

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.3:631.24(477.81)

**ПОГОДЖЕНО** **ДОНУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
**Директор ІНІ** **Завідувач кафедри**  
енергетики, автоматики і Електротехніки, електромеханіки та  
енергозбереження електротехнологій  
(назва ІНІ) (назва кафедри)

Каплун В.В. Окушко О.В.  
(підпис) (підпис)  
2022 р. 2022 р.

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

на тему «Підвищення енергоефективності електротехнології теплової обробки  
сипких матеріалів» в АТ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ЦЕМЕНТ»  
Спеціальність 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(назва)  
Магістерська програма (назва)  
Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Виконав**

(підпис)

(ІПБ студента)

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

**Консультанти**

**Скорона праці** **к.т.н., доцент**  
(науковий ступінь та вчене звання)

**Чуєнко Р.М.**  
(підпис) (ІПБ)

КИЇВ – 2022

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Електротехніки, електромеханіки та  
електротехнологій  
(назва кафедри)

Окушко О.В.  
(науковий ступінь та вчене звання) (прізвище) (І ПБ)

“ ” 2022 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Гументіку Володимир Михайловичу  
(І ПБ)

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

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(назва)

Магістерська програма Енергоінжиниринг  
(назва)

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

Тема магістерської роботи «Підвищення енергоефективності електротехнологій  
теплової обробки сипких матеріалів» в АТ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ЦЕМЕНТ»

Затверджена наказом ректора НУБіП України від 14.11.2021р. № 2216 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 5 жовтня 2022 р.  
(місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи:

- Правила удантвування електроустановок;
- Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів;
- Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів;
- Результати обстеження підприємства – об'єкта практики.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз сучасних технологій виготовлення цементного матеріалу;
2. Обґрунтування параметрів індукційного теплоемератора;
3. Розрахунок сушильного барабану для сушіння піску;
4. Охорона праці.

Дата видачі завдання “ 14 ” 11 2021 р.

Керівник магістерської роботи

Березюк А.О.

(прізвище) (вчене звання та ініціали)

Завдання прийняв до виконання  
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

Гументіку В.М.

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 62 с., 16 рис., 1 табл., 40 джерел.

**Об'єкт дослідження:** електромагнітні і температурні процеси всередині індукційного генератора з теплової обробки сипких матеріалів.

**Предмет дослідження:** електротехнологічний комплекс із теплової обробки сипких матеріалів.

**Мета роботи:** розробити проект енергоефективного технологічного комплексу з теплової обробки сипких матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- 1) Провести аналіз сучасних технологій температурного впливу на сипкі матеріали;
- 2) Дослідити основні принципи електричного нагріву в технологічному процесі температурної обробки сипких матеріалів;
- 3) Обґрунтувати конструктивні, енергетичні та режимні параметри індукційного теплогенератора;
- 4) Проаналізувати електромагнітні і температурні поля при індукційному нагріві сипких матеріалів.

Розроблено метод розрахунку електромагнітних і теплових полів індукційного теплогенератора, який є складовою технологічної лінії з теплової обробки піску перед виготовленням бетону. Проведено розрахунок енергетичних, режимних та геометричних характеристик індукційного теплогенератора.

Розроблено конструкторську документацію технологічної лінії з теплової обробки піску перед виготовленням бетону з використанням теплогенератора індукційного типу.



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦЕМЕНТНОГО МАТЕРІАЛУ.....	7
1.1. Технології виготовлення цементного матеріалу.....	7
1.2 Вибір технології сушіння сипкого матеріалу.....	11
1.3. Способи підігріву теплоносіїв.....	13
1.4 Застосування методу індукційного нагріву для створення гарячого теплоносія.....	17
2 ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ, ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА.....	18
2.1. Обґрунтування конструкції індукційного теплогенератора.....	18
2.2. Рівняння електромагнітного поля для циліндричної системи координат ..	20
2.3 Розв’язок рівняння електромагнітного поля для індуктора, що завантажений феромагнітною трубою.....	21
2.3.1 Визначення сталих інтегрування.....	24
2.3.2 Визначення складових вектора магнітної індукції.....	29
2.4. Розрахунок енергетичних характеристик індукційного теплогенератора....	31
2.5. Чисельне моделювання процесу індукційного нагріву.....	29
3 РОЗРАХУНОК СУШИЛЬНОГО БАРАБАНАУ ДЛЯ СУШІННЯ ПІСКУ.....	32
3.1 Визначення сабаритних розмірів сушильного барабану.....	32
3.2. Визначення параметрів теплоносія в сушильних установках.....	43
4. ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СУШІННЯ ПІСКУ.....	47
4.1. Розробка теплогенератора індукційного типу.....	47
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	47
5.1. Загальні вимоги безпеки.....	47
5.2. Вимоги безпеки перед початком роботи.....	49
5.3. Вимоги безпеки під час роботи.....	51
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

## ВСТУП

# НУБІП України

Сьогодні, в умовах економічної та енергетичної кризи, всі галузі в Україні мають на меті досягнення максимального енергозбереження. Це потребує комплексної інтенсифікації та підвищення ефективності виробництва на основі впровадження нових технологічних рішень та ефективних технологій.

# НУБІП України

Питання визначення потенціалу енергозбереження на галузевому рівні в працях вітчизняних і зарубіжних науковців не розроблено до кінця, але воно має велике значення для оцінки енергоємності та рівня енергозбереження галузі

# НУБІП України

народного господарства. очікуваний період. Однією з найбільш енергоємних галузей є цементна промисловість. В Україні споживає понад 3 млн т.у.о. на рік та 2 млрд кВт/год електроенергії. Одним із основних шляхів зниження споживання енергії є переведення цементних заводів з мокрого на сухий спосіб виробництва, що дозволяє заощадити до 50% енергії.

# НУБІП України

На початку XX століття в Україні було 60 цементних заводів загальною потужністю близько 1,6 млн. тонн цементу. Проте після Першої світової війни більшість цементних заводів було зруйновано. З приходом радянської влади цементній промисловості України довелося починати з нуля.

# НУБІП України

Сьогодні Україна посідає п'яте місце у світі з виробництва цементу після Китаю, Індії, США та Японії.

Українська цементна промисловість є однією з найбільш швидкозростаючих галузей у світі, з темпом зростання близько 9%, і темпи зростання в найближчі кілька років є передбачуваними.

# НУБІП України

Основним недоліком багатьох цементних заводів в Україні сьогодні є те, що вони використовують для виробництва цементу мокрий процес, який є більш енергоємним, ніж сухий процес, який використовується в розвинених країнах світу. Тому компаніям важливо поступово переходити на більш прогресивні енергозберігаючі технології.

# НУБІП України

Перед тим як розглядати виробництво цементу, найкраще зрозуміти загальну структуру українського будівельного комплексу, оскільки знання всього

комплексу може дати краще розуміння особливостей розміщення та розвитку цементної промисловості в Україні.

Цементна промисловість є матеріаломісткою, тому цементні заводи знаходяться в районах найбільшої концентрації сировини. Найбільшими центрами

виробництва цементу в Україні є Амвросіївка, Краматорськ, Єнакієве (Донецька область), Кривий Ріг, Дніпропетровськ (Дніпропетровська область), Балаклея

(Харківська область), Іванівська область, Миколаїв (Львівська область), Здолбунів (Рівненська область), Ямниця (Івано-Франківська область), Кам'янець-

Подільський (Хмельницька область), Бахчисарай (Автономна Республіка Крим), Ольшанка (Миколаївська область) та Одеса.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ

## ЦЕМЕНТНОГО МАТЕРІАЛУ

### 1.1. Технології виготовлення цементного матеріалу

Почнемо з того, що основний компонент в цементному виробництві - це клінкер. Це спеціальна суміш з двох природних матеріалів, які проходять випалення в печах при високих температурах. Як було сказано вище, матеріалів два:

- Вапно;
- глина.

Стандартна рецептура клінкеру - 75% вапна, 25% глини. Іноді замість глини використовують інші природні матеріали, які за своїм складом і якістю схожі на глину. Наприклад, доломіт або трепел. Клінкер, змішаний з двох компонентів штучним шляхом, так і називається «штучний». Але є в природі і натуральний

клінкер, який можна використовувати вже в готовому вигляді. Одним з представників такого матеріалу є «вапняний мергель». Це гірська порода. Але з причини, що родовища природного клінкеру зустрічаються досить рідко, основна маса цементних заводів використовують у виробництві штучний.

До того ж вапно і глина є поширеними природними матеріалами.

Але клінкер - це основне, але не єдина сировина для виробництва цементу. У процесі помелу клінкеру додаються гідралічні матеріали, які покращують цементні якості та впливають на швидкість затвердіння. Найчастіше додають гіпс у розмірі 3% від обсягу клінкеру або доломіт у розмірі 15%.

### Процес виробництва

Перший етап - це змішання компонентів для виробництва клінкеру. Другий етап - це випал, де відбувається утворення самого клінкеру, коли два матеріали з'єднуються між собою під дією високої температури. Це спечена маса, що складається із зерен з розмірами невеликого горіха.

Третій етап - помел. Цей процес відбувається всередині кульових млинів, схожих на великий горизонтальний барабан, всередині якого закладені металеві кулі і конуси (Цильбепси). Потрапляючи всередину млина, клінкер подрібнюється

до стану порошку. Чим тонше помел, тим марка цементу вище, тобто його характеристики краще.

З'єднання цементу з водою має відбуватися по всій поверхні частинок. І чим більшою площа поверхні, тим краще цементні якості. Тобто маленьких частинок більше, ніж великих, а відповідно загальна площа зіткнення збільшується. Можна навести приклад. Один грам стандартного цементу має питому площу 2000-3000 см<sup>2</sup>. Той же вага високоміцного цементу має питому площу вже 6000 см<sup>2</sup>.

### *Технології виробництва цементу*

В основному всі технології відрізняються один від одного тільки одним процесом, це підготовка сировини. Таких технологій три:

1. Мокра.

2. Суха.

3. Комбінована.

У першому варіанті як компонент для клінкеру використовується крейда, а не вапно. Для цього відбувається змішання всіх складових частин у спеціальному барабані, де відбувається не тільки змішання, але і подрібнення. Обов'язкова умова - це вода, яка так само додається в барабан. Тому дана технологія і носить назву «мокра».

Отримана таким способом маса носить назву шихта, її вологість звичайно 30% - 50%. Вона надходить по технологічному ланцюжку в піч випалу, де перетворюється в кульки. Це і є клінкер, який піддається помолу.

Сухий спосіб багато фахівців вважають майбутнім цементного виробництва. Тут багато процесів об'єднані, що скорочує термін випуску цементу і здешевлює його виробництво. Наприклад, процес помелу та сушіння компонентів можна проводити в кульовій млині, куди подаються гарячі гази, що йдуть назустріч матеріалами. Тому шихта являє собою подрібнений порошок.

По своїй назві комбінований спосіб вже говорить про те, що в його процесі використовуються всі етапи двох попередніх технологій. Але і тут є відмінності. Приміром, на деяких заводах шихта, вироблена мокрим способом, висушується в спеціальних фільтрах, де її вологість доводиться до 18%, тобто виходить напівсуха суміш.



Інший спосіб, це коли все відбувається навпаки. Тобто, спочатку готується суха суміш з компонентів, потім у неї додається вода у розмірі 10% - 14%. Відбувається гранулювання матеріалу, і тільки після цього його подають на випалення.

Українська цементна галузь представлена 30 заводами з річною виробничою потужністю близько 24 млн тонн, але на сьогодні цемент виробляють лише 15 підприємств. Основні центри промисловості: Амвросіївка, Краматорськ (Донбас), Кривий Ріг, Дніпродзержинськ, Дніпропетровськ, Балаклея (Харківська область), Здолбунів (Рівненська область), Миколаїв (Львівська область), Ямниця (Ісламський район) Ванно-Франківської області, Кам. Янець-Подільський (Хмельницька область) Вільшани (Миколаївська область). Наведено виробіток за останні роки на рис. 1.1 [5, 6].

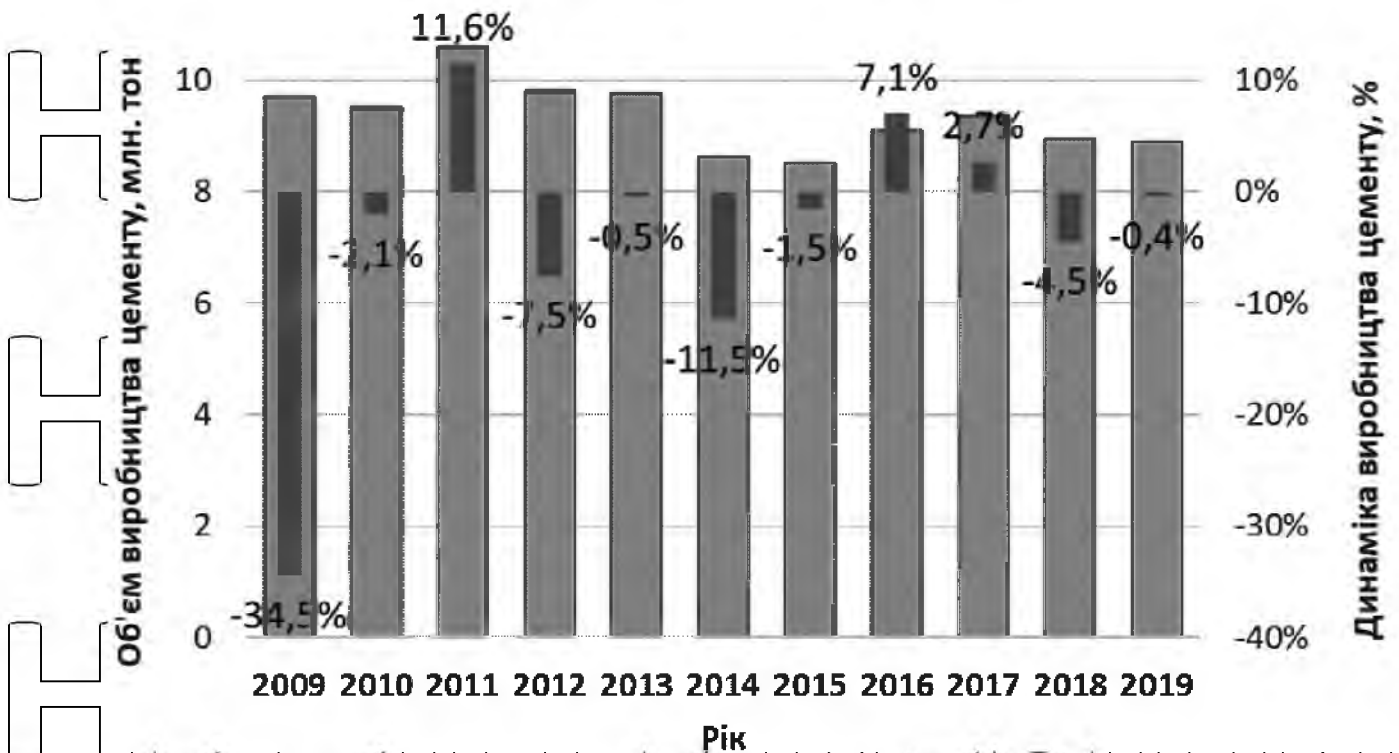


Рис. 1.1. Динаміка виробництва цементу

Більшість підприємств вітчизняної цементної промисловості були побудовані в 1920-1950-х роках, а їхня продукція в основному використовувалася за відсталими технологіями. Наприклад, енергоефективний сухий спосіб виробництва клінкеру використовують лише ВАТ «Дніпроцемент» і «Кривий Ріг».

