

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

_____/Каплун В.В./
(підпис)

_____/Окушко О.В./
(підпис)

« ____ » _____ 2026 р.

« ____ » _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ПРИ
СУШІННІ С.Г. ПРОДУКЦІЇ»

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

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

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

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., ДОЦЕНТ
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В.І.
(ПІБ)

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

К.Т.Н., ДОЦЕНТ
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Малиновський А.В.
(ПІБ)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та електротехнологій
_____ Окушко О.В.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
«_____» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ**

Малиновському Артему В'ячеславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

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

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

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

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Дослідження використання
ультразвуку при сушінні с.г. продукції»

затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і
природокористування України від 18.11.2024 р. № 2058 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 22.05.2026р
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: Результати науково-дослідницьких робіт у
сфері ультразвукового сушіння та електронагріву, наукові публікації та технічні
матеріали, нормативні документи: ДСТУ, ІЕС, ISO

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз стану питання та визначення задач досліджень. 2. Теоретичне
обґрунтування параметрів електротехнологічного комплексу сушіння фруктової
сировини 3. Експериментальні дослідження процесу зневоднення фруктової
сировини із застосуванням прямого електронагріву та попередньої ультразвукової
обробки. 4. Розробка електротехнологічного комплексу сушіння фруктової
сировини з використанням прямого електронагріву та ультразвуку. 5. Оцінка
енергетичної та економічної ефективності електротехнічного комплексу сушіння. 6.
Оцінка енергетичної та економічної ефективності електротехнічного комплексу .

Дата видачі завдання «18» листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи	_____	<u>Усенко С.М.</u>
	(підпис)	(ПІБ)
Завдання прийняв до виконання	_____	<u>Малиновський А.В.</u>
	(підпис)	(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 78 с., 2 табл., 28 рис., 30 джерел.

Об'єкт дослідження – процес зневоднення фруктової сировини в електротехнологічному комплексі з використанням комбінованого енергетичного впливу.

Предмет дослідження – сукупність фізичних закономірностей та механізмів впливу електричних полів і акустичних коливань на енергетичні, кінетичні та електротехнічні показники процесу переробки фруктів.

Мета магістерської роботи – підвищення енергоефективності та зниження витрат на виробництво сухофруктів шляхом проєктування комплексу, що поєднує прямий електричний вплив та попередню акустичну обробку сировини.

У магістерській роботі проведено аналіз сучасних способів сушіння плодовоовочевої продукції та виявлено, що традиційні конвективні методи часто є малоефективними через високу енергоємність та значну тривалість процесу. Оскільки фрукти за своєю структурою є складними капілярно-пористими тілами, основна частина вологи в них знаходиться у зв'язаному стані, що ускладнює її видалення. Для вирішення цієї проблеми в роботі обґрунтовано доцільність застосування комбінованого впливу, який дозволяє інтенсифікувати виведення рідини з внутрішньоклітинного простору..

У практичній частині магістерської роботи описано результати експериментів, які підтвердили переваги прямого електронагріву. Такий підхід забезпечує рівномірне об'ємне виділення тепла безпосередньо в продукті. Додаткове використання ультразвукової ванни на етапі підготовки дозволяє значно прискорити подальше зневоднення за рахунок припустимої руйнації клітинної структури. Це дає змогу проводити сушіння при помірних температурах, що позитивно впливає на збереження вітамінів та загальну якість готового продукту.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	8
1.1. Коротка характеристика фруктів як матеріалу для сушіння.....	8
1.2. Огляд наявних методів та пристроїв сушіння фруктової сировини.....	10
1.3. Застосування ультразвукової обробки та прямого електронагріву в процесі зневоднення	16
1.4. Висновки до першого розділу та завдання дослідження	20
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ФРУКТОВОЇ СИРОВИНИ.....	22
2.1. Структурна схема електротехнологічного комплексу	22
2.2. Обґрунтування параметрів електроакустичної системи для передсушильної обробки сировини	23
2.2.1. Складання фізичної моделі електроакустичної системи для ультразвукового впливу на фрукти.....	23
2.2.2 Обґрунтування характеристик робочого ультразвукового поля	24
2.3. Обґрунтування оптимальних режимів обробки.....	35
2.4. Висновки до другого розділу	37
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ФРУКТОВОЇ СИРОВИНИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРЯМОГО ЕЛЕКТРОНАГРІВУ ТА ПОПЕРЕДНЬОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ.....	39
3.1. Визначення мети та декомпозиція завдань експериментального етапу	39
3.2. Оцінка впливу попередньої ультразвукової підготовки фруктової сировини на кінетику конвективного та комбінованого сушіння.....	40
3.2.1. Характеристика об'єктів дослідження та опис лабораторної апаратури	40

