

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики  
(інститут)

Електротехнічний факультет  
(факультет)

Кафедра електроенергетики  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**кваліфікаційної роботи ступеня магістра**  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

Студента Тарасюка Андрія Віталійовича  
(ПІБ)

академічної групи 141М-22-1  
(шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)

спеціалізації<sup>1</sup> \_\_\_\_\_

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(офіційна назва)

на тему Розробка електричної частини електромагнітної обробки вугілля  
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
Кваліфікаційної роботи	Чемеринський М.С			
Розділів:				
Розділ 1	Чемеринський М.С			
Розділ 2	Чемеринський М.С			
Розділ 3	Тимошенко Л.В.			
Рецензент				
Нормоконтролер	Олішевський Г.С.			

Дніпро  
2023

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри  
Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка  
(повна назва кафедри)

\_\_\_\_\_ Папаїка Ю.А.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеня магістра**  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту Тарасюку А. В. академічної групи 141М-22-1  
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
спеціалізації<sup>1</sup> \_\_\_\_\_

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(офіційна назва)

на тему Розробка електричної частини електромагнітної обробки вугілля,  
затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

Розділ	Зміст	Термін виконання
Вступна частина	Опис існуючих технологій обробки вугілля із застосуванням електричної енергії	
Основна частина	Розрахунок установки електромагнітної обробки вугілля	
Економічна частина	Капітальні та експлуатаційні витрати	

Завдання видано \_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

Чемеринський М.С.  
(прізвище, ініціали)

Дата видачі \_\_\_\_\_

Дата подання до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис студента)

Тарасюк А.В.  
(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 60 с., 3 рис., 6 табл., 3 додатки, 18 джерел, презентація з 13 слайдів.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА УСТАНОВКА, МАГНЕТРОН, ВУГІЛЛЯ, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ,

*Об'єкт детальної розробки:* електромагнітна обробка вугілля.

*Мета роботи:* розробка установки електромагнітної обробки вугілля.

Було проведено аналіз питання актуальності та доцільності використання електромагнітної обробки вугілля. Розглянуто загальну характеристику НВЧ-устаткування та застосування НВЧ технології в промисловості.

Розроблено установку електромагнітної обробки, що дозволяє обробляти вугілля шляхом НВЧ нагрівання для подальшого його використання. Вугілля розташовано у хвилеводі вздовж середини широкої стінки, паралельно вузькій, тобто у максимумі електричного поля. Проведено розрахунок НВЧ-установки конвеєрного типу, за допомогою якого встановлено зв'язок основних параметрів, що визначають технологічний процес. Проведено порівняльну характеристику різних видів обробки матеріалу.

Економічне обґрунтування проекту виконано шляхом розрахунків капітальних і експлуатаційних витрат на реалізацію проекту, а також визначені фонд заробітної плати персоналу і термін окупності проектного рішення.

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Вступна частина.....	7
1.1 Характеристика НВЧ-установок.....	7
1.2 Застосування НВЧ технології в промисловості.....	12
1.3 Методи розрахунку НВЧ пристроїв для нагрівання.....	15
1.4 Переваги та проблеми мікрохвильового нагріву.....	17
2 Основна частина .....	19
2.1 Механізм взаємодії мікрохвильового випромінювання з діелектричними середовищами.....	19
2.2 Вибір джерела НВЧ енергії.....	23
2.3 Розрахунок НВЧ пристрою для термообробки.....	27
3 Економічна частина.....	42
3.1 Розрахунок капітальних інвестицій.....	43
3.2 Розрахунок експлуатаційних втрат.....	46
3.3 Визначення річної економії від впровадження науково-технічного рішення.....	51
3.4 Визначення та аналіз показників економічної ефективності.....	52
3.5 Висновки за розділом .....	57
Висновки.....	55
Перелік джерел посилання.....	56
Додаток А Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи.....	58
Додаток Г Відгук керівника кваліфікаційної роботи.....	59
Додаток Д Відгуки керівників розділів.....	60

## ВСТУП

Технологічна обробка різних матеріалів майже завжди включає у собі термообробку і, в першу чергу, нагрівання або сушіння. При традиційних способах нагрівання та сушіння (конвективному, радіаційному та контактному) відбувається поверхнєве нагрівання об'єкта. Якщо теплопровідність об'єкта низька, що має місце у діелектриків, то термообробка об'єкта відбувається повільно, з локальним перегрівом поверхні нагріву. Можливе підгоряння цієї поверхні, виникнення внутрішніх механічних напруги. Все це, зрештою, може призвести до зниження якості матеріалу чи його браку.

Для швидкісної термообробки матеріалу з високою провідністю використовують електричний струм промислової частоти. Цей вид нагріву дає позитивний результат тільки у випадках, коли не відбувається підвищення температури в місцях контакту електрода з об'єктом, що нагрівається. Вплив цього контакту усувається застосуванням струмів високої частоти. В цьому випадку об'єкт, що нагрівається, поміщають між пластинами конденсатора. Струми, які у об'єкті, викликають у ньому виділення тепла.

Високочастотним, діелектричним або надвисокочастотним (НВЧ) називається нагрівання об'єкта енергією електромагнітного поля надвисоких частот. Електромагнітна хвиля, проникаючи в матеріал, взаємодіє з зарядженими частинками. Сукупність таких мікроскопічних процесів призводить до поглинання енергії поля об'єктом. Повний опис цього ефекту може бути отримано лише за допомогою квантової теорії. Однак для успішного проектування електротермічних пристроїв НВЧ нагріву достатньо обмежитися врахуванням макроскопічних властивостей матеріального середовища, що описуються класичною фізикою.

Залежно від розташування зарядів молекули діелектричного середовища можуть бути полярними та неполярними. У деяких молекулах розташування зарядів настільки симетрично, що без зовнішнього електричного поля їх електричний дипольний момент дорівнює нулю. Полярні молекули володіють

деяким електричним дипольним моментом і без зовнішнього поля. При накладення зовнішнього електричного поля неполярні молекули поляризуються, це значить, що симетрія розташування їх зарядів порушується, і молекула набуває деякий електричний момент. Під дією зовнішнього поля у полярних молекул не лише змінюється величина електричного моменту, але і відбувається поворот молекули по напрямку поля.

Зазвичай розрізняють електронну, іонну, дипольну та структурну поляризацію діелектрика. На НВЧ найбільшу питому вагу мають дипольна та структурна поляризації, так що виділення тепла, можливо, навіть у відсутність струму провідності.

Дослідженнями, що проводяться в різних країнах, встановлено високу ефективність використання НВЧ нагріву в різних галузях господарської діяльності – промисловості, сільському господарстві, медицині тощо. Триває, причому небезуспішно, пошук нових галузей використання методів НВЧ обробки.

## 1 ВСТУПНА ЧАСТИНА

Технологічна обробка матеріалів майже завжди включає таку операцію, як нагрівання. Однією з найпоширеніших видів нагріву є штучне сушіння.

При традиційному способі підведення тепла, конвективному, радіаційному, кондуктивному – процес сушіння лімітується швидкістю перенесення вологи до поверхневих шарів матеріалу. У комбінації з конвективним або радіаційним методами підведення тепла для прискорення внутрішнього масопереносу може бути використана енергія надвисокочастотних електричних полів, що збуджуються в термообробному середовищі.

Однак довгий час цей спосіб не отримував промислового застосування через високу вартість НВЧ обладнання.

Різке зниження вартості НВЧ енергії за рахунок збільшення ККД генераторів НВЧ, спрощення їх конструкції та підвищення їх довговічності дозволило вести систематичні роботи з вивчення впливу енергії електромагнітного поля частоти на різні матеріали та розробити ряд працездатних пристроїв.

Але все ж таки застосування НВЧ обробки, незважаючи на збільшення швидкості сушіння, вимагає великих енерговитрат. Тому в роботі було запропоновано термомеханічний спосіб обробки вугілля. НВЧ енергія застосовується у ньому лише нагрівання діелектрика.

### 1.1 Характеристика НВЧ-установок

НВЧ-установки призначені для швидкого розігріву, розморожування та розігріву заморожених продуктів, доведення до готовності напівфабрикатів. Завдяки проникненню енергії електромагнітного поля всередину продуктів відбувається їхнє швидке нагрівання, тривалість якого вимірюється хвилинами. В оброблюваних продуктах добре зберігаються вітаміни та мінеральні

речовини. НВЧ-установки використовуються і в дієтичному харчуванні. Енергія електромагнітного поля у робочій камері апарату поглинається продуктом майже повністю, тобто ККД апаратів цього типу високий. У світовій практиці використовуються НВЧ-установки різних модифікацій (рис. 1.1). Існуючі установки можна поділити за низкою ознак: за потужністю, продуктивністю та ін.



Рисунок 1.1 – Види НВЧ-установок: а – побутовий, б – лабораторний, в – промисловий.

За потужністю НВЧ-установки поділяються на три групи:

- малої – до 1,5 кВт;
- середньої – 1,5-5,0 кВт;
- великий – понад 5 кВт.

За продуктивністю НВЧ-установки може бути трьох категорій:



- малої – 5-10 кг/год;
- середньої – 15-40 кг/год;
- великий – від 50 кг/год і вище.

Установки малої та середньої потужності прийнято називати НВЧ-печами, НВЧ-шафами, мікрохвильовими печами, електронними шафами, діелектричними печами.

Апарати великої потужності зберігають назву електротермічних НВЧ-установок або просто НВЧ-установок.

За технологічним призначенням НВЧ-печі ділять на апарати для приготування, розігріву, розморожування, пастеризації, стерилізації, сушіння (у тому числі сублимаційної); універсальні, багаторежимні, призначені для реалізації технологічних процесів.

За способом дії НВЧ-установки поділяють на апарати періодичної та безперервної дії.

Конструктивно виконання НВЧ-печей може бути підлоговим, настільним, вбудованим.

За способом охолодження НВЧ-генератора розрізняють печі повітряного та водяного охолодження.

Нагрівання речовин відбувається за частоті промислового струму близько 2450 кГц. Пристрій для перетворення частоти струму від 50 Гц до 2450 кГц є електронною лампою і називається магнетроном. Схема НВЧ-апаратів або мікрохвильових апаратів включає наступні основні елементи: корпус (теплова ізоляція в деяких конструкціях), магнетрон, робоча камера або резонатор, пристрій для збільшення рівномірності теплової обробки, а також пристрій контролю, регулювання та безпеки роботи.

Для покращення рівномірності теплової обробки їжі використовуються такі варіанти конструкцій:

- механізм обертання або руху продуктів;
- система відбивачів (напряме випромінювання на продукцію);

- дисектор – обертова у горизонтальній площині верхньої частини робочого об'єму пластина. Вона розтинає поле та вирівнює його.
- система імпульсного нагрівання. Відповідно до неї за відсутності енергії температура в продукті, що обробляється, вирівнюється за рахунок його теплопровідності.

Принцип роботи НВЧ-апаратів заснований на перетворенні електричної енергії в енергію мікрохвиль [1]. Спеціальний пристрій, який називається магнетрон, генерує мікрохвилі, і вони, проникаючи в камеру печі, розігрівають продукт. Мікрохвиля – це змінне магнітне поле, що має частоту коливань 2450 МГц. Мікрохвиля, проникаючи в продукти на певну глибину, змушує молекули вагатися з великою частотою, що призводить до підвищення температури. Мікрохвилі проникають внутрішньо продукту приблизно на 2-3 см, не змінюючи його хімічного складу. На більшу глибину тепло передається за рахунок теплопровідності продукту (це потрібно враховувати під час приготування їжі).

Важлива перевага НВЧ нагрівання – теплова безінерційність, тобто, можливість практично миттєвого включення та вимкнення теплового впливу на оброблюваний матеріал. Звідси висока точність регулювання процесу нагрівання та його відтворюваність. Перевагою НВЧ нагрівання є також принципово високий ККД перетворення НВЧ енергії в теплову, що виділяється в обсязі тіл, що нагріваються. Теоретичне значення цього ККД близько 100%. Теплові втрати в трактах, що підводять, зазвичай невеликі, і стінки хвилеводів і робочих камер залишаються практично холодними, що створює комфортні умови для обслуговуючого персоналу.