Цемент», на які припадає 15% усього виробництва клінкеру. А в усьому світі цим способом отримують близько 90% клінкеру, оскільки він забезпечує споживання 100-120 кг палива на рік. р. на 1 т клінкеру. На цементних заводах України цей показник у 2017 році становив 218,2 кг. п., тобто вдвічі більше у світі.

В останні роки проект «спільного впровадження» кількох потужних українських компаній розпочав модернізацію цементних заводів. Найбільшим з них є ВАТ «Подільський цемент» (Хмельницька область, поблизу Кам'янця-Подільського), яке побудувало нову піч сухого способу для випалу клінкеру та зберегло чотири печі, що працюють за мокрим процесом, що раніше використовували природний газ. Після 2006 року – Вугілля. У 2008 році розпочато будівництво нової технологічної лінії виробництва цементу сухим способом 2,5 млн. тонн/рік. Введення в експлуатацію даної лінії дозволило майже вдвічі скоротити споживання палива, зменшити витрати на цемент, а також викиди пилу та шкідливих речовин у навколишнє середовище, що призвело до значного зниження питомих енерговитрат – з 6771 МДж на тону до 3180 МДж джоуль. Клінкеру, тобто в 2, 1 рази. Викиди пилу скоротилися з 150 г/с до 11 г/с (більш ніж у 10 разів), а середньорічні викиди CO<sub>2</sub> скоротилися на 740 тис. тонн.

## 1.2 Вибір технології сушіння сипкого матеріалу

Під час виробництва бетону на ВАТ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ЦЕМЕНТ» існує проблема, з утворенням вологи у піску, який використовується для виробництва бетону.

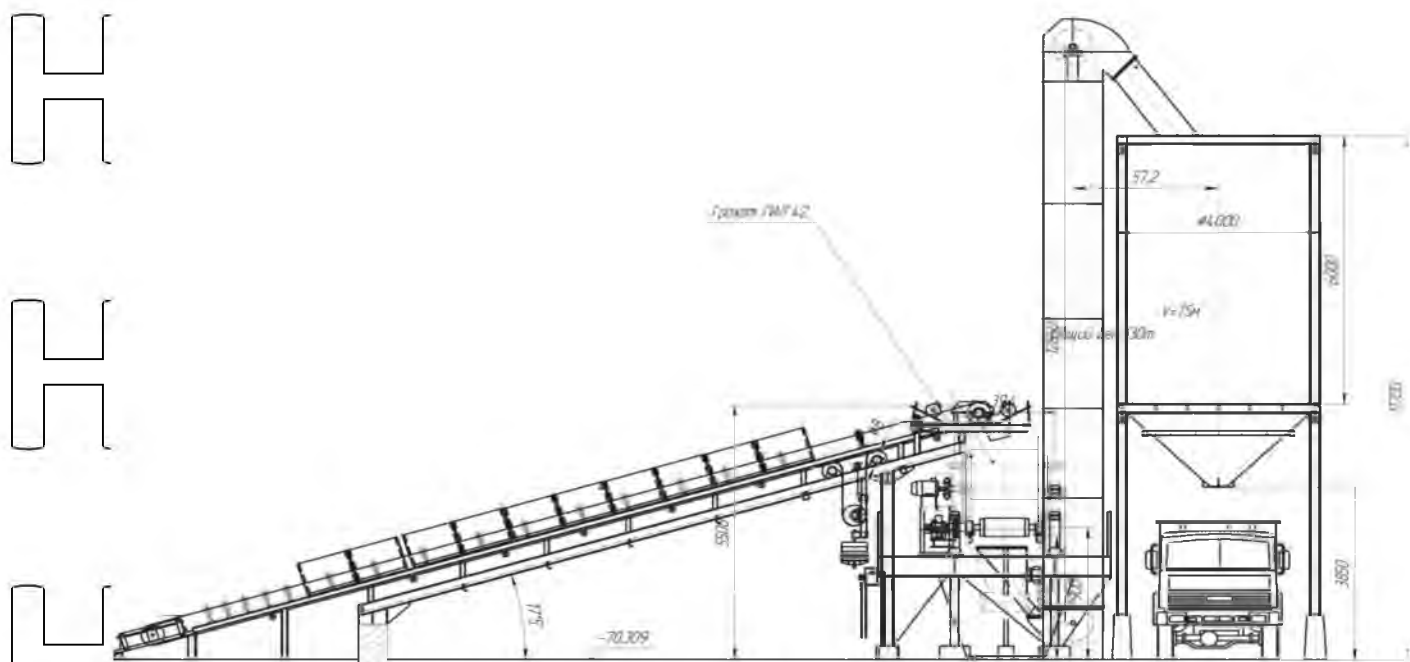


Рис. 1.2. Технологічна лінія по транспортуванню піску

Далі декількома підземними конвеєрами пісок транспортується прямо в бетономішалку. Ще одна проблема, взимку, коли вологість піску дуже висока, вода може затопити підземний конвеєр і обладнання в ньому.

Враховуючи вищезазначені проблеми, актуальним є впровадження пісокосушального обладнання в існуючу технологічну трасу (рис. 1.2.) обладнання для просушування піску (Додаток Б).

Сушіння матеріалів – це складний теплофізичний процес, в основу якого покладені явища перенесення. До основних фізичних явищ необхідно віднести:

- теплообмін між поверхнею матеріалу і оточуючим середовищем (сушильним агентом), у процесі якого відбувається проникнення тепла до центра окремих тіл;
- переміщення вологи в матеріалі, або вологопереміщення;
- випаровування вологи з поверхні матеріалу в оточуюче середовище (насичення вологою сушильного агента, або вологовіддача).

Якщо вологість матеріалу є вище вологості гігроскопічної точки, то матеріал перебуває у сирому стані і його сушіння буде відбуватися за будь-яких параметрів повітря (сушильного агента) за умови.

При сушінні порівняно об'ємних тіл їх внутрішні шари можуть навіть утримувати вільну вологу. В той же час вологість поверхневих шарів буде нижчою гігроскопічної точки.

Для переміщення вологи на поверхню матеріалу необхідно створити відповідні умови, які виражаються наявністю градієнтів: вологості, температури, тиску.

Переміщення вологи під дією градієнта вологості називається вологопроникністю, а температури – термовологопровідністю. Якщо всередині матеріалу виникає надлишковий тиск (градієнт тиску) пароповітряної суміші, то волога також буде рухатись до поверхні випаровування.

Існує три основних напрямки видалення вологи із матеріалів: фізико-хімічний, механічний і тепловий.

Фізико-хімічний – побудований на поглинанні вологи гігроскопічними речовинами, які мають значну сорбційну здатність. Такими речовинами є вапно, хлористий кальцій і ряд інших. Даний спосіб використовують у деяких випадках при видаленні вологи із газів і рідин.

Механічний – призначений для видалення вологи із матеріалів, які мають високу початкову вологість. Для цього використовують пресування, фільтрацію та центрифугування.

Аналіз вказаних напрямків показує, що для сільськогосподарських рослинних матеріалів найбільш реально можна застосувати тепловий спосіб.

Серед великої кількості способів у господарствах при вирощуванні сільськогосподарських культур знайшли широке застосування лише два способи сушіння: радіаційний, конвективний.

Радіаційний який характерний тим, що теплота підводиться до матеріалу у вигляді променів сонячної енергії. Це природне зниження вологості.



Конвективний – спосіб, при якому тепло передається конвекцією від сушильного агента до матеріалу. Під сушильним агентом розуміють нагріте атмосферне повітря або ж суміш паливних газів з повітрям.

При виборі відповідного діапазону температур слід враховувати конструкцію сушильної установки. Серед сучасних методів конвекційного сушіння найпоширенішими стали барабанні сушильні комплекси. Коли матеріал рухається від завантажувального кінця сушильного барабана до розвантажувального кінця (підвищення температури та зниження вологості), температура та вологість сировини, яка висушується під час процесу сушіння, змінюється по довжині барабана.

### 1.3. Способи підігріву теплоносіїв

У виробництвах широко розповсюджені теплові процеси – нагрівання й охолодження рідин і газів та конденсація парів, які здійснюються у теплообмінних апаратах – теплообмінниках.

Теплообмінниками називають апарати, призначені для передачі тепла від одних речовин до інших. Речовини, що беруть участь у процесі передачі тепла, називаються теплоносіями. Теплоносії, що мають температуру, вищу за середовище, яке нагрівається, і які віддають тепло, прийнято називати нагрівачими агентами. Теплоносії з температурою, нижчою за середовище, від якого вони приймають тепло, називають охолоджувачими агентами.

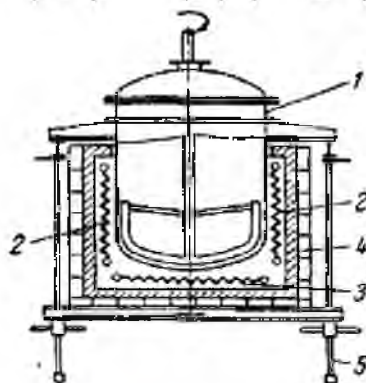
Як прямі джерела тепла у біотехнологічних виробництвах використовують переважно газу – продукти спалювання органічного пального – та електричний струм. Речовини, що отримують тепло від цих джерел і віддають його через стінку теплообмінника середовищу, яке нагрівається, називають проміжними теплоносіями. До числа поширених проміжних теплоносіїв (нагрівачих агентів) належать водяна пара і гаряча вода, іноді застосовують високотемпературні теплоносії – перегріту воду, мінеральні масла або органічні рідини.

Нагрівання електричним струмом. За допомогою електричного струму нагрівання можна проводити у дуже широкому діапазоні температур, точно підтримуючи та регулюючи температуру нагрівання відповідно до заданого

технологічного режиму. Електричні нагрівачі характеризуються простотою, компактністю і зручністю в обслуговуванні.

Залежно від способу перетворення електричної енергії у тепло розрізняють нагрівання електричними опорами (омічне нагрівання) – печі прямої дії; індукційне нагрівання; височастотне нагрівання.

Найпоширенішим способом є нагрівання електричним опором. Нагрів здійснюється у електричній печі опору (рис. 1.3)



1-обігріваний апарат;  
2- бокові секції нагрівальних елементів; 3- довга секція нагрівального елемента печі; 4- футерівка печі; 5- пристрій для опускання футерування

Рис 1.3 Електропіч опору.

Під час проходження струму через нагрівальні елементи 2 і 3, виконані у вигляді дрітних спіралей або стрічок. Нагрівальні елементи виготовляються переважно з хромо-залізо-алюмінієвих сплавів, що мають великий омічний опір і високу термостійкість (ніхроми або фехраль). Тепло, що виділяється під час проходження електричного струму через нагрівальні елементи, передається стінкам апарату 1. Піч футерують зсередини вогнестійкою кладкою 4 та покривають ззовні шаром теплової ізоляції, наприклад шаром шлакової вати. Для періодичного огляду електронагрівачів електропіч обладнана пристроєм для опускання 5. Температуру нагріву зазвичай регулюють підключенням (відключенням) окремих секцій нагрівальних елементів. Нагрівання електричними опорами дозволяє досягати температур 1000-1100 °С.

Розрахунок електронагрівачів полягає у визначенні потрібної потужності. Кількість тепла, яке необхідно підвести у процесі нагрівання електричним струмом, визначається з теплового балансу

$$Q_E + G \cdot c \cdot t_f = G \cdot c \cdot t_E + Q_A$$

де  $Q_E$  – кількість тепла, що виділяється в електронагрівальному елементі під час проходження електричного струму, кДж/год; усі інші позначення – як у рівнянні

$$\text{Звідси } Q_E = G \cdot c \cdot (t_E - t_f) + Q_A$$

Потужність електронагрівальних елементів (у кВт)  $N = Q_E / 3600$

Виходячи з розрахованої потужності, знаходять необхідну силу струму та опір нагрівача. За величиною опору підбирають матеріал, переріз і довжину провідників. Крім цього, за рівняннями теплопередачі має бути розрахована поверхня елементів, за якої задана кількість тепла буде передаватись середовищу, що нагрівається, без надмірного підвищення температури і перегорання нагрівача.

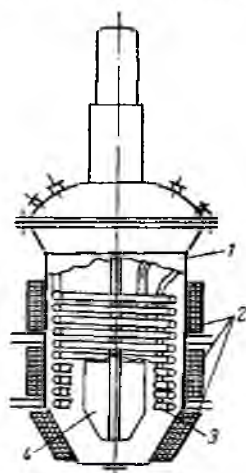
Спосіб високочастотного нагрівання використовують для нагрівання матеріалів, що не проводять електричного струму (діелектриків), тому часто його називають діелектричним. Принцип високочастотного нагрівання полягає у тому, що молекули матеріалу, поміщені у змінне електричне поле, починають коливатися з частотою поля і при цьому поляризуються. Коливальна енергія частинок витрачається на подолання тертя між молекулами діелектрика і перетворюється у тепло безпосередньо у масі матеріалу, що нагрівається. За рахунок використання цього тепла досягається рівномірне нагрівання матеріалу.

Кількість тепла, що виділяється, пропорційне до квадрату напруги та частоти струму. Зазвичай використовують частоту  $1 \cdot 10^6 - 100 \cdot 10^6$  Гц. Діелектричне нагрівання легко регулюється та може бути повністю автоматизоване, але к.к.д. нагрівальних установок відносно низький

**1.4 Застосування методу індукційного нагріву для створення гарячого теплоносія.**

Спосіб індукційного нагрівання базується на використанні теплового ефекту, що викликається вихоровими струмами Фуко, які виникають у товщині стінок

сталевому апарату під дією змінного електричного поля. Апарат з індукційним електронагрівом складає на трансформатор, первинною обмоткою якого слугують індукційні котушки, а магнітопроводом і вторинною обмоткою – стінки апарату (рис. 11.10). Змінне магнітне поле створюється за допомогою індукційних котушок 2, які кріпляться на апараті 1. Апарат обладнаний змієвиком 3 і мішалкою 4. Індукційне нагрівання забезпечує рівномірне обігрівання за температур до 400 °С і дозволяє точно підтримувати задану температуру. Робота таких обігрівачів може бути повністю автоматизована.