3.2.2. Алгоритм та методологія проведення ультразвукової обробки матеріалу	40
3.2.3. Аналіз результатів впливу попередньої ультразвукової обробки матеріалу на процес сушіння.....	41
3.3. Висновки до третього розділу.	49
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ФРУКТОВОЇ СИРОВИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРЯМОГО ЕЛЕКТРОНАГРІВУ ТА УЛЬТРАЗВУКУ	51
4.1. Розробка конструкції створеного електротехнологічного комплексу сушіння фруктової сировини	51
4.2. Обґрунтування параметрів випромінювача для попередньої ультразвукової обробки.....	53
4.3.. Розробка системи автоматизованого керування цим електротехнічним комплексом	63
4.5. Висновки до четвертого розділу.....	67
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ.....	68
5.1. Розрахунок енергетичної ефективності	68
5.2. Розрахунок економічної ефективності	69
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

ВСТУП

Обґрунтування актуальності дослідження. Переважна більшість харчових ресурсів рослинного походження характеризується високим вмістом вологи, що є природним середовищем для їхнього функціонування. Проте з точки зору промислової переробки, надмірна концентрація води суттєво знижує енергетичну цінність продуктів, значно підвищує логістичні витрати та створює сприятливий ґрунт для мікробіологічного псування.

Сучасний стан ринку сухофруктів в Україні демонструє домінування імпоротної продукції. Однією з ключових причин низької конкурентоспроможності вітчизняних товарів є їхня висока собівартість, яка часто перевищує цінові пропозиції іноземних постачальників. Корінь цієї проблеми криється у високій енергомісткості технологічних ліній та застарілих методах видалення вологи, що мають низький коефіцієнт корисної дії. Слід враховувати, що фрукт як об'єкт дослідження має специфічну капілярно-пористу структуру, де вміст вологи може сягати 90%, а її основна частка перебуває у зв'язаному стані всередині клітинних мембран.

На сьогодні розроблено чимало сушилних систем із різними принципами підведення теплової енергії. Однак аналіз їхньої експлуатації свідчить про те, що існуючі рішення не завжди відповідають сучасним стандартам якості, потребують значних капіталовкладень та характеризуються надмірним споживанням електричної енергії. У зв'язку з цим, проведення наукових пошуків, спрямованих на створення інноваційних електротехнологічних комплексів для переробки сільськогосподарської продукції, є стратегічно важливим завданням для галузі харчової промисловості.

Мета та стратегічні завдання наукового пошуку. Основна мета даної **магістерської роботи** полягає у науково-теоретичному обґрунтуванні та технічній розробці електротехнологічної системи з підвищеними показниками енергоефективності. В основу роботи покладено ідею комбінованого

енергетичного впливу, що передбачає поєднання прямого резистивного нагріву електричним струмом та попередньої акустичної активації сировини ультразвуком.

Для досягнення поставленої мети в межах **магістерської роботи** було сформульовано наступні дослідницькі завдання:

- Здійснити комплексний аналіз поточного стану проблеми, ідентифікувати та систематизувати наявні технічні засоби для сушіння та препроцесингу фруктів, оцінивши їхній потенціал та конструктивні недоліки.
- На основі серії експериментальних випробувань встановити робочі параметри електроакустичного модуля, який у поєднанні з джерелом живлення забезпечить оптимальну інтенсивність руйнації мікроструктур для виходу внутрішньоклітинної рідини.
- Провести експериментальне дослідження кореляції між ультразвуковим впливом і прямим нагрівом та зміною електрофізичних характеристик (зокрема питомого опору), що дозволить визначити діапазони адаптивного регулювання джерел енергії.
- Вивчити особливості трансформації мікроскопічної структури фруктових зразків під дією комбінованих полів різної природи при варіюванні режимів обробки.

Об’єкт дослідження – процес зневоднення фруктової сировини в електротехнологічному комплексі з використанням комбінованого енергетичного впливу.

Предмет дослідження – сукупність фізичних закономірностей та механізмів впливу електричних полів і акустичних коливань на енергетичні, кінетичні та електротехнічні показники процесу переробки фруктів.

Методологічна основа дослідження. В основу наукового апарату **магістерської роботи** покладено фундаментальні положення теорії пружних середовищ, хвильової механіки, теорії електроакустичного перетворення та електродинаміки. Також використано математичні моделі тепломасообміну та сучасні методики статистичного аналізу даних із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Коротка характеристика фруктів як матеріалу для сушіння

Сухофрукти займають значну позицію в харчовій культурі людини, оскільки вони є не лише смачними, а й корисними доповненнями до щоденного меню. На відміну від свіжих фруктів, які втрачають частину своїх вітамінів під час тривалого зберігання, сухофрукти здатні зберігати свої корисні властивості протягом тривалого часу і можуть бути джерелом вітамінів цілий рік, незалежно від сезону.

