

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка та дослідження параметрів мікрохвильової печі з поліпшеними властивостями

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-23-1

Бі
Підпис

Бізюк І.Ю.
Ініціали, прізвище

Керівник

М
Підпис, дата

проф. д.т.н., Скиба М.Є.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

Н
Підпис, дата

С.І. Пундик
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

М
Підпис, дата

доц. к.т.н., Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

17 12 2024 р.

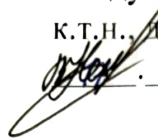
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр і назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр і назва
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доцент Неймак В.С.

 . 12 . 2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Бізюк Ілля Юрійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка та дослідження параметрів мікрохвильової печі з поліпшеними властивостями

керівник роботи д.т.н., проф. Скиба М.Є.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 16 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____

3. Вихідні дані до роботи Технології мікрохвильового нагрівання, технічні рішення мікрохвильового нагрівання та застосування при нагріванні продуктів харчування

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

Вступ. Огляд і аналіз технології НВЧ нагріву та обладнання Розробка моделей мікрохвильового нагріву. Проектування мікрохвильових печей з поліпшеними характеристиками та розробка схем керування 4 Експериментальна частина Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
Аркуш 1. Огляд технології мікрохвильового нагрівання. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Огляд та аналіз пристроїв для НВЧ нагріву. Документ технологічний (A1). Аркуш 3. Технологічна схема нагріву. Документ технологічний. Аркуш 4. Мікрохвильова піч з поліпшеними властивостями. Вид загальний (A1) Аркуш 5. Мікрохвильова піч з поліпшеними властивостями. Документ ілюстраційний. (A2) Аркуш 6. Мікрохвильова піч з поліпшеними властивостями. Схема електрична принципова (A1).

Аркуш 7. Мікрохвильова піч з поліпшеними властивостями. Схематична електрична принципова (Л1). Аркуш 8. Стенд для дослідження параметрів мікрохвильової печі. Схема структурна (Л2). Аркуш 9. Стенд для дослідження параметрів мікрохвильової печі. Документ ілюстраційний (Л3).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд і аналіз технології НВЧ нагріву та обладнання	до 15.10.22р.	
2. Розробка моделей мікрохвильового нагріву.	до 30.10.22р.	
3. Проектування мікрохвильових печей з поліпшеними характеристиками та розробка схем керування	до 5.11.22р.	
4 Експериментальна частина	до 20.11.22р.	
5. Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	до 12.12.22р.	

Студент


Підпис

І.Ю. Бізюк
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

М.Є. Скиба
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Бізюк Ілля Юрійович
2. Тема магістерської роботи Розробка та дослідження параметрів мікрохвильової печі з поліпшеними властивостями
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____
4. Об'єм магістерської роботи: креслень 9 арк., сторінок записки 77
5. Ця робота присвячена розробці та дослідження параметрів мікрохвильової печі з поліпшеними властивостями

Запропоновано поліпшену конструкцію та методики дослідження параметрів мікрохвильової печі, що забезпечує необхідні технологічні параметри НВЧ нагрівання

В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам.

В першому розділі представлено огляд і аналіз технології діалектичного НВЧ-нагріву виробів. Таким чином, дані досліджень з використання НВЧ-енергії в різних технологічних процесах дають змогу говорити про ефективність цього фізичного методу під час обробки виробів. Також було розглянуто та проаналізовано пристрої мікрохвильового діелектричного нагрівання. Переваги та недоліки мікрохвильових діелектричних нагрівальних приладів.

У другому розділі встановлено залежність частоти НВЧ-електромагнітного поля для підвищення рівномірності нагріву продукту необхідної товщини. Визначено значення власної потужності електромагнітного поля НВЧ для підвищення температури продукту за відповідної оптимальної частоти.

У третьому розділі розроблено конструкцію мікрохвильової печі та схему керування з поліпшеними характеристиками. Представлено електричну схему ланцюга керування для додаткового обдування ємності печі під час роботи. Розроблено електричну схему датчика пари для контролю кількості пари в ємності мікрохвильової печі. Обрано вентилятор для додаткового обдування магнетрона і видалення пари з ємності мікрохвильової печі.

У четвертому розділі визначено теплофізичні, електрофізичні та енергетичні параметри під час розроблення продуктів харчування. Дослідження проводили за різних температур нагріву, різних рівнів потужності, що подається на оброблювані продукти, і різних періодів приготування та обробки. Зроблено висновки щодо значень енергетичних параметрів, які використовуються для обробки харчових продуктів за різних густин. Надано рекомендації щодо вибору потужності та частоти випромінювання, використовуюваного для обробки харчових продуктів, з метою зниження енергоспоживання.

Підпис студента _____
« 17 » 12 20 24 р.

Р І Ш Е Н Н Я Е К

Протокол 5 від « 27 » 12 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК добре / 6




Рекомендації ЕК _____

Особливі відмітки _____
Технічний секретар _____

« 27 » 12 20 24 р.

Зміст

Вступ	6
1 Огляд і аналіз технології мікрохвильового нагріву та обладнання...	8
1.1 Огляд технології мікрохвильового нагріву для обробки харчових продуктів.....	8
1.2 Огляд і аналіз систем мікрохвильового розігріву харчових продуктів	12
1.3 Висновки до розділу	23
2 Розробка моделей мікрохвильового нагріву	24
2.1 Розрахунок параметрів впливу електромагнітних полів НВЧ-печей на продукти харчування.....	24
2.2 Аналіз теплофізичних та електрофізичних параметрів мікрохвильової обробки харчових продуктів.....	29
2.4 Висновки до розділу	33
3 Проектування мікрохвильових печей з поліпшеними характеристиками та розробка схем керування.....	34
3.1 Розробка мікрохвильових схем керування з поліпшеними характеристиками	34
3.2 Розроблення та вибір НВЧ-елементів із поліпшеними характеристиками	42
3.3 Висновки до розділу	51
4 Експериментальна частина	52
4.1 Розробка експериментальної установки для дослідження теплофізичних, електрофізичних та енергетичних параметрів мікрохвильового нагріву харчових продуктів	52

МРМА 24.00.00.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Розробка та дослідження параметрів мікрохвильової печі з поліпшеними властивостями Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушв
Виконав	Бізюк	Скиба					2	
Перевір.						ХНУ г.в. ЕТМ-23		
І.контр.								
Затвер.	Неймак							

ВСТУП

Фізичний механізм нагріву їжі, яка більшою чи меншою мірою є діелектриком, що містить достатню кількість води, спрощується тим, що оброблюваний матеріал поглинає енергію НВЧ-електромагнітного поля завдяки силам тертя, які виникають під дією електромагнітного поля під час поляризації молекул води. Процес поляризації розуміють як примусовий, викликаний падаючим мікрохвильовим електромагнітним полем. Енергія електромагнітного поля використовується для здійснення роботи сил тертя між молекулами в процесі поляризації та вібрації. Ця енергія, як і будь-яка інша енергія, що витрачається на подолання сил тертя, перетворюється у внутрішню потенційну енергію у вигляді тепла. При цьому збільшення енергії відбувається практично одночасно в усьому тілі, на відміну від процесу звичайної термообробки, де припливу тепла ззовні, тобто з поверхні, не відбувається. Саме тіло, що піддається мікрохвильовому діелектричному нагріванню, стає джерелом теплового випромінювання в навколишній простір.

Мікрохвильові печі різних марок, моделей і потужностей, що стали популярними останніми роками, мають практично ідентичну схемотехніку і, відповідно, практично однакові причини виходу з ладу електронних компонентів.

Під час приготування їжі в робочій камері утворюється велика кількість пари, і після вимкнення печі та зупинки вентилятора пара прилипає до внутрішніх поверхонь та електронних компонентів, спричиняючи їхнє вікове зношування та передчасний вихід з ладу.

Крім того, якщо потік повітря, що охолоджує нагрітий магнетрон, раптово припиняється під час роботи, у структурі магнетрона можуть утворитися мікротріщини, що призведе до поступового зниження вакууму і скорочення терміну служби.

Метою даної магістерської дисертації є усунення цих недоліків і підвищення надійності та довговічності побутової техніки.

Для цього нам потрібно:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

- після увімкнення таймера тримати вентилятор увімкненим досить довго, щоб провітрити внутрішню камеру й охолодити магнетрон..

- на контейнері мікрохвильової печі також має бути встановлений датчик пари. Цей датчик контролює кількість пари, що утворюється під час приготування їжі. Коли кількість пари досягає заданого значення, вентилятор вимикається.

- встановивши додатковий вентилятор для видалення парів із контейнера мікрохвильової печі та забезпечення більш інтенсивного повітрообміну.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

1.1 Огляд технології мікрохвильового нагріву для обробки харчових продуктів

На сьогоднішній час мікрохвильову обробку використовують у побуті та в харчовій промисловості для таких процесів, як приготування їжі, сушіння, розморожування, кип'ятіння, запікання, стерилізація та екстрагування.

Найпоширеніше застосування мікрохвильової енергії - приготування їжі та готових до вживання продуктів. Приготування ділиться на два етапи. Їжу нагрівають до певної температури і підтримують при цій температурі до завершення приготування. Поетапний мікрохвильовий нагрів також використовується для того, щоб уникнути нерівномірного нагріву різних частин оброблюваного продукту, оскільки швидкість нагріву висока і температура може бути перерозподілена за рахунок теплопровідності матеріалу під час контролю температури.

Однією з особливостей мікрохвильової обробки є швидке і відносно рівномірне (без градієнта) нагрівання всього об'єму продукту. Це, за своєю природою, залежить від наявності та властивостей вологи та її розподілу в об'ємі, а не від теплофізичних властивостей тіла, що нагрівається. Ця здатність діелектричного нагріву ефективно використовується для розморожування продуктів у харчовій промисловості.

Обробка дріжджових напівфабрикатів електромагнітними хвилями дуже високої частоти (мікрохвилями) посилює процес бродіння. Застосування сильного електричного поля під час замісу посилює процес бродіння, збільшуючи швидкість виділення CO₂ і швидкість підйому тіста при підвищенні температури від кімнатної до 30°C [1].

Випал в електромагнітному полі дуже високої частоти збільшує швидкість нагріву і скорочує час термообробки в 5-10 разів, але порівняно з верхнім нагріванням продукт не підгорає, харчова цінність продукту зберігається, а цінність і

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

вихід готового продукту збільшуються.

Нагрівання об'єктів, особливо харчових продуктів, електромагнітними полями відрізняється від нагріву кондукцією або конвекцією тим, що елементи докільця, які відокремлюють джерело електромагнітних коливань від об'єкта, що нагрівається, у принципі не беруть участі в теплопередачі. Тому в такій системі (джерело - навколишнє середовище - об'єкт, що нагрівається) тепловий потік не є безперервним, а енергія передається у вигляді електромагнітних коливань. Взаємодія нагрітого об'єкта з електромагнітним полем генерує тепло в самому нагрітому об'єкті.

Діелектричне нагрівання - це метод нагрівання діелектричних матеріалів за допомогою електричного поля, що змінюється в часі. Надвисокочастотний (НВЧ) нагрів - це використання енергії електромагнітного поля дуже високої частоти в діапазоні Гц для нагріву різних середовищ і об'єктів. Відповідно до Міжнародної угоди про розподіл частот, для мікрохвильових систем використовуються частоти 895-915 МГц і 2350-2450 МГц [1].

Діелектричні властивості харчових продуктів і різних матеріалів залежать здебільшого від їхнього виду, вмісту вологи, температури і частоти електричного поля. Складна взаємодія між кількістю тепла, що виділяється, і глибиною проникнення мікрохвильового поля означає, що товщина продукту має бути обрана таким чином, щоб перегрів відбувався в зовнішньому (поглинання) і внутрішньому (для нижчих значень) шарах коефіцієнта поглинання.

З електрофізичної точки зору їжа класифікується як напівпровідник. Продукти харчування являють собою складні гетерогенні суміші, що містять 50-95 % води. З погляду взаємодії їжі з електромагнітними полями її складові - білки, жири, вуглеводи і вода - слід віднести до неідеальних діелектриків, а водні розчини солей (електроліти) - до провідників згідно зі встановленими класифікаціями. При застосуванні зовнішнього електричного поля в продукті виникають струми зсуву, що відображають діелектричні властивості, і струми провідності, що відображають вільне перенесення заряду. Останній завжди присутній у вологих кормах, оскільки основи, солі та кислоти дисоціюють у воді з утворенням іонів, створюю-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

чи активну провідність у матеріалі [2].

Ефект нагрівання їжі в полі дуже високої частоти (НВЧ) в основному пов'язаний з її діелектричними властивостями, які визначаються поведінкою диполів у НВЧ-полі. Диполі (дипольні молекули або атоми) можуть бути присутніми в їжі, як, наприклад, молекули води, або створюватися в їжі під впливом зовнішнього електричного поля. Розташування наявних диполів під впливом зовнішнього електричного поля, а також поява нових диполів і їхнє розташування становлять суть поляризації (рис. 1.1). Це явище відіграє центральну роль у механізмі нагрівання предметів, поміщених у мікрохвильове поле. Енергія зовнішнього електричного поля, що використовується для поляризації діелектрика, перетворюється на тепло всередині діелектрика, і це тепло розсіюється по всьому виробу, а не тільки на його поверхні. Саме тому діелектричне нагрівання часто називають об'ємним.

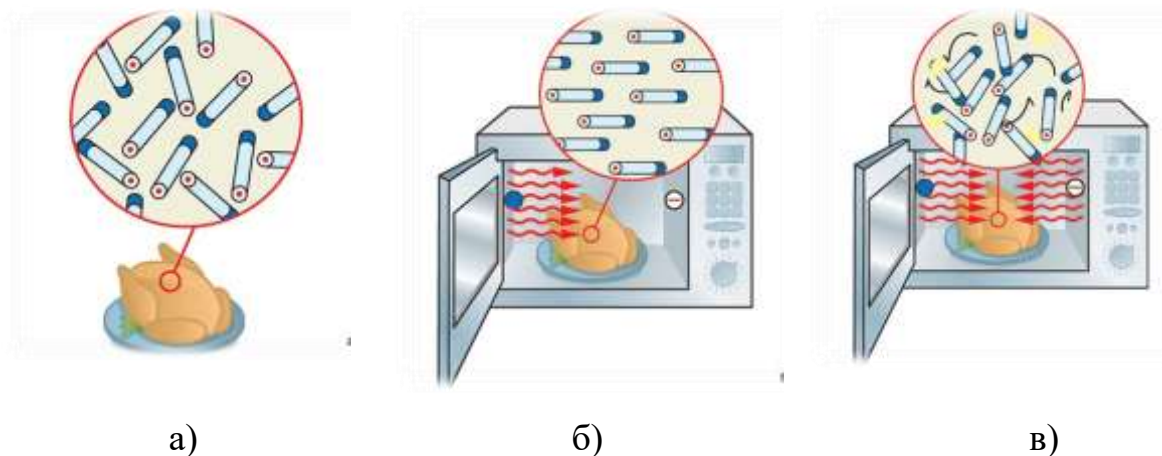


Рисунок 1.1 - Орієнтація диполів продуктів під дією зовнішнього електричного поля: а - при відсутньому електричному полі; б - при постійному електричному полі; в - при високочастотних змінних електричних полях

Мікрохвильове випромінювання - напрямом електричного поля електромагнітних хвиль змінюється мільярди разів на секунду, одночасно змушуючи молекули води обертатися. Водночас молекули води поглинають енергію випромінювання і віддають її у вигляді тепла в масу, що оточує продукт.

Джерелом мікрохвильового випромінювання є високовольтний вакуумний прилад - магнетрон (рис. 1.2). Магнетрони - це спеціальні вакуумні лампи, у яких

електрони рухаються в додатковому магнітному полі [3].

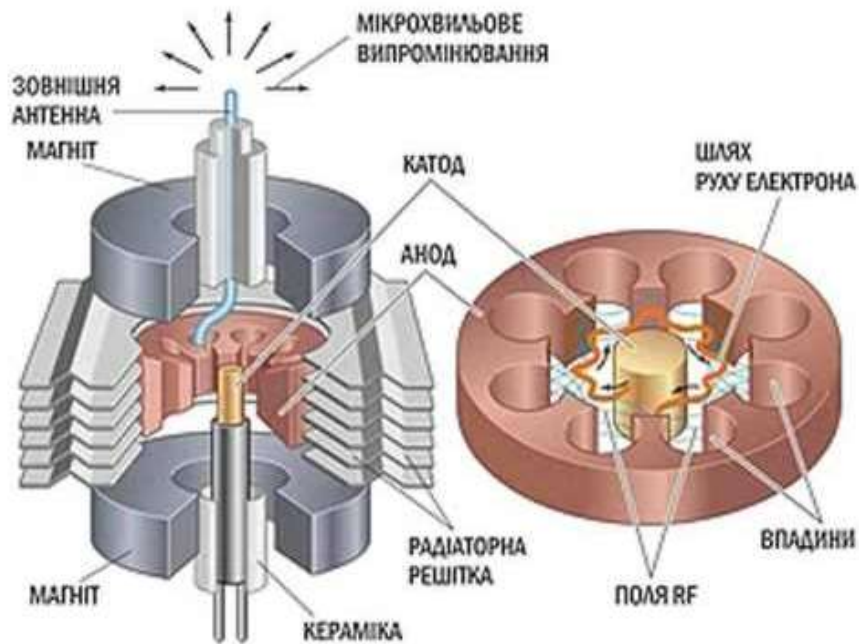
Для випромінювання мікрохвиль від антени магнетрона необхідна висока напруга (близько 3-4 кВ). Оскільки напруги в мережі (220 В) недостатньо для подачі достатньої потужності на магнетрон, для живлення використовується спеціальний високовольтний трансформатор. Потужність магнетрона сучасних мікрохвильових печей становить 600-900 Вт.



а)



б)



в)

Рисунок 1.2 – Конструкція магнетрона: а - загальний вигляд; б – схема підключення магнетрона; в – схема конструктивна магнетрона

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

У катодах магнетронів центральна нитка розжарення розташована в порожнистій камері, а зовнішня стінка служить анодом. Електрони, що вилітають із гарячого катода, летять до анода через зазор у сильному магнітному полі, створюваному постійним магнітом. Магнітне поле змушує електрони рухатися по спіралі через стінки камери. Електромагнітні резонатори в циліндричних порожнинах розташовані через рівні проміжки по краях магнетронної камери. Високочастотне магнітне поле в резонаторі збуджується електронним струмом. Це також впливає на потік електронів, змушуючи їх відхилятися в протилежному напрямку, що ще більше збільшує електричне поле, створюване в порожнині резонатора. За допомогою металевих хвилеводів частина цього поля передається на антену, звідки воно випромінюється в поле камери. Петля з дроту, прикріплена до одного з резонаторів, або отвір, просвердлений у резонаторі із зовнішнього боку циліндра, слугують вилкою для розсіювання мікрохвильової енергії [4].