1 – апарат; 2 – індукційні котушки; 3 – паровий змієвик; 4 – мішалка

Рис. 1.4. Апарат із зовнішніми індукційними котушками:

Недоліком індукційного нагрівання є висока вартість. Тому для підвищення економічності спочатку продукт у апараті нагрівають насиченою водяною парою, що проходить через змієвик 3 до температури близько 180 °С, після чого температуру підвищують до заданого рівня за допомогою індукційного нагрівання.

Переваги індукційного нагрівання:

- Пожежо- та вибухобезпечність;
- Можливість нагрівання матеріалу до високої температури;
- Рівномірний розподіл температури по поверхні завантаження;
- Висока надійність;
- Високий ККД;
- Можливість роботи на струмах промислової частоти.



Будучи одним із найшвидших і екологічно чистих методів безконтактного нагріву струмопровідних матеріалів, індукційний нагрів може використовуватися в самих різних галузях промисловості - від термообробки до технічного обладнання. Метод індукційного нагріву також широко використовується в різних технологічних процесах, таких як машинобудування, сушіння різних матеріалів, сільське господарство.

Серед технічного обладнання для індукційного нагріву можна виділити теплоносіїні індукційні нагрівачі. На відміну від звичайних резистивних нагрівачів, які використовують дроти або електроди

Індукційні нагрівачі виготовляються з високотемпературних сплавів, таких як нікель-хромові сплави, вольфрамові сплави, і складаються з індукційних і провідних навантажень.

У порівнянні зі звичайними обігрівачами індукційна система нагріву теплоносія набагато надійніша, а сам індуктор також безпечніший. Це пояснюється тим, що при надійній ізоляції індукторів вихрові струми в навантаженні замикаються в діапазоні поширення магнітного поля, не створюючи умов для виникнення потенціалів на технічному обладнанні

Індукційні нагрівачі можуть працювати на промислових (50 Гц) і високочастотних (вище 50 Гц). У порівнянні з резистивними нагрівачами, індукційні нагрівачі забезпечують високу надійність і довший термін служби (до 100 000 годин) системи опалення.

Це можна пояснити відсутністю високотемпературних нагрівальних елементів і високотемпературне контактне з'єднання. Отже, завдяки високим енергетичним характеристикам індукційних нагрівачів, використання індукційних нагрівачів дозволяє істотно знизити експлуатаційні витрати, забезпечити високу ефективність, надійність і стабільність роботи, високий ступінь керованості процесу нагріву.

НУБІП України

## 2. ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ, ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА.

### 2.1. Обґрунтування конструкції індукційного теплогенератора

Термічна сушка сипучого матеріалу (піску) з використанням викопного палива вимагає в середньому 8-12 МДж енергії для випаровування 1 кг води, що еквівалентно енергії, вироволеної при спалюванні природного газу об'ємом близько 0,133 - 0,323 м<sup>3</sup> (в у грошовому еквіваленті це приблизно еквівалентно (3,5 - 6 грн.), в залежності від категорії споживача.

Використання індукційного теплогенератора в складі сушильного комплексу для забезпечення такої ж кількості вологи з піску відповідає приблизно 1,5-3,5 кВт/год, що відповідає приблизно такому ж грошовому еквіваленту. Однак сушарки, які спалюють викопне паливо для отримання гарячого теплоносія, є пожежонебезпечними та екологічно нешкідливими.

Враховуючи вищезазначене, необхідно є розробка електротехнічного комплексу, який є невід'ємною частиною технічного маршруту термічної обробки піску перед виготовленням бетону з використанням індукційних теплогенераторів, який відрізняється від наведених тим, що в ньому немає шкідливі фактори.

За попередніми розрахунками, використання електронно-технологічного комплексу для сушіння піску на базі індукційних теплогенераторів (наприклад, потужністю 35 кВт) дасть річний прибуток до 500 тис. АЕД/рік, при 5-міс. термін окупності, продуктивність установки до 5000 кг/год. Заміна викопного палива електричною енергією в процесі технології сушіння піску (що необхідно для виробництва теплоносіїв) може заощадити до 25% ресурсів і енергії, а з іншого боку, гарантує відповідність процесу сушіння екологічним нормам. Враховуючи, що електротехнічний комплекс для сушіння піску на основі індукційних теплогенераторів потребує значно менше часу для виходу на номінальний режим

роботи в порівнянні з установками на спалюванні органічного палива, це дозволяє збільшити виробництво та зменшити кількість енергії на виробництво.

При проектуванні індуктивної системи важливо встановити залежність між індуктивністю та модально-геометричними параметрами навантаження. Слід

також зазначити, що ефективність індукційного нагрівального пристрою в

основному залежить від величини його ККД. Ефективність пристрою

індукційного нагріву залежить від електрофізичних властивостей геометричних параметрів навантаження та індуктивності, а саме: довжини обмотки, кількості

витків обмотки, кількості шарів, конфігурації індукційних проводів, кількості

елементів у навантаженні тощо.

Отже, для забезпечення необхідного режиму сушіння піску (з урахуванням заданої продуктивності сушильного барабана) параметри циліндричного

індуктора з теплообмінним пристроєм представляють собою пучок вільно

розташованих сталевих труб малого діаметра (рис. 2.1), призначений для

повітряне опалення, потужністю 35 кВт, що відповідає вимогам мисливської ефективності та екологічності.

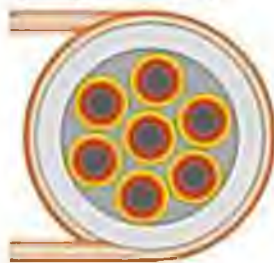


Рис. 2.1. Циліндричний індуктор із теплообмінним апаратом у вигляді пучка сталевих труб

Також з економічної точки зору рекомендується використовувати промислове джерело напруги - 380/220 В, частота змінного струму - 50/60 Гц

## 2.2. Рівняння електромагнітного поля для циліндричної системи координат

Розглянемо електромагнітне поле циліндричного індуктора з досить довгою феромагнітною трубкою. Індукційний нагрів на промислових частотах (50 Гц) характеризується відсутністю вільних зарядів у розглянутій системі середовища та допущенням квазістаціонарності поля. Це означає, що довжина електромагнітної хвилі досить велика в порівнянні з характерним розміром об'єкта, що нагрівається. У той же час відношення провідності матеріалу до частоти поля набагато більше 1, і ми можемо знехтувати струмом зміщення порівняно зі струмом провідності.

Далі ми розглянемо випадок, коли довжина індуктора набагато більше його діаметра ( $l \gg 3d_1$ ).

Електромагнітне поле циліндричного індуктора можна розрахувати за рівняннями Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad (2.1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (2.2)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (2.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \quad (2.4)$$

і матеріальних рівнянь:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad (2.5)$$

де  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{j}$  – вектор магнітної індукції, магнітна сила і електричне поле, густина струму,  $\sigma$ ,  $\mu$  – інтегра провідність магнітна проникність матеріалу труби, які в даній задачі вважаються постійними.



Крім того, для спрощення вихідних рівнянь, що описують електромагнітні процеси в провідних середовищах, враховуючи нелінійний характер проникності, ми будемо використовувати відому концепцію Л. Р. Неймана, а саме: проникність матеріалу приймається рівною об'єму вся феромагнітна середа постійна і розраховується за середнім значенням напруженості магнітного поля на поверхні навантаження.

Пропонується розв'язувати задачу електромагнітного поля для осесиметричної установки вектора магнітного потенціалу ( $A$ ), яка вводиться наступним рівнянням:

$$\operatorname{rot} \bar{A} = \bar{B}. \quad (2.6)$$

Загальновідомо, що описується склад електромагнітного поля ( $B, H, E, j$ )

Для осесиметричного випадку достатньо визначити лише азимутальний компонент вектора магнітного потенціалу  $A_z$ .

Щоб данна функція  $A$  Після визначення необхідно визначити його значення розбіжності. Ми продовжуватимемо приймати кулонівські калібрування, які відповідають таким умовам:

$$\operatorname{div} \bar{A} = 0, \quad (2.7)$$

$$\bar{E} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t}. \quad (2.8)$$

### 2.3 Розв'язок рівняння електромагнітного поля для індуктора, що завантажений феромагнітною трубою.

на рис. 2.2 Наведено обчислювальну модель циліндричного індуктора, на якій позначено чотири підобласті: область над індуктором, область під

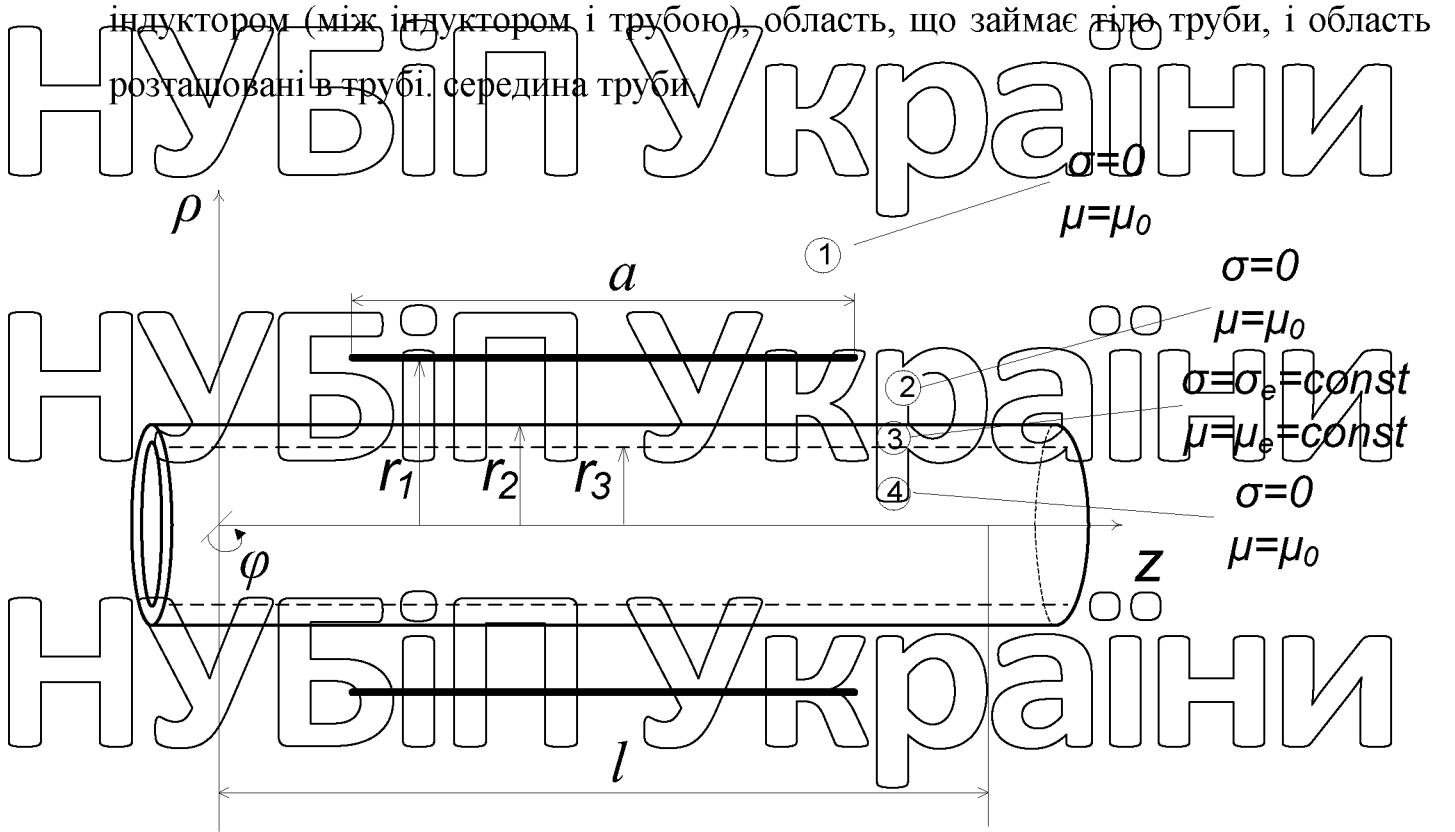


Рис. 2.2. Розрахункова модель циліндричного індуктора

Вважається, що струм індуктора зосереджений у нескінченно тонкому шарі струму, густина якого відповідає щільності дійсного струму

$$I_m = I_{0m} \frac{w}{a} \tag{2.9}$$

котрий міняється за гармонічним законом відповідно функції  $e^{i\omega t}$ . Це припущення є загальновизнаним. Це припущення є загальновизнаним. Це припущення є загальновизнаним [12, 13, 14]. В (2.11)  $w$  – кількість витків;  $a$  – довжина намотки індуктора,  $i = \sqrt{-1}$ .

На рис. 2. Площі позначені 1 - це повітряний простір поза індуктором  $\sigma = 0$  та  $\mu = \mu_0$ ; 2 – немагнітний зазор, зазвичай заповнений ізоляційним середовищем  $\sigma = 0$  та  $\mu = \mu_0$ ; 3 – електропровідна стіна трубки  $\sigma = \sigma_e = \text{const}$  та  $\mu = \mu_e = \text{const}$ ; 4 – немагнітний простір всередині трубки з  $\sigma = 0$  та  $\mu = \mu_0$ .

З урахуванням останнього рівняння та виразу (2.9) рівняння для визначення розподілу вектора магнітного потенціалу вздовж індуктора набуває вигляду:

$$\frac{\partial^2 A_{\varphi m}}{\partial \rho^2} + \frac{\partial^2 A_{\varphi m}}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_{\varphi m}}{\partial \rho} - \left( \frac{1}{\rho^2} + i\mu_j \sigma_j \omega \right) A_{\varphi} = 0, \quad (2.10)$$

Надалі не будемо писати показники степеня  $\rho$  і  $m$  вектора магнітного потенціалу, пам'ятайте, що мова йде про величину азимутальної складової вектора магнітного потенціалу.

З позначенням  $\bar{A} = \frac{2}{l} \int_0^l A \sin(pz) dz$  Останнє рівняння спрощується до:

$$\frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial \rho^2} + \frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial z^2} \sin(pz) dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{A}}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho^2} \bar{A} - i\mu \sigma \omega \bar{A} = 0.$$

Отже, після інтегрування змінної рівняння (2.10) зводиться до диференціального рівняння другого порядку сталої похідної:

$$\frac{d^2 \bar{A}}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\bar{A}}{d\rho} - \left( \frac{1}{\rho^2} + i\mu \sigma \omega + p^2 \right) \bar{A} = 0, \quad (2.11)$$

Для зон 1, 2, 4 він матиме вигляд:

$$\frac{d^2 \bar{A}}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\bar{A}}{d\rho} - \left( \frac{1}{\rho^2} + p^2 \right) \bar{A} = 0, \quad (2.12)$$

а для зони 3 – осьгакий:

$$\frac{d^2 \bar{A}}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\bar{A}}{d\rho} - \left( \eta^2 + \frac{1}{\rho^2} \right) \bar{A} = 0, \quad (2.13)$$

де  $\eta = \sqrt{p^2 + i\mu \sigma \omega}$ .