Важливою перевагою НВЧ нагріву є можливість здійснення та практичного застосування нових незвичайних видів нагріву, наприклад вибіркового, рівномірного, надчистого, саморегулюючого.

Вибіркове нагрівання засновано на залежності втрат у діелектриці від довжини хвилі, тобто залежності тангенса кута діелектричних втрат як функції

довжини хвилі  $\lambda$ . При цьому в багатокомпонентній суміші діелектриків будуть нагріватися ті частини, де високий  $\operatorname{tg} \delta$ .

Рівномірне нагрівання. Зазвичай передача тепла здійснюється за рахунок конвекції, теплопровідності та випромінювання. Звідси неминучий температурний градієнт (перепад) від поверхні в глибину матеріалу, причому тим більший, що менше теплопровідність. Зменшити або майже усунути великий градієнт температури можна за рахунок збільшення часу обробки. У багатьох випадках тільки за рахунок повільного нагріву вдається уникнути перегріву поверхневих шарів матеріалу, що обробляється. Прикладами таких процесів є випал кераміки, одержання полімерних сполук тощо.

За допомогою НВЧ енергії можна не тільки рівномірно нагрівати діелектрик за його об'ємом, але й одержувати за бажанням будь-який заданий розподіл температур. Тому при НВЧ нагріванні відкриваються можливості багаторазового прискорення низки технологічних процесів [2].

Надчисте нагрівання. Якщо при нагріванні газовим полум'ям, а також за допомогою дугових пальників відбувається забруднення матеріалів, то НВЧ енергію можна підводити до матеріалу, що обробляється через захисні оболонки їх твердих діелектриків з малими втратами. Внаслідок забруднення практично повністю усуваються. Крім того, поміщаючи матеріал, що нагрівається, у відкачаний об'єм або інертний газ, можна усунути окислення його поверхні. Забруднення від діелектрика, якою підводиться НВЧ енергія, дуже малі, так як у разі малих втрат навіть за пропускання великої НВЧ потужності цей діелектрик залишається практично холодним.

Саморегулююче нагрівання. При нагріванні, для цілей сушіння, якість одержуваного матеріалу суттєво покращується за рахунок того, що нагрівання висушених місць автоматично припиняється. Пояснюється це тим, що тангенс кута діелектричних втрат таких матеріалів, як дерево, прямо пропорційний вологості. Тому, зі зменшенням вологості в процесі сушіння втрати НВЧ енергії зменшуються, а нагрівання продовжується тільки в тих ділянках оброблюваного матеріалу, де ще збереглася підвищена вологість.

## 1.2 Застосування НВЧ технології в промисловості

У сучасному світі часто зустрічаються такі технології виробництва та обробки матеріалів, які вже багато років не модернізувалися, і внаслідок чого є низькоефективними та неекологічними. Така ситуація виходить через те, що не вистачає наукових здобутків. Методи виробництва, що використовуються в наш час, крім того, що завдають колосальної шкоди природі, шкодять і людям, які працюють на цих підприємствах або знаходяться поблизу. Але завдяки тому, що з кожним роком вимоги до технологій виробництв стають дедалі жорсткішими, наука змушена розробляти сучасні способи виробництва матеріалів або модернізувати старі. Розглянемо для прикладу деякі етапи технологій виробництв із різних галузей промисловості з неефективними та економічно не вигідними властивостями.

### Сушіння матеріалів.

У світі процес сушіння різноманітних матеріалів один із найнеефективніших етапів у циклі виробництва [3]. У промисловості мають місце цикли виробництва, до яких на певному етапі потрібно вивести частину вологи з будівельних матеріалів, вихідної сировини, матеріалів різної твердості і сипкості, буває необхідно видалити розчинник з пофарбованої деталі, продукту або пасти, напівфабрикату і т.п. Цей етап у виробництві потрібен для того, щоб покращити якість матеріалу, наприклад, підвищити питому теплоту згоряння кам'яного вугілля, або для того, щоб прискорити деякі процеси, такі як сушіння деревини, адже вона необхідна не тільки для зменшення питомої маси матеріалу, а й прискорення будівництва; збільшення терміну експлуатації. Крім того, сушіння застосовується навіть для збільшення терміну зберігання продуктів.

### Видалення вологи з матеріалу механічним способом.

В даний час відомі такі методи видалення вологи з матеріалів: пресування, фільтрування та центрифугування. Вони необхідні для неповного сушіння, коли з матеріалу видаляється лише частина вологи і не потрібно її

повне видалення. Отже, кілька прикладів зневоднення механічного типу: для того, щоб висушити деревину, використовують відсмоктування. Сенс даного методу в тому, що матеріал занурюють у камеру, заповнюють її гарячим спеціальним агентом і після того, як волога з деревини передалася агенту, включають насос, який наближає тиск у камері вакууму [3]. При сушінні утфелю має бути центрифугування. Утфель – це маса, що складається з кристалів сахарози та міжкристального розчину. Щоб із цієї сировини отримати цукор, його поміщають у центрифугу, де міжкристальний розчин відтікає від кристалів сахарози. Відомо, що під час цього процесу матеріал висушується до 1,0 – 1,5% вмісту вологи. Після цього застосовується сушіння гарячим повітрям, яке дозволяється знизити відсоток вмісту вологи до 0.14.

Тепловий спосіб сушіння.

Тепловий спосіб сушіння – найдавніший і відомий метод видалення вологи з матеріалу, який ділиться на 2 типи: природний та штучний [3]. Перший тип сушіння відбувається на відкритому повітрі і є досить тривалим за часом процесом. Сушильний агент у разі – це повітря, а джерело теплоти – це сонячна енергія. Цей спосіб видалення вологи люди використовують для того, щоб висушити величезні маси матеріалу на значних територіях. Причому якщо говорити про зневоднення дерева, трави та іншої сировини, то немає певних умов щодо температури або вологості повітря. Якщо розглядати штучний спосіб теплового сушіння, то тут має місце бути більш якісне та повне видалення вологи з матеріалів за допомогою перетворення вологи на пару та відведення останнього. Призначені для цього процесу установки схожі на інші масо- та теплообмінними апаратами. Так як у різних пристроях волога приділяється по-різному, їх поділяють на такі типи: установки з високою промисловою частотою, контактні, радіаційні, конвективні та радіаційно-конвективні.

У конвективних установках процес передачі тепла від нагрітого середовища відбувається за допомогою процесів масо-і теплообміну через конвекцію на поверхні матеріалу, що висушується. В даному випадку

спеціальним агентом є робоче середовище, яке і переносить теплоту та маси водяної пари.

Кондуктивний процес – процес зневоднення матеріалу на металевій нагрітій поверхні. Тут все очевидно: від нагрітого металу за допомогою процесу теплопровідності тепло переходить до матеріалу, і волога випаровується. У камері є вентиляція, яка відводить отриману пару разом із повітрям.

Контактне сушіння – об'єднана назва кондуктивної та кондуктивно-конвективного сушіння. При радіаційному та радіаційно-конвективному сушінні процесу передачі тепла матеріалу відбувається шляхом випромінювання через що відбувається випаровування вологи та зневоднення. Дана конструкція робить шлях переміщення матеріалу триразово більшим, ніж його продуктивність за обмежених габаритів. Втрати тепла в даній сушарці знижуються на три чверті, якщо порівнювати з одноходовою. Це досягається через те, що газ, що відходить, більш холодний, а площа поверхні контакту барабана з навколишнім середовищем зменшений.

Вертикальні сушила для піску розробляють подібно до багатоподових печей. У них пісок періодично пересипається від тарілок, що обертаються, на нерухомі кільця і назад за допомогою скребоків. Зазвичай конструкція вертикальних сушарок розроблена таким чином, що топкові гази течуть проти напрямку руху піску. Витрата умовного палива у цих видах сушарок становить 40 - 60 кілограмів на тонну матеріалу.

Але даний метод сушіння піску можна замінити сушінням за допомогою НВЧ технології та конвеєрного апарату. У такому разі суттєво скоротяться витрати на нагрівання матеріалу та процес виробництва стане набагато простіше.

Хімічний спосіб.

Крім вищезазначених методів сушіння матеріалів, має місце хімічний спосіб. Сенс його в тому, щоб видалити вологу з матеріалу за допомогою гігроскопічних речовин, таких як хлористий кальцій, сірчана кислота і т.п.

Однак це дуже дорого, тому такий метод сушіння застосовується лише для осушення газів, цінних порід деревини тощо.

Отже, представлені види зневоднення матеріалів є вкрай неекономічними та неекологічними через великі витрати енергії. ККД таких методів сушіння у виробництві коливається в межах 23 – 52%.

### **1.3 Методи розрахунку НВЧ пристроїв для нагрівання**

Найбільш трудомісткою частиною у розробці НВЧ установки є розробка простору взаємодії. На жаль, у переважній більшості робіт, присвячених таким системам відсутні будь-які обґрунтовані методи розрахунку.

З доступної літератури відомо лише два методи інженерного розрахунку НВЧ установок. Так у роботі [4] запропоновані співвідношення для розрахунку НВЧ сушарок прямого та протиточного типів без урахування конвективного теплообміну діелектрика із середовищем. Однак у роботі [5] не розкрито значення НВЧ потужності, необхідне забезпечення процесу сушіння  $R_{тр}$ , визначення якої вимагає, очевидно, проведення самостійного теоретичного дослідження чи експерименту, що різко знижує цінність розрахункового методу. Співвідношення роботи [6] отримані лише для лінійної апроксимації залежності постійної згасання НВЧ хвилі від вологості діелектрика, що обробляється.

Розрахунок НВЧ камери з урахуванням конвективного теплообміну наведено у роботі [7], [8], де запропонований процес сушіння розбивається на два етапи:

- нагрів оброблюваного діелектрика до кипіння;
- зняття шару товщиною 2 мм з поверхні деревини за температури кипіння.

На кожному з цих етапів розрахунок камери розглядається як самостійне завдання, причому постійне згасання передбачається лінійною функцією температури та вологості. Запропоновані в цих роботах співвідношення

дозволяють при заданих величинах потужності генератора, постійної згасання на вході та виході з сушарки та коефіцієнта конвекції визначити основні параметри, що визначають конструкцію НВЧ установки – її довжину, швидкість сушіння та розподіл поглинутої потужності. Наведені в роботі [9] результати експериментальної перевірки розрахунку показали хорошу її згоду з експериментом.

Однак не завжди процес нагрівання можна вести при постійній температурі, що дорівнює температурі кипіння рідини. Часто, з технологічних причин сушіння ведеться при температурі нижче температури кипіння рідини, що випаровується, як наприклад, при сушінні деревини.

Для діелектриків який завжди можливе і запропоноване у роботі [10] експериментальне визначення коефіцієнта тепловіддачі за характеристикою нагрівання чи остигання, так як процес у цьому випадку відбувається в дуже короткий проміжок часу та визначення температури на початку та наприкінці короткого часового інтервалу дуже важко.

При розрахунку НВЧ нагрівальних пристроїв завжди необхідно знати величину постійної згасання в лінії передачі з діелектриком, що обробляється.

Завдання поширення найпростіших типів хвиль у хвилеводі з діелектриком розглядалися багатьма авторами. Найбільші труднощі у вирішенні завдання вносить облік втрат енергії електромагнітного поля аналізованої електродинамічної системи. При цьому добре вивчені функції, за допомогою яких описується електромагнітне поле, наприклад, у хвилеводних без втрат, стають неодмінними, так як не задовольняють прийнятим раніше граничним умовам і втрачають властивість ортогональності. Суворе рішення реальної електромагнітної системи з втратами дуже важко і зазвичай при розрахунку хвилеводів з малими втратами вдаються до різних спрощень.

Для розрахунку постійної згасання необхідно знати значення  $E$  і  $\operatorname{tg}\alpha$ . Величини цих параметрів, що наводяться для різних матеріалів, дано як правило в залежності від температури, а при розрахунку НВЧ установки необхідно враховувати їхню залежність і від вологості.