Частота електромагнітних хвиль визначається розміром і формою резонатора. Змінне електромагнітне поле печі змушує молекули «вібрувати» на більш високих частотах і рухатися більш інтенсивно, що призводить до збільшення кінетичної енергії і, як наслідок, до підвищення температури. Мікрохвилі, випромінювані магнетроном (генератором хвиль), потрапляють у пічну камеру через хвилевід і багаторазово відбиваються від металевих стінок, перш ніж досягнуть продукту.

1.2 Огляд і аналіз систем мікрохвильового розігріву їжі

Мікрохвильова піч або мікрохвильова піч - це електронний пристрій, призначений для розігріву або швидкого приготування і розморожування їжі за допомогою електромагнітних хвиль у дециметровому діапазоні (зазвичай 2450 МГц) [3].

Ці печі використовують для розморожування, сушіння і плавлення пластмас, випалу кераміки та розігріву клеїв. Деякі промислові печі мають різні частоти випромінювання. На відміну від звичайних печей (наприклад, мікрохвильо-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Мікрохвильові печі зазвичай складаються з таких основних компонентів (рис. 1.3): лампи для освітлення камери печі (1), вентиляційна решітка (2), магнетронний генератор хвиль (3), охолоджувач (4), НВЧ-хвилевід для передавання хвиль у камеру печі (5), панель керування та дисплей (8), механічний привод із підставкою (9), лоток, що обертається, поворотний стіл для рівномірного опромінення продукту (10), розділювальне кільце з роликками, що обертаються (11), дверний замок (12).

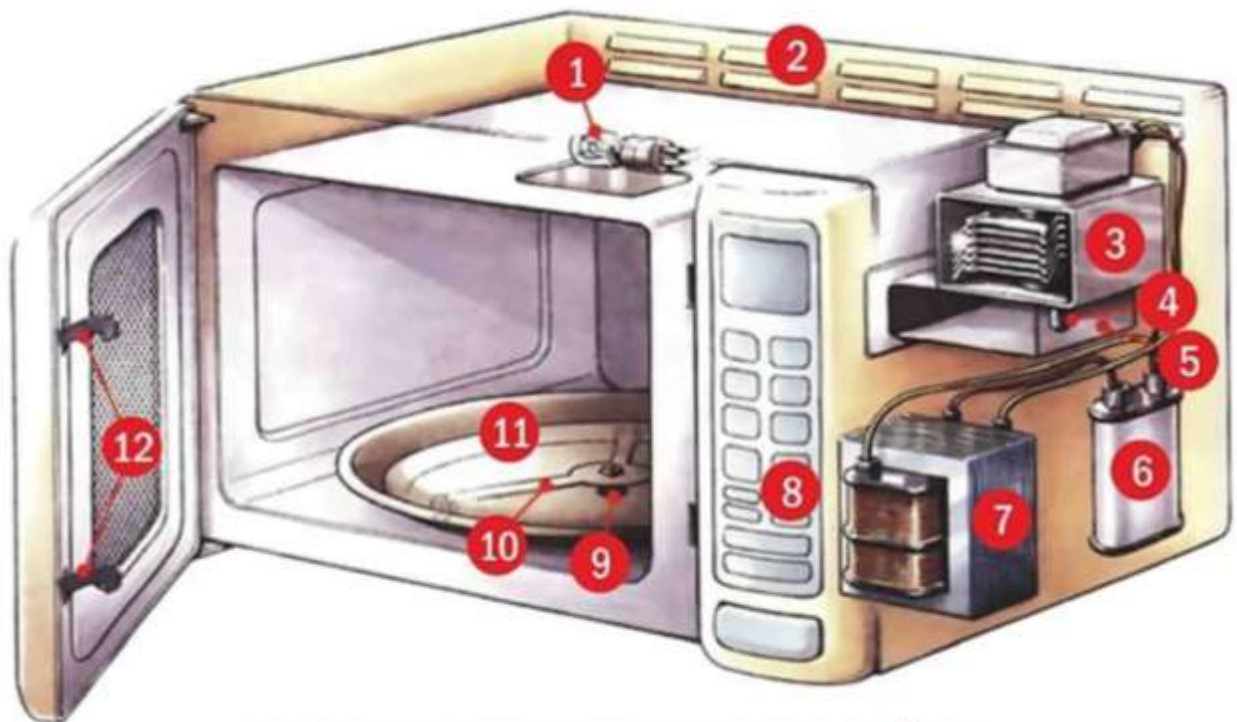


Рисунок 1.3 – Панорамний вид на мікрохвильову піч

У цьому розділі представлено основні функціональні характеристики мікрохвильових печей і відмінності між основними та додатковими елементами. Магнетрон. Магнетрон перетворює напругу на мікрохвилі та спрямовує їх у камеру печі. Без магнетрона не було б мікрохвиль, а отже, і мікрохвильової печі. Теплове реле магнетрона (тепловий запобіжник) - захищає топкову камеру від перегріву магнетрона. Якщо магнетрон перегрівається, термозапобіжник перериває подачу живлення на магнетрон.

Охолоджувач (вентилятор). Охолоджує магнетрон і вентилює камеру печі. Працює в усіх режимах мікрохвильової печі.

Замок дверцят являє собою досить складну конструкцію. Він виконує дві функції: утримує дверцята щільно зачиненими і запобігає роботі печі, якщо дверцята відчиняються під час приготування їжі. Мікрохвильова піч блокується й автоматично припиняє роботу.

Панель управління. Функціонує для своєчасного ввімкнення і вимкнення сусідніх пічних агрегатів відповідно до заздалегідь заданої програми. Існує три типи контролю і управління: механічний, кнопковий і сенсорний.

Механічний тип (рис. 1.4) - найпростіший, без електронного дисплея, тільки ручки: двома поворотними ручками встановлюється потужність опромінення і запускається таймер. Механічні регулятори - найпростіші, найнадійніші та найдешевші. Однак такий механізм не забезпечує необхідної точності під час встановлення часу, і навіть різниця в кілька секунд може зіпсувати продукт.



Рисунок 1.4 - Типи мікрохвильових панелей управління:

а - механічна; б – кнопкова; в - сенсорна

Кнопковий тип (б на рис. 4) - час встановлюється на електронному циферблаті натисканням кнопки. Менш надійні, ніж механічні годинники, але надійніші, ніж сенсорні. Привабливий зовнішній вигляд.

Сенсорний екран (рис. 4, в) - гладкий екран із кнопками для завдання функцій мікрохвильової печі. Привабливий зовнішній вигляд. Можна запрограмувати

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

складні процеси приготування. Завдяки відсутності виступаючих кнопок на екрані менше накопичується бруд. Недоліком такого управління є те, що під час сильних стрибків напруги може перегоріти сенсорний елемент, що робить його заміну дорожчою порівняно з іншими системами управління. Мікрохвильові печі з сенсорним керуванням становлять близько 60-70 % усіх мікрохвильових печей, що продаються.

Високовольтний трансформатор; перетворює напругу мережі 220 В на напругу, необхідну для роботи магнетрона.

Високовольтний запобіжник. Захищає високовольтний трансформатор від перевантаження в разі виходу з ладу високовольтного випрямляча або елемента магнетрона.

Високовольтний випрямляч. Складається з розв'язувального конденсатора і випрямного діода, розрахованого на високу напругу. Він перетворює змінний струм, необхідний для керування магнетроном, на постійний.

Вхідні двері складаються з перфорованої пластини і скляної панелі. Діаметр щілини вибирають таким чином, щоб хвилі не проходили через отвір і відбивалися в камеру.

Лампочка. Освітлює внутрішній простір духовки за відчинених дверцят і під час роботи. Напруга живлення 220 В, потужність 20 Вт.

Гриль - це функція, що дає змогу приготувати на грилі практично все, від овочів до риби та м'яса. З цим приладом ви зможете насолоджуватися «підрум'яненою» їжею в мікрохвильовій печі. Два нагрівальні елементи, під'єднані послідовно. Кожен елемент розрахований на 110 В, а два послідовно з'єднаних - на 220 В.

ТЕНЕЛЬНИЙ ГРИЛЬ - чорна металева труба з нагрівальним елементом усередині, розташована над робочою поверхнею. Багато духовок оснащено так званими «рухомими» нагрівальними елементами, які можна переміщати й розташовувати вертикально або по діагоналі (під кутом), щоб нагрівати як верхню частину, так і бічні сторони.

Грилі з рухомими нагрівальними елементами особливо зручні у використанні та надають більше можливостей для приготування страв (наприклад, у де-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

приготування їжі. Однак більш різноманітні та складні страви можна приготувати тільки в печах із грилем. Побутові мікрохвильові печі бувають окремими та вбудованими.

Побутові мікрохвильові печі можна розділити на:

- мікрохвильові печі Мікрохвильова піч - це звичайна мікрохвильова піч, що виконує тільки функцію розморожування та розігрівання їжі. Жодних додаткових функцій у неї немає (рис. 1.6, а).

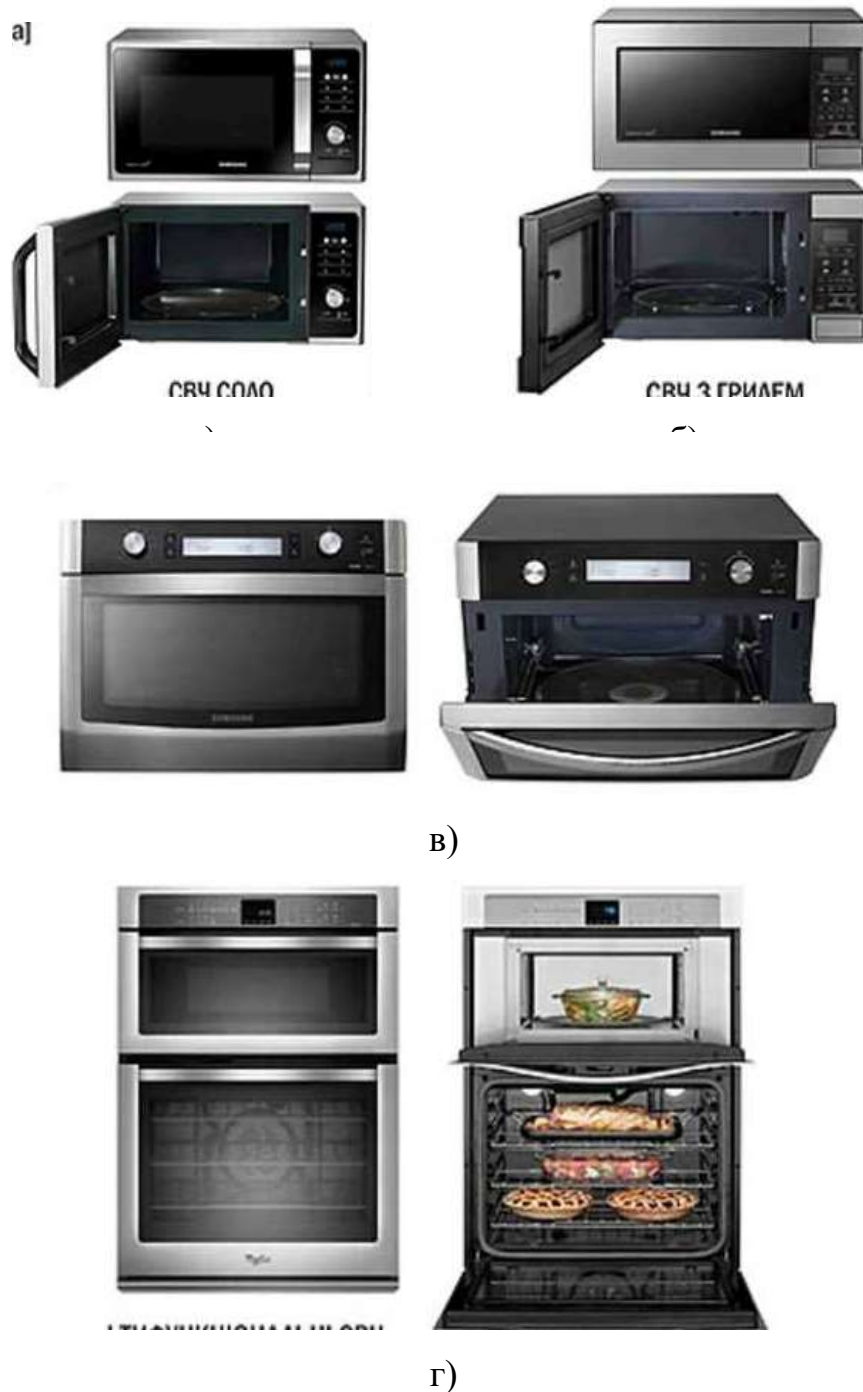


Рисунок 1.6 – Конструкції НВЧ-печей: а - НВЧ соло; б - НВЧ з грилем;

						МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

в - НВЧ з конвекцією; г - мультифункціональні НВЧ

- мікрохвильові печі з грилем - це НВЧ-печі, які, окрім розігрівання та розморожування продуктів, мають вбудовані нагрівальні елементи (додаткові нагрівальні елементи) і рожен для приготування, наприклад, курки-гриль (рис. 1.6, б).

- конвекційна мікрохвильова піч - ця мікрохвильова піч здатна обдувати продукти гарячим повітрям під час приготування. Повітря рівномірно розподіляється по всій поверхні страви, створюючи ефект, схожий на приготування в духовці (рис. 1.6, в). Завдяки конвекції продукти можна запікати або смажити з найкращим смаком. У таких мікрохвильових печах можна тушкувати м'ясо, запікати птицю та випікати торти на більш високих швидкостях, ніж зазвичай.

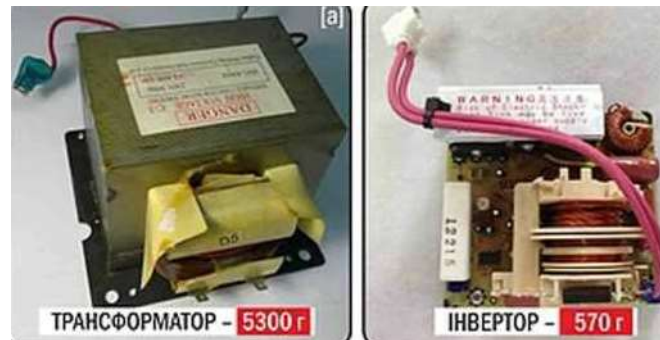
Мікрохвильова піч із грилем і конвекцією може використовуватися для приготування складних страв. У мікрохвильовій печі цього типу можна готувати п'ять різних видів їжі, включно з розігріванням продуктів і напоїв, розморожуванням, простим приготуванням і кип'ятінням води. Гриль можна використовувати для приготування смачних страв із хрусткою скоринкою, як-от курка та гарячі сендвічі. Комбінуйте гриль і мікрохвильову піч для приготування м'яса. Поєднуйте мікрохвильову піч і конвекцію для сушіння трав або приготування овочевих страв. Комбінуйте гриль і конвекцію для створення складних вишуканих страв ресторанна кухня.

Багатофункціональні мікрохвильові печі (d на рис. 1.6). Найдорожчі з побутових мікрохвильових печей, що мають додаткові функції, як-от гриль, конвекція, пароварка і тостер, а також інші режими приготування та інші технічні рішення, крім стандартної мікрохвильової печі.

Інверторна мікрохвильова піч - технологія інверторних печей була розроблена компанією Panasonic. Замість того щоб випромінювати частинами з постійною потужністю (імпульсами), як у звичайних мікрохвильових печах, інверторна піч випромінює хвилі безперервно, тому потужність випромінювання змінюється в часі та безперервно проникає в їжу. Це гарантує більш природне приготування (збереження поживних речовин і первісної структури продукту) і більш економічне нагрівання. Назва «інверторна піч» походить від спеціального пристрою, зва-

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ного інвертором. Від інших (звичайних) типів печей його відрізняє наявність інвертора. Він дає змогу контролювати й керувати потужністю магнетрона. Трансформатор (рис. 1.7) займає в мікрохвильовій печі набагато більше місця, ніж електронний блок управління інвертора. Відсутність трансформатора робить ці моделі легшими.



а)



б)

Рисунок 1.7 – Звичайні та інвертовані трансформатори для мікрохвильових печей:

а – загальний вид; б – графік зміни потужності

Головна перевага інверторних мікрохвильових печей полягає в тому, як вони працюють. Змінюючи потужність магнетрона під час приготування, можна впливати на продукти протягом усього процесу готування. Поступово знижуючи потужність наприкінці процесу приготування, можна отримати складніші та корисніші страви.

Безсумнівно, всі мікрохвильові печі споживають значну кількість енергії. Печі з грилем і конвекцією є найбільшими споживачами енергії і вимагають наявності на кухні надійного джерела живлення. У цих моделей є тільки один недолік. Сьогодні вони мало чим відрізняються від звичайних мікрохвильових печей. Якщо раніше різниця становила майже половину ціни, то тепер вона стала доступ-

нішою для споживачів.

У звичайних мікрохвильових печах частина мікрохвиль відбивається від стінок робочої камери і потрапляє на продукти. За наявності поворотного столу мікрохвилі розподіляються рівномірно. Існують мікрохвильові печі без поворотного столу (рис. 1.8 а) і мікрохвильові печі з поворотним столом (рис. 1.8 б). Розподільник мікрохвиль обертається всередині камери. Він може бути встановлений у верхній або нижній частині мікрохвильової печі.

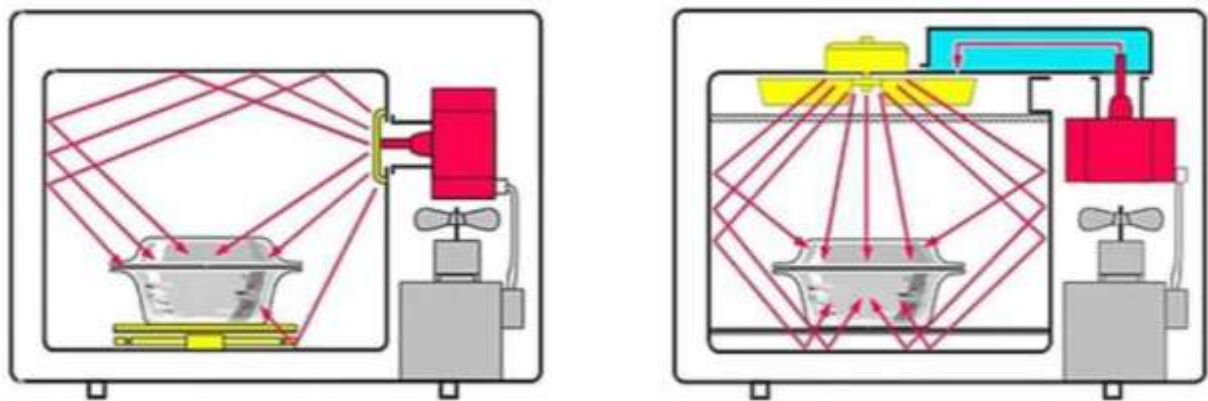


Рисунок 1.8 - Мікрохвильова піч: а - без поворотного столу;
б - із поворотним столом

Додаткові опції та аксесуари, що використовуються в мікрохвильових печах.