Розгляд межі векторного магнітного потенціалу на нескінченності ( $A_\varphi|_{\rho \rightarrow \infty} = 0$ ) а векторний магнітний потенціал дорівнює нулю на осі симетрії ( $A_\varphi|_{\rho=0} = 0$ ), Розв'язки для виділених ділянок мають вигляд.

$$\left. \begin{aligned} \bar{A}_1 &= C_2 K_1(p\rho), \quad \rho > r_1 \\ \bar{A}_2 &= C_3 I_1(p\rho) + C_4 K_1(p\rho), \quad r_1 > \rho > r_2 \\ \bar{A}_3 &= C_5 I_1(p\rho) + C_6 K_1(p\rho), \quad r_2 > \rho > r_3 \\ \bar{A}_4 &= C_7 I_1(p\rho), \quad \rho < r_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Подальший розв'язок цієї задачі полягає в знаходженні інтегральної постійної  $C_2 - C_7$ . Для цього необхідно записати 6 рівнянь, що випливають з граничних умов на межі, що обмежує виділену область: Рівність нормальних складових магнітної індукції  $B_\rho^- = B_\rho^+$ , Дотичні складові напруженості магнітного поля рівні на межі, де шару струму немає і стрибок напруженості магнітного поля на межі, де розташований шар струму  $H_z^+ - H_z^- = I_0$ .

$$\bar{I}_0 = \frac{I_m w}{a} \frac{4}{\rho l} \left[ \sin\left(\rho \frac{l}{2}\right) \cdot \sin\left(\rho \frac{a}{2}\right) \right], \quad (2.15)$$

### 2.3.1 Визначення сталих інтегрування

Додайте 6 рівнянь до границі на основі граничних умов  $\rho = r_1$ ,  $\rho = r_2$  і  $\rho = r_3$ , знаходимо  $C_2 - C_7$ .

Тут виконується умова рівності тангенціальних складових напруженості магнітного поля  $H_z^- = H_z^+$ , і умова рівності нормальних складових магнітної індукції  $B_\rho^- = B_\rho^+$ .



отже ми отримуємо систему з 6 рівнянь:

$$\begin{cases} C_2 K_1(pr_1) - C_3 I_1(pr_1) - C_4 K_1(pr_1) = 0 \\ C_2 K_0(pr_1) + C_3 I_0(pr_1) - C_4 K_0(pr_1) = \frac{I_0 \mu_0}{p} \\ C_3 I_1(pr_2) + C_4 K_1(pr_2) - C_5 I_1(\eta r_2) - C_6 K_1(\eta r_2) = 0 \\ C_3 I_0(pr_2) - C_4 K_0(pr_2) - \frac{\mu_0 \eta}{\mu_e p} C_5 I_0(\eta r_2) + \frac{\mu_0 \eta}{\mu_e p} C_6 K_0(\eta r_2) = 0 \\ C_5 I_1(\eta r_3) + C_6 K_1(\eta r_3) - C_7 I_1(pr_3) = 0 \\ \frac{\mu_0 \eta}{\mu_e p} C_5 I_0(\eta r_3) - \frac{\mu_0 \eta}{\mu_e p} C_6 K_0(\eta r_3) - C_7 I_0(pr_3) = 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

Після виконання деяких алгебраїчних перетворень ми отримуємо остаточну форму постійного інтеграла:

$$C_2 = -I_0 \mu_0 r_1 (I_1(pr_1) + MK_1(pr_1)),$$

$$C_3 = -I_0 \mu_0 r_1 K_1(pr_1),$$

$$C_4 = -I_0 \mu_0 r_1 K_1(pr_1) M_0,$$

$$C_5 = \frac{-I_0 \mu_0 r_1 K_1(pr_1) (I_1(pr_2) + MK_1(pr_2))}{(I_1(\eta r_2) - K_1(\eta r_2) Q)},$$

$$C_6 = \frac{I_0 \mu_0 r_1 K_1(pr_1) (I_1(pr_2) + MK_1(pr_2))}{I_1(\eta r_2) - K_1(\eta r_2)},$$

$$C_7 = \frac{\mu_0 \eta \left( \frac{-I_0 \mu_0 r_1 K_1(pr_1) (I_1(pr_2) + MK_1(pr_2))}{(I_1(\eta r_2) - K_1(\eta r_2) Q)} \right) I_0(\eta r_3)}{\mu_e p I_0(pr_3)} + \frac{\mu_0 \eta \left( \frac{I_0 \mu_0 r_1 K_1(pr_1) (I_1(pr_2) + MK_1(pr_2))}{I_1(\eta r_2) - K_1(\eta r_2)} \right) K_0(\eta r_3)}{\mu_e p I_0(pr_3)}$$

Підставивши значення  $C_2 - C_7$  ввійшовши в систему рівнянь (2.16), усі ті трансформаційні векторні магнітні потенціали, позначені на рисунку 2. 2.2 Округ буде мати форму:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \sum_{k=1}^{\infty} (-I_0 \mu_0 r_1 (I_1(p_k r_1) + M_k K_1(p_k r_1)) K_1(p_k \rho)) \sin(p_k z) \\
 A_2 &= \sum_{k=1}^{\infty} (-I_0 \mu_0 r_1 K_1(p_k r_1) (I_1(p_k r_2) + M_k K_1(p_k r_2))) \sin(p_k z) \\
 A_3 &= \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{-I_0 \mu_0 r_1 K_1(p_k r_1) (I_1(p_k r_2) + M_k K_1(p_k r_2))}{(I_1(\eta_k r_2) - K_1(\eta_k r_2) Q_k)} \right] I_1(\eta_k \rho) + \\
 &+ \frac{I_0 \mu_0 r_1 K_1(p_k r_1) (I_1(p_k r_2) + M_k K_1(p_k r_2))}{I_1(\eta_k r_2) - K_1(\eta_k r_2)} K_1(\eta_k \rho) \sin(p_k z) \\
 A_4 &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_0 \eta \left( \frac{-I_0 \mu_0 r_1 K_1(p_k r_1) (I_1(p_k r_2) + M_k K_1(p_k r_2))}{(I_1(\eta_k r_2) - K_1(\eta_k r_2) Q_k)} I_0(\eta_k r_3) \right.}{\mu_e p I_0(p r_3)} + \\
 &+ \left. \frac{I_0 \mu_0 r_1 K_1(p_k r_1) (I_1(p_k r_2) + M_k K_1(p_k r_2))}{I_1(\eta_k r_2) - K_1(\eta_k r_2)} K_0(\eta_k r_3) \right) I_1(p_k \rho) \sin(p_k z) \\
 &+ \frac{\mu_e p I_0(p r_3)}{\mu_e p I_0(p r_3)} I_1(p_k \rho) \sin(p_k z)
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

де  $Q_k$ ,  $N_k$ ,  $M_k$  — коефіцієнти, відповідно розраховані за формулою (2.36),

(2.39), (2.42), за умови заміни  $p \rightarrow p_k = (2k-1)\pi/l$ ,  $\eta \rightarrow \eta_k = \sqrt{p_k^2 + i\mu\sigma\omega}$ .

За отриманим векторним розподілом магнітного потенціалу можна отримати розподіл густини струму в зоні трубопроводу:

$$j_3 = -i\sigma\omega A_3. \tag{2.18}$$

Враховуючи поточне навантаження (2.25), ми отримуємо:

$$\begin{aligned}
 j_3 &= \frac{4I_m \nu \mu_0 r_1 \sigma \omega}{al} \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{(I_1(p_k r_2) + M_k K_1(p_k r_2))}{(I_1(\eta_k r_2) - K_1(\eta_k r_2) Q_k)} P_k (I_0(p_k r_1) - M_k K_0(p_k r_1)) \right) \times \\
 &\times (I_1(p_k \rho) - Q_k K_1(p_k \rho)) \sin\left(p_k \frac{l}{2}\right) \sin\left(p_k \frac{a}{2}\right) \sin(p_k z).
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

### 2.3.2 Визначення складових вектора магнітної індукції

З отриманих розв'язків азимутальних складових вектора магнітного потенціалу можна отримати всі компоненти електромагнітного поля. Тому в циліндричній системі координат вектор магнітної індукції визначається:

$$\vec{B} = \vec{i}_\rho \left( \frac{\partial A_z}{\partial \rho} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) + \vec{i}_\varphi \left( \frac{\partial A_\rho}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \right) + \vec{i}_z \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial(\rho A_\varphi)}{\partial \rho} - \frac{\partial A_\rho}{\partial \varphi} \right). \quad (2.20)$$

Враховуючи те, що всі похідні по координаті  $\varphi$  в осесиметричній формулі дорівнюють 0, маємо наведену складову:

$$B_z = \frac{\partial A_\varphi}{\partial \rho} + A_\varphi \quad \text{— по } z\text{-координаті,} \quad (2.21) \quad B_\varphi = 0 \quad \text{п } \varphi\text{-координаті,} \quad (2.22)$$

$$B_\rho = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \quad \text{— по } \rho\text{-координаті.} \quad (2.23)$$

З виразу (2.21) ми отримуємо рівняння магнітної індукції для  $z$ -компоненти, індукованої в кожній із чотирьох областей. Наведемо остаточний вираз для першої області:

$$\begin{aligned} B_{z1} &= \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{\infty} C_2 p_k \left( -K_0(p_k \rho) - \frac{1}{p_k \rho} K_1(p_k \rho) \right) + C_2 K_1(p_k \rho) \sin(p_k z) = \\ &= \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{\infty} \left( -C_2 p_k K_0(p_k \rho) - C_2 \frac{1}{r} K_1(p_k \rho) + C_2 \frac{1}{r} K_1(p_k \rho) \right) \sin(p_k z) = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} C_2 p_k K_0(p_k \rho) \sin(p_k z) = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} I_0 \mu_0 r_1 (I_1(p_k r_1) + M_k K_1(p_k r_1)) p_k K_0(p_k \rho) \sin(p_k z). \end{aligned}$$

Щоб визначити  $\rho$ -компоненту індукції магнітного поля, розв'язок азимутальної складової вектора магнітного потенціалу необхідно диференціювати вздовж  $z$ , маємо:

$$B_{\rho} = \sum_{k=1}^{\infty} p_k A \cos(p_k z). \quad (2.24)$$

Індукована складова вздовж координати  $\rho$  дає кінцевий вираз для першої області згідно з виразом (2.54):

$$B_{\rho 1} = \sum_{k=1}^{\infty} p_k (-I_0 \mu_0 r_1 K_1(p_k \rho) (I_1(p_k r_1) + M_k K_1(p_k r_1))) \cos(p_k z).$$

#### 2.4. Розрахунок енергетичних характеристик індукційного теплогенератора.

Отже, альтернативно розглядаючи опір, можна визначити енергетичну характеристику індуктивного пристрою – струм індуктора, який буде визначатися за такою формулою:

$$I_{ind} = \frac{U}{Z_m + r_{ob}} \quad (2.25)$$

Повна потужність індуктора складатиметься з активної та реактивної складових і визначається за наступною формулою:

$$S = UI^* \quad (2.26)$$

Активна потужність індуктора є дійсною частиною повної потужності і визначається:

$$P = \text{Re}(S). \quad (2.27)$$

Розрахувати реактивну потужність котушки індуктивності для визначення кількості та потужності необхідних компенсаційних пристроїв. Реактивна складова - це уявна частина повної потужності:

$$Q = \text{Im}(S). \quad (2.28)$$

При визначенні коефіцієнта потужності індуктивного пристрою необхідно враховувати його активну і реактивну потужність (повну потужність):



$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (2.29)$$

Електричний ККД установки визначається за формулою:

$$\eta = \frac{P - r_{об} \cdot I_{інд} \cdot I_{інд}^*}{P} \quad (2.30)$$

На підставі розрахунків визначено енергетичні та геометричні характеристики індукційного теплогенератора, який є невід'ємною частиною технологічної лінії термічної обробки піску перед виготовленням бетону,

продуктивністю до 1000 кг/год. Таким чином визначаються такі конструктивні характеристики циліндричних індукторів: довжина індуктора  $a = 0,8 \text{ м}$ , внутрішній діаметр індуктора  $d_{інд} = 0,33 \text{ м}$ , кількість витків обмотки  $w = 106$  (2.53

витка мідної шини (10x3 мм)). Індуктивне навантаження складається з 32 сталевих водогазопроводів (ГОСТ 3262-75) діаметром 33,5 мм і довжиною 1 м.

Використовуючи циліндричний індуктор такого діаметру, можна подати струм промислової частоти (50 Гц). Індукційна установка живиться від мережі 220/380 В (двофазне підключення).

Енергетичні характеристики: активна потужність  $P = 3.552 \times 10^4 \text{ кВт}$ , реактивна потужність  $Q = 4.765 \times 10^4 \text{ квар}$ , струм в індукторі  $I = \frac{U_{лн}}{1.41} = 152.846 \text{ А}$ .

З результатом втрати тепла від обмотки ККД установки становлять 97%.

Крім того, в програмному середовищі MathCad було проведено розрахунок компенсаційного пристрою (компенсації реактивної потужності), з якого визначеного струму, що вибирається з мережі:  $I = 91,6 \text{ А}$  (додаток А).

## 2.5. Чисельне моделювання процесу індукційного нагріву.

Для осесиметричного випадку індукційного нагріву електромагнітне поле буде розглядатися відносно величини векторного магнітного потенціалу згідно з наступним рівнянням:

$$\nabla(\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) \mathbf{A} + \nabla(\mu \nabla \mathbf{A}) - \sigma \nabla(\nabla \mathbf{A}) = \left( \frac{\sigma V_{loop}}{2\pi r} + J^e_{\varphi} \right), \quad \mathbf{A} = A_{\varphi} \mathbf{e}_{\varphi} \quad (2.31)$$

де  $\sigma$  – Питома провідність матеріалів,  $\text{См/м}$ ;  $\mu$  – повна магнітна проникність середовища ( $\mu = \mu_0 \mu_r$ );  $\varepsilon$  – абсолютна діелектрична проникність середовища ( $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ );  $\omega$  – обертлова частота,  $\text{рад/с}$ .

Чисельні розрахунки проводили методом скінченних елементів в обчислювальному середовищі Comsol. Обчислювальна модель побудована з використанням модуля AC/DC у розділі Quasi-Static, Magnetics у розділі Azimuthal Induced Current та модуля Vector Rotation з урахуванням гармонічного аналізу – Time Harmonic Analysis.

На етапі створення розрахункової моделі індукційного нагрівача необхідно задати геометричні параметри та електрофізичні властивості кожної області моделі.

Розрахункова модель (рисунок 2.3) складається із секції багат шарового індуктора довжиною 100 мм, навантаженої циліндричною феромагнітною заготовкою діаметром 33,5 мм.