Теоретичний розрахунок таких залежностей є самостійним, досить складним завданням, тому при розробці НВЧ установок зазвичай необхідні відомості про залежності  $\epsilon$  і  $\tan\alpha$  від різних параметрів, що характеризують технологічний процес, визначаються експериментально, однак, дані про  $\epsilon$  і  $\tan\alpha$  різних тонких діелектриків, як правило, у літературі не повні.

#### **1.4 Переваги та проблеми мікрохвильового нагріву**

Є безліч позицій, які виправдовують застосування енергії НВЧ у сфері нагрівання у промисловості. Вони призвели до помітного поліпшення в дослідженнях та розробках, їх застосовують у обробці різноманітних матеріалів, таких, як кераміка, пластмаса графен, золото, термопласт і навіть відходи. Виявилось, що нагрівання за допомогою мікрохвиль об'ємних діелектриків є ефективним, тому що нагрівання проходить рівномірно і швидко по всьому об'єму.

Крім того, помітним плюсом на користь цього методу нагріву є економічна ефективність, економія енергії, чистота в екологічному значенні. Така технологія нагрівання здатна покращити якість продукції, помітно прискорити темпи виробництва, значно скоротити необхідну площу, скорочує теплові втрати і, що важливо, дозволяє тримати під ретельним контролем нагрівання утеплювачів.

Однак не все так добре, тому що є й низка мінусів цієї технології. Так як для мікрохвильової технології нагрівання джерелом енергії є електрика, такий спосіб нагрівання матеріалів залежить від вартості електроенергії при будь-якому коефіцієнті ефективності НВЧ печі. Крім того, є ще один значний мінус: під час переробки корисних копалин у промислових масштабах є ризик виникнення теплового пробою або теплової нестійкості через те, що випромінювання взаємодіє з матеріалами, що нагріваються. Це явище породжує неконтрольоване зростання температури робочого навантаження, а потім може пошкодити матеріал. Цікавим фактом є те, що причини виникнення цього

явища різні у відмінних одна від одної умовах обробки. І, останній мінус технології НВЧ нагрівання: нагрівання за таким методом значним чином залежить від властивостей матеріалу, що нагрівається. Як відомо, є ряд матеріалів, які досить ефективно поглинають мікрохвильове випромінювання, але є і прозорі або, гірше, що відбивають НВЧ випромінювання без нагрівання.

Можна зробити висновок про те, що щоб застосовувати технологію нагрівання мікрохвильовим випромінюванням, необхідно абсолютно чітко і ясно розуміти суть взаємодії НВЧ енергії з даним матеріалом.

В даний час є ціла низка фундаментальних експериментальних і теоретичних робіт про нагрівання мікрохвильовим випромінюванням різних матеріалів, включаючи вугілля. Серед робіт щодо вивчення впливу НВЧ випромінювання до найбільш значимих можна віднести теоретичні дослідження [11,12]. Також із використанням різних установок були реалізовані експериментальні роботи про НВЧ нагрівання діелектричних матеріалів [13,14]. Отримані в перерахованих роботах результати роблять вагомий внесок цю проблематику, але повністю не закривають потреби мікрохвильової обробки матеріалів.

## **2 ОСНОВНА ЧАСТИНА**

Тенденції в області термообробки сипучих матеріалів спрямовані на пошук нових високоефективних і екологічно чистих технологій. Одним із таких напрямків є використання в якості джерела тепла енергії мікрохвильового випромінювання.

При розробці мікрохвильових пристроїв, призначених для технологічних процесів термообробки сипучих матеріалів, використовуються такі унікальні властивості, як: об'ємний характер нагріву, вибірковість нагріву, висока чистота нагріву, високий коефіцієнт перетворення енергії мікрохвильового випромінювання в теплову енергію.

Результати аналізу матеріалів наукових публікацій [15,16], що найбільша увага в розвитку досліджень в області мікрохвильового технологічного нагріву спрямована на пошук нових технічних рішень для застосування мікрохвильових технологій з метою заміщення існуючих, малоефективних технологій термообробки матеріалів.

### **2.1 Механізм взаємодії мікрохвильового випромінювання з діелектричними середовищами**

Механізм взаємодії мікрохвильового випромінювання з діелектричними матеріалами заснований на тому, що електромагнітне поле, проникаючи в матеріал, взаємодіє із зарядженими частинками, викликаючи їх коливання. Молекули діелектричного середовища можуть бути неполярними та полярними. При накладенні зовнішнього електричного поля неполярні молекули набувають деякого електричного моменту, а в полярних молекул відбувається поворот осі у напрямку прикладеного електричного поля. Виділення тепла в діелектричному середовищі можливе навіть за відсутності струму провідності.

У цьому випадку середовище представляється що складається з осциляторів, кожен з яких взаємодіє з електричним полем, внаслідок чого робить вимушені коливання.

Нехай середовище, що піддається нагріванню, є ізотропним і матеріальні рівняння середовища можна записати у вигляді (2.1), а електромагнітне поле змінюється в часі за гармонічним законом (2.2) [17]:

$$\left. \begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \\ \vec{J} &= \sigma \cdot \vec{E} \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

де:  $\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  – абсолютна діелектрична та магнітна проникність вакууму;

$\vec{J}$  – щільність струму провідності;

$\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  – вектори напруженості електричного та магнітного поля;

$\vec{D}$ ,  $\vec{B}$  – вектори електричної та магнітної індукції;

$\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність середовища;

$\mu$  – відносна магнітна проникність середовища;

$\sigma$  – провідність середовища.

Припустимо, що електромагнітне поле змінюється у часі за гармонічним законом:

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_m \cdot e^{j\omega t} \\ \vec{H} &= \vec{H}_m \cdot e^{j\omega t} \end{aligned} \right\}, \quad (2.2)$$

де  $\omega$  – кругова частота коливань.

У цьому випадку потужність теплових втрат дорівнює:

$$P_{II} = \frac{1}{2} \int_V \sigma \cdot \dot{E} \cdot \dot{E}^* dV + \frac{1}{2} \int_V \omega \cdot \varepsilon'' \cdot \dot{E} \cdot \dot{E}^* dV + \frac{1}{2} \int_V \omega \cdot \mu'' \cdot \dot{H} \cdot \dot{H}^* dV, \quad (2.3)$$

де:  $\dot{E}^*$  и  $\dot{H}^*$  – комплексно пов'язані значення амплітуд векторів напруженості електричного  $\vec{E}$  та магнітного  $\vec{H}$  полів.

Питому потужність теплових втрат можна визначити із рівняння (2.3) у вигляді:

$$P_{num} = \frac{\sigma}{2} \cdot |\dot{E}|^2 + \frac{\omega \cdot \varepsilon_c''}{2} \cdot |\dot{E}|^2 + \frac{\omega \cdot \mu_c''}{2} \cdot |\dot{H}|^2, \quad (2.4)$$

Перший доданок виражає об'ємну щільність потужності, що виділяється в середовищі при протіканні в ній струму провідності згідно із законом Джоуля-Ленца.

Друге і третє доданки (2.4) визначають об'ємну щільність потужності, що виділяється в середовищі за рахунок зміщення по фазі векторів діелектричної  $\vec{D}$  та магнітної  $\vec{B}$  індукції та векторів  $\vec{E}$  та  $\vec{H}$ .

У роботі будемо досліджувати такі матеріали, які мають такі значення дійсної та уявної частини абсолютної магнітної проникності:  $\mu_c' = 1$ ;  $\mu_c'' = 0$ . У цьому випадку третій доданок (2.4) дорівнює нулю.

Виділення тепла серед за рахунок струмів провідності і поляризації не відрізняється друг від друга. Цей факт можна висловити, записавши відносну діелектричну проникність середовища ( $\tilde{\varepsilon}$ ) з урахуванням її провідності.

Таким чином вираз набуває вигляду:

$$P_{num} = \frac{\omega \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon''}{2} \cdot |\dot{E}|^2, \quad (2.5)$$

або

$$P_{num} = 0,278 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot \varepsilon'' \cdot |\dot{E}|^2, \quad (2.6)$$

де:  $f$  – частота коливань електромагнітного поля, Гц;

$\dot{E}$  – напруженість електромагнітного поля,  $V/cm$ ;

$P_{num}$  – питома потужність теплових втрат,  $Вт/см^3$ .

З рівняння (2.6) випливає, що вище частота електромагнітного поля, то більше питома потужність виділяється в діелектричному середовищі.

В Україні для термообробки матеріалів використовуються електромагнітні коливання на частотах 915 МГц і 2450 МГц.

При виборі довжини хвилі джерела НВЧ енергії треба враховувати те, що зі збільшенням частоти зменшується глибина проникнення електромагнітної хвилі в діелектрик з втратами.

Значення уявної частини відносної діелектричної проникності матеріалу (чинника втрат) ( $\varepsilon''$ ) залежить не тільки від частоти коливань електромагнітного поля, а й від вологості та температури.

Зв'язок між температурою в матеріалі і НВЧ потужністю питомих втрат можна визначити, помістивши матеріал, що обробляється діелектриком з втратами між пластинами плоского конденсатора.

Рівняння для визначення енергії в конденсаторі має вигляд:

$$W = \frac{1}{2}CU^2, \quad (2.7)$$

де:  $C$  – ємність конденсатора;

$U$  – напруга на пластинах конденсатора.

Рівняння визначення значення поглинутої потужності в діелектриком матеріалі можна визначити як дійсну частину похідної  $\frac{dW}{dt}$ , де величина  $C$  - прямо пропорційна комплексній діелектричній проникності. Отже, можна записати з урахуванням виразу (2.6):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{num}}{c_d \cdot \rho_d}. \quad (2.8)$$

або

$$\frac{dT}{dt} = \frac{K \cdot f \cdot E^2 \cdot \varepsilon''}{c_d \cdot \rho_d}. \quad (2.9)$$

У цих рівняннях:

$P_{\text{пит}}$  – величина поглиненої потужності,  $\frac{Вт}{см^3}$ ;

$K = 0,278 \cdot 10^{-12}$  – постійна величина;

$f$  – частота,  $Гц$ ;

$E$  – напруженість електричного поля,  $\frac{В}{см}$ ;

$c$  – теплоємність діелектричного матеріалу,  $\frac{Дж}{г \cdot ^\circ C}$ ;

$\rho$  – щільність діелектричного матеріалу,  $\frac{г}{см^3}$ ;

$\lambda$  – довжина хвилі у вільному просторі,  $см$ ;

$W$  – енергія,  $Дж$ .

Рівняння (2.8) пов'язує зміну температури в матеріал з діелектричними втратами з величиною поглиненої потужності мікрохвильового випромінювання за умови відсутності теплових втрат без урахування зміни агрегатного стану матеріалу.

У цій роботі буде використовуватись нагрів вугілля на частоті електромагнітного поля 2450 МГц.

## 2.2 Вибір джерела НВЧ енергії

У мікрохвильових пристроях термообробки діелектричних матеріалів застосовується широкий спектр джерел НВЧ енергії, що відрізняються за конструкцією та параметрами.

Для потужних мікрохвильових установок застосовуються джерела НВЧ енергії від 25 кВт та вище, на частотах коливання електромагнітного поля 2450 МГц або 915 МГц.

Недоліками таких потужних джерел НВЧ енергії є:

1. Значна вага та габаритні розміри;
2. Метод підведення НВЧ енергії для реалізації рівномірного нагрівання матеріалу, що оброблюється, досить складний і не завжди реалізований;
3. Для стабільної роботи джерела НВЧ енергії необхідно, щоб коефіцієнт стоячої хвилі за напругою, що створює необхідність використання для захисту спеціального пристрою – феритового циркулятору;
4. Джерело НВЧ енергії використовує водяне охолодження (вода має бути певної якості);
5. При виході з ладу джерела НВЧ енергії зупиняється весь технологічний процес до його заміни;
6. При проектуванні та виготовленні мікрохвильових установок, в яких використовуються джерела НВЧ енергії великої потужності, застосовуються спеціальні засоби захисту як при експлуатації, так і при пуско-налагоджувальних роботах;
7. Висока вартість потужних джерел НВЧ енергії.