Сенсорне приготування (Sensor) (рис. 1.9). У деяких моделях ця функція дає змогу готувати більш точно і своєчасно. Спеціальні датчики відстежують активне виділення пари з продуктів, коли температура досягає 100°C, і розраховують час, що залишився, залежно від продуктів, що завантажуються.



Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

Рисунок 1.9 – Функція сенсорного приготування продуктів

Тарілка зі скоринкою. Додатковий спосіб отримання підсмаженої скоринки. Мікрохвильові печі оснащені металевими пластинами, які під час приготування нагріваються до 200°C.

Голосові підказки. Деякі мікрохвильові печі нового покоління оснащені підказками на дисплеї та додатковими голосовими підказками.

Подача пари. Моделі з цією опцією запобігають висиханню продуктів, прискорюють процес приготування і полегшують очищення робочої камери.

Функція автоматичного зважування автоматично зважує продукти в робочій камері за допомогою вбудованих ваг. Це дає змогу точніше встановити час і потужність мікрохвильової печі.

У мікрохвильових печах використовується кілька способів захисту від мікрохвиль: магнетрон вимикається за відчинених дверцят, дверцята блокуються під час увімкнення печі, функція батьківського контролю блокує пульт дистанційного керування, щоб він не реагував на його команди.

Переваги мікрохвильових печей: компактність - відносно невеликі розміри; найефективніше приготування їжі, як порівняти з іншими кухонними приладами; швидке розморожування та розігрівання продуктів; під час приготування в мікрохвильовій печі зберігається більше поживних речовин, ніж на плиті; не потрібно використовувати воду або олію (не утворюються канцерогенні речовини); немає продуктів згоряння. Відсутність викидів, екологічність - працює без шкоди для довкілля тощо.

Недоліки мікрохвильових печей Приготування їжі обмежене (у мікрохвильовій печі не можна використовувати деякі рецепти та готувати деякі продукти (наприклад, яйця, молюски)); внутрішні поверхні забруднюються та їх незручно чистити; між корпусом і дверцятами утворюються щілини (через знос ущільнювача); захист від мікрохвиль із часом погіршується; електронні При приготуванні їжі у мікрохвильовій печі не використовують олію або вершкове масло (включно із соками), тому смак страв відрізняється від традиційних способів приготування. Для отриман-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ня хороших результатів необхідно правильно і точно встановити час і потужність.

Думки про шкоду мікрохвиль для здоров'я розділилися і багато в чому засновані на комерційних інтересах. Пряма шкода мікрохвиль для здоров'я людини пов'язана з несприятливим впливом мікрохвильового випромінювання. Щоб звести до мінімуму прямий і непрямий негативний вплив мікрохвильового випромінювання, рекомендується наступне: не стійте поруч із мікрохвильовою піччю, що працює; не готуйте в мікрохвильовій печі протягом тривалого часу.

1.3 Висновки до розділу

У цьому розділі представлено огляд і аналіз технології діалектичного НВЧ-нагріву виробів. Таким чином, дані досліджень з використання НВЧ-енергії в різних технологічних процесах дають змогу говорити про ефективність цього фізичного методу під час обробки виробів.

Використання мікрохвильового нагріву дає змогу поліпшити технічні процеси, знизити вартість кінцевої продукції та підвищити харчову й біологічну цінність сировини, напівфабрикатів і готових продуктів.

Також було розглянуто та проаналізовано пристрої мікрохвильового діелектричного нагрівання. Переваги та недоліки мікрохвильових діелектричних нагрівальних приладів.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ

2.1 Розрахунок параметрів впливу електромагнітних полів НВЧ-печей на продукти харчування

Фізичний механізм нагріву їжі, яка більшою чи меншою мірою є водовмісним діелектриком, полягає в тому, що оброблюваний матеріал поглинає енергію електромагнітного поля НВЧ завдяки силам тертя, що створюються електромагнітним полем між молекулами води під час поляризації. Поляризаційні процеси визначають як вимушені процеси, індуковані вхідними мікрохвильовими електромагнітними полями. Енергія електромагнітного поля витрачається на сили тертя між молекулами в процесі молекулярної поляризації та вібрації. Ця енергія, а також інші види енергії, використовуються для подолання сил тертя і перетворюються у внутрішню потенційну енергію у вигляді тепла. На відміну від звичайних процесів термообробки, збільшення енергії відбувається практично одночасно по всьому тілу, а не зовнішнім струменем, тобто потоком тепла від поверхні. Джерелом випромінювання тепла в навколишній простір є об'єкт, що піддається мікрохвильовому діелектричному нагріванню.

Електромагнітні хвилі, що проходять через хвилеводи, зазвичай поділяють на два типи:

- хвилі типу Е мають складову електричного поля в напрямі поширення і не мають складової магнітного поля в тому самому напрямі;
- хвилі типу Н мають складову магнітного поля в напрямі поширення, але не мають складової електричного поля в тому самому напрямі; і хвилі типу Е мають складову електричного поля в напрямі поширення, але не мають складової магнітного поля в тому самому напрямі.

Коли ці типи хвиль змішуються, у хвилеводі генерується безліч змішаних хвиль. Водночас різні типи хвиль створюють різні положення ліній електромагнітного поля у хвилеводі. У камерах для приготування їжі їжа готується під впливом мікрохвильового випромінювання. Камера являє собою прямокутний металевий

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

вий контейнер, мікрохвильове випромінювання вводиться з одного боку. Уже один цей факт свідчить про те, що основна проблема таких печей - нерівномірне нагрівання їжі всередині. Насправді внутрішній простір духовки - ідеальне місце для утворення стоячих хвиль (аналог акустичних резонаторів). Це означає, що багато мінімумів і максимумів електромагнітних коливань спричинені багаторазовими відбиттями електромагнітних хвиль. Хвилі вдаряються об металеві стінки камери. Спектр часів резонансу мікрохвильової камери з продуктом і без нього показано на рис. 2.1.

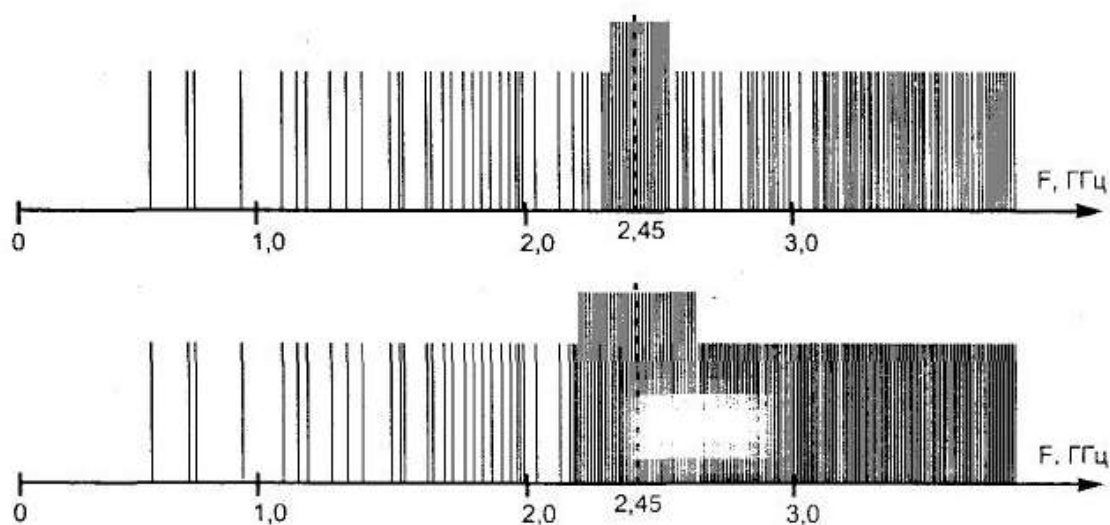


Рисунок 2.1 – Частота мікрохвильового резонансу в топковій камері

Крім основних коливань, у камері виникає низка високих коливань. Щоб забезпечити найкраще приготування їжі, необхідно домогтися найбільшої щільності мод у районі основної робочої частоти генератора, що приводить камеру в рух. Найпростіший спосіб домогтися цього - збільшити розмір камери.

Як видно з малюнка 2.1, рівномірність нагріву їжі збільшується в міру збільшення завантаження камери. Дійсно, чим більше готового продукту завантажуються в камеру, тим складнішим стає розподіл електромагнітного поля в камері. Крім основних коливань, у камері виникає низка складних режимів коливань, які сприяють більш рівномірному розподілу електромагнітної енергії в камері, що призводить до більш рівномірного нагрівання продукту.

Таким чином, велике навантаження на варильну поверхню покращує ситуа-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

цію, але не є достатнім для правильного приготування їжі. Рівномірного нагріву можна домогтися тільки шляхом чергування наявних типів електромагнітних коливань. Амплітуду різних режимів коливань можна варіювати. При цьому кожен продукт під час приготування піддається впливу полів з різним розподілом мінімальних і максимальних значень. Поєднання цих полів забезпечує рівномірне нагрівання продуктів у центрі робочої камери.

У дослідженнях використовуються різні види овочів і фруктів. Яблука, картопля, морква, буряк, огірки, баклажани і перець мають різну пористість, щільність, механічні, електрофізичні та теплові властивості. Через ефект загасання електромагнітних хвиль, як і в інших хвильових процесах, поглинаєма потужність зменшується в міру віддалення від поверхні зразка, відповідно, зменшується і рівень нагріву (рис. 2.2).

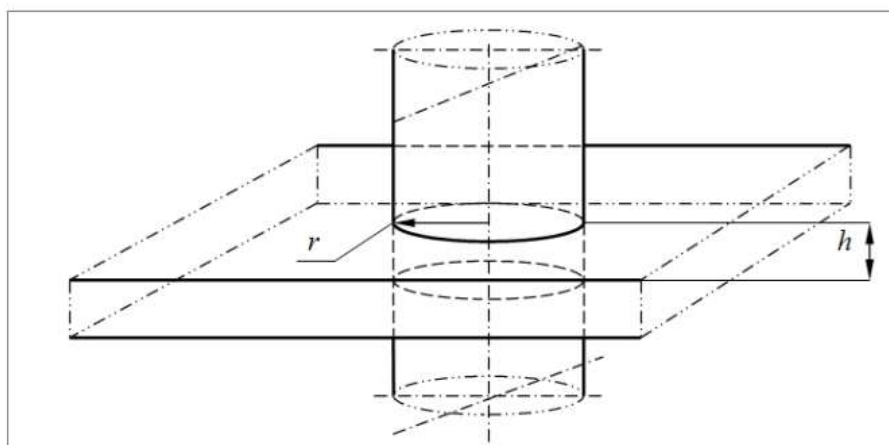


Рисунок 2.2 – Моделювання об'єктів, що підлягають нагріванню в мікрохвильових печах, і рекомендовані геометричні розміри

Об'єктом моделювання є геометрія, що складається з перетинів взаємно ортогональних геометрій, тобто нескінченно довгого циліндра із заданим радіусом і нескінченно довгої пластини з товщиною, що дорівнює висоті циліндра (рис. 2.3).

НВЧ-випромінювання

Глибина проникнення випромінювання у продукт

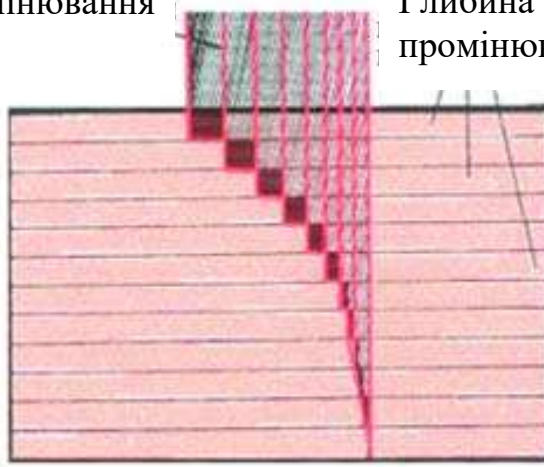


Рисунок 2.3 – Діаграма розподілу поглиненої потужності в об'ємі продукту

Згідно з інформацією про процес нагрівання зразка, передбачається такий тепловий баланс:

$$Q_1(h) - Q_2(h) = q(h) \quad (2.1)$$

де h – товщина зразка який досліджується; $Q_1(h)$ - тепло, що виділяється в об'ємі зразка при поглинанні мікрохвильової енергії; $Q_2(h)$ - кількість тепла, що передається зсередини до поверхні зразка і виділяється в навколишнє середовище механізмами теплопередачі; $q(h)$ - тепло, що залишилося в об'ємі зразка через падаючу мікрохвильову енергію.

Якщо припустити, що теплове випромінювання в зовнішнє середовище постійне і визначається тільки складом і структурою зразка, то збільшення питомої потужності електромагнітних мікрохвиль призведе до збільшення залишкового тепла в об'ємі зразка. В іншому разі температура буде підвищуватися. Як було помічено вище, температура зменшується зі збільшенням відстані від джерела тепла, так само як і електромагнітне випромінювання стає слабшим зі збільшенням відстані від поверхні. Фізична модель впливу мікрохвильового випромінювання на діелектричні матеріали з неоднорідною структурою і складом показана на рис. 2.4.

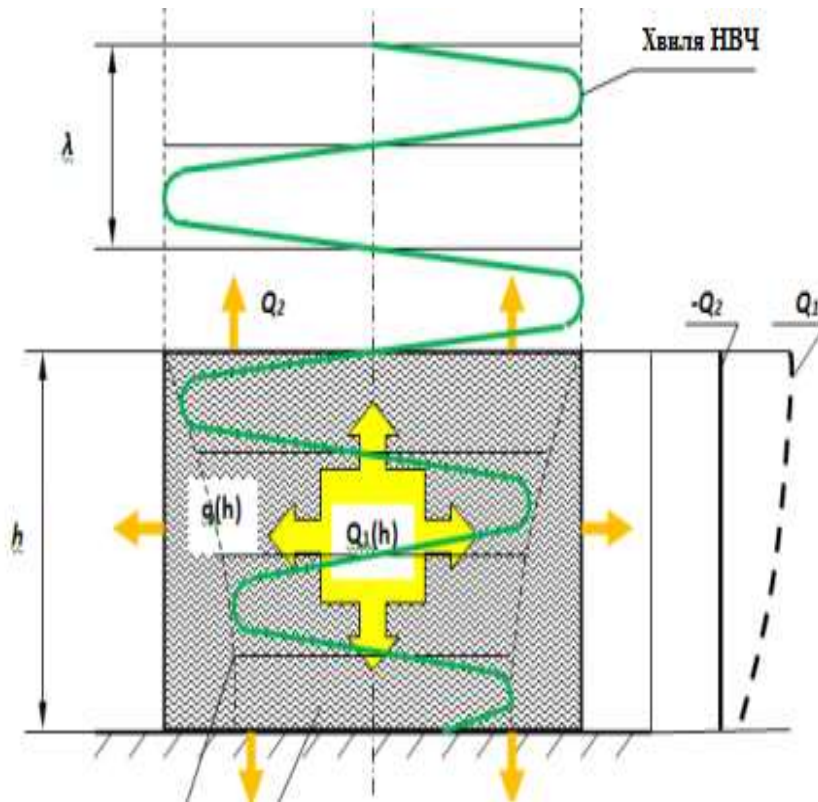


Рисунок 2.4 – Схема дії НВЧ-випромінювання на діелектричні матеріали неоднорідної структури і складу

Припускаючи рівномірний розподіл частинок в об'ємі зразка, можна припустити таке: мікропори з підвищеним термічним опором перешкоджають дифузії теплового потоку в зовнішнє середовище. Під час використання низько- і середньогравітаційних мікрохвильових електромагнітних полів мікропори виробу слугують своєрідним тепловим бар'єром на шляху теплового потоку, випромінюваного об'єктом нагріву, тобто з внутрішньої області. Розсіювання від об'єкта до зовнішньої області сповільнюється, а частинки дифундують поблизу виробу через зниження інтенсивності.

Таким чином, у наведеному вище випадку рівняння теплового балансу для процесу нагріву може бути записано таким чином:

$$Q_1(h) - [Q_2(h) - q_1(\Pi)] = q(h) \quad (2.2)$$

де $q_1(P)$ – кількість тепла, що утримується на кордонах порожнин (пор) у структурі зразка, пропорційна пористості матеріалу.

Згідно з цією формулою, що більше тепла утримується в порах продукту, то менше тепла виділяється в навколишнє середовище, що призводить до залишкового тепла і рівномірного теплового ефекту від поверхні до глибини продукту. Це дає змогу збалансувати тепловий ефект і поліпшити якість продукту.

При використанні високої питомої потужності характер залежності відрізняється від описаного тим, що температура швидко зростає зонально. Це може бути пов'язано зі збільшенням дипольної активності мікрочастинок нуту в сильному електромагнітному полі. Оскільки потужність НВЧ-електромагнітного поля зменшується зі збільшенням відстані від поверхні, енергії електромагнітних хвиль стає недостатньо і приплив додаткового тепла припиняється. Тоді починає працювати описаний вище механізм.

При використанні високої питомої ємності від температурної залежності відрізняється від описаного вище і різко зростає в діапазоні. Ймовірно, це пов'язано зі збільшенням дипольної активності частинок продукту в сильному електромагнітному полі. У міру віддалення від поверхні потужність НВЧ-електромагнітного поля зменшується, електромагнітні хвилі витрачають свою енергію і припиняють приплив додаткового тепла. У майбутньому описаний вище механізм може бути.

2.2 Аналіз теплофізичних та електрофізичних параметрів мікрохвильової обробки харчових продуктів

Характер і швидкість охолодження та нагріву залежать від теплових властивостей плодів і овочів, сировини та продуктів із них. Теплофізичні властивості овочів і фруктів використовуються для розрахунку раціональних параметрів процесів приготування їжі з використанням різних джерел енергії. У цьому випадку використовується мікрохвильове нагрівання.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Ці показники слід використовувати в подальших розрахунках для моделювання процесу розігрівання.

До них належать: насипна густина, яка являє собою масу фрукта, овоча або іншого продукту на одиницю об'єму і розраховується за такою формулою:

$$P = \frac{m}{V} \text{ кг/м}^3, \quad (2.3)$$

де m – вага продукту, кг; V - об'ємна маса продуктів, м³.