Висушене якісне плодове сировина отримують з плодів із щільною м'якоттю, такими як яблука, груші та айва. Ці плоди мають схожу анатомічну структуру, що включає три основні компоненти: зовнішню шкірку плоду, насіннєві камери з насінням у центрі та м'якоть між ними. М'якоть є найціннішою частиною для переробки.

За хімічним складом м'якоть представляє собою колоїдну капілярно-пористу біологічну систему рослинного походження. Вона містить безліч мікропор та капілярів, які забезпечують циркуляцію вологи між внутрішніми шарами і поверхнею. Проте кількість вільної води у рослинних об'єктах зазвичай незначна; вона переважно зв'язана з іншими компонентами або перебуває всередині клітинних оболонок, що ускладнює процес сушіння.

Яблука не тільки популярні серед споживачів по всьому світу, але й є цінною сировиною для виробництва сухофруктів із високим рівнем вітамінів та мінералів. Вони мають високий вміст цукру і органічних кислот та різноманіття біологічно активних речовин. Більшість сухих речовин яблук розчиняються у воді; до них належать цукри, органічні кислоти та інші розчинні речовини.

Хімічний склад свіжих яблук виглядає наступним чином: вода – 83–86 %, цукри – 8–15 %, пектинові речовини – 0,5–1,2 %, органічні кислоти – 0,2–1,7 %, мінеральні речовини – 0,3–0,5 %. Яблука також містять азотисті (0,2–0,6 %) і

дубильні (0,02–0,07 %) сполуки разом із вітамінами С і групи В (В1, В2, В6), РР та каротином.

Вуглеводний склад яблук представлений у відсотках: фруктоза – 8.1; глюкоза – 3.8; сахароза – 3.0; крохмаль – 0.24; пектинові речовини – 1.1; клітковина – 0.6. Мінеральні елементи нараховують калій – 38 мг; кальцій – 19 мг; фосфор – 13 мг; магній – 10 мг; залізо – 2.5 мг тощо. Середній рівень вітамінів становить: аскорбінова кислота – 7 мг%; каротин – 0.1 мг%; тіамін – 0.04 мг%; рибофлавін – 0.03 мг%; ніацин – 0.2 мг%. Загальна маса сухих розчинних речовин у яблуках коливається між 7–20 %. цукри представлені моно- та дисахаридами.

Груші також є корисними ласощами завдяки багатому складу ферментів ,цукрів ,клітковини ,органічних кислот ,дубильних і пектинових речовин ,азотовмісних сполук і різноманітності вітамінів . Хімічний склад груш подібний до складу яблук ,але містить менше кислот (від 0 ,1 до 0 ,6 %), дубильних (від 0 ,01 до 0 ,21 %) і пектинових речовин (від 0 ,1 до 0 ,6 %), а також менше вітаміну С (3–17 мг/100 г).

Айва вирізняється великими розмірами плодів вагою від 300 до 600 грам або навіть більше для деяких сортів . Плоди мають форму яблука чи груші й часто ребристу поверхню . Її щільна м'якоть має терпкий смак жовтуватого чи кремового кольору.

Свіжі плоди айви не споживаються через виражений смак терпкості й наявність кам'янистих клітин . Замість цього їх використовують для приготування компотів ,варення й желе.

Склад айви подібний до складу яблук та груш але має більший зміст дубильних речовин (від 0 .2% до 1 .8%) і пектину (від 0 .75% до 3 .2%). Також вона багата на органічні кислоти (від 1 .3% до 2 .0%) і містить різноманітні вітаміни групи В.

Ключові характеристики насіннячкових фруктів як об'єкт сушіння включають їх тепло- та електрофізичні властивості: питомий електричний опір або питома електропровідність σ ; вологість W ; густина γ ; теплоємність C

; коефіцієнти температуропровідності та теплопровідності λ . Середні значення цих показників наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Теплофізичні характеристики свіжих насіннячкових фруктів

Фрукти	W , %	ρ , Ом·м*	γ , кг/м ³	C , Дж/(кг·°С)	λ , Вт/(м·°С)	$\alpha \cdot 10^{-8}$, м ² /с
Яблука	83–86	110–130	790–1200	3780–3850	0,42–0,51	14–14,6
Груші	83–86	115–140	855–1250	3760–3930	0,51–0,54	13,4–14,2
Айва	83–86	110–125	842–1150	3690–3900	0,46–0,53	13,6–14

*при температурі фруктів 20 °С.

Аналіз даних, представлених у табл. 1.1, демонструє, що всі зазначені тепло- та електрофізичні характеристики насіннячкових фруктів мають значну подібність. Основним фактором, який впливає на їхні значення, є вологість, показники якої практично знаходяться в одному і тому ж діапазоні.

