29-97 і державних стандартів ГОСТ 12.2.061-81, ГОСТ 12.3.042-88, ГОСТ 12.1.004-91

# НУБІП України

Видано Постанову лікарів № 37 від 1 грудня 1999 року  
У технічних правилах експлуатації електроустановок споживачів застосовуються вимоги нормативно-правових актів.

У Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів застосовуються вимоги таких нормативно-правових актів:

# НУБІП України

- ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень, затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01 грудня 1999 року № 42;

# НУБІП України

- ДСанПіН № 198-97 Державні санітарні норми і правила при виконанні робіт в невимкнених електроустановках напругою до 750 кВ включно, затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 09 липня 1997 року № 198;

# НУБІП України

- ДСанПіН № 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів, затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України від 18 грудня 2002 року № 476, зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 13 березня 2003 року за № 263/7524.

Усі види робіт необхідно проводити на відповідних технічних засобах і за їх паспортними даними, згідно із затвердженими інструкціями та технічними

# НУБІП України

картами, які містять заходи щодо запобігання шкідливому та небезпечному впливу на працівників.

Навантаження та транспортування зернових матеріалів повинно здійснюватися згідно з правилами та інструкціями, затвердженими роботодавцем, які діють на час експлуатації транспортних засобів, що використовуються підприємством.

Технічні процеси та операції, пов'язані з використанням або виділенням отруйних, подразливих і легкозаймистих речовин, повинні проводитися в окремих приміщеннях або спеціальних ізольованих зонах виробничих приміщень, обладнаних системами вентиляції, засобами захисту працівників і засобами пожежогасіння.

Робочі місця, де можливе виділення отруйних і вибухових речовин, повинні бути обладнані уловлювачами, укриттями з локальним відсмоктуванням.

Процес термічної обробки повинен бути організований таким чином, щоб забруднення водою ґрунтом, відходами і стічними водами, а також викид в атмосферу вихлопних газів і пилу в повітрі не перевищували гранично допустимі концентрації (ГДК).

Для кожного процесу, в якому використовуються небезпечні речовини, в технічній документації повинні бути передбачені методи нейтралізації та очищення розлитих або пролитих хімікатів, методи очищення стічних вод і забрудненого повітря.

Необхідно виконувати технічні операції, щоб запобігти контакту та переміщенню працівників швидше, ніж 0,3 м/с, а також технологічне обладнання з високотемпературними компонентами.

З метою запобігання шкідливому впливу на організм працівників шуму, теплових коливань, електромагнітних та інших випромінювань, парових

виділень, парів і туди необхідне дистанційне керування роботою технічних засобів.

Терміни технічного обслуговування та ремонту електронагрівального приладу вказані в таблиці. 5.1.

Таблиця 5.1

Найменування установки	Періодичність		
	ремонт капітального, рік	ремонт поточного, місяць	огляду, місяць
1 Електропечі дугові	2	4	1
2 Електропечі опорні	2 - 3	4 - 6	1 - 2
3 Установки індукційні (плавильні та нагрівальні)	4 - 6	6	2 - 3
4 Установки високочастотні	3 - 4	6	1
5 Котли електродні напругою:			
- понад 1000 В	2	6	1
- до 1000 В	2	за рішенням особи, відповідальної за електрогосподарство	перед опалювальним сезоном

## 5.2 Перелік запроектованих заходів для усунення виявлених небезпечних, шкідливих виробничих факторів

Організаційно-технічні заходи щодо усунення небезпечних і шкідливих виробничих факторів, передбачені цим проектом, спрямовані на:

- Запобігання проникненню обертових частин машини - забезпечте захист;
- Захист від вибухів за наявності небезпечних концентрацій парів на станціях занурення, сушіння та фарбування - передбачається встановлення вибухозахищених світильників та проводки в сталевих трубах;

- Очищення будинку від шкідливих газів і забезпечення припливу свіжого повітря – передбачити систему вентиляції, яка складається з витяжних і припливних вентиляторів;

- Уникнення дотику до струмоведучих частин електрообладнання — забезпечити захисне заземлення та занулення металевих частин і використовувати засоби захисту;

- Захист будівель від прямих ударів блискавки – передбачається встановлення блискавкозахистних екранів на даху будівель;

- Забезпечення пожежної безпеки – передбачається встановлення пожежних гідрантів та вогнетасників;

- Передбачення місцевого освітлення робочого місця.

Безпечна робота операторів енергосервісу в господарстві досягається не тільки організаційно-технічними заходами, а й наявністю ефективних засобів індивідуального захисту.

### 5.3 Пожежна безпека

Заходи пожежної безпеки включають:

1. Організація розміщення, експлуатації та обслуговування електроустановок та будівель і споруд, на яких вони розташовані, повинні відповідати вимогам ССБН, ПБЕЕС, ПУЕ та промислово-гігієнічних норм і НД щодо забезпечення протипожежного захисту та екологічної безпеки.

2. Приміщення електроустановок, які створюють шкідливі виробничі фактори, повинні відповідати вимогам чинних санітарно-гігієнічних норм проектування промислових підприємств. Рівень освітлення, опалення та вентиляції в будинку повинен відповідати вимогам будівельних норм і правил.

Мікрокліматичні умови в приміщеннях, наявність шкідливих речовин у повітрі робочої зони, рівень шуму та інші несприятливі фактори виробничого середовища повинні відповідати вимогам відповідних НД ДСН 3.3.6.042-99, ДСН 3.3.6.037-99, ДСанПіН No 3.3.6.096-2001 та ДСанПіН No 198-97.