Значення цього показника залежить від вмісту сухої речовини в плоді чи овочі, вмісту води в тканині та вмісту повітря. Повітря в тканині наповнене киснем, вуглекислим газом та азотом і займає відносно великий об'єм. Що більше сухої речовини і менше повітря в плоді чи овочі, то щільніша маса.

Теплоємність вказує на інтенсивність зміни температури під час охолодження або нагрівання овочів і фруктів. Питома теплоємність - це величина, що вказує на кількість тепла, яка необхідна для нагрівання одиниці маси (кг) овочів і фруктів на 1°C. Питома теплоємність розраховується за такою формулою:

$$C = \frac{Q}{m \cdot \Delta t} \text{ Дж/(кг К)}, \quad (2.4)$$

де Q - кількість теплової енергії для опалення, Дж; m - обсяг фруктів, овочів та інших товарів, кг; Δt - перепад температури при нагрівання, °C.

Питома теплоємність фруктів і овочів залежить від вмісту вологи, органічних і мінеральних речовин, структури та властивостей тканин. Існує пряма залежність між вмістом вологи та питомою теплоємністю [6].

Теплопровідність - це кількість теплової енергії, що проходить за одиницю часу (секунду) через 1 м² поверхні овоча або фрукта завтовшки 1 м за різниці температур в 1 °C [7]. Вона розраховується за таким рівнянням:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\lambda = \frac{Q \cdot B}{S(t_1 - t_2)\tau} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}), \quad (2.5)$$

де Q - теплова енергія, Дж; B - ширина продукту, м; S - площа, через яку передається тепло в продукті, м^2 ; τ - час, с.

Абсолютне значення теплопровідності фруктів і овочів залежить від вмісту вологи, температури, структури та пористості тканин.

Теплопровідність - це показник того, як швидко фрукти та овочі нагріваються або остигають. Що вища теплопровідність, то швидше фрукт чи овоч охолоджується або нагрівається. Рівень теплопровідності залежить від щільності, розміру пор і температури фрукта або овоча [7].

Теплопровідність у процесі визначається за таким рівнянням:

$$d = \frac{\lambda}{C \cdot P} \quad (2.6)$$

де d - коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; λ - коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; C - питома теплопровідність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; P - щільність маси фруктів, овочів та іншої продукції, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Електричне поле впливає не тільки на фізіологічний стан овочів і фруктів, а й на вміст деяких речовин, наприклад, кислот у темних фруктових соках, що використовуються в наукових дослідженнях.

Електропровідність - це здатність фруктів або овочів проводити електричний струм. Електропровідність залежить від хімічного складу фруктів, овочів і продуктів їхньої переробки, вмісту води, цукрів, органічних кислот і неорганічних солей, структури клітинної мембрани, структури та властивостей тканин. Кожна сполука має свою власну провідність, а всі разом вони складають загальну провідність фрукта чи овоча. Різні види, сорти та культивари фруктів і овочів, кожен з яких має свій особливий хімічний склад, клітинну та тканинну структуру, володіють різними рівнями електропровідності [8].

Електропровідності плодів і овочів змінюється при зміні їхнього хімічного складу, структурних, механічних та електрофізичних властивостей тканин, а та-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

кож збільшується при збільшенні вмісту вільної та зменшенні вмісту зв'язаної води.

Швидкість приготування їжі в мікрохвильовій печі визначається потужністю магнетрона. Більшість кухонних плит сьогодні оснащені магнетронами потужністю 700-850 Вт, які здатні закип'ятити, наприклад, чашку води вагою 200 г за 2-3 хвилини. Тому потужність мікрохвильової печі можна визначити таким простим способом.

Наступні рівняння встановлюють зв'язок між вихідною потужністю мікрохвильового нагріву і тепловими та фізичними параметрами процесу обробки продукту:

$$P = \frac{C \cdot m \cdot \Delta t}{\tau} \quad (2.7)$$

де C – питома теплоємність продукту, що обробляється (Дж/градус); m – вага продукту, що обробляється (кг); Δt – різниця температур (початок і кінець нагріву); τ – час нагріву (с).

У результаті аналізу було визначено параметричні залежності теплоємності та теплопровідності, а також температурну динаміку.

Процес НВЧ-нагріву діелектричних матеріалів, зокрема досліджуваних продуктів харчування, характеризується перенесенням електричних зарядів і пов'язаних із ними молекул (поляризація з утворенням диполів) за умови впливу на матеріал (продукт) ультразвуку, високочастотних електромагнітних полів, призначених для динаміки НВЧ-діелектричних процесів, і комплексної проникності ε з втратами та діелектричної електрофізичних властивостей об'єкта впливу, як-от тангенс кута нахилу, є важливими для нагріву $\text{tg}\delta$ [2].

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 \varepsilon (1 - j \cdot \text{tg}\delta) \quad (2.8)$$

де ε - відносні діелектрична проникність матеріалів; ε_0 - електрична постійна; j – щільність струму магнетрона; $\text{tg}\delta$ - коефіцієнт діелектричних втрат (тангенс кута

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

втрат).

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

де ε_1 - активна складова діалектичної проникності.

Водночас ослаблення електромагнітного поля всередині матеріалу (як і в інших хвильових процесах) знижує силу його впливу в міру збільшення поперечних розмірів виробу, що призводить до нерівномірного нагрівання. Згідно з [3], оцінка рівномірності НВЧ-нагріву діелектриків залежить від глибини проникнення НВЧ-електромагнітного поля, що визначається відстанню, на якій поглинута потужність задається відстанню, на якій вона зменшується на коефіцієнт e , який визначається таким рівнянням:

$$\Delta = \frac{\lambda}{\sqrt{2 \cdot \varepsilon_k (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}} \quad (2.10)$$

де λ - довжина хвилі залежить від частоти електромагнітної хвилі і властивостей матеріалу.

Енергетики розуміють, що глибина проникнень мікрохвиль - це віддаль, на якій щільність потужності знижується до 37% від її значення на поверхні, а 63% початкової енергії електромагнітних хвиль поглинається матеріалом і перетворюється на тепло.

Електрофізичні властивості багатьох харчових продуктів описано в [4]. Дані, отримані для цього дослідження, були взяті з відповідної літератури. Ці дані будуть використані надалі для визначення частоти НВЧ-електромагнітного поля, необхідної для рівномірної теплової обробки продуктів стандартної товщини.

2.4 Висновки до розділу

З урахуванням зміни теплофізичних, фізико-механічних та електрофізичних

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

властивостей продукту в процесі діелектричного нагріву встановлено залежність частоти НВЧ-електромагнітного поля для підвищення рівномірності нагріву продукту необхідної товщини. Визначено значення власної потужності електромагнітного поля НВЧ для підвищення температури продукту за відповідної оптимальної частоти.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ З ПОЛІПШЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТА РОЗРОБКА СХЕМ КЕРУВАННЯ

3.1 Розробка мікрохвильових схем керування з поліпшеними характеристиками

На основі наведених вище даних було виявлено низку недоліків, які призводять до виходу з ладу мікрохвильової печі:

- під час приготування їжі в робочій камері утворюється велика кількість пари, і після вимкнення печі та зупинки вентилятора пара прилипає до внутрішніх поверхонь та електронних компонентів, спричиняючи вікове зношування та передчасний вихід з ладу;

- якщо потік повітря, що охолоджує нагрітий магнетрон під час роботи, раптово припиниться, у структурі магнетрона з'являться мікротріщини, що призведе до поступового зниження вакууму і скорочення терміну служби.

Виходячи з цього, було намічено ключові аспекти модернізації мікрохвильових печей для підвищення їхньої надійності та довговічності.

Для цього знадобиться модернізація наявних електричних ланцюгів керування та інтеграція таких елементів керування:

- реле часу для підтримання роботи вентилятора, навіть якщо таймер закінчився за вимкненої мікрохвильової печі;

- датчик контролю пари в контейнері мікрохвильової печі.

На рис. 3.1 та в ілюстративній частині бакалаврської роботи показано додаткову схему під'єднання реле часу для продовження роботи вентилятора після вимкнення мікрохвильової печі та активації таймера.

Контакти ланцюга L-out (фаза) і N-out (нейтраль) підключаються безпосередньо до відповідних клем (контактів, доріжок) на виході мережевого фільтра, де завжди є мережева напруга..

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- плівковий конденсатор типу K73 на напругу 400 В. Також можна використовувати електролітичні резистори ємністю 0,125 Вт.

Для забезпечення надійнішої роботи мікрохвильової печі та зменшення зовнішнього випромінювання і радіоперешкод в електромережі фаза мережевої вилки має бути захищена.

Схему також можна використовувати для інших пристроїв, які потребують тимчасових затримок від кількох секунд до кількох хвилин, із тимчасовою нестабільністю менше ніж 10%, як для струмових навантажень (двигуни, реле), так і для струмових навантажень (лампи, нагрівачі).

Для поліпшення роботи мікрохвильових печей і підвищення їхньої довговічності та ефективності в наявні схеми мікрохвильових печей вбудовують ланцюги, що під'єднують датчик контролю пари всередині контейнера мікрохвильової печі. Датчик контролю виявляє наявність пари в контейнері, а елемент у ланцюзі управління вмикає та вимикає вентилятор для додаткової вентиляції та видалення пари з контейнера печі. Схему підключення датчика пари показано на рис. 3.2.

Схема працює таким чином. Термостат постійно очікує натискання кнопки S2 і закривається, щойно обирається режим приготування в мікрохвильовій печі або повертається важіль таймера, тим самим активуючи кнопку. Коли кнопка закривається, генерується імпульс струму, який надходить на вхід Т-тригерного лічильника DA1 (вивід 3) і перемикає його зі стану 0 у стан 1 (вивід 1). У цей же час транзистор VT2 відкривається, активуючи реле, контакти якого вмикають мікрохвильову піч.

Після закінчення процесу приготування всі елементи мають припинити роботу, і тільки вентилятор має продовжувати працювати до повного звільнення камери печі від пари.

За надлишку пари в контейнері пара, що випаровується з поверхні продукту через паропровід (передбачений конструкцією цього датчика), потрапляє на термістор R3, який має негативний температурний коефіцієнт.

Це зменшує опір і відкриває транзистор VT1. Позитивна напруга подається з емітера VT1 на вхід уставки тригера R (вивід 4), який скидається. Тригер пере-

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

микається в стан 0, піч припиняє роботу, а вентилятор обдування обертається до повного видалення парів. Ланцюги затримки C4-R7 також під'єднані до входу R і формують імпульс скидання тривалістю майже дві секунди в перший момент подачі живлення на схему. Це необхідно для утримання тригера в нульовому стані під час увімкнення мікрохвильової печі до завершення всіх перехідних процесів. Для запобігання брязкоту контакту S2 у схему введено ланцюг C5-R8, який посиляє на рахунковий вхід тригера виразний одиночний імпульс і запобігає кільком швидким переміщенням. Це запобігає кільком високошвидкісним операціям.

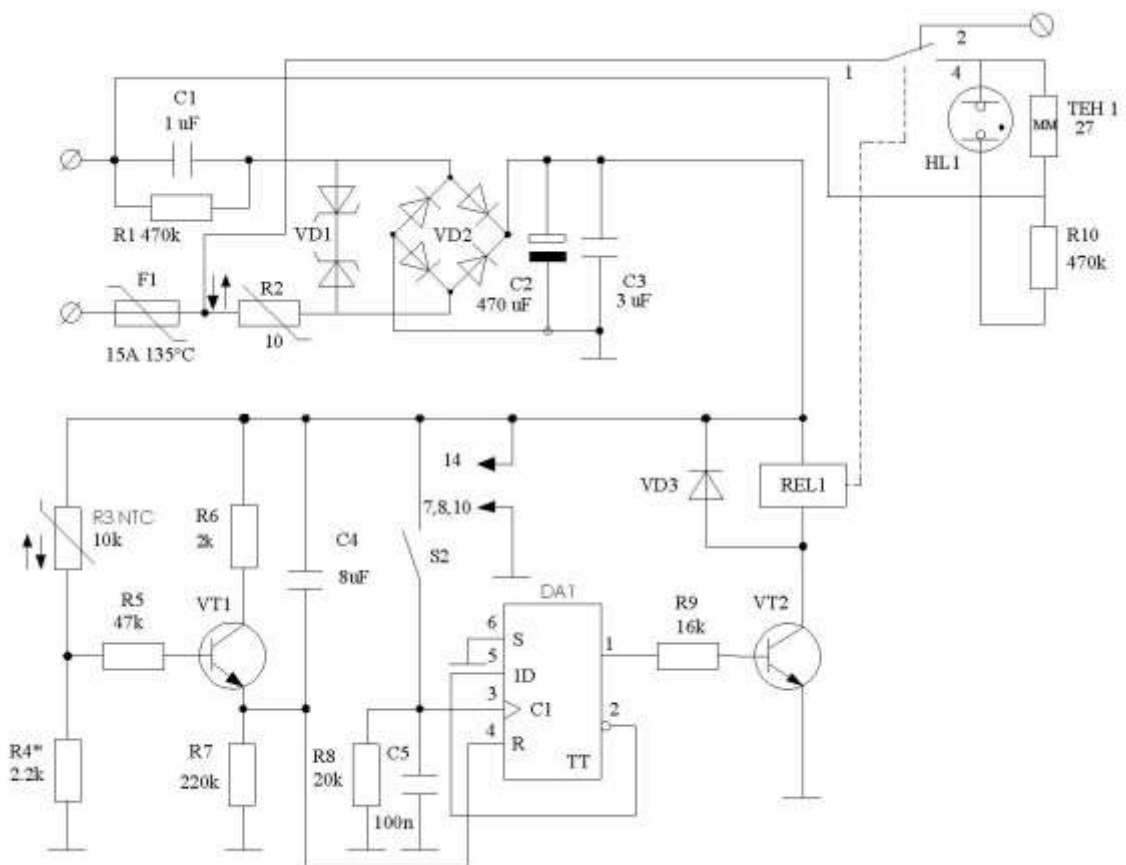


Рисунок 3.2 - Схема підключення датчика пари

Процес налаштування зводиться до вибору величини опору резистора R4. Це робиться так: замість R4 підключіть змінний резистор опором 10 кОм і опустіть терморезистор R3 у місце максимальної концентрації погойдувань. Викрутіть змінний резистор до максимального опору. Реле замикає свої контакти без наван-

таження і поступово зменшує опір змінного резистора. Як тільки реле вимкнеться (спрацює), вимірюється опір змінного резистора. Це значення відноситься до температури 100 °С. І це ще не означає, що за інтенсивного виділення пари її температура дорівнює 100 °С. За нижчої атмосфери, наприклад, на рівні моря, пара виділяється за температури 70-80 °С. Тому отриманий опір збільшується на 300 Ом, а найближчий постійний опір припадає. Таким чином, поріг спрацьовування реле знижується приблизно до 85 °С (тригер скидається, щойно температура датчика досягає 85 °С). Це означає, що пара вже інтенсивно виділяється і тепло передається через паропровід на датчик, який відразу ж нагрівається). У будь-якому разі рекомендується зосередитися на пароутворенні. Наприклад, можна спробувати під'єднати датчик до самої мікрохвильової печі, але через теплову інерцію пристрій не зможе достовірно визначити момент інтенсивного пароутворення, а якщо він низький, то не зможе відключитися. Також можна налаштувати датчик на температуру, нижчу за робочу температуру реле, і, досягнувши її, увімкнути таймер затримки, щоб піч вимкнулася через кілька секунд.

Живлення здійснюється безтрансформаторним способом за допомогою гасячого конденсатора С1. Амплітуда напруги обмежується симетричним супресором (захисним діодом) до 16 В і подається на випрямний міст VD2, де падає з 0,5 В до 1 В. У результаті на конденсаторі С2 з'являється напруга від 15 до 15,5 В. Варто зазначити, що під час спрацьовування реле вихідна напруга живлення «просідає» на 5 В, до 10,5 В, але це не впливає на роботу пристрою і достатньо для надійного утримання контактів реле. На вході теплового реле має бути встановлений термозапобіжник F1 з температурою перегорання 130-140°С.

Термозапобіжники переривають ланцюг при досягненні певної температури, а запобіжники - при досягненні певного струму, але це не одне й те саме. Під час складання пристроїв слід використовувати тільки високоякісні електронні компоненти, розраховані на високі температури, а під час виготовлення та встановлення потрібна максимальна точність. Використання припою з низькою температурою плавлення для паяння і лудіння друкованих плат неприпустимо. Також необхідно дотримуватися обережності під час встановлення обладнання, щоб

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

уникнути ураження електричним струмом. У схемі використовується безтрансформаторне джерело живлення, і різниця потенціалів між будь-якою частиною пристрою та землею приблизно дорівнює амплітудній напрузі мережі. У схемі використовуються SMD радіоелементи; усі SMD компоненти мають розмір 1206. Неполяризовані конденсатори - керамічні SMD і можуть бути використані з материнської плати комп'ютера, що вийшла з ладу; також отримано SMD транзистор VT1 з NPN-конструкцією. У комплект елементів входить терморезистор R2, призначений для обмеження кидка струму під час заряджання конденсатора. Не рекомендується використовувати плівкові або дротяні резистори. Це пов'язано з тим, що з часом вони потрапляють між витками і починають горіти. Максимальний опір резистора R2 становить 50 Ом. Транзистор VT2 - з коефіцієнтом посилення не менше 200, інакше реле не працюватиме. Можна використовувати складові або польові транзистори.

Елементи схеми F1, C1, R1, HL1, R10, R3, S2 і REL1 розташовано на зовнішньому боці друкованої плати, у будь-якому зручному місці на корпусі мікрохвильової печі, переважно якомога далі від магнетрона.

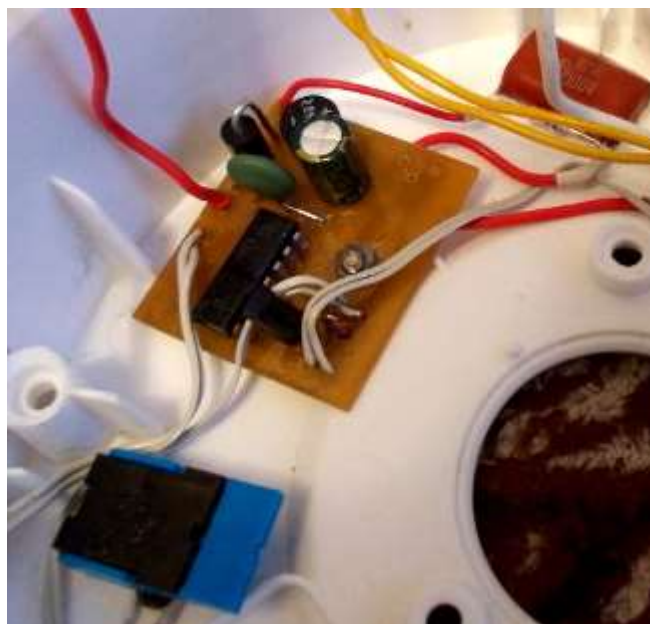


Рисунок 3.3 – Плата підключення датчика пари

Термозапобіжники припаюються безпосередньо до контактів нагрівача і

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Блок управління складається з мікроконтролера, дисплея, кнопок і сенсорних панелей, електромагнітних реле, дзвінків та інших сигналів. Це плата управління мікрохвильової печі. На схемі все це показано на окремій платі, позначеній як «плата живлення і управління». Для подачі живлення на блок керування мікрохвильовою піччю використовується невеликий понижувальний трансформатор. На схемі він позначений як LVTransformer (показана тільки первинна обмотка).