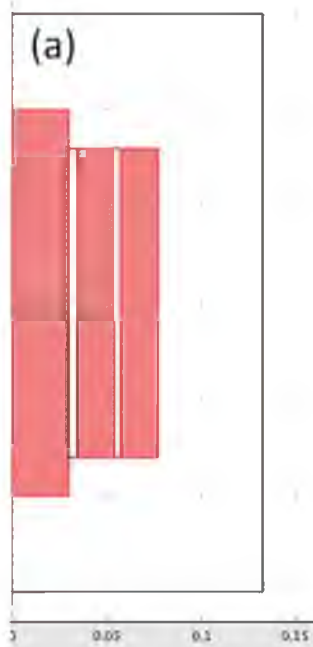


Рис. 2.3 Розрахункова модель циліндричного індуктора.

Для коректного розв'язання електромагнітної складової задачі на границях області задаються такі граничні умови:

- умова азимутальної симетрії відносно осі,  $r = 0$ ;
- умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях,  $A_\varphi = 0$ ;
- на всіх інших границях автоматично присвоюється умова неперервності (на границях індуктора і труби),  $\mathbf{n}(\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0$ ,

де  $\mathbf{H}$  – напруженість магнітного поля,  $A/m$ ;  $\mathbf{n}$  – вектор зовнішньої нормалі.

Розрахункова площа індуктора розбивається на достатню кількість кінцевих елементів. Скінченно-елементна сітка розрахункової області показана на рисунку 2.4. Для отримання більш точних результатів приблизно 10 кінцевих елементів розміщують у площі, яку займає корпус трубки, що відповідає глибині проникнення електромагнітних хвиль (рисунк 2.4). У нашому випадку, коли індуктор працює на промислових частотах  $f = 50 \text{ Hz}$  глибина проникнення електромагнітних хвиль у феромагнітних середовищах  $\delta = 7 \text{ мм}$ .

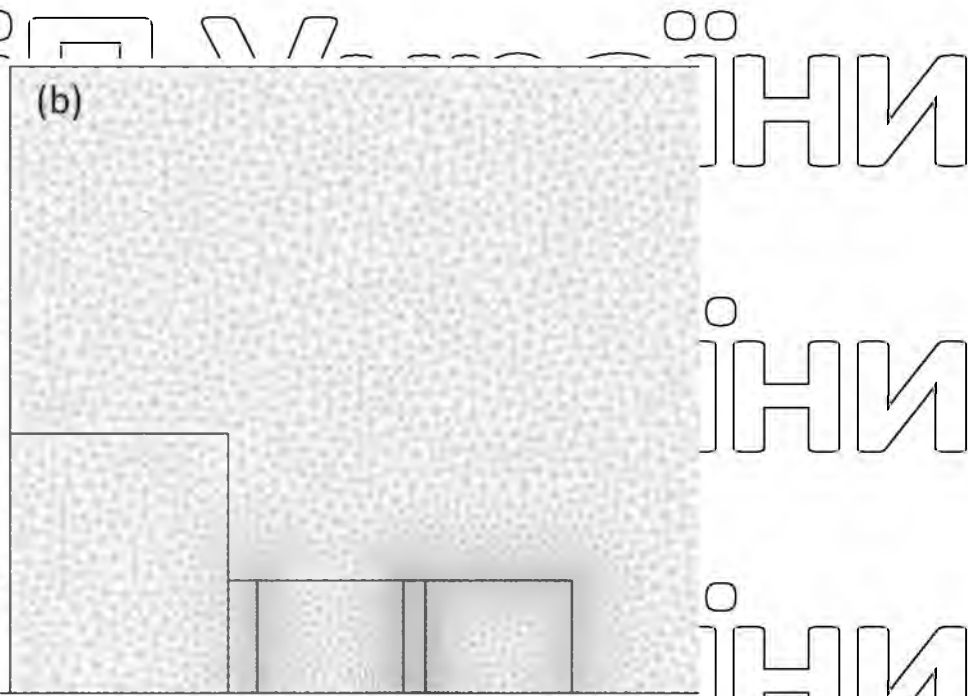


Рис. 2.4 Кінцево-елементна сітка на розрахунковій області індуктора

В результаті моделювання було отримано результати, щодо розподілу складових магнітної індукції (рис. 2.5.). Величина магнітної індукції в тілі труби відповідає

значенню, отриманому аналітичним методом розрахунку. Розбіжність склала близько 10%, що відповідає допустимому відхиленню при інженерних розрахунках.

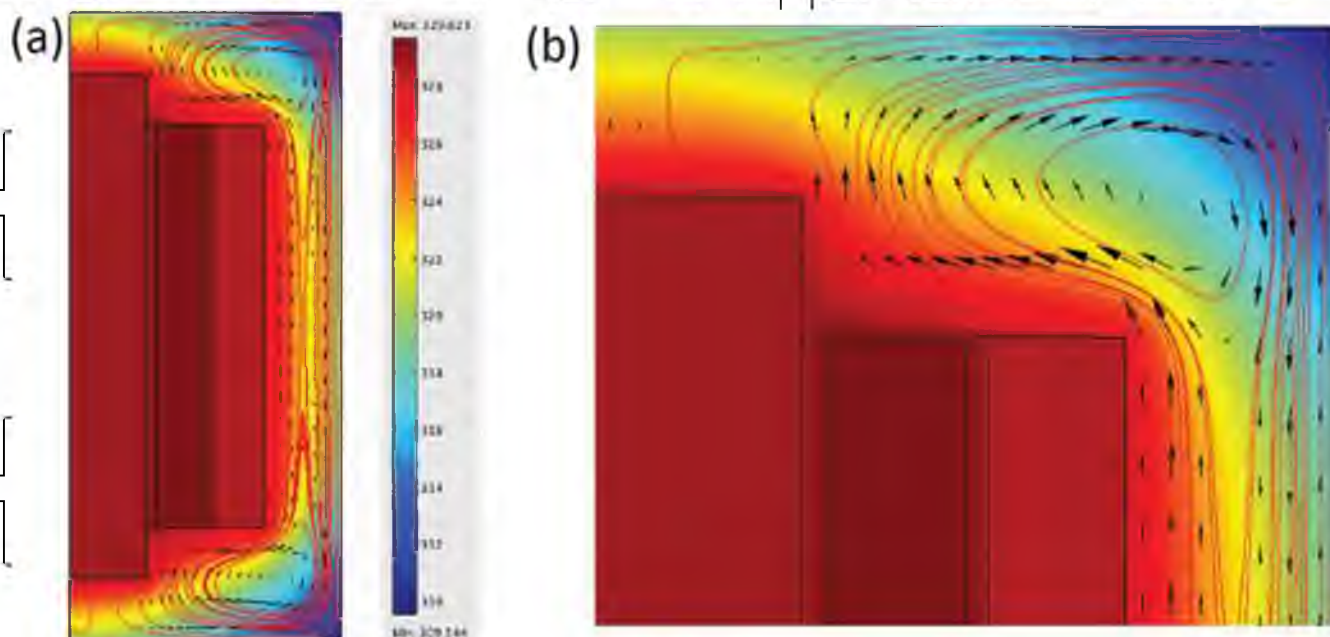


Рис. 2.5 Розподіл магнітної індукції

### 3. РОЗРАХУНОК СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА ДЛЯ СУШННЯ ПІСКУ.

#### 3.1. Визначення габаритних розмірів сушильного барабану.

Як правило, у барабанній сушарці рух охолоджуючої рідини та матеріалу, що сушиться, є прямим. Початкова температура теплоносія вибирається відповідно до властивостей і вологості матеріалу, що сушиться.

Залежно від характеристик матеріалу, що сушиться, всередині барабана встановлюють переливні пристрої різної конструкції (рис. 3.1), які повинні забезпечувати:

- оптимальне заповнення барабана матеріалом;
- максимальний контакт матеріалу з осушувачем;
- зробити матеріал максимально наближеним до суспензії, оскільки в цьому випадку можливі найкращі умови теплообміну;



– максимальна рівномірність розподілу матеріалу в поперечному перерізі барабана;

– Подібною же якомога менше матеріалу в барабані де подрібнення призводить до збільшення необоротного видалення пилю.

Для збільшення засипання матеріалу в барабан на виході матеріалу з барабана встановлюють опорний пристрій. У системі підйомної лопатки умови теплообміну кращі, ніж у випадку, коли матеріал заливається в ізоляційний блок проміжної системи. З іншого боку, для систем підйомних лопатей на даний момент лише невелика частина матеріалу вільно виливається з лопаті, переважно

в щербинь (у шарах на кордусі барабана), тому використання розподільних і проміжних систем виявилось більш ефективним.

При наявності системи дозування матеріал вільно висипається кілька разів при кожному обертанні і зачерпуванні барабана. При цьому матеріал відносно рівномірно розподіляється по всьому перерізу барабана. Іноді під час сушіння сипучих або липких матеріалів дві системи об'єднують в одному барабані – система підйому та лопатей встановлюється з гарячого кінця, а потім розподільна або проміжна система.

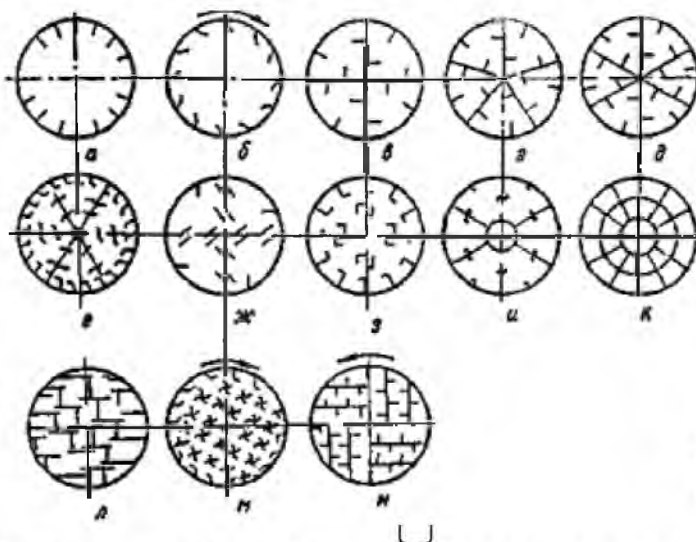


Рис. 3.1. Системи внутрішніх пристроїв сушильного барабану

Основною характеристикою продуктивності сушильного барабана є випаровування (напряга проти вологи) об'єму 1 м<sup>3</sup>. Величина випаровування залежить від природи та розміру маси матеріалу, початкової та кінцевої вологості,

часу, протягом якого матеріал залишається в барабані, і характеристик обладнання всередині барабана. Загальноприйнято вважати, що для одного і того ж матеріалу за однакових умов швидкість висихання та випаровування приблизно пропорційна відношенню поверхні частинки до її об'єму. Цим пояснюється зручність попереднього подрібнення висушуваного матеріалу.

З підвищенням початкової температури осушувача тепловіддача від газу до матеріалу збільшується. Тому необхідна найвища початкова температура газу, яка допускається властивостями матеріалу, що висушується, і знаходиться в межах температурної стійкості металу, з якого виготовлений барабан.

Спрощено розрахунок сушильної установки для визначення питомої витрати тепла і теплоносія, а також габаритних розмірів (довжини і діаметра). Слід зазначити, що в нашому випадку джерелом тепла є індукційний нагрівач, тому в даному випадку розрахунки пов'язані з визначенням складу та теплоти згоряння викопного палива, а також визначенням параметрів димового газу відпрацьованого палива в процес сушіння, який можна знехтувати. Це тому, що на виході з теплогенератора ми отримуємо гарячий теплоносій (гаряче повітря) без будь-яких домішок.

Відомий спосіб розрахунку сушильного барабана за коефіцієнтом об'єму

$\alpha_v$ , де об'єм барабана визначається за формулою:

$$V_0 = \frac{1,2 \cdot Q_0}{(3,6 \cdot \alpha_v \cdot \Delta t)}, \quad (3.1)$$

де 1,2 – коефіцієнт, що враховує заповнення барабана матеріалом;  $Q_0 = W \cdot q_c$  – теплота, затрачена на сушіння, кДж/год;

$\alpha_v$  – об'ємний коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>3</sup>·К);

$\Delta t$  – температурний напір, °С

У середині барабана відбувається складний теплообмін. Відповідно до рівняння (3.1) тепло передається до матеріалу, що висушується, шляхом конвекції та насткового виромінювання від зовнішньої поверхні матеріалу, розташованого на лопатях QII, потоком теплоносія QI, а також за рахунок теплопровідності, коли матеріал контактує з нагрітими металевими частинами барабана QIII (рис. 3.2.).

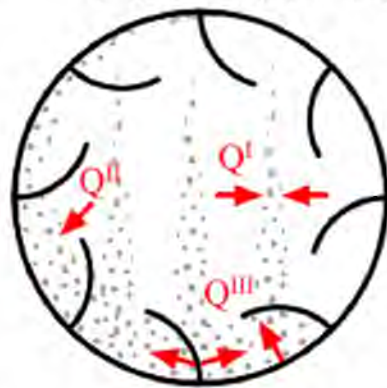


Рис. 3.2. Процес теплообміну в середині барабана

За допомогою конвекційного способу обігріву можна передати до 85-90% усього тепла.

Об'ємний коефіцієнт теплообміну буде визначатися як сума трьох

коефіцієнтів  $\alpha_v = \alpha_v^I + \alpha_v^{II} + \alpha_v^{III}$ . Кожен описується досить складним виразом. Для розрахунку об'ємного коефіцієнта теплообміну можна використати спрощений вираз:

$$\alpha_v = 16 \cdot (w_r \cdot \rho_r)^{0,9} \cdot n^{0,7} \cdot \beta^{0,54}, \quad (3.2)$$

де  $\rho_r$  - густина теплоносія (повітря), кг/м<sup>3</sup>;  $n$  - кількість обертів барабану, об/хв.;  $\beta$  - Оптимальне заповнення барабана матеріалом, %;  $w_r$  -

Швидкість руху теплоносія в секції барабана, м/с.

Швидкість руху теплоносія приймається на 1-2 м/с меншою за швидкість, з якою спливають частинки, щоб виключити винос дрібних частинок сухого матеріалу з барабана.

Температурний тиск визначається як середнє логарифмічне значення різниці температур теплоносія на вході і виході з стовбура:

$$\Delta t = \frac{(t_1 - \theta_0) - (t_2 - \theta_2)}{\ln \frac{(t_1 - \theta_0)}{(t_2 - \theta_2)}} \quad (3.3)$$

За спрощеним методом в об'єм барабана входить об'єм, необхідний для нагріву вологого матеріалу  $V_{пр}$ . Об'єм, необхідний для зволоженого термометра

температури та випаровування вологи  $V_{сущ}$ . Останній визначається коефіцієнтом

масопередачі  $\beta$  і Середня концентрація водяної пари  $\Delta C_{CP}, \text{м}^3/\text{м}^3$

$$V_{сущ} = \frac{W}{(3600 \cdot \beta_v \cdot \Delta C_{CP})} \quad (3.4)$$

Питома витрата тепла на сушку матеріалу на 1 кг вологи, що випаровується, становить:

$$q_c = q_{вип} + q_{наг} + q_{наск} \quad (3.5)$$

Питома витрата тепла на випаровування води - це корисна теплота, яка визначається за формулою:

$$q_{вип} = i_0 + e_{II} \cdot t_2 - c_w \cdot \theta_0 \quad (3.6)$$

Питома витрат тепла на нагрівання вологого матеріалу  $q_{наг}$  обчислення від

початкової температури до кінцевої температури за такою формулою:

$$q_{наг} = \frac{(c_m + c_w \cdot u_2) \cdot (\theta_2 - \theta_0)}{(u_0 - u_2)} \quad (3.7)$$

Питомий потік тепла в навколишнє середовище визначається за формулою.

$$q_{наск} = \frac{3,6 \cdot k \cdot F_6 \cdot \Delta t_{cp}}{W} \approx (0,1 + 0,12) \cdot (q_{вип} + q_{наг}), \quad (3.8)$$



де  $F_6$  – площа поверхні барабану,  $m^2$ ;  $k$  – коефіцієнт теплопередачі,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ ;  $\Delta t_{cp}$  – середня різниця температур теплоносія і навколишнього середовища,  $^{\circ}C$ .