При використанні для установок НВЧ нагріву джерел меншої потужності, наприклад (2,5...5,0) кВт, також стикаються з перерахованими вище недоліками.

Для усунення існуючих недоліків джерел НВЧ енергії запропоновано малогабаритні, дешеві джерела НВЧ енергії з повітряним охолодженням, зібрані на базі комплектуючих побутових НВЧ печей.

Ці джерела НВЧ енергії можна розташовувати на електродинамічних системах таким чином, щоб реалізувати заданий розподіл температури оброблюваному матеріалу. При використанні малогабаритних джерел НВЧ енергії не потрібні феритові циркулятори, так як магнетрони для побутових НВЧ печей з одного боку добре переносять відбитий сигнал, а з іншого боку



мають температурний захист і автоматично відключає магнетрон у разі його перегріву.

Малогабаритні джерела НВЧ енергії не вимагають водяного охолодження, а охолоджуються потоком повітря. Особливо слід підкреслити ту обставину, що з виходу одного з них, технологічний процес, зазвичай, не зупиняється, а заміна джерела може бути здійснено протягом кількох хвилин. Ціна таких джерел невелика.

На рис. 2.1 представлено рисунок джерела НВЧ енергії (магнетрон), розробленого на базі зарубіжних комплектуючих, що має масу 12 кг та габаритні розміри: довжина – 400 мм; ширина – 200 мм; висота - 200 мм з хвилеводним виведенням енергії перетином (72 x 34) мм. Вибір хвилеводного виведення енергії заснований не тільки на прагненні зменшення габаритів та ваги джерела НВЧ енергії, але головним чином виходячи з діаграми спрямованості розподілу НВЧ потужності з хвилеводу.



Рисунок 2.1 – Джерело НВЧ енергії потужністю 1,5 кВт

Перспективи розвитку малогабаритних джерел НВЧ енергії пов'язане із зменшенням маси та габаритних розмірів, а також зі збільшенням ККД джерела за рахунок використання інверторної схеми живлення магнетрону.

Малогабаритні джерела НВЧ енергії в даний час знайшли широкі області застосування мікрохвильових пристроїв термообробки матеріалів.

Магнетрони можуть працювати на різних частотах від 0,5 до 140 ГГц, з потужностями від декількох Вт до десятків кВт у безперервному режимі та від 10 Вт до 5 МВт в імпульсному режимі при тривалості імпульсів головним чином від часток до десятків мікросекунд.

Магнетрони мають високий ККД (до 80%). Магнетрони бувають як неперебудовувані, так і ті що перебудовуються в невеликому діапазоні частот (зазвичай менше 10%). Для повільної перебудови частоти застосовуються механізми, які рухаються рукою, для швидкої (до кількох тисяч перебудов у сік) — ротаційні та вібраційні механізми.

В останні 10-15 років майже у всіх класах приладів, що є джерелами НВЧ-енергії, досягнуто суттєвого покращення параметрів та характеристик. Це сприяє розширенню традиційних та появи нових сфер застосування енергії НВЧ електромагнітних хвиль, що, у свою чергу, висуває постійно зростаючі вимоги до електричних характеристик, показань надійності, довговічності та економічності та стимулює як подальше вдосконалення існуючих класів та типів НВЧ-приладів, так і розробку нових. Реальна конкуренція привела з одного боку до, досить ясного і об'єктивного розуміння обмежень, а, з іншого боку, до більш-менш певного розмежування сфер кращого використання тих чи інших приладів.

Так за магнетронами залишаються переваги в тих областях, де потрібна мінімізація масогабаритних параметрів приладу та радіоелектронного засобу (РЕЗ) в цілому, експлуатація надійності та простоти управління; низькі робочі напруги та рівні робочих коливань.

На сьогодні магнетрони залишаються найдешевшими джерелами НВЧ-енергії серед НВЧ (в розрахунку на 1 Вт потужності) і мають найвищу питому потужність.

За останні два десятиліття класичні магнетрони були суттєво вдосконалені у напрямі мініатюризації, підвищення довговічності та надійності. Це стосується як магнетронів безперервної дії, застосування яких для побутових НВЧ печей, установок промислового нагріву, для медичної апаратури та інше, неухильно шириться, так і імпульсних магнетронів.

### 2.3 Розрахунок НВЧ пристрою для термообробки

У цьому розділі запропоновано метод формування рівномірного розподілу температури у матеріалах прямокутного поперечного перерізу ( $l > 0,3 \cdot \lambda$ ), низької теплопровідності  $\left( \lambda_T \leq 0,2 \frac{Вт}{\text{K} \cdot \text{м}} \right)$  у мікрохвильових пристроях з поздовжньою взаємодією.

Побудова мікрохвильових пристроїв для рівномірного розподілу температури по поперечному перерізу матеріалів та малою теплопровідністю ґрунтується на тому, що:

- енергія електромагнітного поля надвисоких частот поширюється у напрямку руху матеріалу, що обробляється;
- мікрохвильовий пристрій складається з послідовно включених секцій хвилеводного типу та сповільнювальних систем, які забезпечують суперпозицію розподілу температури поперечного перерізу завантаження, що задовольняє вимогам технологічного процесу.

Такі технологічні процеси термообробки матеріалів необхідні, наприклад, для обробки будівельних матеріалів, сипучих матеріалів, харчових матеріалів тощо.

Запропонований мікрохвильовий метод здійснює рівномірне нагрівання діелектричного сипучого матеріалу у всьому обсязі і знімає внутрішні термічні

напруги в процесі обробки. Об'ємний характер нагріву діелектричних матеріалів призводить до повноти обробки.

Для діелектричних матеріалів великого поперечного перерізу запропоновано метод побудови мікрохвильового пристрою, що складаються з двох секцій, що мають взаємодоповнює розподіл температури поперечного перерізу оброблюваного матеріалу.

Перша електродинамічна система у вигляді прямокутного хвилеводу, що працює на основному типі хвилі  $E_{01}$ , забезпечує максимальну температуру в центрі діелектричного завантаження та її спад по площині до зовнішньої поверхні завантаження. Друга електродинамічна система, наприклад, що уповільнює система типу діафрагмований хвилевід, забезпечує максимальну температуру на зовнішній поверхні завантаження та її спад по об'єму до осі діелектричного завантаження. Результуючий розподіл температури поперечного перерізу діелектричного завантаження від двох секцій мікрохвильового пристрою повинен забезпечити розподіл температури поперечного перерізу завантаження, що задовольняє вимогам технологічного процесу.

Прямокутний хвилевід працює на основному типі хвилі  $E_{01}$  і розподіл амплітуди напруженості електричного поля в поперечному перерізі завантаження описується функцією Бесселя нульового порядку, що має максимум в центрі хвилеводу і периметру, що спадає по краях хвилеводу.

Діафрагмований хвилевід є сповільнювальною системою, ступінь концентрації напруженості електричного поля до поверхні сповільнювальної системи визначається коефіцієнтом уповільнення.

Мікрохвильові пристрої термообробки діелектричних матеріалів у полі хвилі, що біжить, з поздовжньою взаємодією ідеально підходять для застосування в конвеєрному режимі. У мікрохвильових пристроях в полі хвилі, що біжить з поздовжньою взаємодією навантаження і передавальна лінія доповнюють один одного так, що утворюється лінія з втратами, в якій

потужність мікрохвильового випромінювання використовується для термообробки діелектричних матеріалів.

У процесі мікрохвильового нагріву передача тепла матеріалу проводиться шляхом опромінення його енергією надвисокочастотного електромагнітного поля. Висока ефективність процесу передачі енергії по всьому обсягу дозволяє проводити нагрівання діелектричного матеріалу за короткий час.

Потужність, що передається електромагнітним полем в оброблюваний матеріал, пропорційна частоті коливань електромагнітного поля, квадрату напруженості електричного поля і уявної частини відносної проникності діелектричного матеріалу (фактору втрат). Вибір робочої частоти коливань електромагнітного поля визначається наявністю відповідних джерел НВЧ енергії, вибором конструкції установки та діелектричними властивостями матеріалу. У цій дипломній роботі були використані джерела НВЧ енергії на частоті коливань електромагнітного поля 2450 МГц.

Припустимо, що матеріал з діелектричними втратами, який рухається в напрямку поширення мікрохвильової енергії, тобто в напрямку поширення хвилі, що біжить. Нехай оброблюваний матеріал просунувся в електродинамічній системі мікрохвильового пристрою на відстань  $dz = \mathcal{G} \cdot dt$  та потужність  $dP$  розсіяна в матеріалі, викликала нагрівання матеріалу та відповідну зміну постійної згасання на величину  $d\alpha$ .

Модель розрахунку мікрохвильових пристроїв дозволяє оцінити довжину електродинамічної системи  $\ell$ , величину необхідної потужності для нагрівання матеріалу в матеріалі  $P_{mp}$ , і коефіцієнт корисної дії НВЧ установки.

Рівняння для величини постійної згасання має такий вигляд:

$$\alpha(z) - \alpha_{\min} = \alpha_{\max} \cdot \left\{ 1 - \frac{P_{ex} - P(z)}{P_{mp}} \right\}, \quad (2.10)$$

де  $\alpha_{\max}$  – величина постійної згасання енергії в матеріалі до термообробки в НВЧ установці;

$\alpha_{\min}$  – величина постійної згасання енергії у матеріалі за умови відсутності у ньому води.

З теорії передавальних ліній:

$$-\frac{dP(z)}{dz} = 2\alpha(z) \cdot P(z). \quad (2.11)$$

Підставляючи вираз (2.10) у (2.11) та інтегруючи в межах

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq z \leq \ell \\ \alpha_{\max} \geq \alpha(z) \geq \alpha_{\ell} \end{array} \right\}, \quad (2.12)$$

де  $\alpha_{\ell}$  - величина постійної згасання енергії електромагнітного поля надвисоких частот у матеріалі при значенні  $z = \ell$ .

У цьому випадку довжина мікрохвильового пристрою можна отримати довжину у вигляді рівняння:

$$\ell = \frac{1}{2 \left[ \alpha_{\min} + \alpha_{\max} \cdot \left( 1 - \frac{P_{\text{ex}}}{P_{\text{mp}}} \right) \right]} \ln \left[ \frac{\alpha_{\ell} \cdot \frac{\alpha_{\max} \cdot \frac{P_{\text{ex}}}{P_{\text{mp}}} - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}}{\alpha_{\ell} - \alpha_{\min} - \alpha_{\max} \left( 1 - \frac{P_{\text{ex}}}{P_{\text{mp}}} \right)} \right], \quad (2.13)$$

$$\frac{P(z)}{P_{\text{mp}}} = \frac{1 + \frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}} - \frac{P_{\text{ex}}}{P_{\text{mp}}}}{\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}} - \frac{P_{\text{ex}}}{P_{\text{mp}}} + \exp \left[ -2z \left\{ \alpha_{\max} \left( \frac{P_{\text{ex}}}{P_{\text{mp}}} - 1 \right) - \alpha_{\min} \right\} \right]}, \quad (2.14)$$

Ці рівняння використовуються розробниками для оцінки як довжини надвисокочастотного пристрою, так і величини необхідної вхідної потужності. Однак ці співвідношення є наближеними. Вони не враховують залежність діелектричних параметрів матеріалів від температури і не дозволяють досить точно розрахувати довжину електродинамічної системи та, відповідно, коефіцієнт корисної дії мікрохвильового пристрою.

Мікрохвильові пристрої термообробки діелектричних матеріалів в полі хвилі, що біжить, фізично можна уявити навантаженою передавальною довгою лінією. Таку довгу навантажену лінію можна було б розглянути як каскадне включення окремих секцій і застосувати прості методи перемноження матриць. Однак рішення цієї задачі передбачає, що відомі всі необхідні залежності діелектричних параметрів матеріалів, як від вологості, так і температури.