Мікроконтролер через буферні елементи (транзистори) керує електромагнітними реле: реле 1, реле 2 і реле 3, які вмикають або вимикають вихідні елементи мікрохвильової печі відповідно до заданого алгоритму роботи.

Робочими елементами і схемами є магнетрони, двигуни ТТМ (двигуни поворотного столу), FM (двигуни вентилятора), нагрівачі гриля і OL (лампи духовки).

Особливу увагу слід приділити виконавчим схемам із магнетронами (генераторами мікрохвильових імпульсів дуже високої частоти).

У схему входить високовольтний трансформатор (HVTransformer) (рис. 3.4). Він повинен пропускати струм, напругу і потужність 1500-2000 Вт (1,5-2 кВт), необхідні для роботи магнетрона. Вихідна (корисна) потужність магнетрона становить 500-850 Вт.

На первинну обмотку трансформатора подається змінна напруга 220 В. З однієї із вторинних обмоток знімається змінна напруга 3,15 В і подається на обмотку напруження магнетрона. Обмотка розжарення необхідна для генерації (емісії) електронів. Варто зазначити, що струм, споживаний цією обмоткою, може досягати 10 А.

Інша вторинна обмотка високовольтного трансформатора являє собою двохвольтний ланцюг із високовольтним конденсатором (HVCapacitor) і діодом (HV Diode), який створює постійну високу напругу 4 кВ і живить аноди магнетрона. Струм анода невеликий, близько 300 мА (0,3 А).

У результаті електрони, що вилітають з обмотки нитки розжарення, починають свій шлях у вакуумі. Особлива траєкторія руху електронів усередині магнетрона створює мікрохвильове випромінювання, необхідне для приготування їжі.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Мікрохвильове випромінювання відводиться від магнетрона за допомогою антени і потрапляє в камеру через частину прямокутного хвилеводу. Ця схема являє собою специфічний мікрохвильовий нагрівач. Це пов'язано з тим, що сама НВЧ-камера є елементом цього НВЧ-нагрівача, по суті, резонатором, в якому генерується електромагнітне випромінювання.

3.2 Розроблення та вибір НВЧ-елементів із поліпшеними характеристиками

Прототипом модернізації стала мікрохвильова піч Samsung стандартного діапазону.

Конструктивно мікрохвильові печі складаються з металевої камери, в якій готується їжа (рис. 3.5).

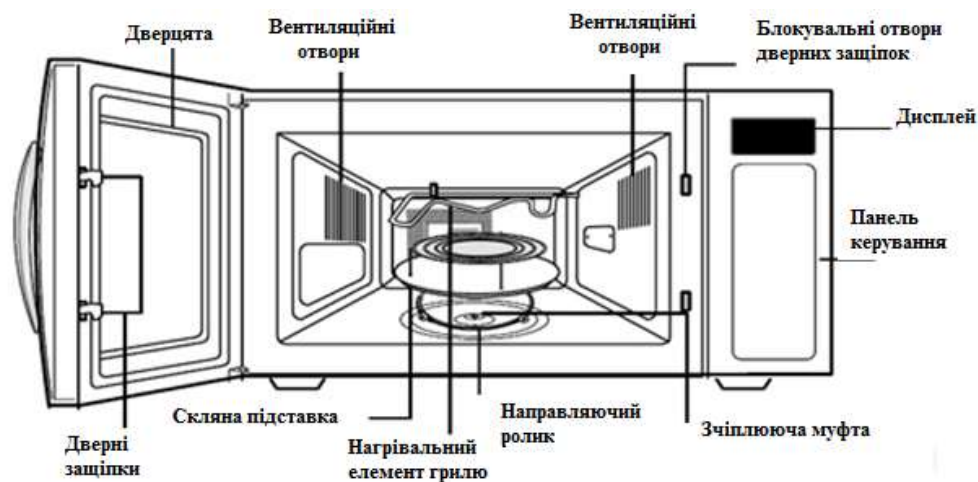


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд мікрохвильової печі з функцією мікрохвильового нагріву

Мікрохвильова піч містить такі основні елементи (рис. 3.6): високовольтне джерело живлення (трансформатор), мікрохвильовий діапазон, блок керування (механічний або електронний), нагрівач, вентилятор і камера для нагрівання продуктів.

Мікрохвильовий тракт мікрохвильової печі являє собою комбінацію трьох елементів: потужного генератора мікрохвиль, пристрою, що адаптує генератор до

навігації.

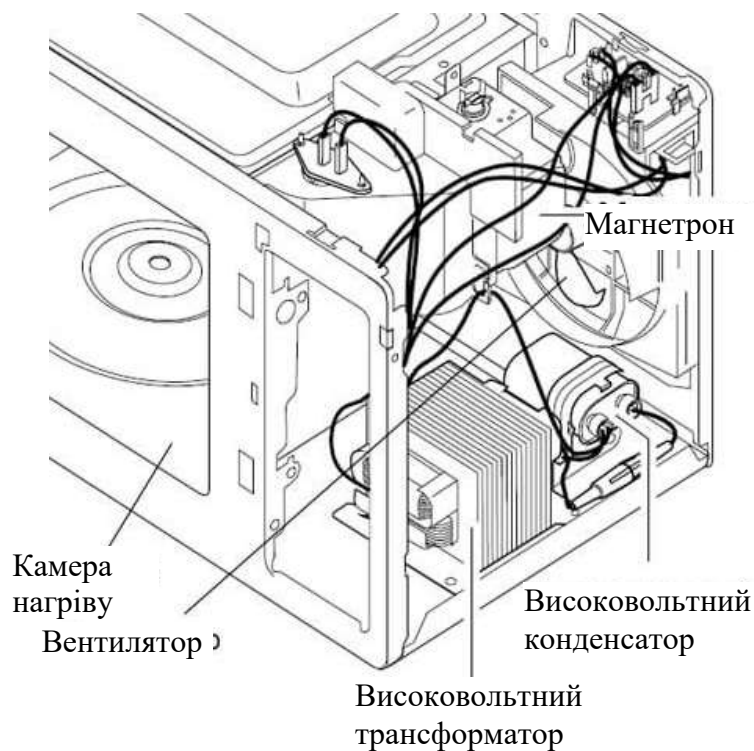


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд основних елементів НВЧ печі

Усередині мікрохвильової печі є дверцята, щоб запобігти виходу випромінювання (рис. 3.7).

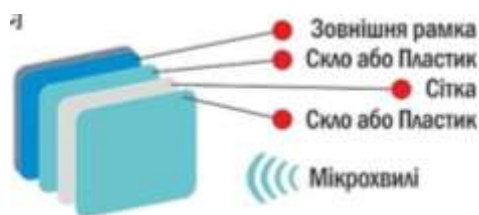


Рисунок 3.7 – Дизайн дверцят мікрохвильової печі

Для рівномірного нагріву їжі в робочій камері встановлюється поворотний стіл, який приводиться в рух редуктором (двигуном), скорочено ТТMotor (двигун поворотного столу).

Для рівномірного нагрівання їжі необхідно використовувати розділову тарілку у верхній частині мікрохвильової печі. Роздільник має вигляд вентилятора, але призначений для генерування певного типу мікрохвиль у просторі для приго-

тування їжі, щоб їжа нагрівалася рівномірно..

Для вирішення цієї проблеми використовують два підходи. Використання обертових лотків. На рис. 3.8 показано розсіювач, встановлений поруч із місцем введення мікрохвильової енергії в камеру печі.

Металеві лопаті дифузора обертаються на стику хвилеводу магнетрона і камери згоряння. Лопаті дифузора мають різні розміри, і кожна з них взаємодіє з магнітним полем у хвилеводі, постійно змінюючи спектр електромагнітних коливань і, відповідно, структуру магнітного поля в топковій камері. При цьому і без того недосконалі умови адаптації магнетрона до пічної камери постійно змінюються, що призводить до зниження ефективності печі та додаткового нагрівання магнетрона.

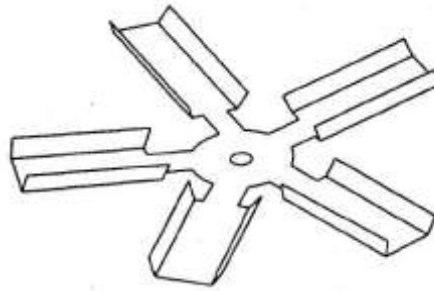


Рисунок 3.8 – Металевий дисектор

Інший механізм полягає в тому, щоб забезпечити рівномірну температуру їжі під час увімкнення мікрохвильової печі. Як правило, готова їжа має неоднорідну структуру і розташовується на тарі несиметрично. Під час обертання печі поле різних мод коливань, присутніх у камері, швидко змінюється. Навіть у центрі обертання продукту напруженість електромагнітного поля постійно змінюється. У результаті нагрівання відбувається більш рівномірно й ефективно, ніж у дифузорах. З цієї причини в багатьох зарубіжних мікрохвильових печах замість дифузорів використовуються обертові лотки.

Головний компонент мікрохвильової печі - магнетрон. Магнетрон - це спеціальна вакуумна трубка, яка генерує мікрохвилі. Мікрохвильове випромінювання чинить дуже цікавий вплив на вологу в усіх продуктах (рис. 3.9).

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

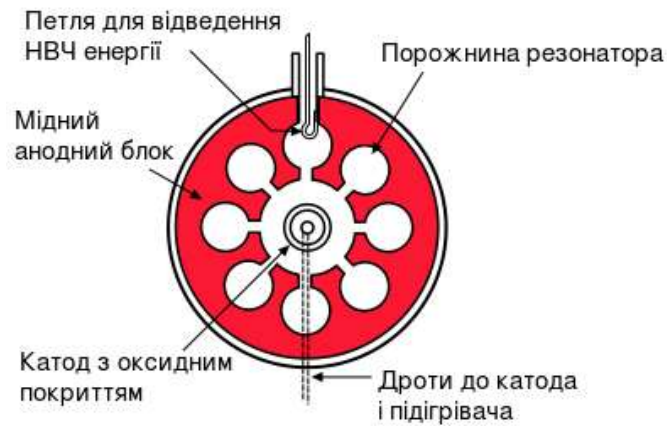


Рисунок 3.9 – Будова резонансного магнетрона

Магнетрон генерує мікрохвилі, які передаються в камеру через прямокутний хвилевід.

Потужність магнетрона регулюється від 50 до 900 Вт. Для охолодження магнетрона під час роботи використовується FM-вентилятор (двигун вентилятора), який обдуває магнетрон холодним повітрям. Повітря, нагріте потоком повітря від магнетрона, надходить через повітряний канал у камеру і використовується для розігрівання їжі. Частина нагрітого повітря і водяної пари виходить через спеціальні нерадіоактивні отвори.

Магнетрони традиційно використовуються як генератори мікрохвиль у побутових мікрохвильових печах як відносно недорогі, але потужні НВЧ-пристрої. Проблема, однак, полягає в тому, що різні об'єми і типи продуктів можуть призвести до того, що параметри печі будуть сильно варіюватися залежно від навантаження, прикладеного до магнетрона. За такого широкого діапазону зміни навантаження практично неможливо успішно узгодити магнетрон (з погляду підтримання високої ефективності НВЧ-ланцюга в усьому діапазоні навантажень). Тому між магнетроном і пічною камерою встановлюється хвилевід - пристрій, що поширює електромагнітні хвилі певного типу і діапазону частот.

Набагато простіше правильно під'єднати магнетрон до хвилеводу, а хвилевід до камери печі (з мінімальними втратами потужності), ніж під'єднувати магнетрон безпосередньо до камери НВЧ-печі. Однак усе ще не вдається підібрати магнетрон до хвилеводу і камери печі так, щоб відбиття мікрохвильової енергії перебувало в прийнятних межах (до 30%) як за повного завантаження, так і за порож-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ньої печі. Тому завжди вказується мінімальне завантаження печі, зазвичай 0,2 ... Не менше 0,3 кг.

Хвилевід, який використовується між магнетроном і мікрохвильовим резонатором, зазвичай являє собою прямокутний або круглий шматок трубки. Стінки хвилеводу (особливо довгі) можуть бути ретельно відполіровані або покриті сріблом для зменшення втрат енергії. Як ми знаємо, коаксіальні кабелі також можуть використовуватися для передачі електромагнітної енергії. Різниця між роботою коаксіальних кабелів і хвилеводів полягає в тому, що в коаксіальних кабелях втрати зростають зі збільшенням частоти, в той час як хвилеводи працюють тільки вище певної, так званої критичної частоти. Ця частота чітко визначається геометричними розмірами хвилеводу. Щоб хвилевід міг проводити мікрохвильову енергію, один з його поперечних розмірів повинен (у першому наближенні) бути більшим за половину довжини хвилі, що входить у хвилевід.

Крім цих елементів, мікрохвильові схеми мають низку захисних функцій. Наприклад, термовимикач контролює температуру магнетрона. Стандартна робоча температура становить приблизно 800-1000 °С. Таким термовимикачем є магнетрон.

Додаткові термовимикачі (мал. 3.10) позначені на схемі як «термовимикач мікрохвильової печі» (під'єднаний до повітряного каналу) і «термовимикач гриля» (регулює температуру гриля). Якщо виникає нештатна ситуація і магнетрон перегрівається, термовимикач розмикає ланцюг, і магнетрон перестає працювати. У цьому разі термовимикач вибирають із температурою вимкнення 120-145 °С і невеликим зазором.

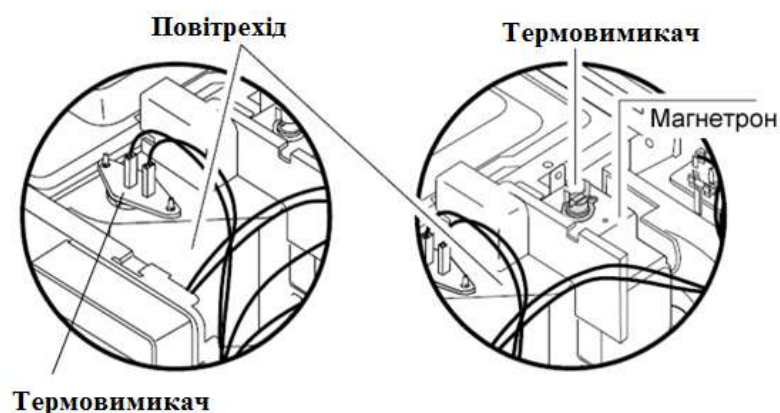


Рисунок 3.10 - Схеми розміщення термовимикачів у корпусі печі

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Найважливішими елементами мікрохвильової печі є три перемикачі, розташовані навколо правого краю камери мікрохвильової печі (рис. 3.11).

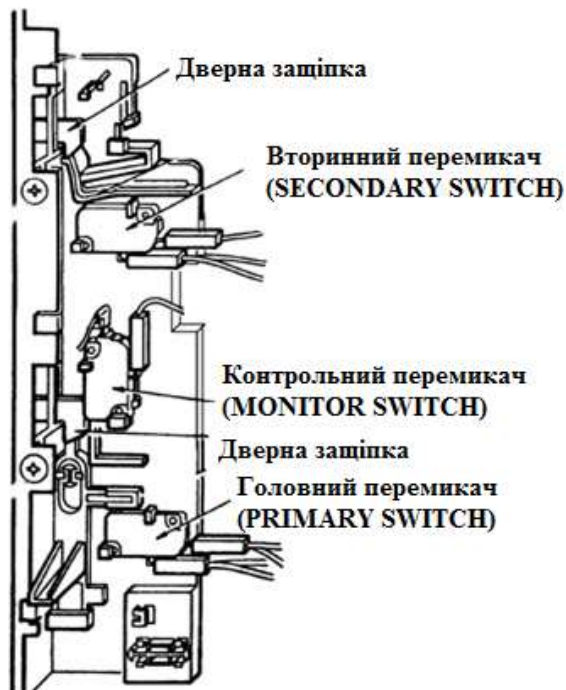


Рисунок 3.11 – Перемикач

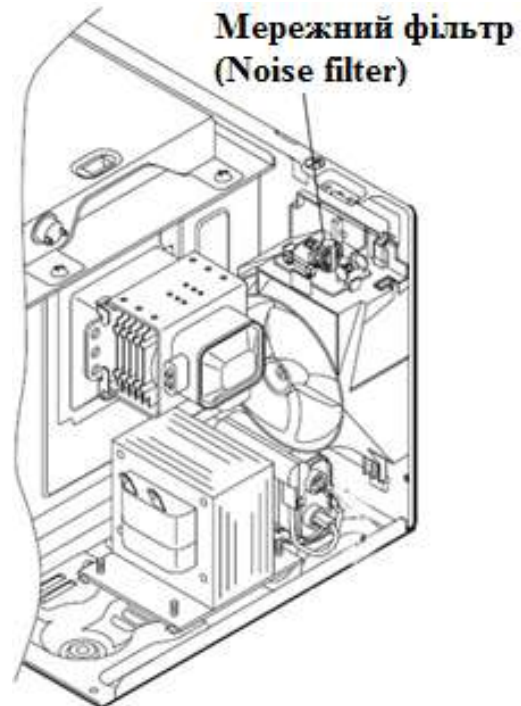


Рисунок 3.12 - Мережевий фільтр

Два перемикачі (первинний і вторинний) замикають свої контакти, коли зачиняються передні дверцята; третій контрольний перемикач (перемикач керування) розмикає свої контакти, коли дверцята зачиняються. Якщо будь-який із цих перемикачів вийде з ладу, мікрохвильова піч або перестане працювати, або перегорить запобіжник (автоматичний вимикач). Мережевий мережевий фільтр (мал. 3.12) необхідний для обмеження перешкод, що надходять у мережу живлення під час роботи мікрохвильової печі.

Для подальшого пояснення розробки пілотної установки наведено схему мікрохвильової печі у форматі SolidWorks (рис. 3.13).