При розрахунку конструктивних розмірів барабана, коли площа його поверхні ще невідома, ми припускаємо, що втрати тепла в навколишнє середовище становлять близько 10% тепла, витраченого на нагрівання матеріалу і випаровування води.

Масова витрата теплоносія в сушильному барабані розраховується за формулою:

$$L_r = \frac{G_{сух} \cdot (u_0 - u_2) \cdot 1000}{(d_2 - d_1)} \quad (3.9)$$

де  $d_2, d_1$  – вологість теплоносія на виході та вході в сушильний циліндр,  $кг/год$  відповідно.

Для визначення діаметра сушильного барабана скористаємося формулою:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4L_r}{3600 \cdot w_r \cdot \rho_r \cdot (1 - \beta)}} \quad (3.10)$$

Для сушильних барабанів однією з важливих характеристик є кількість води, яку можна випарувати за одиницю часу. Ця характеристика називається напругою сушильного барабана від води. Довжину барабана можна визначити, враховуючи час, необхідний для висихання матеріалу в барабані. Зазвичай барабан встановлюють під кутом до горизонталі ( $\alpha = 2 - 8^{\circ}$ ). Під час обертання барабана перемішуваний лопатями матеріал падає зверху і одночасно переміщується по барабану на певну відстань.

На основі запропонованої методики розрахунку сушильного барабана розроблено програму розрахунку основних характеристик сушильного барабана в програмному середовищі Microsoft Excel (рис. 3.3). При цьому визначаються

основні параметри теплоносія (повітря), а також визначається габаритний розмір сушильного барабана.

# НУБІП України

Табл. 3.1

## Програма розрахунку сушильного барабану

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ДАНІ									
2	1. Висушувальний матеріал			Опилки				W конечное	6	%
3	2. Диаметр частиц материала			0,65	мм			абс. сух. мат-ла	2,72	кДж/(кг*К)
4	3. Продуктивність			0,65	т/час			Насыпная пл-ть	230	кг/м³
5			4. Початковий вологовміст	65	%					
6	5. Поч. тем-ра сушильного агента			425	°C					
7	6. Давление атмосферного воздуха			760	мм.рт.ст					
8	7. Температура палива			20	°C					
9	8. Відносна вологість повітря			72	%					
10	9. Температура повітря			18	°C					
11	10. ККД			0,95						
12	11. Кінцева температура			110	°C					
13	12. Кінцева вологовміст матеріалу			6						
14	13. Тиск насиченої водяної пари					2063,484	Па			
15	14. Вологовміст атмосферного повітря, Хо					0,0092359	кг/кг сух. пов.			

### ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ РОЗМІРІВ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА

Середня температура в барабані,  $T_{cp}$

Щільність сушильного агента при середній температурі в барабані,  $\rho_{cp}$

Парціальний тиск водяної пари в газі на вході в сушарку,  $P_1$

Парціальний тиск водяної пари в газі на виході з сушарки,  $P_2$

Середній парціальний тиск водяної пари в газі,  $P$

Теплоємність сушильного агента в барабані при температурі,  $z$

Відносне заповнення барабана висушуваним матеріалом,  $\beta$

Частота обертання барабана,  $n$

Швидкість газів в барабані,  $\omega$

Коефіцієнт масопередачі

Тиск насичених парів над вологим матеріалом на початку сушіння,  $p^*1$

Тиск насичених парів над вологим матеріалом в кінці сушіння,  $p^*2$

$DR_{cp}$

$DX_{cp}$

Обсяг сушильного барабана без урахування обсягу апарату необхідного на прогрів матеріалу,  $V$

Витрата тепла на нагрівання матеріалу до температури  $t_{m1}$ ,  $Q_p$

Об'ємний коефіцієнт теплопередачі,  $K_v$

Температура суш. агента до до-ой він охолоне віддаючи тепло на нагрівання мат-а до  $t_{m1}$ ,  $t_x$

Середня різниця температур,  $\Delta t_{cp}$

# НУБІП України

# НУБІП України

H	Об'єм сушарки необхідний для прогріву вологого матеріалу, $V_p$	1
	Загальний обсяг сушильного барабана, $V$	
	За довідковими даними вибираємо характеристики барабанної сушарки	
	Обсяг сушильного простору, $m^3$	
	Довжина барабана, $m$	
	Товщина стінок зовнішнього циліндра, $mm$	
H	Внутрішній діаметр барабана, $m$	1
	Кількість секцій, шт	
	Частота обертання барабана, об/хв	
	Загальна маса, $t$	
	Споживана потужність двигуна, $kWt$	
	Об'ємний витрата вологого сушильного агента на виході з барабана, $V_v$	
H	Дійсна швидкість в барабані, $\omega d$	1
	Кількість матеріалу, що знаходиться в сушарці, $G_m$	
	Середній час перебування матеріалу в сушарці, $T$	
	Кут нахилу барабану, $\alpha^\circ$	
	Середня щільність сушильного агента при температурі 267,50	
	Середня в'язкість сушильного агента при температурі 267,50	
H	Критерій Архімеда, $A_r$	1
	Швидкість винесення	

Отже, за вихідними даними були визначені наступні параметри сушильного барабана.

### Параметри теплоносія (повітря)

Початкова температура теплоносія (на вході в барабан) 80-95 °C

Кінцева температура теплоносія (на виході з барабану) 50-55 °C

### Габарити сушильного барабану

Довжина барабану 5000 мм

Діаметр барабану 720

### 3.2. Визначення параметрів теплоносія в сушильних установках

Пісок, використовуваний для приготування сухих цементно-піщаних сумішей на будівельному майданчику, повинен мати вологість від 3 до 5 мас.%. Пісок з вологістю вище 5% попередньо просушують, оскільки в шлангу можуть утворитися пробки.

При виборі відповідного діапазону температур слід враховувати конструкцію барабана. У міру проходження піску через сушарку його вологість повинна змінюватися приблизно на 15-20%.

Температура і вологість сировини під час сушіння змінюються по довжині барабана в міру того, як пісок рухається від завантажувального кінця сушильного барабана до розвантажувального кінця сушильного барабана (температура підвищується, вологість знижується).

Температура і вологість осушувача також змінюються відповідно до довжини сушильного барабана (температура падає, волога переходить від піску до осушувача, а вміст води збільшується). Враховуючи відносно низький діапазон температур, передача тепла до поверхні висушуваного матеріалу відбувається в основному за рахунок конвекції і в деякій мірі за рахунок випромінювання. У таких сушарках зазвичай відбувається проточна схема теплообміну.

Для розрахунку процесу теплообміну розрахуємо процес сушіння піску в барабанній сушарці продуктивністю до 500 кг/год. Спочатку напишемо рівняння балансу маси води:

$$M_1 \frac{\omega_1}{100} + L_1 \frac{d_1}{1000} = M_2 \frac{\omega_2}{100} - L_2 \frac{d_2}{1000}, \quad (3.12)$$

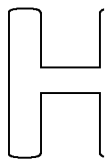
де  $M_1$ ,  $M_2$  – маса вологого піску на вході та виході з сушильного барабана, кг; , кг ;

$\omega_1$ ,  $\omega_2$  - Вологість піску на вході (20%) і виході (5%) сушильного барабана, % ;

$L_1$ ,  $L_2$  - Витрата осушувача відбувається на вході та виході з сушильного барабана відповідно.  $\frac{\text{кг пов}}{\text{год}}$ .

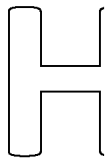
Вміст сухих речовин піску в процесі сушіння не змінюється і визначається за формулою:

$$M_c = M_1 \frac{100 - \omega_1}{100} = M_2 \frac{100 - \omega_2}{100}, \quad (3.13)$$



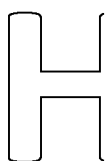
Маса піску на виході з сушарки становитиме:

$$M_2 = M_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} = 493 \text{ кг}, \quad (3.14)$$



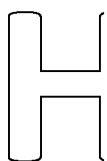
Кількість води, що випарувалася під час сушіння, дорівнює різниці маси піску до і після сушіння:

$$W = M_1 - M_2 = M_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} = 16 \text{ кг}, \quad (3.15)$$



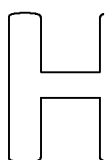
Питома витрата сухого сикативу (теплоносія) на 1 кг випареної вологи:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1} = 488 \text{ кг повітря / кг вип. вологи}, \quad (3.16)$$



де  $d_2$  і  $d_1$  – кінцева та початкова вологість теплоносія відповідно (визначається за картою Hd (рисунок 3.4)).

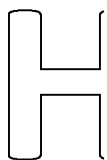
Вартість теплоносія визначається за формулою:



$$L_2 = l \cdot W = 3924 \text{ кг пов / год}, \quad (3.17)$$

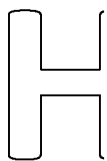
Об'ємна витрата теплоносія визначається:

$$V = \frac{L_2}{\rho} = 3600 \text{ м}^3 / \text{год}, \quad (3.18)$$



де  $\rho = 1.09 \text{ кг / м}^3$  – питома густина повітря при температурі 80 °С.

Теплова потужність додатково за формулою:



$$Q = C \cdot L_2 \cdot (t_2 - t_1) = 125 \text{ МДж}, \quad (3.19)$$

де  $C = 1000 \text{ Дж / кг} \cdot \text{К}$  – теплоємність сухого повітря;



$t_2$  і  $t_1$  – кінцева температура і початкова температура осушувача відповідно.

Активна потужність теплогенератора розраховується за формулою:

$$P = \frac{Q}{3600} = 35 \text{ кВт}, \tag{3.20}$$

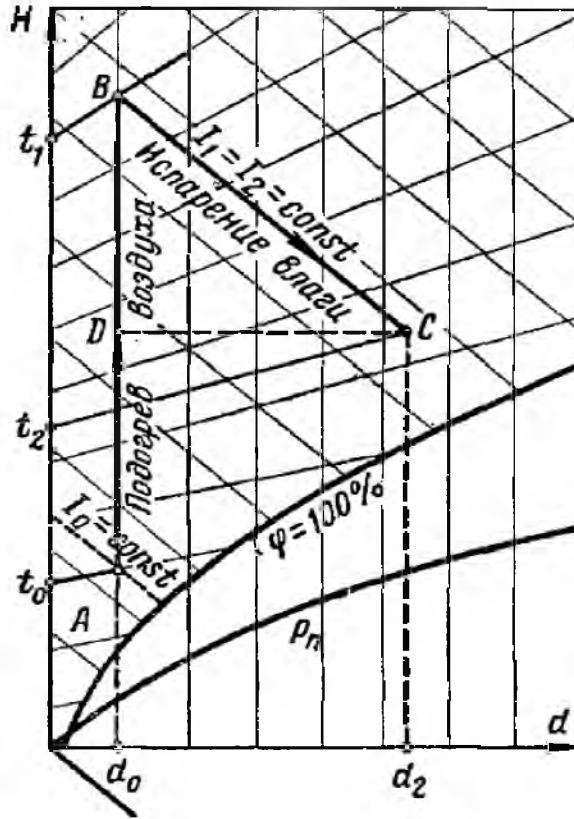


Рис. 3.4. Принципова схема сушарки та процесу в теоретичній сушарці на Hd-схемі.

## 4. ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СУШІННЯ ПІСКУ.

### 4.1. Розробка теплогенератора індукційного типу.

На підставі наведених вище розрахунків для індукційного теплогенератора і сушильного барабана (розділи 2V і 3) наведемо технічну характеристику електротехнічного комплексу для сушіння піску.

# НУБІП України

## Основні технічні характеристики

- напруга живлення ..... 380/220 В (+10% - 15%);
- частота напруги живлення ..... 50/60 Гц;

# НУБІП України

- вихідна потужність ..... до 100 кВт;
- коефіцієнт корисної дії ..... не менше 0,97;
- питома швидкість нагріву ..... (10-30) °С/г.сек.

# НУБІП України

- сушильний агент ..... чисте повітря;
- температура теплоносія на виході ..... 30 - 200 °С;

# НУБІП України

- середній термін роботи ..... не менше 15 років;
- ступінь захисту від ураження електричним струмом ..... IP54;
- умови експлуатації ..... У2;

# НУБІП України

Електротехнічні комплекси для сушіння піску на основі індукційних теплогенераторів (рис. 4.1) включають:

1. Повітродувка
2. Індукційний теплогенератор
3. Сушильний барабан
4. Витяжний вентилятор
5. Блок автоматики та управління

# НУБІП України

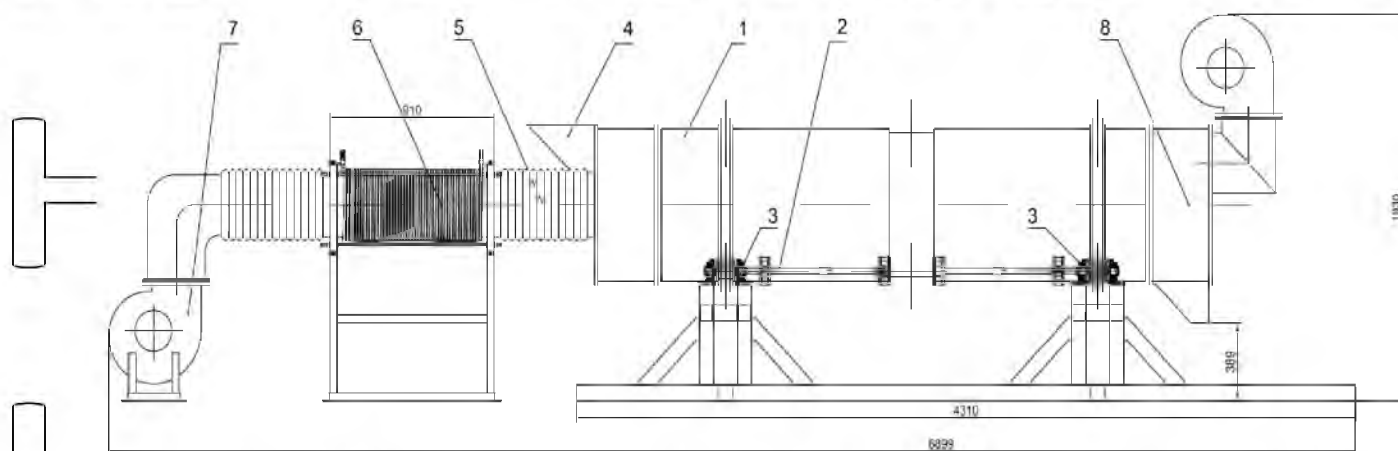


Рис. 4.1. Електротехнологічний комплекс для сушіння піску на базі теплогенератора індукційного типу.