3. Засоби індивідуального захисту, пристрої та інструменти, які використовуються для обслуговування електрогосподарств, будівель і споруд підприємств, повинні бути перевірені та випробувані.

4. Працівники споживачів електроенергетики Опри виконанні електромонтажних робіт повинні дотримуватись ПБЕЕС та Інструкцій з охорони праці, які встановлюють обов'язкові вимоги безпеки для працівників даної професії.

5. Кожен працівник електротехнічного виробництва зобов'язаний знати і дотримуватись вимог безпеки праці до електроустраткування, яке він обслуговує, та організації праці на робочому місці.

6. Безпосереднє керівництво організаційно-технічною роботою по створенню безпечних умов праці електроустановок покладається на керівників споживачів та енергоуправлінь. Керівники електрогосподарства, начальники



дільниць (електроцехів, підстанцій, служб, лабораторій, майстри) та інші посадові особи, відповідальні за зонування споживчих споруд, повинні забезпечити виконання організаційно-технічних заходів щодо створення безпечних і нешкідливих умов праці працівників шляхом проведення наочних інструктажів на демонстрації та навчання безпечним методам праці та відповідності електроустановок системи керування вимогам ЄСБП, дотримання працівниками вимог безпеки праці та використання ними інструменту, обладнання, спецодягу, спецвзуття та інших засобів індивідуального захисту залежить від роботи.

7. Кожний нещасний випадок і порушення правил охорони праці ми повинні ретельно розслідувати та розслідувати, з'ясувати причину нещасного випадку та винну особу та вживати заходів для запобігання повторенню нещасного випадку.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України



## ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі магістра була розглянута тема «Вдосконалення електромагнітної системи електротехнологічного пристрою з теплової обробки сипких матеріалів».

На основі одержаних теоретичних і практичних результатів розв'язана актуальна задача по вдосконаленню електромагнітної системи електротехнологічного пристрою з теплової обробки сипких матеріалів за допомогою циліндричного індуктора із завантаженням у вигляді багатострижневої системи.

В першому розділі був проведений аналіз сучасних методів сушіння сипких матеріалів, типи зерносушарок та технології сушіння.

В другому розділі розглянули сутність індукційного методу нагріву зернового матеріалу та його застосування в технології сушіння зерна кукурудзи.

В третьому розділі була розглянута конструкція індукційного теплогенератора у вигляді індуктора із завантаженням у вигляді пучка феромагнітних стрижнів, проведений електромагнітний та тепловий розрахунок, який заснований на аналітичному методі розрахунку густини тепловиділень та апроксимації отриманих результатів добутком поліномів.

В четвертому розділі було проведено чисельне моделювання електромагнітного поля індукційного теплогенератора за допомогою методу скінченних елементів і тривимірної постановки задачі. Тепловий розрахунок вирішувався чисельно в програмному середовищі COMSOL в осесиметричній постановці.

В п'ятому розділі представлена охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях, а саме: загальні вимоги безпеки при обслуговуванні електротермічного обладнання, перелік запроектованих заходів для усунення виявлених небезпечних, шкідливих виробничих факторів та пожежна безпека.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. - Л.: Энергоатомиздат, 1988. - 280 с.

2. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок, М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962 – 320 с.

3. Слухоцкий А. Е. Установки индукционного нагрева: [учебное пособие для вузов; под ред. А. Е.Слухоцкого] / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. Б. Бамунэр . – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.

4. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Л. Р. Нейман. – М. –Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 190 с.

5. Жмихов И.Н., Гальбрайт Л.С., Акуліч А.В., Шербина Л.А., Сорокін Ф.А. Процессы и оборудование производства волокнистых и пленочных материалов: Вышэйшая школа 2013. – 587 с.

6. Національна енергетична компанія “Укренерго”. Правила улаштування електроустановок: Міністерство енергетики України, 2017. – 605 с.

7. Маціяшко В.А. Правила охорони праці в деревообробній промисловості: Міністерстві юстиції України 2005. – 88 с.

8. I. Kondratenko, A. Zhylytsov, A. Bereziuk / Electromagnetic field of the three-phase cylindrical inductor if it runs off with frequency converter in non-stationary modes III IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), 2017, 247 – 250 p.

9. Rudnev V. Handbook of induction heating / V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black. – Marcel Dekker. Inc., 2003.

10. Andrii Bereziuk, Olexiy Karlov, Kryshchuk Roman, Anatoliy Mrachkovsky, Vitaliy Nalyvaiko Improved method of calculation the electromagnetic generator for environmentally friendly method of forming coolant / 6th International Conference – Renewable Energy Sources (ICoRES 2019), E3S Web Conf., 2020. Vol. 154.

11. Безпека праці в сільських електроустановках: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / М.Т.Дут, С.Н.Радько, В.П.Гракай, А.І.Чміль. – К.: Вид-во ТОВ «Аграр МедіаГруп», 2012. – 430 с.

12. Humphries S., Finite-element Methods for Electromagnetics. Electronic edition (2010), 329 p.

13/ Laura A.M. D'Angelo, Herbert De Gersem "Quasi-3-D Finite-Element Method for Simulating Cylindrical Induction-Heating Devices", IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques, vol. 2, pp. 134-141, 2017.

14. T.A. Jankowski, N.H. Pawley, L.M. Gonzales, C.A. Ross, J.D. Journey, "Approximate analytical solution for induction heating of solid cylinders", Appl. Math. Model., vol. 40, pp. 2770-2782, 2016.

15. P. Guerrier, K.K. Nielsen, S. Menotti, J. H. Hattel, "An axisymmetrical non-linear finite element model for induction heating in injection molding tools", Finite Elements Anal. Des., vol. 110, pp. 1-10, 2016.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України