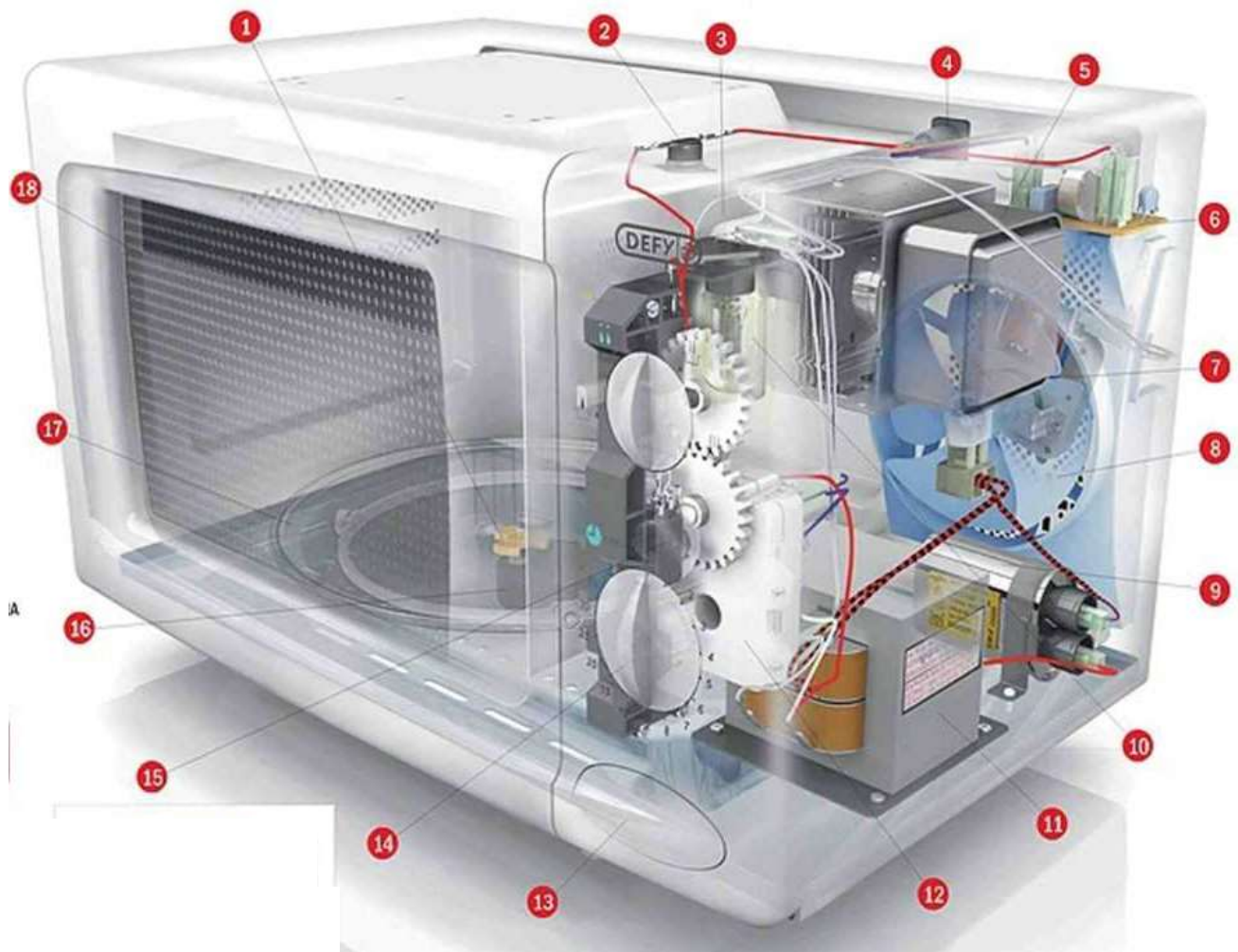


Рисунок 3.13 - Ілюстрація мікрохвильової печі: 1... Муфта, прикріплена до вала електродвигуна, який обертає скляний піддон печі, 2... Датчик пари в мікрохвильовій камері, 3... Система управління (програматор), 4... Підсилювач для мікрохвильового входу від агнетрона; 5... Магнетрон; 6... Мікропроцесорний блок (комп'ютер) з двоспрямованими напівпровідниками і тиристорами; 7... Двигуни вентиляторів (охолоджувачів); 8... Вентилятор (охолоджувач) для магнетронного вентилятора; 9... Високовольтний конденсатор; 10... Внутрішнє освітлення; 11... Високовольтний перетворювач (трансформатор); 12... Таймер і блок налаштування контролю енергії, 13... Дверні кнопки, 14... Шкала таймера, 15... Вимикач, 16... Двигун обертання скляного лотка для рівномірного опромінення продукту, 17... Скляний лоток на роликівій основі (розділювальне кільце з роликами для обертання), 18... Захисна металева сітка для відбиття мікрохвиль.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

Додаткове обдування магнетрона і вибір вентилятора для видалення парів з контейнера мікрохвильової печі.

Практично всі сучасні моделі мікрохвильових печей мають стандартну функцію конвекції. Особливістю таких пристроїв є наявність спеціального вентилятора. Роль цього пристрою полягає в циркуляції потоку теплого повітря в печі та сприянні нагріванню їжі.

Ця опція підвищує універсальність мікрохвильової печі та значно прискорює процес розігрівання. Це зручне рішення, яке приносить додаткові переваги всередині печі. Крім того, вентилятор нагнітає повітря на магнетрон і гриль.

Тому дуже важливо стежити за справністю цього елемента мікрохвильової печі. Роль витяжних вентиляторів у таких пристроях, як наші мікрохвильові печі, полягає в ефективному видаленні повітря зі стандартною швидкістю..

Цей загальний об'єм визначає основну характеристику вентилятора - об'єм повітря м³/год. Під час розрахунку зазвичай враховується не тільки об'єм повітрообміну, а й запас продуктивності, що враховує місцеві опори (наприклад, вигини повітропроводів, довжину фільтрів тощо).

Продуктивність вентилятора паровидалення визначається за таким рівнянням:

$$L = V \cdot k, \quad (3.1)$$

де L – продуктивність вентилятора, м³/год; V – об'єм мікрохвильової печі, м³; $V = 20$ літрів або $0,02$ м³; k – кратність повітрообміну. Для якісного повітрообміну і повного видалення парів із бака печі коефіцієнт повітрообміну становить $k = 4$.

$$L = 0,02 \cdot 4 = 0,08 \text{ м}^3/\text{год.}$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

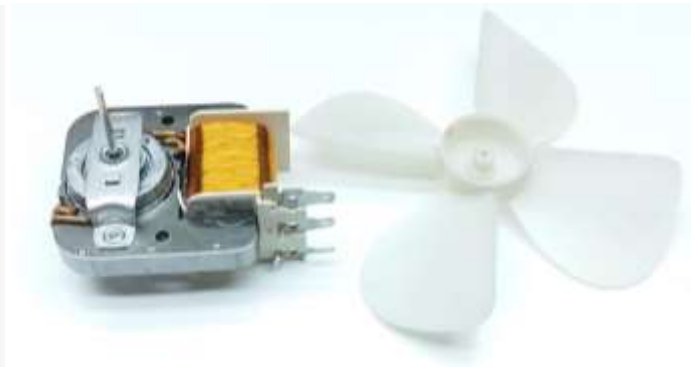
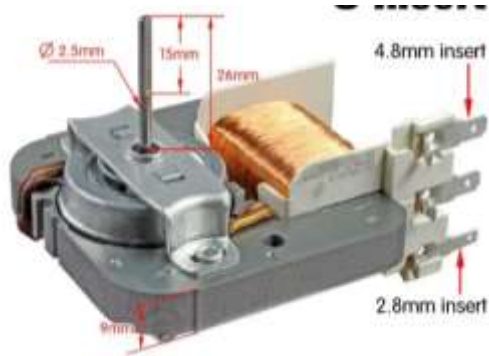


Рисунок - Загальний вигляд вентилятора з електродвигуном

Вибрано дуттьові вентилятори для мікроканальних печей Альпарі MWO-2070118 MWO-2070120 зі стандартного асортименту [16]. Діаметр колеса вентилятора 110 мм.

3.3 Висновки до розділу

У цьому розділі розроблено конструкцію мікрохвильової печі та схему керування з поліпшеними характеристиками.

Представлено електричну схему ланцюга керування для додаткового обдування ємності НВЧ-печі під час роботи НВЧ-печі.

Розроблено електричну схему датчика пари для контролю кількості пари в ємності НВЧ-печі. Обрано вентилятор для додаткового обдування магнетрона і видалення пари з ємності НВЧ-печі.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

4 Експериментальна частина

4.1 Розробка експериментальних установок для дослідження теплофізичних, електрофізичних та енергетичних параметрів мікрохвильового нагріву харчових продуктів

4.1.1 Підготовка структурних креслень експериментальної апаратури для дослідження теплових, електричних та енергетичних параметрів мікрохвильового нагріву харчових продуктів

Для дослідження теплофізичних, електрофізичних та енергетичних параметрів мікрохвильового нагріву їжі було підготовлено структурну схему експериментальної установки.

Як експериментальну установку використано стандартну побутову мікрохвильову піч діапазону Samsung.

Експериментальна установка також включає: стандартну побутову мікрохвильову піч Samsung; магнетронний регулятор потужності типу LATR; вимірювач потужності для вимірювання напруги, струму і споживаної потужності; термометр-щуп для вимірювання глибини проникнення мікрохвиль і температури на цій глибині; прилад для вимірювання теплопровідності їжі. для вимірювання теплопровідності досліджуваного продукту; мікроамперметр для вимірювання електропровідності досліджуваного продукту; електронний мікроскоп для візуального контролю приготування їжі.

Блок-схему експериментальної установки представлено на рис. 4.1. На цій блок-схемі умовно показано параметричні властивості кожного елемента експериментальної установки та взаємозв'язок між ними.

Для подальшого пояснення розроблення експериментальної установки подано загальні та детальні технічні характеристики кожного пропонованого пристрою.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Ця модель стандартної побутової мікрохвильової печі Samsung була створена в SolidWorks. Модель наочно показує всі елементи, з яких складається мікрохвильова піч.

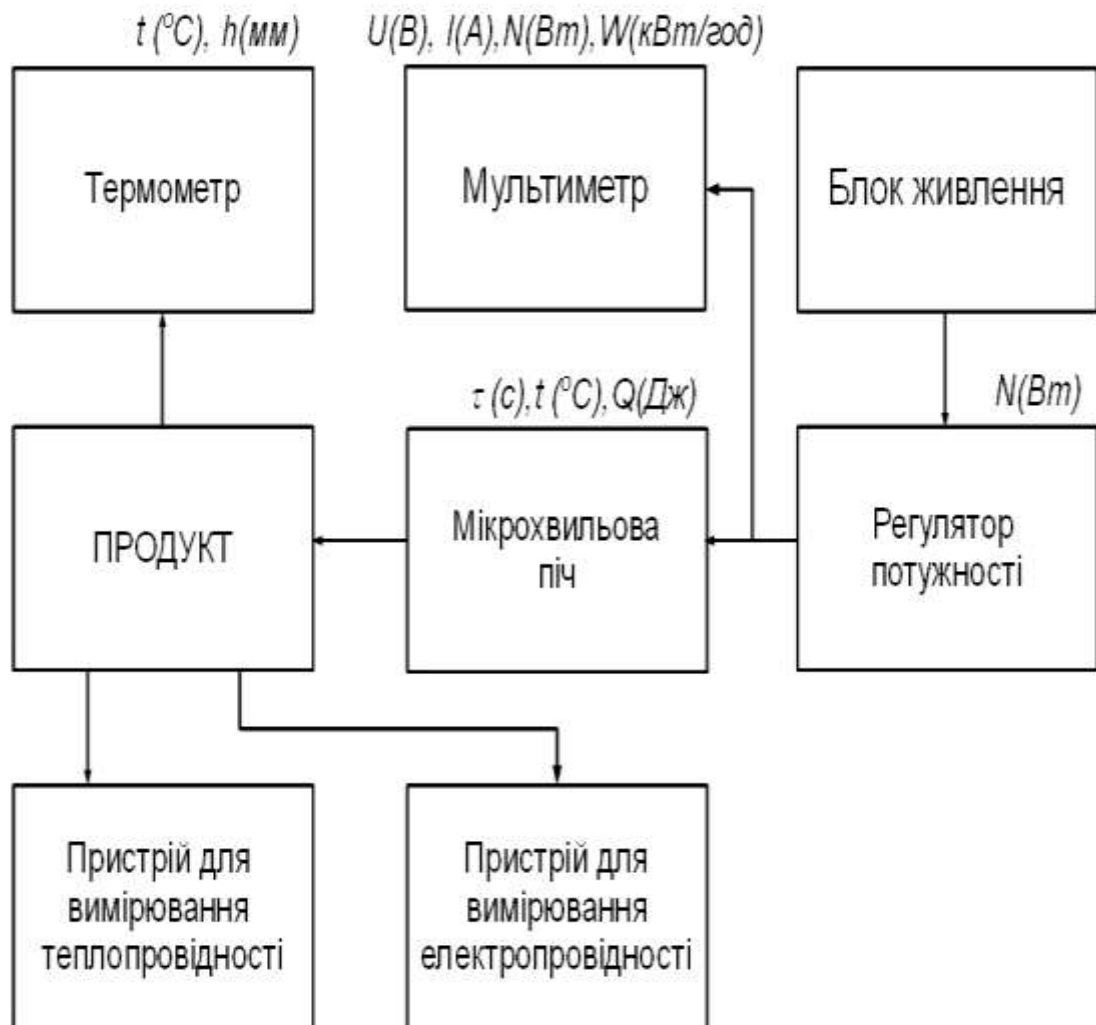


Рисунок 4.1 - Схема експериментальної установки для дослідження теплофізичних, електрофізичних та енергетичних параметрів мікрохвильового нагріву їжі

(рис. 3.2).

Мікрохвильова піч складається з таких основних елементів (рис. 3.3): висковольтного джерела живлення (трансформатора), мікрохвильового тракту, блока керування (механічного або електронного), нагрівача, вентилятора і камери нагрівання продукту.

4.2 Експериментальні методики визначення теплофізичних, електрофізичних та енергетичних параметрів мікрохвильового нагріву харчових продуктів

Під час виконання роботи з цього розділу необхідно експериментально дослідити теплофізичні, електрофізичні та енергетичні параметри НВЧ-нагріву їжі.

Вибрати оптимальні енергетичні параметри НВЧ-нагріву для приготування їжі. Як рослинні продукти було обрано картоплю, буряк, моркву, помідори та яблука. Циліндричні зразки продуктів висотою $h = 40$ мм і радіусом $r = 20$ мм.

Процедура експерименту була такою:

1. Теплопровідність вимірювали шляхом поміщення зразка в пристрій, вимірювання теплопровідності щохвилини та запису відповідного значення для встановлення зв'язку між теплопровідністю та придатністю продукту для приготування..

2. Електропровідність вимірювали шляхом занурення зонда мультиметра на 1,5-2 см у пропонований зразок і вимірювання величини струму мікроамперметром.

3. Значення відносної діелектричної проникності ϵ' і діелектричного тангенса $\text{tg}\delta$ цих видів виробів узяті з відповідних довідників [11], оскільки визначити їх експериментально не є можливим. Ці дані використовуються для визначення частоти НВЧ-електромагнітного поля, необхідної для рівномірної термообробки виробів.

4. Для визначення енерговитрат, необхідних для приготування їжі, циліндричні зразки продуктів висотою $h = 40$ мм і радіусом $r = 20$ мм поміщали в камеру приладу, охолоджену до 50 °С. Поміщений у центр скляного контейнера термоме-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

тричний зонд занурювали в систему і вимірювали температуру за допомогою електронного термометра з діапазоном вимірювання від -50 0С до +300 0С на глибині 8-10 мм від верху. Зразок поміщали в мікрохвильову камеру, напругу і потужність встановлювали в діапазоні 0-250 Вт і 50-900 Вт відповідно, час обробки становив 1 хвилину. Через 1 хвилину зразок витягали з камери і вимірювали температуру в лунках, що утворилися. Потім температуру вимірювали шість разів щохвилини, в результаті чого час обробки зразка склав 360 с.

Потім напруга змінювалася з кроком у 50 Вт, і експеримент повторювався.

Споживану потужність вимірювали кожну хвилину під час експерименту.

Частота випромінювання мікрохвильового магнетрона в більшості випадків варіюється між 915 і 2450 МГц.

Глибину проникнення і ступінь готовності цих зразків оцінювали візуально за допомогою мікроскопа і щупа.

Результати експериментів дають змогу встановити значення витрати енергії та глибини проникнення випромінювання в продукт залежно від часу приготування, температури, питомої потужності, маси та щільності оброблюваного зразка.

4.3 Обробка експериментальних результатів для дослідження теплофізичних, електрофізичних та енергетичних параметрів під час НВЧ-нагріву харчових продуктів

Картопля - 1,2; буряк - 2,1; морква - 1,7; томат - 0,5; яблуко - 0,7-0,9. Фізична густина продукту (кг/м³): картопля - 1460; буряк - 1560; морква - 1470; томат - 890; яблуко - 1310..

Теплоємність, теплопровідність, температуропровідність і електропровідність кожного зразка за різних температур нагріву визначено за експериментальною методикою.