Оскільки в мікрохвильових пристроях зазвичай потрібно нагріти діелектричний матеріал, що рухається до заданої температури, то температура матеріалу змінюється вздовж електродинамічної системи в напрямку поширення бігучої хвилі. Діелектричні параметри матеріалу є функцією координати  $z$ , отже, від координати  $z$  залежить згасання на одиницю довжини електродинамічної системи та величина погонної потужності втрат. Від величини питомої потужності втрат залежить значення температури діелектричного матеріалу, що рухається.

Розглянемо конструкцію мікрохвильового пристрою, що складається з двох секцій з різними електродинамічними систем для термообробки матеріалів з поздовжньою взаємодією, представлену на рис. 2.2

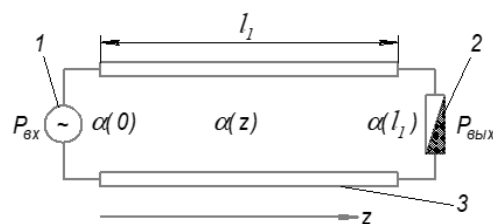


Рисунок 2.2 – Схема НВЧ пристрою, що складається з двох секцій з діелектричним матеріалом, що нагрівається: 1 – джерело НВЧ енергії; 2 –

узгоджене навантаження; 3 – діелектричний матеріал, що нагрівається,  $\ell_1$  та  $\ell_2$  – довжина електродинамічної системи в першій і другій секції.

Діелектричні параметри матеріалу змінюються лінійно зі зростанням температури та рівняння для розподілу потужності мікрохвильового випромінювання у загрузці можна записати у вигляді:

$$P(z, r) = f(z) \cdot f(r) \cdot P_{\text{ex}} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{\text{HZ}} \cdot z}, \quad (2.15)$$

де:  $f(z)$  и  $f(r)$  – функція, що враховує залежність розподілу потужності в матеріалі з урахуванням розподілу температури у напрямку осі  $z$  та радіусу  $r$ .

Значення функції  $f_+(z)$  джерела зліва визначається співвідношенням:

$$f_+(z) = \frac{\alpha_{\text{HZ}}}{\alpha_{\text{KZ}} - (\alpha_{\text{KZ}} - \alpha_{\text{HZ}}) \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{\text{HZ}} \cdot z}}, \quad (2.16)$$

Якщо відомо розподіл потужності мікрохвильового випромінювання в оброблюваному матеріалі, а також значення постійної згасання, то можна визначити погонну потужність втрат  $P_{\text{noz}}(z)$  у напрямку осі  $z$  у відповідність до виразів для хвилеводних систем:

$$P_{\text{noz}}(z, r) = 2 \cdot P_{\text{ex}} \cdot \alpha_{\text{KZ}} \cdot f_+^2(z) \cdot f(r) \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{\text{HZ}} \cdot z}, \quad (2.17)$$

Вираз для питомої потужності втрат при постійному перерізі оброблюваного діелектричного матеріалу набуває вигляду відповідно до виразу:

$$P_{\text{y0}}(z) = \frac{P_{\text{noz}}(z)}{S_{\text{n.сеч.}}} \quad (2.18)$$



де:  $S_{n.сеч}$  – площа поперечного перерізу діелектричного матеріалу, або

$$P_{y\partial}(z, r) = \frac{2 \cdot \alpha_{kz} \cdot f_+^2(z) \cdot f(r)}{S_{n.сеч}} \cdot P_{вх} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{hz} \cdot z}. \quad (2.19)$$

Наростання температури з кількістю поглиненої потужності мікрохвильового випромінювання за відсутності теплових втрат та змін агрегатного стану матеріалу визначається виразом:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{погл}}{c_{\partial} \cdot \rho_{\partial}}, \quad (2.20)$$

або

$$T(z, r) = T_n(z, r) + \frac{2 \cdot \alpha_{kz} \cdot f_+^2(z) \cdot f(r) \cdot \tau}{S_{n.сеч} \cdot c_{\partial} \cdot \rho_{\partial}} \cdot P_{вх} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{hz} \cdot z}, \quad (2.21)$$

де:  $\tau$  – час обробки матеріалу в першій секції НВЧ пристрою.

У перерізі ( $z = 0$ ) діелектричний матеріал набуває за час  $\tau$  максимальне значення температури в стаціонарному режимі на осі круглого хвилеводу ( $r = 0$ ), що працює на основній хвилі типу  $E_{01}$ .

Рівняння для кінцевої температури  $T_k$  матеріалу можна записати у вигляді:

$$T_k(0,0) = T_n(0,0) + \frac{2 \cdot \alpha_{kz} \cdot f_+^2(z) \cdot \tau}{S_{n.сеч} \cdot c_{\partial} \cdot \rho_{\partial}} \cdot P_{вх}. \quad (2.22)$$

З рівняння (2.22) при заданому значенні потужності джерела НВЧ енергії можна визначити час  $\tau$  за який завантаження придбало задану температуру  $T_k$  (0,0) в стаціонарному режимі для першої секції.

Якщо визначено час, то можна визначити розподіл температури в матеріалі в напрямку розповсюдження енергії в електродинамічній системі з рівняння (2.21) та визначити довжину електродинамічної системи  $\ell_1$ , а також величину потужності мікрохвильового випромінювання, що надходить у навантаження контролю технологічного режиму.

Температура у матеріалі на кінці електродинамічної системи може бути визначена на осі прямокутного хвилеводу (у центрі діелектричного завантаження) із рівняння:

$$T(\ell_1, 0) = T_n(\ell_1, 0) + \frac{2 \cdot \alpha_{kz} \cdot f_+^2(\ell_1) \cdot \tau}{S_{n.cеч.} \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot P_{вх} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{hz} \cdot \ell_1}. \quad (2.23)$$

Розподіл температури в завантаженні  $T_2(z, r)$  після проходження секції мікрохвильового пристрою у вигляді діафрагмованого хвилеводу (джерело зліва) виводиться таким же чином, згідно і має вигляд:

$$T_2(z, r) = T_1(\ell_1, r) + P_{вх} \frac{2[\alpha_{kz} f_+^2(z) + \alpha_{kr} f_+^2(r)] \tau}{S_{n.c.} \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{hz} z} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_r (R-r)}, \quad (2.24)$$

де

$$f_+(r) = \frac{\alpha_{hr}}{\alpha_{kr} - (\alpha_{hr} - \alpha_{kr}) \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{hr} \cdot (R-r)}}. \quad (2.25)$$

Систему координат при аналізі другої секції мікрохвильового пристрою за координатою у напрямку радіусу зручно використовувати за інших граничних умов. Вважатимемо, що умова ( $r = R$ ) на зовнішній поверхні

завантаження або на рівні поверхні сповільнювальної системи відповідає максимальному значенню температури діелектричного завантаження.

У цьому випадку можна визначити в стаціонарному режимі час, необхідний нагрівання до максимальної температури зовнішньої поверхні діелектричного завантаження при значенні координати ( $z = 0$ ).

З рівняння (2.24) випливає:

$$T_2(0,0) = T_1(\ell_1, r) + P_{ex} \cdot \frac{2 \cdot [\alpha_{kz} \cdot f_+^2(0) + \alpha_{kr} \cdot f_+^2(R)] \cdot \tau}{S_{n.c.} \cdot c_d \cdot \rho_d}. \quad (2.26)$$

Якщо визначено час нагріву завантаження, можна визначити розподіл температури в завантаженні у напрямі поширення енергії в електродинамічній системі з рівняння (2.24) і визначити довжину електродинамічної системи  $\ell_2$ , а також величину потужності мікрохвильового випромінювання, що надходить у навантаження для контролю технологічного режиму.

Значення температури у стрижні на кінці електродинамічної системи  $\ell_2$  може бути визначено на осі хвилеводу (у центрі діелектричного завантаження) з рівняння:

$$T_2(\ell_2, 0) = T_1(\ell_1, 0) + P_{ex} \cdot \frac{2 \cdot [\alpha_{kz} f_+^2(\ell_2) + \alpha_{kr} f_+^2(R)] \cdot \tau}{S_{n.c.} \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{hz} \cdot \ell_2}. \quad (2.27)$$

Розрахунок розподілу температури у матеріалі у його руху зі швидкістю  $\vec{g}$  (динамічний режим). Значення поглиненої потужності мікрохвильового випромінювання у динамічному режимі:

$$P_{погл}(z) = P_{ex} - P(z), \quad (2.28)$$

або

$$P_{\text{ногл}}(z) = P_{\text{вх}} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \alpha_{\text{нз}} \cdot z}). \quad (2.29)$$

Вираз для розподілу температури в завантаженні для хвилеводної секції мікрохвильового пристрою має вигляд:

$$T_1(z, r) = T_n(z, r) + \frac{2 \cdot \alpha_{\text{кз}} \cdot f_+^2(z) \cdot f(r) \cdot \tau_1}{S_{\text{н.сеч.}} \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot P_{\text{вх}} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \alpha_{\text{нз}} \cdot z}). \quad (2.30)$$

Зв'язок довжини електродинамічної системи  $\ell_1$ , часу нагрівання матеріалу завантаження  $\tau_1$  та швидкості його руху визначається співвідношенням:

$$\mathcal{G} = \frac{\ell_1}{\tau_1}. \quad (2.31)$$

Вираз для розподілу температури в матеріалі завантаження, розташованого в секції мікрохвильового пристрою на основі системи, що уповільнює, в динамічному режимі має вигляд:

$$T_2(z, r) = T_1(\ell_1, r) + P_{\text{вх}} \frac{2[\alpha_{\text{кз}} f_+^2(z) + \alpha_{\text{кр}} f_+^2(r)] \tau_2}{S_{\text{н.с.}} \cdot c_d \cdot \rho_d} (1 - e^{-2 \cdot \alpha_{\text{нз}} z}) \cdot e^{-2 \cdot \alpha_r (R-r)} \quad (2.32)$$

Зв'язок довжини електродинамічної системи  $\ell_2$ , часу нагрівання матеріалу завантаження  $\tau_2$  та швидкості його руху визначається співвідношенням:

$$\mathcal{G} = \frac{\ell_2}{\tau_2}. \quad (2.33)$$

Рівняння для розподілу температури в діелектричному стрижні в конвеєрному режимі для першої та другої секцій НВЧ пристрою перетворюються на вигляд:

$$T_1(z, r) = T_n(z, r) + \frac{2 \cdot \alpha_{кз} \cdot f_+^2(z) \cdot f(r) \cdot \ell_1}{S_{н.сеч.} \cdot c_\delta \cdot \rho_\delta \cdot \vartheta} \cdot P_{вх} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \alpha_{нз} \cdot z}), \quad (2.34)$$

$$T_2(z, r) = T_1(\ell_1, r) + P_{вх} \frac{2 \cdot [\alpha_{кз} f_+^2(z) + \alpha_{кр} f_+^2(r)] \cdot \ell_2}{S_{н.с.} \cdot c_\delta \cdot \rho_\delta \cdot \vartheta} (1 - e^{-2 \cdot \alpha_{нз} \cdot z}) \cdot e^{-2 \cdot \alpha_r \cdot (R-r)} \quad (2.35)$$

Коефіцієнт корисної дії мікрохвильових пристроїв максимальний, коли в полі мікрохвильового випромінювання нагрівається лише діелектричне навантаження. Тому для герметизації навантаження від електродинамічної системи доцільно використовувати трубу з радіопрозорого матеріалу (фторопласту), діелектричні втрати в якій набагато менше, ніж у навантаженні. Це дозволяє не враховувати втрати мікрохвильової енергії у трубі з радіопрозорого матеріалу.