Зразок конструкції індукційного теплогенератора (рисунок 4.2), який являє собою котушку, намотану на склопластиковий циліндр на мідну шину з ізоляцією (із застосуванням мідного дроту ПСД з відстанню для запобігання скручування). Діаметр 330 мм. У середині індуктора встановлюється вантаж (рис. 4.3), який складається з пучка незакріплених трубок, закріплених обома кінцями на трубній решетці, а склопластикові трубки розміщені симетрично відносно осі котушки внутрішній індуктор.

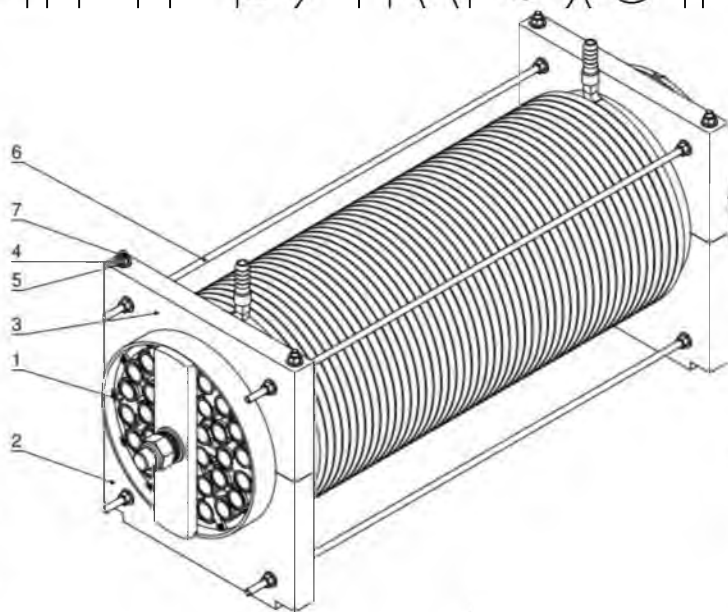


Рис. 4.2. Теплогенератор індукційного типу.

Промисловий вентилятор потужністю 1,5 кВт і продуктивністю 3600 м<sup>3</sup>/год подає в теплообмінник, розташований в корпусі індуктора, холодне повітря, яке нагрівається, проходячи по прямому каналу теплообмінника, проходячи між пучки феромагнітних труб і конвективний теплообмін.

Теплообмінник нагрівається за рахунок теплової дії вихрових струмів, викликаних у ньому електромагнітним полем обмотки індуктора. Щоб знизити ризик перегріву обмотки, подайте воду через неї.

Після виходу з індукційного теплогенератора нагріте повітря направляється в сушильний барабан для подальшого сушіння піску. Температуру на виході теплогенератора можна регулювати, змінюючи швидкість обертання промислового вентилятора і змінюючи значення напруги живлення обмотки.

Принципова електрична схема керування електротехнічним комплексом сушіння піску з використанням індукційного теплогенератора наведена на рис. 1.

43

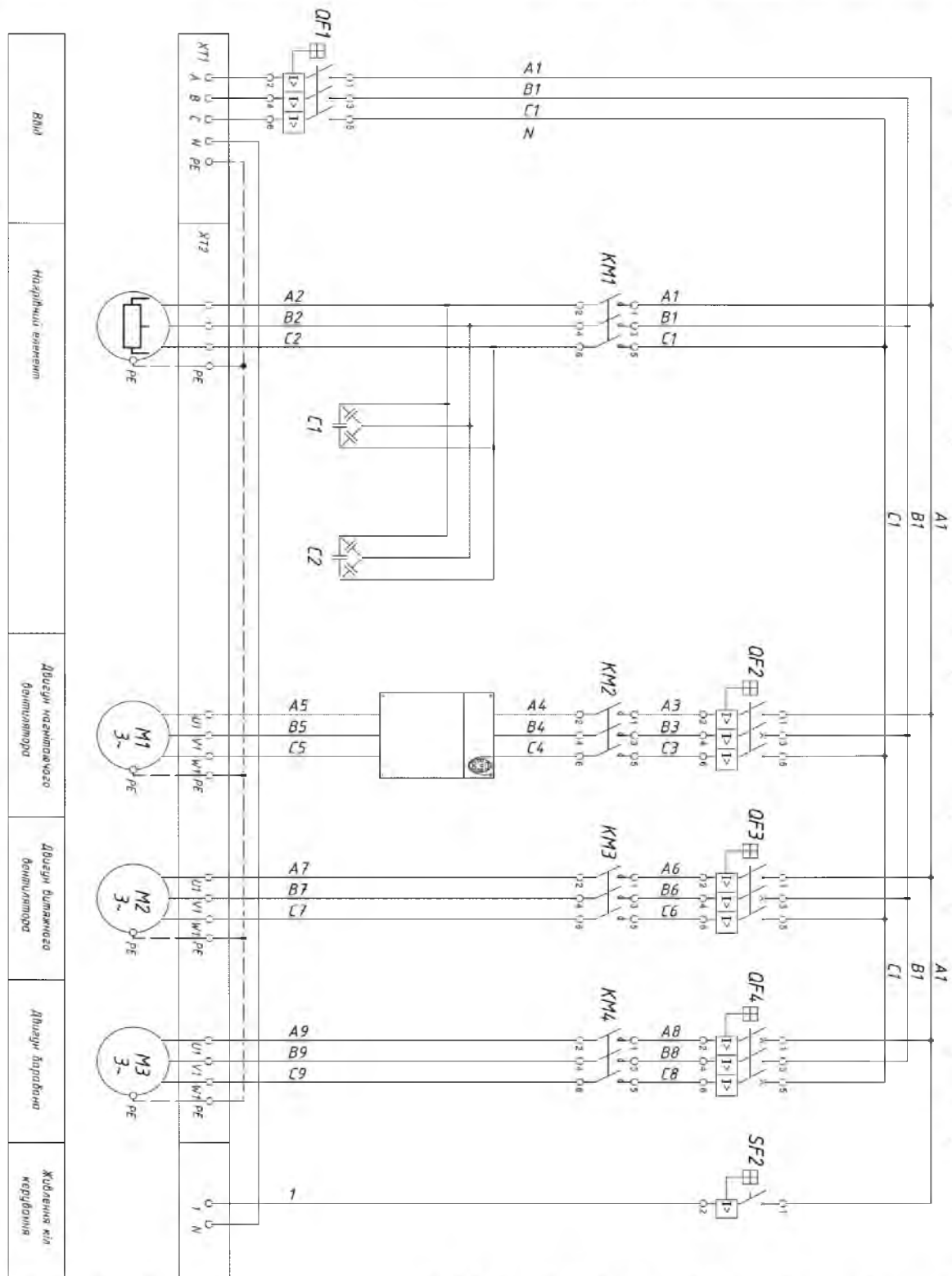


Рис. 4.3а. Принципова електрична схема керування електротехнологічним комплексом (силова)

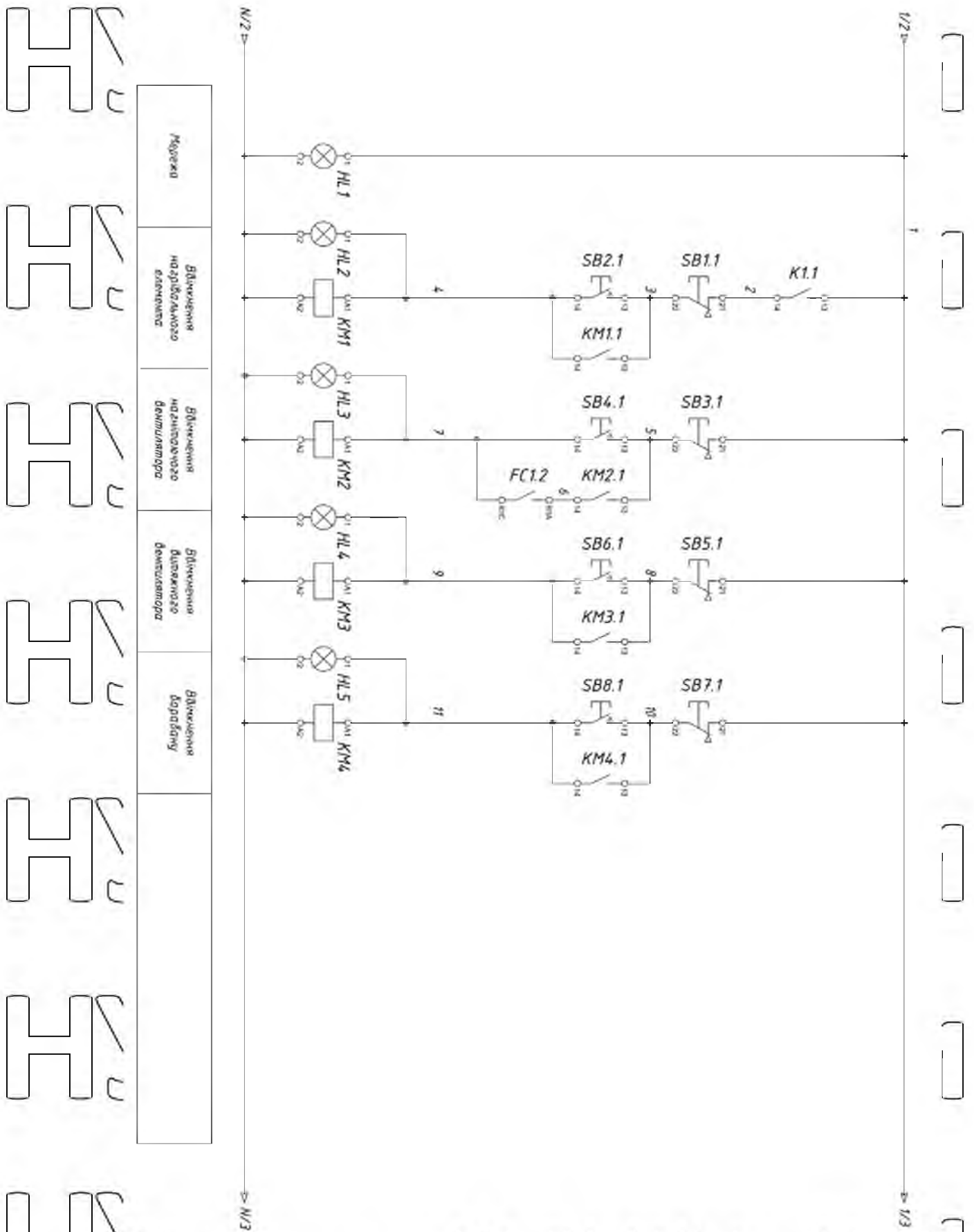


Рис. 4.36. Принципова електрична схема керування електротехнологічним комплексом (коло керування)



## 5. ОХОРОНА ПРАЦІ.

### 5.1. Загальні вимоги безпеки.

До обслуговування сушильних машин допускаються особи віком від 18 років, які попередньо пройшли медичний огляд, вступний інструктаж з ОП та інструктаж на робочому місці, ознайомилися з даною інструкцією та пройшли навчання безпечним методам роботи на виробництві. Перші 12-15 змін - під наглядом майстра зміни або кваліфікованого робітника зі стажем роботи не менше 3 років, мають допуск до самостійної роботи, мають атестацію на ТБ, мають ліцензію на ТБ.

Оператор сушильного комплексу працює під безпосереднім керівництвом бригадира (майстра), чітко і швидко виконуючи його вказівки.

Працівники повинні дотримуватись Правил внутрішнього трудового розпорядку підприємства, не вживати алкоголь, наркотичні та токсичні речовини. Куріння дозволяється тільки поза спеціально відведеними місцями, виробничими будівлями та спорудами. Працівники повинні розуміти і дотримуватися вимог безпеки при користуванні ліфтами. Піднімаючись по сходах, обов'язково тримайтеся за поручні. Дотримуйтеся запобіжних заходів на території заводу.

При обслуговуванні сушильного обладнання працівники можуть зазнавати впливу небезпечних і шкідливих факторів:

- підвищена запиленість повітря в робочій зоні;
- пересувний механізм приводу;
- підвищення напруги електричного поля та статичної електрики;
- підвищення температури поверхні обладнання;
- Можливість вибуху або пожежі.

Вибухи пилоповітряної суміші можуть виникнути при підвищеній запиленості повітря та наявності в приміщенні відкритого вогню або іншого джерела підвищеної температури (нагрівання підшипників, іскри).

Відповідно до галузевих норм безкоштовної видачі спецодягу та засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) оператори сушильних комплексів забезпечуються:

- костюми бавовняні з пілонепроникних тканин (ГОСТ 29057-91);
- бавовняний шолом з пілозахисної тканини;
- шкіряні черевики;
- Рукавички бавовняні;
- респіратор;
- У холодну пору року - одягати куртку поверх утеплюючих прокладок (ГОСТ 29335-92).

Працівники, які обслуговують сушарки, повинні знати і дотримуватися:

- поточний порядок;
- Правила пожежної безпеки;
- Правила особистої гігієни.

Працівники повинні:

- знати правила монтажу та експлуатації обладнання, що обслуговується;
- розуміти призначення кожного вузла та розділу;
- розуміти процес сушіння сипучих матеріалів, особливо піску;
- режими роботи апаратури керування, припливно-витяжної вентиляції, теплоносія, автоматики та роботи блокуючих пристроїв;

Правильне використання робочого одягу та засобів індивідуального захисту;

- знати, як надати першу медичну допомогу при нещасних випадках;
- Відповідальний за роботу на своїй території.

Місця сушарки та обладнання, розташоване на цих ділянках, повинні постійно підтримуватися в чистоті та придатні для обслуговування.

- Забороняється зберігати в сушильні сторонні предмети, майно, легкозаймисті та легкозаймисті рідини, крім мастила. Запас мастила не повинен перевищувати добової потреби.

- Очищення сушильної камери необхідно проводити не рідше двох разів за зміну під час її роботи. Зібране сміття, сміття, пилю необхідно перенести з приміщення у спеціально відведене для цього місце.

- Перед кожною зміною обслуговуючий персонал повинен підготувати все обладнання та топку сушарок, у справний і чистий стан, з необхідним запасом сировини та здати їх черговій зміні. Сушарка переходить в роботу без зупинки роботи обладнання і приймає встановлений технологічний процес.

Вхід стороннім особам до сушарки та складу сировини категорично заборонено, а на вході вивішені оголошення.