Результати експерименту представлені в таблиці. 4.1-4.5.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

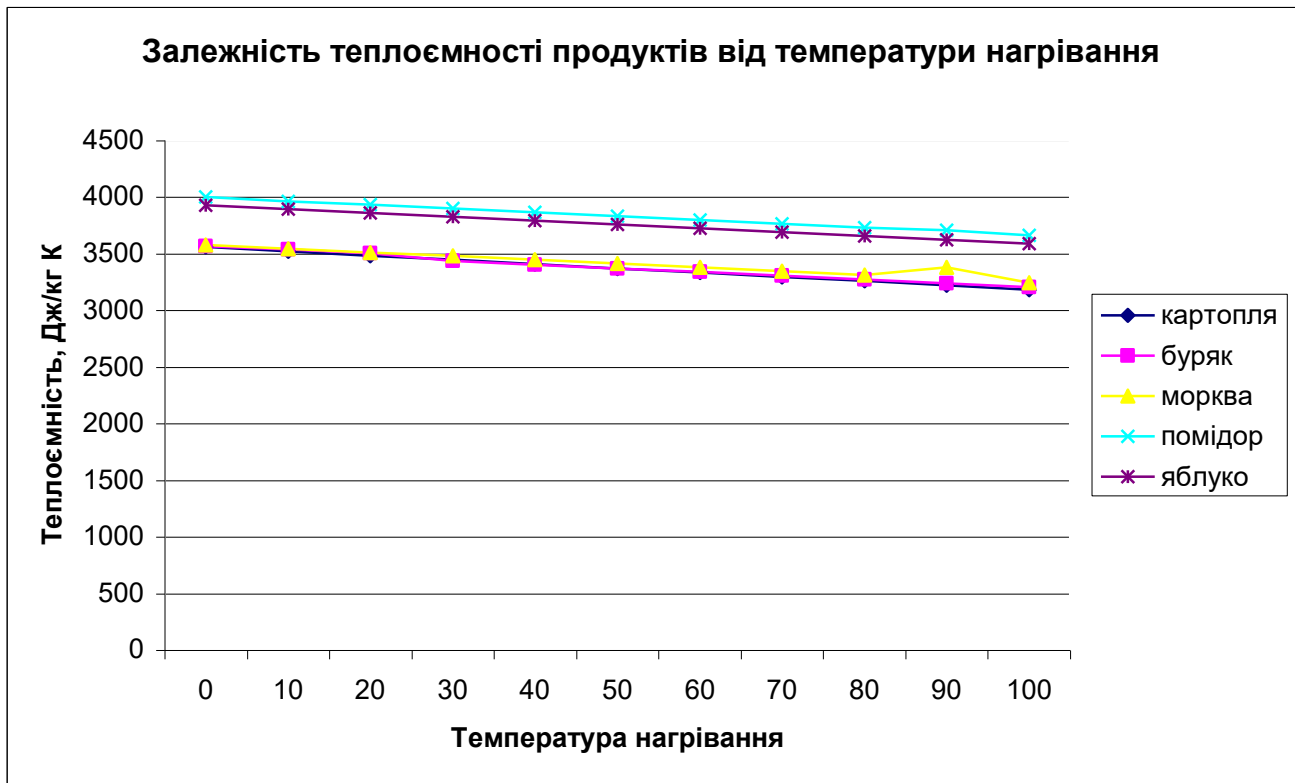


Рисунок 4.1 – Залежність теплоємності їжі від температури

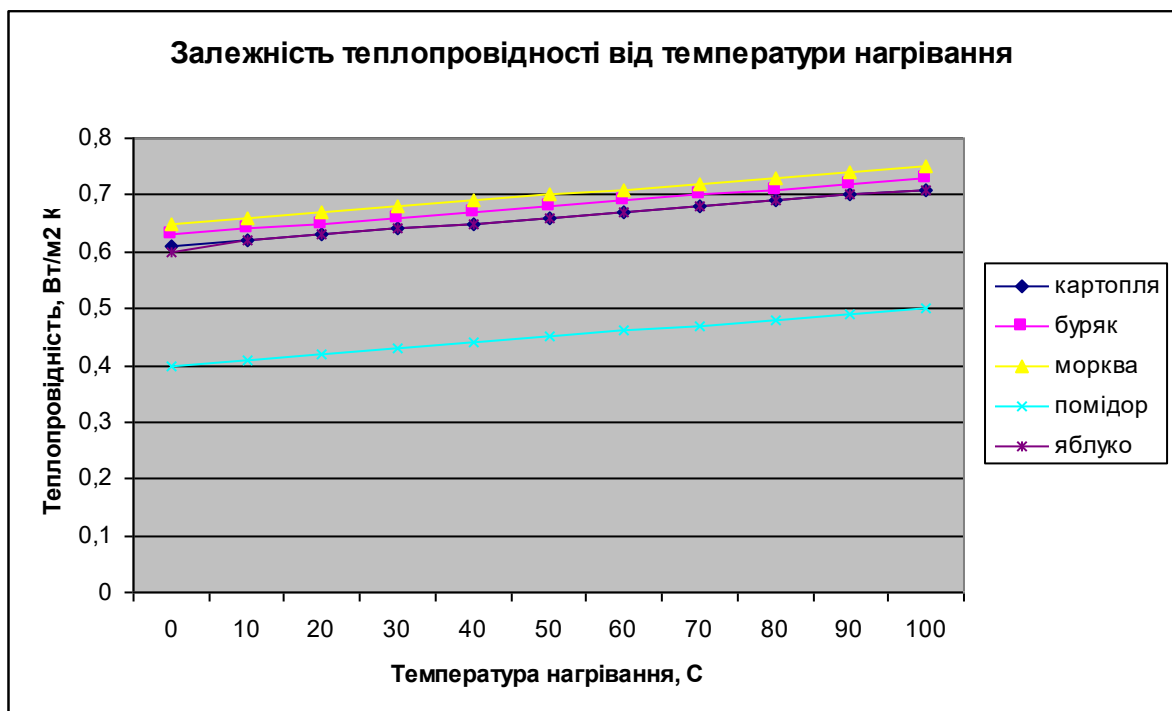


Рисунок 4.2 – Залежність теплопровідності їжі від температури

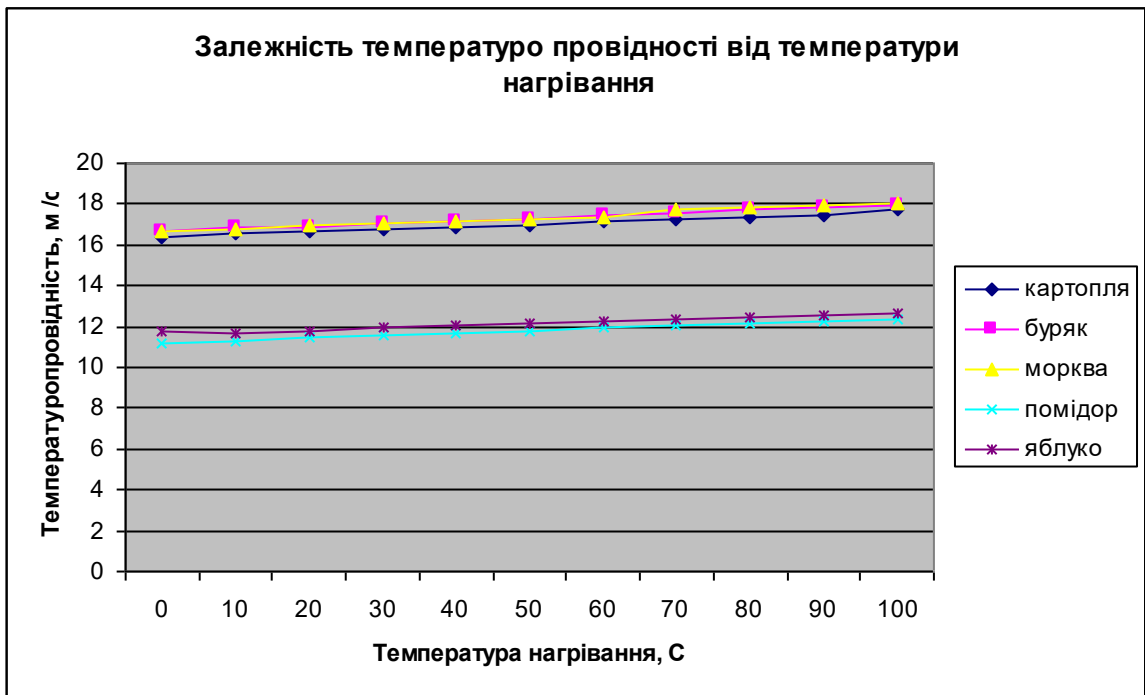


Рисунок 4.3 – Залежність теплопровідності їжі від температури

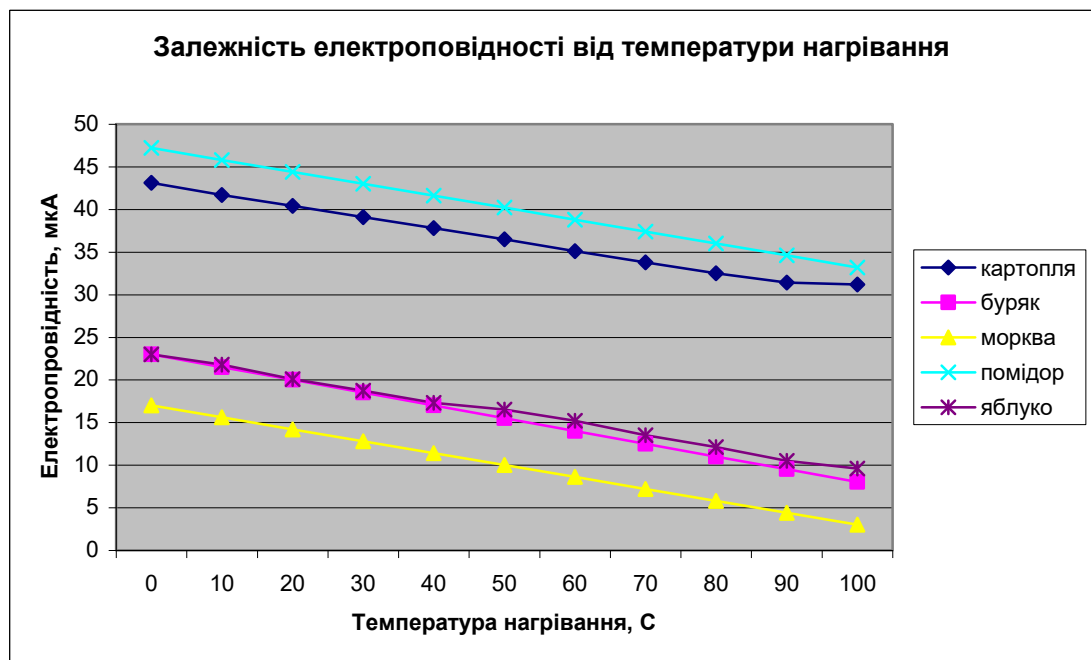


Рисунок 4.4 – Залежність електропровідності їжі від температури

У результаті проведеного дослідження можна зробити висновок, що з підвищенням температури теплоємність зразків їжі з меншою густиною та більшою

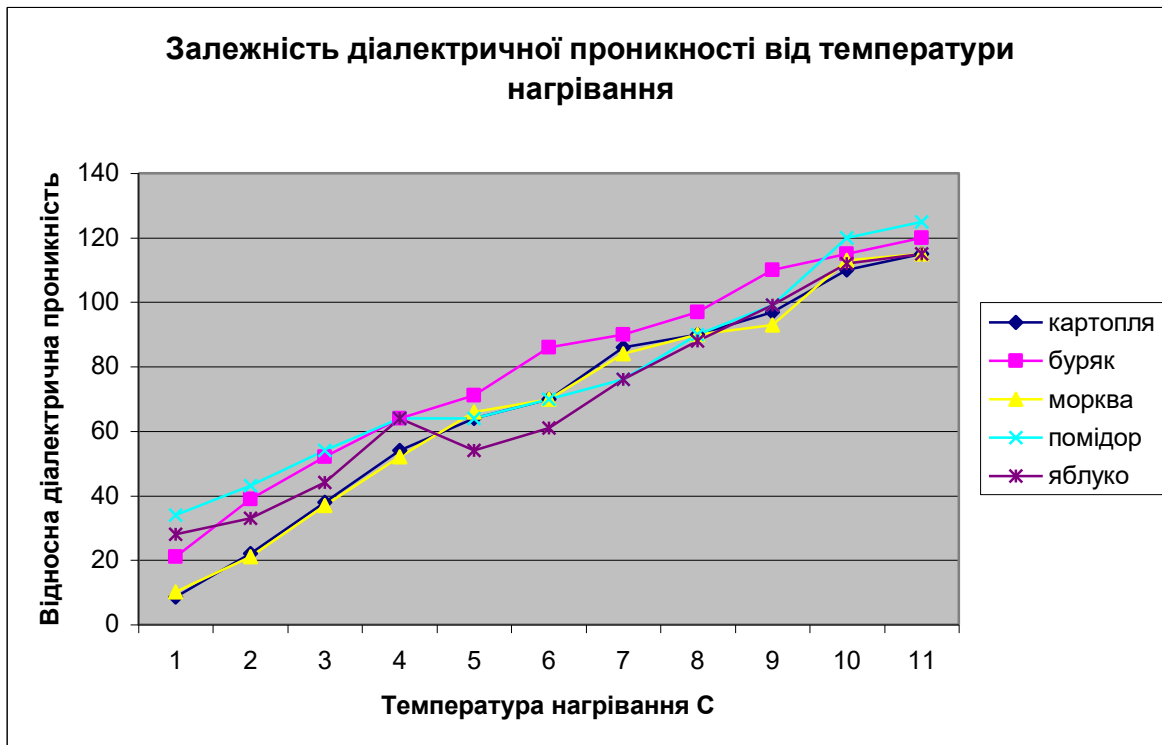


Рисунок 4.5 – Залежність відносної проникності ϵ' від температури нагрівання їжі

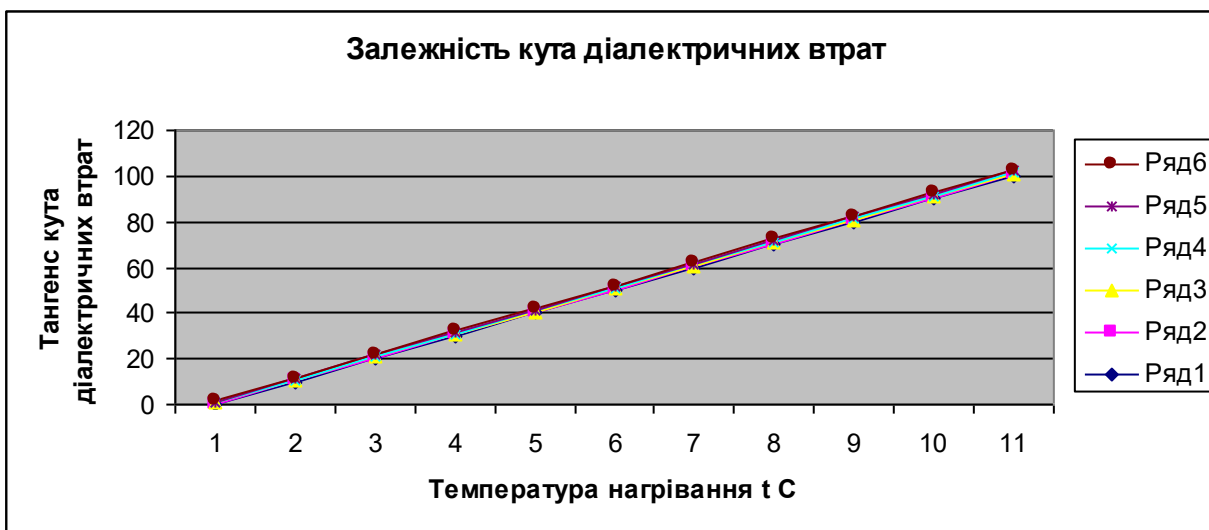


Рисунок 4.6 – Залежність відносного тангенса кута втрат, $\text{tg } \delta$, від температури нагрівання їжі

Якщо $\text{tg } \delta$ зменшується зі зростанням температури, значить, процес нагрівання стабільний (поглинання мікрохвильової енергії зменшується зі зростанням температури). Це автоматичне обмеження температури виникає під час нагрівання матеріалів великого діаметру, наприклад зразків їжі, де втрати відбуваються

через вміст вологи та її залежність від температури (див. розрахунки та графіки вище).

Водночас, через загасання електромагнітного поля в матеріалі (як і в будь-якому хвильовому процесі), інтенсивність впливу зменшується зі збільшенням поперечного розміру виробу, що призводить до нерівномірного нагрівання. Оцінка рівномірності НВЧ-нагріву діелектрика залежить від глибини проникнення НВЧ-електромагнітного поля.

Отримане рівняння (2.16) є моделлю діелектричного нагріву НВЧ-їжі з відомими електрофізичними і теплофізичними властивостями, і, з огляду на потужність, що підводиться, частоту випромінювання і температуру продукту, що готується, можна визначити час обробки і величину напруженості електричного поля, тобто доцільний технологічний режим НВЧ-обробки.

Отримані в розділі про математичні моделі рівняння дають змогу описати фізику процесу НВЧ-діелектричного нагріву композицій з органічних матеріалів, проте вони є доволі незручними для практичного використання під час вибору режиму термообробки. Тому доцільно комбінувати та модифікувати коефіцієнти, що входять до отриманих опорних рівнянь.

Аналіз теплофізичних та електрофізичних показників показує, що перші три показники для зразків картоплі, буряка, моркви, томатів і яблук практично ідентичні, а показники для томатів і яблук відрізняються незначно. Таким чином, можна зробити висновок, що під час вибору часу обробки даних видів продуктів, час обробки картоплі, буряка та моркви має бути встановлений більшим, а томатів і яблук - меншим.

Залежно від фізичної густини (кг/м³) пропонованих продуктів: картопля - 1460; буряк - 1560; морква - 1470; помідори - 890; яблука - 1310, дайте значення потужності магнетрона 50-900 Вт, яка подається на оброблювані продукти, час приготування продуктів з інтервалом 1 хвилина та на їхнє варіння. Визначити питому витрату енергії за потужності E від.

Результати вимірювань обробляються в Microsoft Excel і будуються відповідні графіки залежностей.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

проникнення НВЧ-електромагнітного поля у виріб від частоти і щільності об'єкта (рис. 4.9). Із цього випливає, що в допустимому діапазоні частот (915 і 2450 МГц) прийнятну глибину проникнення, що гарантує рівномірне нагрівання виробів завтовшки 20 мм і 17-27 мм для стандартних виробів, забезпечують на частоті 915 МГц $\pm 2,5\%$ у діапазоні розглянутих густин системи.

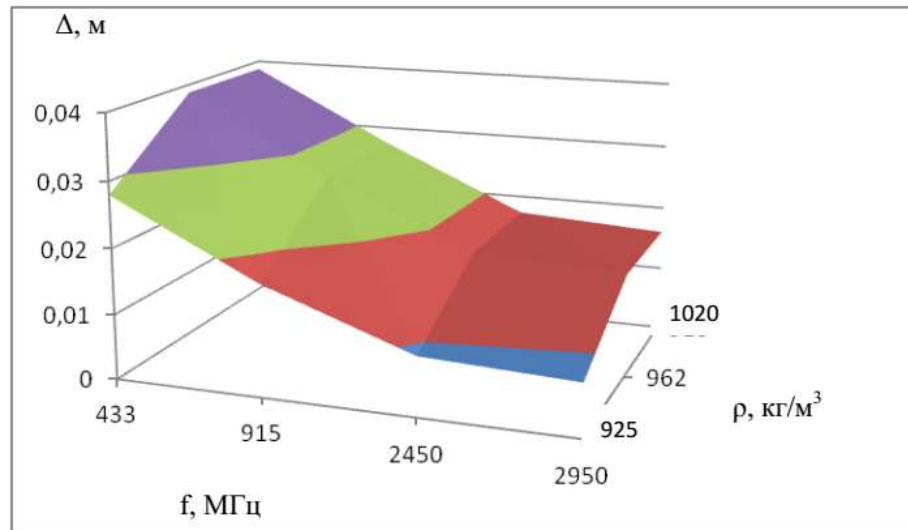


Рисунок 4.9 – Вплив частоти випромінювання і щільності продукту на глибину проникнення

Отримані залежності показують, що глибина проникнення НВЧ-випромінювання в матеріал зменшується зі зменшенням його щільності. Це можна пояснити, з одного боку, складністю передачі збудження від одного диполя до іншого через зменшення кількості зв'язків, а з іншого - ускладненим розповсюдженням теплового потоку з боку зазорів (пір) у структурі, де теплопровідність знижена порівняно з основним матеріалом. Через велику кількість пор у структурі продукту, тобто його меншу щільність, також очікується, що глибина проникнення мікрохвильового електромагнітного поля буде певною мірою зменшена порівняно з більш щільними зразками, такими як картопля, буряк і морква, наприклад.