Отже, мікрохвильова установка для обробки вугілля розроблялась з наступними параметрами: частота коливань електромагнітного поля 2450 МГц; швидкість руху навантаження в установці не менше ніж 0,5 м/хв; потужність мікрохвильового випромінювання в установці 1,5 кВт; початкове значення температури матеріалу навантаження +5 °С; температура нагріву +40 °С; теплоємність матеріалу 0,9 Дж/(г·°С); густина матеріалу 1,1 г/см<sup>3</sup>; шар навантаження <15 мм; дійсна частина відносної діелектричної проникності матеріалу має значення 42; уявна частина відносної діелектричної проникності матеріалу має значення 0,18; розбіжність номінального значення температури матеріалу та температури нагріву має перевищувати 7%.

На рисунку 2.2 представлена конструкція конвеєрної НВЧ-установки для сушіння та мікрохвильової обробки сипких матеріалів, в нашому випадку – вугілля. Конвеєрна НВЧ-установка для сушіння та мікрохвильової обробки

сипучих матеріалів включає: несучу раму 24, бункер 1 з дозуючим пристроєм 2, конвеєр, що складається з ведучого 15 і веденого 22 барабанів і сітки 17 з розділенням на тефлоновим покриттям, дві зони НВЧ-нагріву 5, відлеження 6 і охолодження 7, систему витяжки, що складається з повітровідвідних каналів 8 і вентилятора 10, пристрій вирівнювання висоти матеріалу 9, систему рівномірного розподілу агенту сушіння, що складається з повітроводів 19, вхідного дифузора 26, корпусу 2 двох рядів вихідних конфузурів 20 з прямокутними регульованими отворами, розташованих один під одним під кутом  $90^\circ$  і напірний вентилятор 18, датчики температури 3 і вологості 4, мотор-редуктор 16, пристрій регулювання натягу сітки конвеєра 23, хвильові пастки 11 чвертьхвильових перетворювачів, що поглинають навантаження 12 і 13, вивантажувальний канал 14, обшитий поглиначем і блок управління 21.

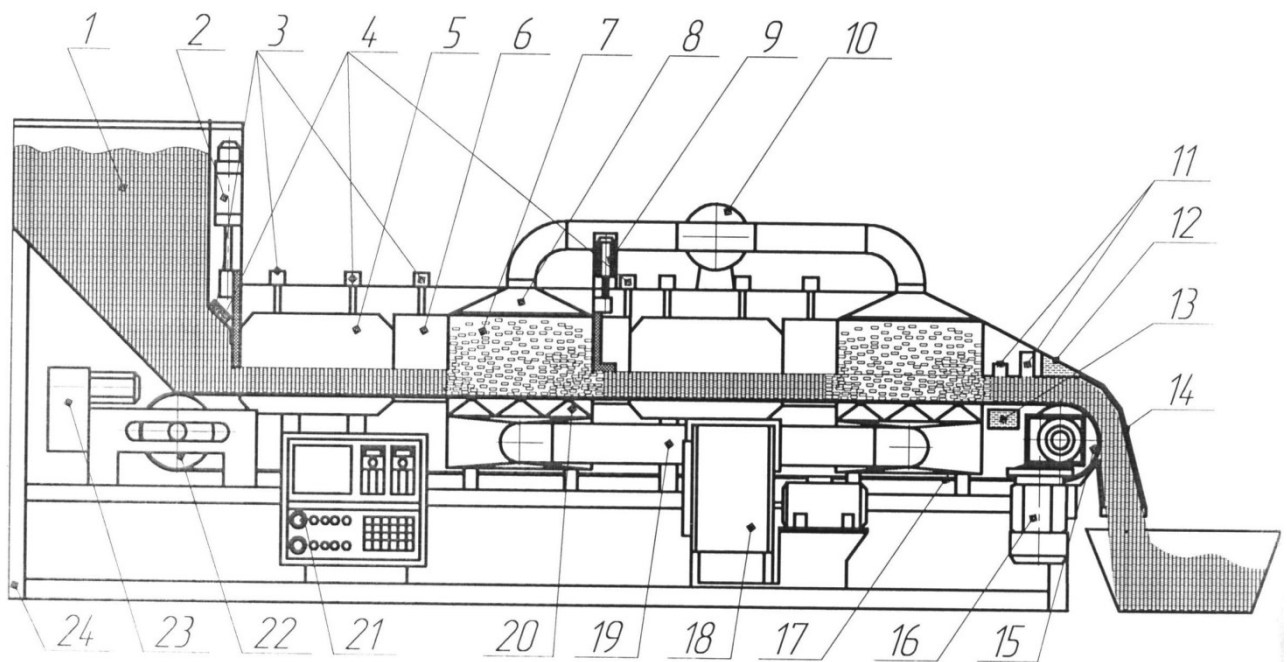


Рисунок 2.2 – Схема установки НВЧ обробки вугілля

Багатофункціональна конвеєрна НВЧ-установка для сушіння та мікрохвильової обробки сипучих матеріалів працює наступним чином.

Оброблюваний матеріал завантажується в бункер 1 НВЧ-установки. Встановлені в бункері датчики 1, 3 і 4 визначають температуру і вологість матеріалу, які передаються на дисплей блоку управління. Отримана інформація

обробляється оператором, який включає в себе необхідний режим роботи НВЧ-установки. Є можливість автоматичного керування НВЧ-установкою при заданих режимах роботи. Після включення НВЧ-установки, матеріал потрапляє на конвеєр і із заданими шаром та швидкістю переміщається всередині робочих камер.

Спочатку матеріал потрапляє в першу робочу камеру, де він переміщається через зони НВЧ-нагріву 5, лежні 6 і охолодження 7. Потім, матеріал проходить наступні робочі камери і через вивантажувальний канал висипається в потрібну тару або машину.

Багатофункціональна конвеєрна НВЧ-установка може працювати в режимах сушіння та мікрохвильової обробки. Режим сушіння призначений для сушіння матеріалів з вихідної вологості до кондиційної або необхідної.

При роботі НВЧ-установки в режимі сушіння, матеріал з бункера, пересуваючись по конвеєру, потрапляє в зону НВЧ-нагріву першої 5 робочої камери, де проводиться його об'ємний нагрівання до потрібної температури. Потім матеріал проходить через зону відлежування. У зоні відлежування 6 відбувається вирівнювання температури шару, а також вихід вологи з внутрішніх шарів матеріалу на її поверхню. Датчики 3 розташовані в зоні відлежування 6 визначають температуру матеріалу. За значеннями температури матеріалу в зоні відлежування визначається тривалість обдування матеріалу в наступній зоні – зоні охолодження 7. У зоні охолодження 7 проводиться обдування матеріалу агентом сушіння в псевдозрідженому шарі. Як агент сушіння служить атмосферне повітря з температурою 20...30 °С.

При необхідності, як агент сушіння може служити і підігріте до потрібної температури повітря. Через організацію псевдозрідженого шару, відбувається рівномірне перемішування матеріалу і відведення вологи, що вийшла, яка через систему витяжки йде назовні. Матеріал при проходженні через зону охолодження 7 охолоджується на 5...10 °С максимальної температури нагрівання. Датчики 3 та 4, розташовані в зоні охолодження визначають температуру зерна, температуру та вологість агента сушіння. Кінцеву

температуру матеріалу можна регулювати шляхом зміни напору та часу роботи напірного вентилятора 18, а також перекриття отворів верхнього ряду конфузорів 20 системи рівномірного розподілу агента сушіння. Далі висота шару, за допомогою пристрою вирівнювання висоти матеріалу 9 вирівнюється до заданого, і матеріал проходить через інші робочі зони.

Багатофункціональна конвеєрна НВЧ-установка працює на частоті 2,45 ГГц. У режимі сушіння потужність електромагнітного випромінювання може змінюватись у діапазоні 300...2000 Вт/кг. Продуктивність установки регулюється зміною швидкості конвеєра, висоти шару та потужності електромагнітного випромінювання. Інтенсивність перемішування матеріалу в псевдозрідженому шарі можна регулювати шляхом зміни напору 18 вентилятора і перерізу отворів верхнього ряду конфузорів 20 системи рівномірного розподілу агента сушіння.

У режимі мікрохвильової обробки можна проводити сушіння вугілля електромагнітну обробку вугілля, а також теплову обробку з метою підвищення їх якості та покращення технологічних властивостей.

При сушінні вугілля потужність електромагнітного випромінювання може змінюватися в діапазоні 100-500 Вт/кг, температура нагріву вугілля не перевищує 50 °С. При роботі на даному режимі задаються швидкість конвеєра НВЧ-установки, висота шару, потужність електромагнітного випромінювання, температура нагріву вугілля та при необхідності тривалість роботи напірного вентилятора 18.

При тепловій обробці вугілля потужність електромагнітного випромінювання може змінюватися в діапазоні 500...1500 Вт/кг. При роботі на даних режимах матеріал також проходить всі зони робочих камер, і при необхідності може бути увімкнений напірний вентилятор 18.

Конвеєрна НВЧ-установка може застосовуватися у будь яких сферах де необхідна теплова обробку матеріалу, це може бути як у сільському господарстві, так і в харчовій та хімічній промисловості для сушіння, знезараження та теплової обробки різних сипких матеріалів.



У таблиці 2.1 наведено порівняльну характеристику апаратів для обробки вугілля.

Таблиця 2.1

Параметри апаратів для обробки вугілля

Вид устаткування	Потужність теплоносія, кВт/т	Потужність вентилятора, кВт/т	Потужність двигуна транспортера, кВт/т	Потужність установки, кВт/т
Повітряна сушарка	200,0	-	3,0	203,0
Інфрачервона сушарка	70,0	-	3,0	73,0
НВЧ-установка	30,0	2×0,75	3,0	34,5

Аналізуючи отримані параметри роботи наведених апаратів можна сказати, що застосування мікрохвильової енергії дозволить суттєво знизити використання теплоносіїв та електроенергії.

### 3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

В даній частині роботи було розраховано економічну складову обробки вугілля за допомогою НВЧ нагріву.

Серед технологічних процесів велике місце займає термообробка, зокрема діелектриків. Термообробку діелектриків можна здійснити як за допомогою НВЧ діелектричного нагріву, так і альтернативними способами.

Добре відомі технологічні переваги НВЧ діелектричного нагріву – рівномірне в порівнянні з іншими способами об'ємне нагрівання, вища швидкість обробки. На сьогоднішній день накопичено великий досвід у проектуванні НВЧ електротермічних установок, насамперед у галузі методів розрахунку та математичного моделювання цих процесів. У той же час при проектуванні НВЧ електротермічних установок практично не проводиться порівнянь з установками з альтернативними способами енергопідведення, незважаючи на те, що ці установки активно конкурують на ринку технологічного обладнання. Тим часом таке зіставлення дозволило б виявити ті сегменти ринку технологічного обладнання, в яких використання НВЧ установок було б найефективнішим.

Для вирішення цієї проблеми необхідна чітка система пріоритетів, відповідно до яких проводиться вибір та конструювання установки. Як такі пріоритети можуть виступати економічні критерії, які найбільше цікавлять потенційних покупців таких установок.

Таким чином, вивчення конкурентоспроможності НВЧ електротермічних установок та проблем її підвищення є актуальним. Вирішення зазначених завдань на стадіях проектування та експлуатації НВЧ установок дозволить реалізувати їх технологічні переваги із забезпеченням максимальної економічної ефективності цього виду обладнання.

### 3.1 Розрахунок капітальних інвестицій

Проектні капітальні інвестиції в устаткування і будівельно-монтажні роботи визначаються на основі цін, наведених у прайс-листах оптових цін на електроустаткування, та інших довідкових матеріалів або за фактичними витратами підприємства. Вартість устаткування по НВЧ обробці діелектричних матеріалів 200 тис. грн. При визначенні величини проектних капіталовкладень ( $K_{пр}$ ) скористаємося формулою [18]:

$$K_{пр} = K_{об} + Z_{тзс} + Z_{м} + Z_{н} + Z_{пр} - Z_{л},$$

де  $K_{об}$  – вартість придбання електрообладнання за проектом;

$Z_{тзс}$  – транспортно-заготівельні і складські витрати;

$Z_{м}$  – витрати на монтажні роботи;

$Z_{н}$  – витрати на налагоджувальні роботи;

$Z_{пр}$  – інші одноразові вкладення грошових коштів, в даному випадку під іншими витратами розуміємо витрати на підготовку проектно-конструкторської документації щодо реалізації проекту модернізації;

$Z_{л}$  – ліквідаційна вартість обладнання, заміненого у ході модернізації.