Працівники зобов'язані повідомляти про кожний нещасний випадок начальника зміни або начальника зміни і, по можливості, підтримувати обстановку на робочому місці та обладнання в такому стані, в якому вони були на момент нещасного випадку, а також життя інших людей, не спричиняючи нещасного випадку без загрози здоров'ю.

Працівники несуть відповідальність за порушення вимог цієї Директиви в порядку, встановленому правилами внутрішнього трудового розпорядку підприємства та чинним законодавством.

## 5.2. Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед початком роботи працівники повинні одягнути робочий одяг, ретельно його заправити, не допускати звисання кінців, приборати волосся під головним убором.

Ознайомтеся з чейнджером і зрозумійте всю технологію, транспорт, роботу всмоктувального обладнання, несправності, виявлені в процесі експлуатації, і що зроблено для їх усунення.

Провести зовнішній огляд приміщень та обладнання.

Перед початком роботи перевірте:

- наявність огорожі та її надійність на місці встановлення;
- придатність заземлювального пристрою;
- функціонування ідеальної мережі;

- зовнішній огляд наявності електрообладнання та електропроводки, сигнальних пристроїв;

- Перевірте, чи обслуговується обладнання.

У разі несправності необхідно повідомити керівника загону та виконувати його вказівки.

Перед введенням сушарки в експлуатацію обслуговуючий персонал повинен перевірити теплогенератор, теплообмінник, витяжний механізм, дифузор, повітропровід, вентилятор, підйомно-транспортне та інше обладнання сушарки для видалення різного роду предметів і пилу, а також перевірити:

- Наявність повних ящиків і напів ящиків;

- придатність вантажно-розвантажувальних механізмів;

- умови роботи та готовність умивальника, конвеєрних стрічок та інших транспортних механізмів;

- вал вентилятора легко обертається, немає аномального шуму та вібрації під час роботи;

- наявність мастила в підшипниках і наявність мастила в коробці передач;

- натяг приводного ременя;

- щільність з'єднання повітроводів, дифузорів і прилягання ревізійних люків;

- ремонтпридатність всмоктувального обладнання;

- наявність та ремонтпридатність основних засобів пожежогашіння, пожежної сигналізації;

- наявність та справний стан огорож, заземлення електрообладнання.

Перед запуском всі механізми сушарки слід перевірити на холостому ходу. Недоліки, виявлені під час огляду, необхідно усунути.

Перед запуском того чи іншого пристрою сушарки необхідно подати попереджувальний звуковий сигнал або через динамік.

### 5.3. Вимоги безпеки під час роботи

Запуск сушильного комплексу повинен проводитися в присутності відповідального за цех (на місці до початку сезону сушіння або після тривалої зупинки після технічного обслуговування).

При запуску стаціонарної сушарки працівники повинні включити транспорт, засипати в сушарку пісок, включити вентилятор, а потім включити теплогенератор. Перед запуском теплогенератора перевірити стан обмоток (електричну міцність ізоляції).

Не запускайте сушарку, доки бункер не заповниться піском.

При обслуговуванні сушарки необхідно стежити за справністю обладнання, огорожень, решіток та інших запобіжних пристроїв, що забезпечують безпечні умови праці.

Усі повітропроводи осушувача, дифузори та вентилятори, розташовані в межах досяжності обслуговуючого персоналу, повинні бути покриті ізоляцією.

Температура зовнішньої поверхні не повинна понад 45 °С.

Під час роботи комплексу двері витяжної камери шахти сушарки повинні бути щільно закриті для запобігання потраплянню відпрацьованого теплоносія в робочу камеру.

Вийняти пробу піску з гарячої камери сушарки можна тільки за допомогою спеціальної ложечки з дерев'яною ручкою.



## ВИСНОВКИ

# НУБІП України

В ході виконання магістерської роботи були досягнуті наступні результати:

1. Розроблено методику розрахунку електромагнітного поля індукційного нагрівального пристрою з використанням теплообмінника у вигляді вільно розташованого пучка сталевих труб малого діаметра (33,5 мм).

2. На основі розробленої методики в програмному середовищі MathCad написана програма для розрахунку енергетичних характеристик індукційного теплогенератора, навантаженого дискретними пучками сталевих труб. Результатом програмного розрахунку є компонентний розподіл електромагнітного та теплового полів в індукторі

3. Індукційний нагрів пучка вільно розміщених сталевих труб для отримання чисельного моделювання розподілу складових електромагнітного поля, на основі розрахунку циліндричних індукторів і сушильних барабанів розроблено конструкторську документацію електро- АТ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ЦЕМЕНТ».

4. За результатами розрахунків і моделювання, а також виходячи з умов забезпечення необхідної продуктивності сушильного барабана розроблено сушильний комплекс, що включає індукційну установку, що складається з 32 сталевих водогазопроводів (ГОСТ 3262-75), діаметром 33,5 мм і довжиною 1 м. Індуктор складається з 106 витків мідної шини довжиною 0,8 м (10x3 мм), намотаної на бакелітовий циліндр діаметром 330 мм. Напруга живлення індуктивної установки 220/380 В. При такій геометрії активна потужність індуктора становить 35 кВт, компенсований струм індуктора - 92 А, ККД індукторної установки - 97%.

5. Для забезпечення необхідних умов сушіння піску сушильний барабан повинен мати такі розміри: довжина барабана мм, діаметр барабана м.м

# НУБІП України

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про енергетику». В редакції від 1 липня 2010 року №2388-VI.

2. Закон України «Про енергозбереження». (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2006, №15, ст.126).

3. Закон України №555-IV від 20.02.2003 р. «Про альтернативні джерела енергії».

4. ДБН А.2.2. – 1 – 2003 Проектування. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд.

5. ДБН А.2.2. – 3 – 2012 Склад та зміст проектної документації.

6. ДБН В.2.5. – 23 – 2003. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Державний комітет України з будівництва та архітектури. – К.: 2004. – 128 с.

7. ДБН В.2.5-27-2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.

8. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ), 2017.

9. ДНАОН 0.00.–1.32–01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних електроустановок. – К.: ПП «Фірма Грамна», 2001. – 117с.

10. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС).

Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 91 від 13.02.2012 та № 905 від 16.11.2012) Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 2 березня 2012 р. за № 350/20663.

11. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. (Затверджено наказом Держнаглядохоронпраці від 09.01.98 №4. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10.02.1998 за №93/2533). – К.: Основа, 1998. – 380 с.

12. Правила користування електричною енергією. Затверджено постановою НКРЕ/ 31.07.1996 №28 у редакції постанови НКРЕ від 17.10.2005 №910. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 18 листопада 2005 р. за №1399/11679.

13. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования / сельскохозяйственных предприятий / Госагропром СССР. - М.: ВО Агропромиздат, 1987. - 191 с.

14. Іноземцев Г.Б. Дипломне проектування енергетичних та електротехнічних систем в агропромисловому комплексі : навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів. 2-е вид., перероб. і доп. / Г.Б.Іноземцев, В.В.Козирський, М.Т.Лут, І.П.Радько, О.Ю. Сийявський. – К.: Вид – во ТОВ «АграрМедіаГруп», 2014. – 526 с.

15. Лут М.Т. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК.: Підручник для студентів ВНЗ / М.Т.Лут, О.В.Мірошник, І.М.Трунова. – Харків, Факт, 2008. – 438 с.

16. Лут М.Т. Безпека праці в сільських електроустановках: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / М.Т.Лут, І.П.Радько, В.Г.Тракай, А.І.Чміль. – К.: Вид – во ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2012. – 430 с.

17. Довідник сільського електрика. 3-є вид., перероб. і доп. / В.С.Олійник, В.С.Гайдук, В.Ф.Пончар та ін.; За ред. В.С.Олійника – К.: Урожай, 1989. – 264с.

18. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. — Т.3. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. - 728 с.

19. Zablodskiy N., V. Plugin. 3D magnetic field distribution in a screw double-stator induction motor // Proceedings XVI International Workshop „Computational Problems of Electrical Engineering „CPEE 2015“, –Lviv. – 2015. – pp. 239–241.

(SCOPUS)

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

21. Щерба, М.А. Математическое моделирование сильных электрических полей в нелинейных и неоднородных диэлектрических средах // *Праці Інституту електродинаміки національної академії наук України*. – Київ, 2015. – Вип. 40. – С. 115–119.

22. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств // *Технічна електродинаміка*. – 2015. – №2. – С. 3–15.

23. 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.

24. Кувалдин А. Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали / А. Б. Кувалдин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.

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

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

27. Слухоцкий А. Е. Индукторы для индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин. – Л., Энергия, 1974. – 264 с.

28. 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.

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

30. Laura A.M. D'Angelo, Herbert De Gersen "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 (SCOPUS)

31. Березюк А. О. Енергетичні характеристики і електричні параметри індукторів для нагріву пучка ферромагнітних труб / А. О. Березюк,

І. П. Кондратенко, А. П. Ращепкін // Вісник Кременчуцького держ. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 3 (62), ч. 2. – С. 56–60.

32. Кондратенко І. П. Дослідження розподілу температури в завантаженні циліндричного індуктора / І. П. Кондратенко, В. П. Лисенко, Д. С. Комарчук // Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК» – К., 2012. – № 184. – Ч. 1. – С. 74–82.

33. Беляев Н.М. Основы теплопередачи. - Киев: Выща школа, 1989. - 344с.

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

35. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г. И. Бабат. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 522 с.

36. Шамов А. Н. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок / А. Н. Шамов, В.А. Бодажков. – Л.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

37. Геминтери В. И. Методы оптимального проектирования / В. И. Геминтери, Б. М. Коган. – [Текст]. – М.: Энергия, 1980. – 160 с.

38. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков, К. А. Лурье. – [Текст]. – М.: Наука, 1967. – 599 с.

39. Лыков А. В. Тепломассообмен / А. В. Лыков. – [Текст]. – М.: Энергия, 1978. – 480 с. – (Справочник).

40. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергия, 1975.- 487с.

НУБІП України

НУБІП України



# НУБІП України

Додаток А

Компенсація реактивної Потужності

$$r^2 := \frac{P}{I^2} = 1.521 \quad \text{опір обмотки}$$

$$X_L := \frac{Q}{I^2} = 2.04$$

# НУБІП України

$$X_C := \frac{r^2 + X_L^2}{X_L} = 3.173$$

$$C := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} = 1.003 \times 10^{-3} \quad \Phi \quad \text{ємність батареї}$$

# НУБІП України

$$Z_C := \frac{-i}{\omega \cdot C} = -3.175i$$

$$Z_L := r^2 + i \cdot X_L = 1.521 + 2.04i$$

$$Z := \frac{Z_C \cdot Z_L}{Z_C + Z_L} = 4.256 + 2.894i \times 10^{-3}$$

# НУБІП України

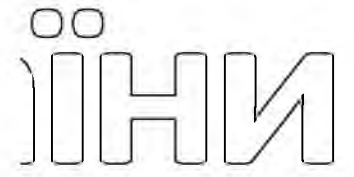
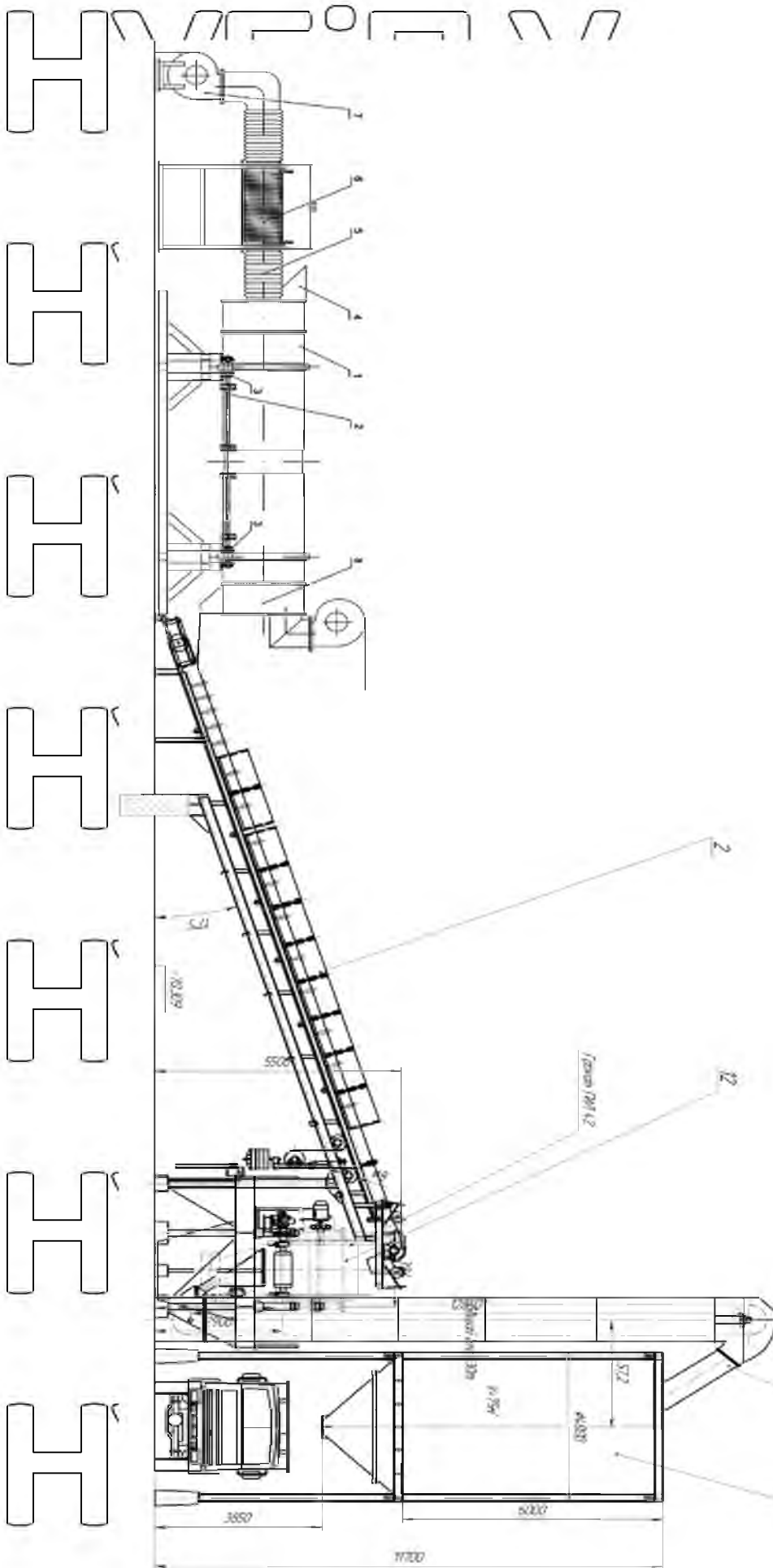
$$I_{\text{мер}} := \frac{U}{|Z|} = 91.632 \text{ A} \quad \text{струм в мережі після компенсації}$$

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

Додаток Б



5

В