Цю залежність можна використати для якісної оцінки впливу щільності матеріалу на глибину проникнення НВЧ-електромагнітного поля і вибору раціональної частоти опромінення.

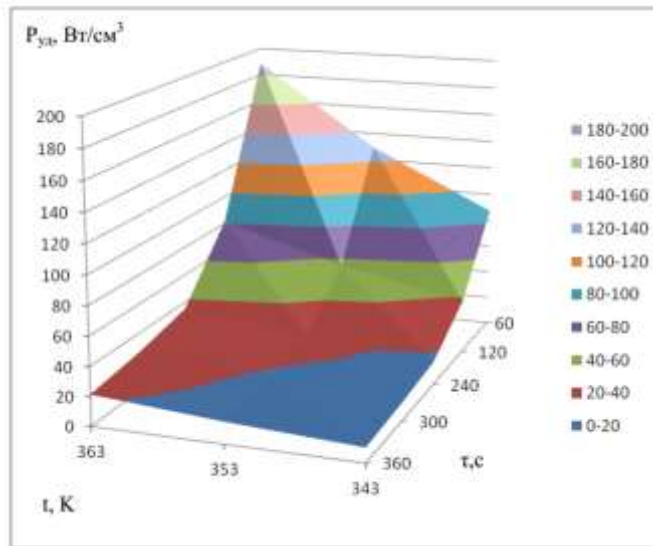


Рисунок 4.10 - Залежність питомого виходу від температури та часу приготування

Нижче наведено залежності питомої потужності від температури оброблення (рисунки 4.11 і 4.12) і питомої потужності від часу (рисунок 4.13) за максимального і мінімального часу оброблення в досліджуваному діапазоні.

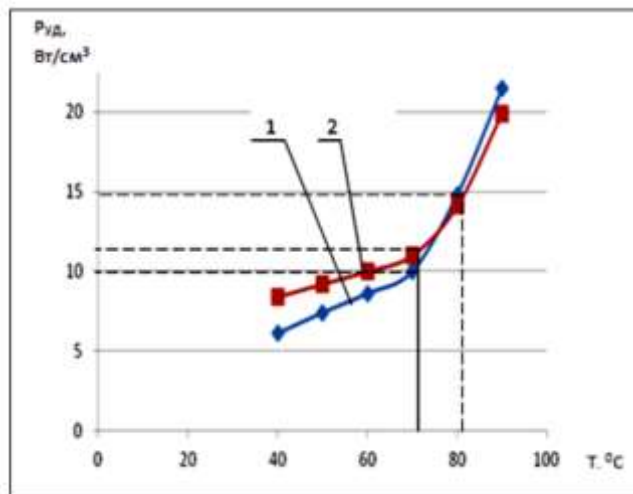


Рисунок 4.11 – Температурна залежність питомої потужності за часу приготування 6 хв

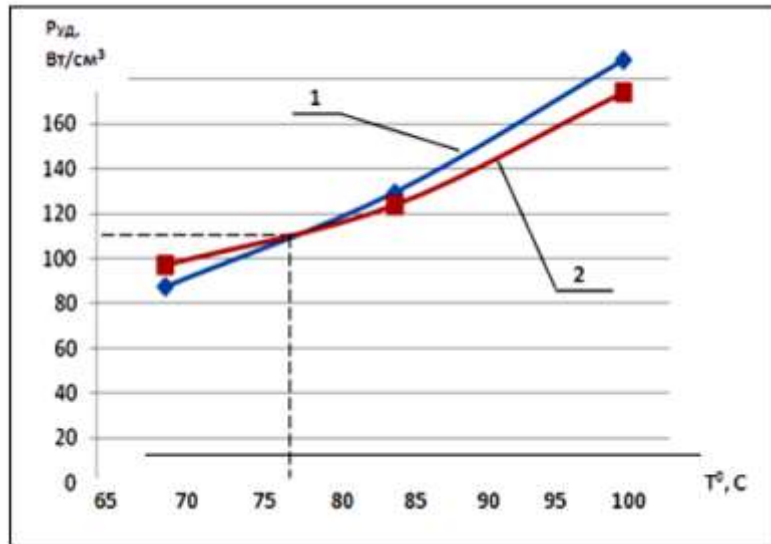


Рисунок 4.12 – Температурна залежність питомої потужності за часу приготування 1 хвилина

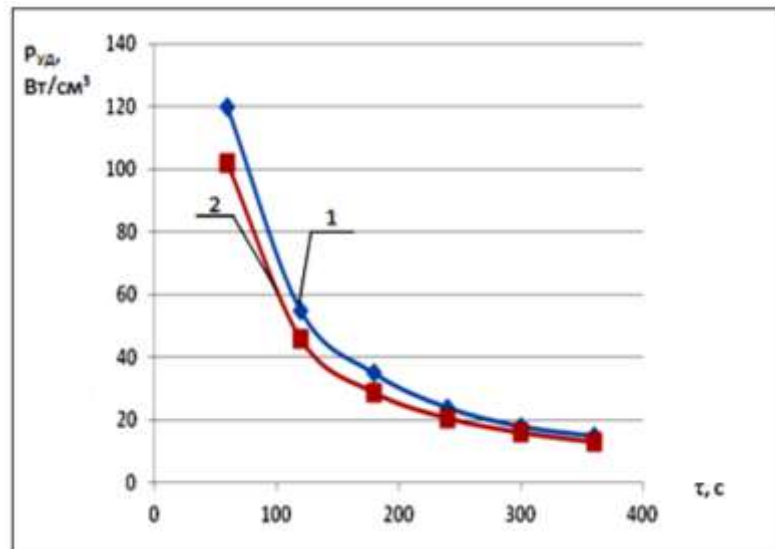


Рисунок 4.13 – Вплив питомої потужності НВЧ-електромагнітного поля на час приготування продукту за температури 800°C

З малюнка видно, що питома кулінарна здатність продукту залишається практично однаковою за температур, близьких до 353 К (800 °C), незалежно від того, короткий чи довгий час обробки. Цей факт дає змогу рекомендувати цю температуру діелектричного НВЧ-нагріву для обробки досліджуваних продуктів харчування.

Запропонований метод було використано для експериментального вивчення

температурної кінетики зразків і зміни структури залежно від потужності та часу обробки. Обробку проводили за таких значень потужності: 100, 300, 450 і 600 Вт. Зразок поміщали в мікрохвильову камеру, час обробки встановлювали рівним 1 хв. Через 1 хв зразок витягували з камери і вимірювали температуру в лунці. Потім зразки повертали в камеру і залишали на 1 хвилину. Експеримент повторювали доти, доки загальна тривалість мікрохвильового опромінення не досягала 4 хвилин. Таким чином, отримували значення приросту температури за кожну хвилину обробки й оцінювали його кінетику за різних питомих потужностей. Якщо ємність термометра не дозволяла проводити подальші вимірювання, зразок поміщали в НВЧ-камеру і встановлювали загальний час обробки 4 хвилини. Після обробки зразки були розрізані в поздовжньому напрямку, а пористу когезійну структуру і стан матеріалу було досліджено за допомогою програми «Металограф» і мікроскопії мікроструктурних зображень. З огляду на об'єм обробленого зразка і рівень використовуваної потужності, питома потужність НВЧ-електромагнітного поля становила 10,6, 31,9, 47,8 і 63,8 Вт/см³, відповідно.

Під час опрацювання результатів експерименту було отримано таку часову залежність температури і питомої потужності під час опрацювання контрольного зразка:

$$\text{при } P_{\text{пит}} = 10,6 \text{ Вт/см}^3, t = 26 \tau^{0,52};$$

$$\text{при } P_{\text{пит}} = 31,9 \text{ Вт/см}^3, t = 45 \tau^{0,809};$$

$$\text{при } P_{\text{пит}} = 47,8 \text{ Вт/см}^3, t = 55 \tau^{0,896};$$

$$\text{при } P_{\text{пит}} = 63,8 \text{ Вт/см}^3, t = 63,4 \tau^{0,958}.$$

Видно, що зі збільшенням питомої потужності температура зразка підвищується інтенсивніше, а її залежність від часу стає майже лінійною, швидше підвищуючись у першу хвилину нагрівання. Розрахункові значення температури наведені в таблиці 4.13 і на рис. 4.14.

Можна зробити висновок, що інтенсивність 10,6 Вт/см³ недостатня для досягнення допустимої температури приготування 70-750°C, необхідної з рівняння, навіть якщо на приготування витрачається значна кількість часу (2.19).

						МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

Таблиця 4.14 – Значення температури зразка залежно від щільності потужності та часу

Питома потужність, Вт/см ³	Температура (°C) при часові обробки (хв)					
	1	2	3	4	5	6
31,9	45	78,8	109	138	165	191,7
47,8	54,9	102,3	147,2	190	232,6	274
63,8	63,4	123,1	181,6	239,2	296	352,8
10,6	26	37,3	43	53,5	60	66

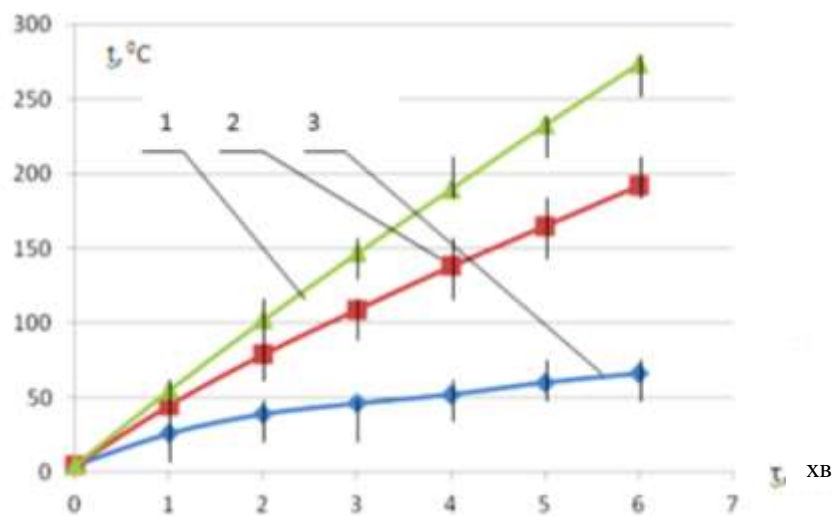


Рисунок 4.14 - Залежність питомої потужності від температурної кінетики зразка:

1 - P3=47,8 Вт/см³, 2 - P2=31,9 Вт/см³, 3 - P1=10,6 Вт/см³

З іншого боку, вищі питомі потужності в досліджуваному діапазоні призводять до незворотних змін структури та властивостей харчових зразків за середніх і тривалих термінів обробки, а також високих температур, що робить їх непридатними для практичного використання.

Хоча прийнятні температури (78,8°C за Pt = 31,9 Вт/см) досягаються за короткий час, процес протікає менш рівномірно, а структура неоднорідна, що пов'язано із загасанням хвилі випромінювання 2450 МГц у матеріалі та підвищеним нагріванням поблизу центру зони впливу.

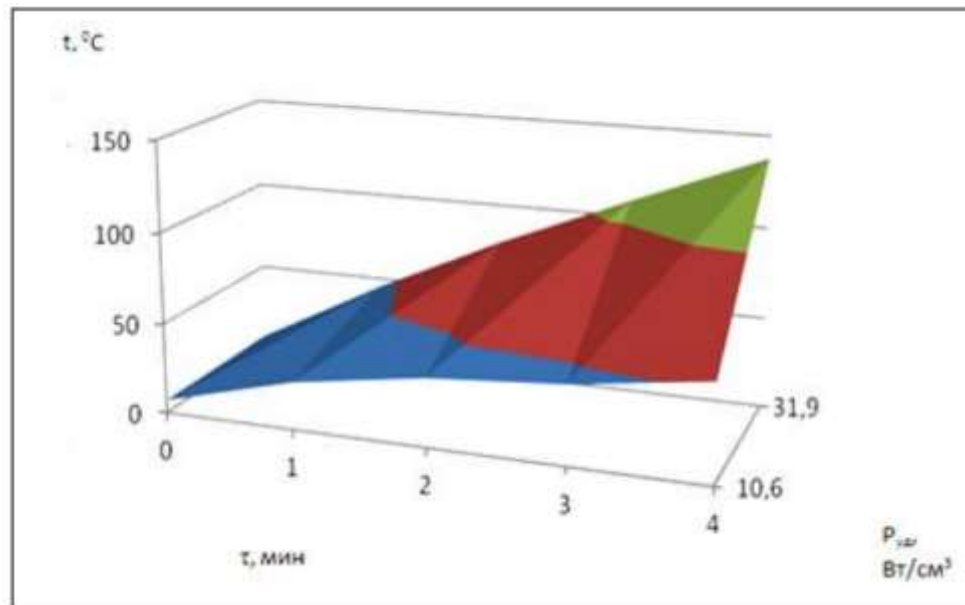


Рисунок 4.15 – Залежність температури зразка від часу обробки та питомої потужності

Отримано температурну залежність питомої потужності за часу обробки 1 і 6 хв:

$$t = 5.04 \cdot P_{\text{пит}}^{0.497}$$

$$t = 6.73 \cdot P_{\text{пит}}^{0.967}$$

Як уже говорилося раніше, можна помітити, що тенденція до збільшення впливу питомої потужності в міру збільшення часу обробки залишається незмінною.

Знайдемо питому потужність, необхідну для доведення зразка з температурою 80 °С до готовності за 6 хвилин:

$$P_{\text{пит}} = \frac{t^{1.033}}{7.167}$$

Підставивши відповідні значення, отримуємо таке: $P_{\text{пит}} = 12,9$ Вт/см.

4.3 Висновок до розділу.

У цьому розділі було визначено теплофізичні, електрофізичні та енергетичні параметри під час розроблення продуктів харчування. Дослідження проводили за різних температур нагріву, різних рівнів потужності, що подається на оброблювані продукти, і різних періодів приготування та обробки.

У результаті було зроблено висновки щодо значень енергетичних параметрів, які використовуються для обробки харчових продуктів за різних густин. Надано рекомендації щодо вибору потужності та частоти випромінювання, використовуваного для обробки харчових продуктів, з метою зниження енергоспоживання.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі розглянуто особливості взаємодії НВЧ-енергії з харчовими інгредієнтами, представлено технічні аспекти НВЧ-обробки та обладнання, яке використовується для цього.

У результаті виконання бакалаврської роботи було зроблено таке.:

1) Для модернізації електричних ланцюгів цієї мікроканальної печі було розроблено додаткові схеми, і після спрацьовування таймера вентилятор продовжував працювати досить довго, щоб провітрити внутрішню камеру й охолодити магнетрон.

2) Датчик для контролю пари в контейнері мікрохвильової печі було обрано та інтегровано в наявну схему мікрохвильової печі.

3) Для поліпшення конструкції та підвищення продуктивності й довговічності було розроблено компонентну модель мікрохвильової печі з поліпшеними характеристиками та вбудованими додатковими пристроями.

4) Додаткові компоненти (вентилятори), необхідні для інтенсивнішого повітрообміну та видалення парів із контейнера мікрохвильової печі.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Архангельский, Ю. С. Багаточастотні установки НВЧ діалектичного нагрівання / Ю.С.Архангельський, Е.М.Гришина //Питання електротехнологій. – 2014. - № 2. – С. 59-63. 153 10.
2. Афіногенов, В. И. Моделювання НВЧ нагрівання діелектрика рухомим випромінювачем / В.И.Анфіногенов, Т.К.Гараєв, Г.А.Морозов // Електронне приладобудування. Науково-практичний збірник. – 2003. - № 1(29). – с. 114-117.
3. Ільницький Л.Я., Сібрук Л.В., Щербина О.А. «Пристрої надвисоких частот та антени»: Навч. посібник. – К: НАУ, 2013.
4. Поплавко Ю.М., Переверзева Л.П., Воронов С.О., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство. К.: НТУУ «КПІ», 2007. – Частина 2. Діелектрики. 392 с
5. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ: Навч. посіб. / С.В. Соколов, Л.Д. Писаренко, В.О. Журба; за заг. ред. Г.С. Воробйова. – Суми : Сумський державний університет. 2011. – 393 с.
6. ДСанПіН 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.
7. ДСТУ 2815–94 "Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни і визначення".
8. Мелков Г. А., Прокопенко О. В. Мікрохвильова електродинаміка та електроніка: Навчальний посібник. – 2-е вид., перероб. та доп. – К.: Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2017. – 272 с.
9. Стоянов А.В. Плоди і овочі — невід'ємний компонент їжі / А.В. Стоянов //Харчова і переробна промисловість. — 2001. — № 8. — С. 8 – 10.
10. Пузік Л.М. Наукове обґрунтування та розробка заходів продовження строків споживання плодів гарбузових рослин: дисертація на здобуття наукового ступеня д. с. - г. н. / Пузік Людмила Михайлівна. - Харків, 2010. - с. 221–232.
11. Іванченко В.И., Модонкаєва А.Э., Ялпачик В.Ф., Стручаєв К.Н., Загорко

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Н.П. Визначення коефіцієнта теплопровідності плодоовочевої продукції при заморожуванні // Зберігання та переробка сільгоспродукції. - 2001. - № 12. - с.24–25.

13. Низкоінтенсивні НВЧ–технології (проблеми та реалізації) / Г.А. Морозов [та інші]. – Київ.: Радіотехніка, 2003. – 112 с.

14. Промислова електроніка. Офіційний сайт журналу. Код доступу: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_59_323.pdf.

15. Офіційний сайт фірми Samsung. Код доступу. <http://www.samsung.com/ua/cooking-appliances>.

16. Офіційний сайт фірми «Київ-Комфорт». Код доступу <https://www.kievkomfort.com.ua/ua/info/articles/rasschitat-proizvoditelnost-ventiljatora-onlajn/>.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Додатки

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		