Витрати на придбання обладнання представимо у таблиці 3.1, ціни в таблиці наведені за даними заводів-виготовителів обладнання та представників ринку електротехнічного обладнання і актуальні на травень 2023 року.

Таблиця 3.1 Розрахунок витрат на придбання обладнання

Найменування	Тип	Ціна тис.грн/од.	Кількість, од.	Загальна вартість обладнання, тис. грн
НВЧ установка	-	200	1	200
Вартість придбання обладнання, тис. грн				200

Затрати на монтажні ( $Z_M$ ) і на налагоджувальні роботи ( $Z_H$ ) визначаємо наступним чином:

$$Z_{M(H)} = \sum (C_i \times a_i \times t_i) \times K_d \times K_{cm} \times K_{pr},$$

де:  $C_i$  – чисельність працівників  $i$ -го розряду, необхідних для виконання певного обсягу монтажних (налагоджувальних робіт), осіб.;

$a_i$  – годинна тарифна ставка працівника  $i$ -го розряду, грн.;

$t_i$  – час, необхідний для виконання певного обсягу монтажних (налагоджувальних робіт), год.;

$K_d$  – коефіцієнт, що враховує розмір доплат;

$K_{cm}$  – коефіцієнт, що враховує єдиний соціальний внесок;

$K_{pr}$  – коефіцієнт, що враховує інші витрати на здійснення монтажних (налагоджувальних) робіт.

При виконанні розрахунку витрат на монтажні та налагоджувальні роботи приймаємо, що годинна ставка монтажника та налагоджувальника становить 125 грн/год. Для монтажу установки потрібно 3 монтажники протягом 2 днів 8-годинного робочого дня та 2 налагоджувальники протягом 8-годинного робочого дня. Розмір доплат за складність роботи приймаємо рівним 15%, отже  $K_d=1,15$ . Коефіцієнт, що враховує єдиний соціальний внесок  $K_{cm}=1,22$ .

Коефіцієнт, що враховує інші витрати на здійснення монтажних, налагоджувальних робіт приймаємо рівними 1,05. Тоді, якщо переобладнанню підлягають 1 установка то вартість монтажних робіт становитиме:

$$Z_M = 3 * (3 * 125 * 16) * 1,15 * 1,22 * 1,05 * 10^{-3} = 26,516 \text{ тис. грн.}$$

Відповідно і вартість налагоджувальних робіт становитиме:

$$Z_H = 2 * (2 * 125 * 8) * 1,15 * 1,22 * 1,05 * 10^{-3} = 5,9 \text{ тис. грн.}$$

Транспортно-заготівельні та складські витрати визначаються виходячи з

відстані доставки обладнання від місця придбання до місця експлуатації; кількості, маси і габаритів устаткування; виду транспортних засобів; транспортних тарифів; розцінок на вантажно-розвантажувальні роботи; витрат на складську обробку.

Зазначене у даній роботі обладнання може бути транспортоване вантажним автотранспортом. Виробники даного обладнання представлені в Україні заводами, що спеціалізуються на високовольтному обладнанні. Вартість транспортно-заготівельних витрат приймаємо на рівні 5% від вартості обладнання:

$$З_{\text{тзс}} = 0,05 \times K_{\text{об}},$$

Таким чином, транспортно-заготівельні витрати становитимуть:

$$З_{\text{тзс}} = 0,05 \times 200000 = 10,00 \text{ тис. грн.}$$

Інші одноразові вкладення грошових коштів, а саме витрати на підготовку проектно-конструкторської документації щодо реалізації проекту модернізації  $З_{\text{пр}}$  приймаємо рівними 10% від вартості обладнання.

$$З_{\text{пр}} = 0,10 \times K_{\text{об}} = 0,10 * 200000 = 20,00 \text{ тис. грн.}$$

Ліквідаційна вартість обладнання, заміненого у ході модернізації і реалізованого на запасні частини для інших розподільчих пристроїв з аналогічним обладнанням та частково на металобрухт, приймаємо рівною 8% від вартості нового обладнання.

$$З_{\text{л}} = 0,08 \times K_{\text{об}} = 0,08 \times 200000 = 16,00 \text{ тис. грн.}$$

Тоді капітальні витрати на придбання основного обладнання за проектом:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{об}} + З_{\text{тзс}} + З_{\text{м}} + З_{\text{н}} + З_{\text{пр}} - З_{\text{л}}, \quad K_{\text{пр}} = 200,0 + 10,00 + 26,516 + 5,900 + 20,00 - 16,00 = 246,416 \text{ тис. грн.}$$

### 3.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати – це поточні витрати на експлуатацію та обслуговування об'єкта проектування за певний період (рік), виражені в грошовій формі. До основних статей експлуатаційних витрат електротехнічного устаткування відносяться:

- амортизаційні відрахування ( $C_a$ );
- річний фонд заробітної плати ( $C_з$ );
- відрахування на соціальні заходи ( $C_c$ );
- річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт ( $C_T$ );
- вартість спожитої електроенергії ( $C_e$ );
- інші експлуатаційні витрати ( $C_{пр}$ ).

Таким чином, річні експлуатаційні витрати складуть:

$$C = C_a + C_з + C_c + C_T + C_e + C_{пр}, \text{ грн.}$$

Амортизація об'єкта основних засобів нараховується виходячи з терміну його корисного використання. Строк корисного використання об'єктів основних засобів і нематеріальних активів визначається підприємством самостійно, виходячи з очікуваних економічних вигод, технічних і якісних характеристик основного засобу, морального і фізичного зносу, а також інших факторів, які можуть вплинути на можливість використання.

Термін корисного використання об'єктів основних засобів для нарахування амортизації, який приймається у даній роботі, відповідає мінімально допустимому терміну корисного використання для передавальних пристроїв становить 6 років. Норма амортизації при прямолінійному методі постійна протягом усього амортизаційного періоду і дорівнює:

$$H_a = (\Phi_{п} - Л) * 100\% / (\Phi_{п} \times T_{п}),$$

де:  $\Phi_{п}$  – первісна (або переоцінена) вартість об'єкта основних засобів;

$Л$  – розрахункова ліквідаційна вартість основних засобів;

$T_{п}$  – термін корисного використання (амортизаційний період).

У розрахунку приймаємо первісну вартість об'єктів основних засобів рівною витратам на придбання основних засобів. Ліквідаційну вартість приймаємо рівною 8% від початкової вартості основних засобів, що підлягають амортизації. Тоді норма амортизації становитиме:

$$N_a = (200,0 - 0,08 * 200,0) * 100\% / (200,0 * 15) = 6,1\%$$

Річні амортизаційні відрахування:

$$C_a = \Phi_{\Pi} * N_a / 100; C_a = 200,0 * 6,1\% / 100\% = 12,2 \text{ тис.грн.}$$

Розрахунок річного фонду заробітної плати. Розрахунок річного фонду заробітної плати здійснюємо за категоріями персоналу (робітники, КСС), що обслуговує об'єкт проектування, відповідно до їхньої чисельності, режиму роботи, за погодинними тарифними ставками, посадовими окладами, формами і системами оплати праці і преміювання, що застосовують на підприємстві.

Основна заробітна плата працівників – це винагорода за виконану роботу відповідно до встановлених норм праці (норми часу, виробітку, обслуговування, посадові обов'язки). Вона визначається тарифними ставками і відрядними розцінками, посадовими окладами для спеціалістів, службовців і керівників. При визначенні основної заробітної плати робітників (за відрядною або погодинною формами оплати) враховуємо погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду та розраховуємо номінальний річний фонд робочого часу робітника.

Номінальний річний фонд робочого часу одного робітника  $F_H$  визначається відповідно до режиму його роботи (кількістю робочих днів і тривалістю зміни):

$$F_H = (D_K - D_{CB} - D_{ВИХ}) \cdot T_{ЗМ}, \text{ годин, де:}$$

де,  $D_K, D_{CB}, D_{ВИХ}$  – кількість календарних, святкових і вихідних днів у році відповідно;

$T_{зм}$  – тривалість зміни, годин.

При розрахунку заробітної плати інженерно-технічного персоналу враховуємо, що вона визначається, виходячи з місячного посадового окладу. Результати розрахунку основної заробітної плати обслуговуючого персоналу представлені у табл. 3.2.

Додаткова заробітна плата – це винагорода за працю понад встановлених норм, за особливі умови праці. До додаткової заробітної плати належать премії, пов'язані з виконанням виробничих завдань і функцій за діючими на підприємстві преміальними системами, доплати і надбавки, гарантійні і компенсаційні виплати, передбачені чинним законодавством (за роботу в нічний і вечірній час, у важких і шкідливих умовах, за багатозмінний режим роботи, за керівництво бригадою незвільненим бригадирам, за навчання учнів тощо).

Додаткова заробітна плата обслуговуючого персоналу визначається в розмірі 8-10% від основної заробітної плати. Таким чином, загальна величина річного фонду заробітної плати складає:

$$C_з = Z_{осн} + Z_{дод}, \text{ грн.},$$

де:  $Z_{осн}$ ,  $Z_{дод}$  – основна і додаткова заробітна плата відповідно.

Розрахунок річного фонду заробітної платні обслуговуючого персоналу. Витрати на оплату праці персоналу, що задіяний в експлуатації обладнання містять в собі витрати на основну заробітну платню (за відпрацьований час), на додаткову зарплату (наприклад, оплата чергових відпусток) у розмірі 10% від основної заробітної платні. Визначаємо ефективний фонд робочого часу за формулою:

$$\text{ФРВ} = (D_k - D_{п} - D_v - D_o) \cdot t_{см}$$

де:  $D_k$  – кількість календарних днів у плановому періоді;



$D_{\text{п}}$  – кількість святкових днів;

$D_{\text{в}}$  – кількість вихідних днів у відповідності до режиму роботи підприємства;

$D_{\text{о}}$  – кількість днів основної (30 днів), додаткової (15 днів, за шкідливі умови) відпустки;

$t_{\text{см}}$  – тривалість робочої зміни (встановлюється у відповідності з режимом роботи та не перевищує 40 годин на тиждень)

$$\text{ФРВ} = (365 - 10 - 52 - 45) \times 12 = 3096 \text{ год.}$$

Для працівників, що працюють в шкідливих та небезпечних умовах оплата праці здійснюється за погодинно-преміальною формою оплати. Окрім основної передбачається додаткова заробітна плата у розмірі 10% від основної. Пряма заробітна плата за тарифом:

$$Z_{\text{п}} = K_{\text{тар}} \cdot t_{\text{час}} \cdot \text{ФРВ} \cdot N_{\text{р}},$$

де:  $K_{\text{тар}}$  – тарифний коефіцієнт, який враховує розряд робітника;

$t_{\text{час}}$  – годинна тарифна ставка робітника, грн/год.

Для розрахунків у кваліфікаційній роботі використовуємо середньогодинну тарифну ставку для електромонтера 4-го розряду, яка, згідно колективного договору підприємства, становить 65 грн/год та середньогодинну тарифну ставку для інженера-електрика – 78 грн/год; ФРВ – фонд робочого часу робітника за рік;  $N_{\text{р}}$  – кількість робітників, що зайняті обслуговуванням, осіб.

Загальна величина річного фонду заробітної платні ФЗП становить 929,7 тис. грн. Відрахування на єдиний соціальний внесок визначаємо за ставкою 22 % від суми усіх виплат (основних та додаткових)

$$C_{\text{с}} = 0,22 \times C_{\text{з}} = 0,22 \times 929,7 = 204,5 \text{ тис. грн.}$$

Річні витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт

електротехнічного обладнання включають витрати на матеріали, запасні блоки, визначені у відсотках від капітальних витрат (у даному випадку основних фондів): – для високовольтних вимикачів річні витрати на ремонт та обслуговування приймаємо рівними 1% від вартості обладнання. Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт:

$$C_m = 0,01 \cdot K_{об} = 0,01 \cdot 200,0 = 2,00 \text{ тис.грн.}$$

Таблиця 3.2 – Розрахунок річного фонду заробітної платні обслуговуючого персоналу дільниці.

№ п.п	Найменування професій робітників	Явочний штат на добу, осіб	Обліковий склад, осіб	Годинна тарифна ставка, грн	Номінальний річний фонд робочого часу	Всього, пряма заробітна плата за тарифом, грн	Додаткова заробітна плата, грн	Всього, основна зарплата, грн
1	електромонтер 4-го розряду	3	4	65	3096	603720	60372	664092
2	Інженер-електрик	1	2	78	3096	241488	24149	265637
	Усього						$C_3$	929729

Річні витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт електротехнічного обладнання включають витрати на матеріали, запасні блоки, визначені у відсотках від капітальних витрат (у даному випадку основних фондів): – для високовольтних вимикачів річні витрати на ремонт та обслуговування приймаємо рівними 1% від вартості обладнання. Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт:

$$C_m = 0,01 \cdot K_{об} = 0,01 \cdot 200,0 = 2,00 \text{ тис.грн.}$$

Розрахунок вартості спожитої електроенергії. Вартість електроенергії, споживаної об'єктом проектування протягом року, визначається виходячи з

його встановленої потужності, річного фонду робочого часу об'єкта проектування та втрат електроенергії за формулою:

$$C_e = W_p \cdot C_e = 30000 \cdot 2,64 = 79200 \text{ грн.}$$

де  $W_p$  – кількість спожитої за рік електроенергії, кВт•год;

$C_e$  – тариф на електроенергію станом на конкретну дату, грн/кВт•год.

Визначення інших витрат. Інші витрати з експлуатації об'єкта включають витрати на охорону праці, на спецодяг та інші. Згідно практичного досвіду, ці витрати визначаються у розмірі 4% від річного фонду заробітної плати обслуговуючого персоналу.

$$C_{np} = 0,04 \times C_z = 0,04 \times 929,7 = 37,2 \text{ тис.грн.}$$

Таким чином, експлуатаційні витрати складуть:

$$C = 12,2 + 929,7 + 204,5 + 2,00 + 79,2 + 37,2 = 1264,8 \text{ тис. грн.}$$

### **3.3 Визначення річної економії від впровадження науково-технічного рішення**

Річна економія від впровадження прийнятого науково-технічного рішення (Екр) може полягати в наступному:

- безпосередній економії ресурсів (електроенергії), зниженні собівартості і збільшенні прибутку від реалізації продукції (за інших рівних умов);
- економією платежів за спожиту електроенергію за рахунок: застосування диференційованих (багатозонних) тарифів на електроенергію та упорядкування графіка навантажень або підвищення класу точності приладів обліку;
- збільшенні випуску продукції за рахунок скорочення часу простоїв основного технологічного обладнання і поліпшення якості продукції.

Це також призводить до збільшення прибутку підприємства в результаті збільшення обсягу реалізації і продажної ціни (за інших рівних умов);

- скорочення екологічних платежів, обумовленому зменшенням шкідливих викидів підприємства у навколишнє природне середовище. Повна річна економія від впровадження прийнятого науково-технічного рішення визначається з урахуванням експлуатаційних витрат по даному об'єкту:

$$E_{кп} = E_{кр} - C = 1365,2 - 1264,8 = 100,4 \text{ тис. грн.}$$

### 3.4 Визначення та аналіз показників економічної ефективності

Оцінка економічної ефективності розглянутих в дипломному проекті технічних і організаційних рішень здійснюється на основі визначення та аналізу наступних показників:

а) розрахункового коефіцієнта ефективності (прибутковості) капітальних витрат  $E_p$ ;

б) терміну окупності капітальних витрат  $T_p$ .

Коефіцієнт ефективності (прибутковості) капітальних витрат  $E_p$  показує, скільки гривень додаткового прибутку (економії) приносить одна гривня капітальних витрат:

$$E_p = E_{кп} / K_{пр} = 100,4 / 246,416 = 0,41$$

де,  $E_{кп}$  – загальна річна економія від впровадження об'єкта проектування, тис. грн.;

$K_{пр}$  – капітальні витрати за варіантом, що викликали економію, тис. грн.

Термін окупності капітальних витрат  $T_p$  показує, за скільки років вони окупляться за рахунок загальної економії від впровадження прийнятого технічного рішення:

$$T_p = K_{пр} / E_{кп} = 246,416 / 100,4 = 2,5 \text{ років}$$

Для остаточної оцінки варіантів і вибору найбільш ефективного з них необхідно порівняти розрахункові значення  $E_p$  з нормативним значенням  $E_n$ . Проект (варіант) капітальних вкладень визнається доцільним за умови  $E_p > E_n$ .

При  $E_p < E_n$  варіант є збитковим і більш економічним визнається відмова від його реалізації.

Так як підприємство здійснює фінансування капітальних витрат за рахунок позикових коштів, тобто за рахунок банківського кредиту, то в якості нормативного значення  $E_n$  приймаємо величину плати за кредит (кредитної ставки)  $N_{кр}$ . Варіант визнається економічно доцільним, якщо розрахунковий коефіцієнт ефективності перевищує величину банківської кредитної ставки:

$$E_p > (N_{кр} + N_{інф}) / 100$$

$$0,41 > 0,16$$

де  $N_{кр}$  – банківська кредитна ставка, %, (5 %);

$N_{інф}$  – річний рівень інфляції, %, (11,3 %).

Таким чином проект визначається доцільним. Результати техніко-економічного обґрунтування ефективності впровадження результатів кваліфікаційної роботи оформляються у вигляді таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Порівняльна оцінка техніко-економічних показників

№ з/п	Найменування показників	Одиниці виміру	Базовий (альтернативний) варіант	Проектний варіант	Зміни у порівнянні з альтернативним варіантом	
					± (тис. грн)	%
1	Капітальні витрати	тис. грн.	367,5	246,416	- 124	- 33,7
2	Експлуатаційні витрати всього	тис. грн.	1365,2	1264,8	- 257,2	- 18,8

3	Річна економія всього	тис. грн.	59,6	100,4	+ 40,4	+ 67,8
4	Розрахунковий коефіцієнт ефективност	долі од.	0,22	0,41	+ 0,19	+ 86,3
5	Розрахунковий термін окупності капітальних вкладень	років	-	2,5		
6	Економія електроенергії	кВт·год	-	2500		

### 3.4 Висновки за розділом

У ході аналізу економічних показників проекту переобладнання були визначені капітальні витрати на заміну устаткування, що передбачає заміну установки НВЧ обробки вугілля, а також очікувані експлуатаційні витрати після такої модернізації.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було розглянуто способи обробки матеріалів у мікрохвильовому полі. Огляд літературних джерел проказав, що мікрохвильове випромінювання дає можливість на порядок прискорити різні хімічні реакції, процеси сушки, а також викликати прискорене нагрівання по всьому об'єму всіляких діелектричних матеріалів. Мікрохвильове випромінювання дає змогу відчутно зменшувати тривалість процесу сушіння сипучих матеріалів.

Наведено результати розрахунків термообробки вугільного завантаження у НВЧ пристроях з поздовжньою взаємодією та в періодичному режимі у НВЧ пристроях променевого типу. Показано, що максимальне відхилення температури від номінального значення температури поперечного перерізу завантаження не перевищувало 9%, а розбіжність теоретичних та експериментальних характеристик не перевищувала 5%. Розподіл температури по довжині матеріалу в НВЧ пристроях променевого типу практично рівномірний (відхилення температури від номінального значення менше трьох градусів Цельсія);

Час нагріву матеріалу до заданого значення температури матеріалу на порядок менше часу нагріву до заданої температури матеріалу в газовому середовищі. Витрати електроенергії при використанні НВЧ нагріву на (65-70)% менше витрат електроенергії за традиційної технології сушіння, а саме зниження з 203,0 кВт/т до 34,5 кВт/т.

В економічній частині розраховані витрати на придбання устаткування та матеріалів, необхідних для проведення мікрохвильової обробки вугілля.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Мелажник І.Ф., Циганков П.С., та інші. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник. – К.: НУХТ, 2003. – 400 с.: іл..
2. Meredith, R. Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998 – ISBN 0852969163
3. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Т44 Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2007. - 76 с.
4. Zhao, H.; Turner I. W. „An Analysis of the Finite-Difference Time-Domain Method for Modelling the Microwave Heating of Dielectric Materials within a Three-Dimensional Cavity System“. In: Journal Microwave Power and Electromagn. Energy, Vol. 31, Nr. 4 (1996) , S. 199-214
5. Conversion of coal fly ash to zeolite utilizing microwave and ultrasound energies: a review / Syed Salman Bukharia, Jamshid Behina, Hossein Kazemiana, Sohrab Rohania // Fuel. – 15 January 2015. – V. 140. – P. 250–266.
6. Pickles C.A., Gao F., Kelebek S. Microwave drying of a lowrank subbituminous coal // Minerals Engineering. – July 2014. – V. 62. – P. 31–42.
7. Bartholme, M., Avramidis, G., Viöl, W., Kharazipour, A. Microwave drying of wet processed wood fibre insulating boards (2009) European Journal of Wood and Wood Products, 67 (3), pp. 357-360.
8. Blanche, P., Kaboorani, A., Bustos, C. Understanding effects of drying methods on wood mechanical properties at ultra and cellular levels (2016) Wood and Fiber Science, 48 (2), pp. 117-128.
9. Li, H., Qu, Y., Yang, Y., Chang, S., Xu, J. Microwave irradiation – A green and efficient way to pretreat biomass (2016) Bioresource Technology, 199, pp. 34-41.
10. Schubert, H., Regier, M. The Microwave Processing of Foods (2005) The Microwave Processing of Foods, pp. 1-345.
11. Demir, M., Kahveci, Z., Aksoy, B., Palapati, N.K.R., Subramanian, A., Cullinan, H.T., El-Kaderi, H.M., Gupta, R.B. Graphitic Biocarbon from Metal-



Catalyzed Hydrothermal Carbonization of Lignin (2015) *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 54 (43), pp. 10731-10739.

12. Das, S., Mukhopadhyay, A.K., Datta, S., Basu, D. Prospects of microwave processing: An overview (2008) *Bulletin of Materials Science*, 31 (7), pp. 943-956.

13. Nuhiji, B., Bower, M.P., Swait, T., Phadnis, V., Day, R.J., Scaife, R.J. Simulation of carbon fibre composites in an industrial microwave (2019) *Materials Today: Proceedings*, Part 1 34, pp. 82-92.

14. Gogoi, J.P., Bhattacharyya, N.S., James Raju, K.C. Synthesis and microwave characterization of expanded graphite/novolac phenolic resin composite for microwave absorber applications (2011) *Composites Part B: Engineering*, 42 (5), pp. 1291-1297.

15. Aguilar, J.A., Gomez, I. Microwaves applied to carbothermic reduction of iron ore pellets (1997) *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 32 (2), pp. 67-73.

16. Bansal, A., Sharma, A.K., Kumar, P., Das, S. Characterization of bulk stainless steel joints developed through microwave hybrid heating (2014) *Materials Characterization*, 91, pp. 34-41.

17. Радіометричний НВЧ-контроль властивостей матеріалів / [Куценко В. П., Скрипник Ю.О., Трегубов М.Ф., Шевченко К.Л., Яненко О.П.]. – Донецьк: ШПШ «Наука і освіта», 2012. – 348 с.

18. Методичні вказівки до виконання економічної частини кваліфікаційної роботи для студентів напряму підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укладач: Л.В. Тимошенко - Дніпро: НТУ «ДП», 2020. - 18 с.

## Додаток А

## Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи

№	Формат	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Примітка
			Документація		
1	A4		Пояснювальна записка	60	
			Демонстраційні матеріали		
2	A4		Презентація		

Додаток Г  
Відгук керівника кваліфікаційної роботи

Додаток Д  
Відгуки керівників розділів