1.2. Огляд наявних методів та пристроїв сушіння фруктової сировини

У технології видалення вологи термічне висушування є основним енергетичним процесом. В оглядових статтях часто розглядаються методи сушіння з історичної перспективи, включаючи різні джерела теплової енергії та способи її передачі до матеріалів, що підлягають сушінню. Найпростішою класифікацією є поділ на природне і штучне сушіння, де природний метод є найбільш простим та поширеним способом зневоднення сільськогосподарської продукції у приватних господарствах.

Природне сушіння передбачає розташування сировини на відкритому повітрі за умов природного освітлення без втручання людини у процес або регулювання факторів, що можуть прискорити висушування, таких як температура сировини та вологість повітря. Хоча цей спосіб не потребує енергозатрат, він характеризується тривалістю процесу видалення вологи і вимогами до значних площ для розміщення

сировини. Продукти, отримані таким чином, можуть мати високий рівень забруднення та знижений вміст корисних речовин і вітамінів.

Примусові методи сушіння можуть відбуватися без зміни агрегатного стану вологи (наприклад, центрифугування або пресування) або за його зміни (теплове сушіння) [22]. З точки зору зменшення енергетичних витрат найбільш ефективним варіантом є механічне видалення основної маси вологості для отримання соків та сировини для подальшої переробки в порошки. Однак споживачі традиційно очікують отримання висушених харчових продуктів у формі шматочків або у натуральному вигляді. Такі технологічні процеси вимагають значної кількості теплової енергії, іноді навіть більше за теоретично необхідну.

У більшості сушильного обладнання харчової промисловості теплову енергію для термічного зневоднення виробляють електротехнологічні комплекси. Прагнення підвищити продуктивність сприяло розвитку різноманітних методів передачі енергії до висушуваного матеріалу; їх можна умовно поділити на поверхневі (конвективні, кондуктивні) та об'ємні (акустичні, НВЧ-струми, терморадіаційні — ІЧ-нагрівання тощо).

Конвективне сушіння є найпоширенішим методом і передбачає пропускання нагрітого теплоносія через шар вологої сировини. У ролі теплоносія використовується повітря, водяна пара чи димові гази. Цей метод простий у застосуванні й не потребує складного дорогого обладнання — це його основна перевага. Конвективне сушіння фруктів найчастіше здійснюється у камерних установках періодичної дії.

Камери конвективного сушіння «Садочок-М» призначені для отримання сухих продуктів із овочів, фруктів, грибів, зелені та риби. Обладнання складається з нагрівача (ребристий ТЕН) і вентилятора; висушувана сировина розташовується на лотках із нержавної сталі. Керування режимами сушіння напівавтоматичне і виконується через електронний блок із заданими параметрами температури теплоносія та тривалості сушіння. Основні технічні характеристики цих шаф: споживана потужність – від 0,45 до 1,1 кВт; площа сушильної поверхні – від 0,54 до 2,2 м²; тип нагрівника – ребристий ТЕН із нержавної сталі; вага – не перевищує 60 кг.



Рис. 1.3. Сушильна установка «Садочок-2М»

Основні недоліки конвективних сушильних установок включають низьку ефективність видалення вологи, значні витрати енергії (1,6–2,5 кВт·год на 1 кг випаруваної вологи), нерівномірний прогрів сировини та знижену харчову цінність продукції через вплив високих температур.

Кондуктивні методи сушіння ґрунтуються на передачі тепла до фруктової сировини шляхом контакту з нагрітою поверхнею. Одним із відомих підходів до кондуктивного сушіння є вакуумна технологія, яка передбачає чергування кондуктивного нагріву і вакуумних імпульсів. В рамках цієї технології підготовлені фрукти розташовуються в сушильній камері на спеціальних пластинах, що нагріваються під час процесу сушіння (рис. 1.4).

Серед основних переваг кондуктивного способу сушіння варто відзначити його високу швидкість обробки, що зумовлена підвищеною тепловіддачею при безпосередньому контакті продукту з нагрітою поверхнею. Проте, незважаючи на цю швидкість, кондуктивний метод майже не використовується в харчовій промисловості. Це пояснюється тим, що через прямий контакт продукту з нагрівальним елементом тепло розподіляється нерівномірно, що може призводити до пересушування, тріщин і значної деформації матеріалу. Як наслідок, готовий продукт втрачає свою привабливість для споживачів. Додатково, після завершення

процесу сушіння фрукти втрачають значну частину своїх поживних речовин та вітамінів [31, 32]. Іншим суттєвим недоліком установок кондуктивного типу є їх високе енергоспоживання — приблизно 1,5–1,7 кВт·год на 1 кг видаленої вологи [30].

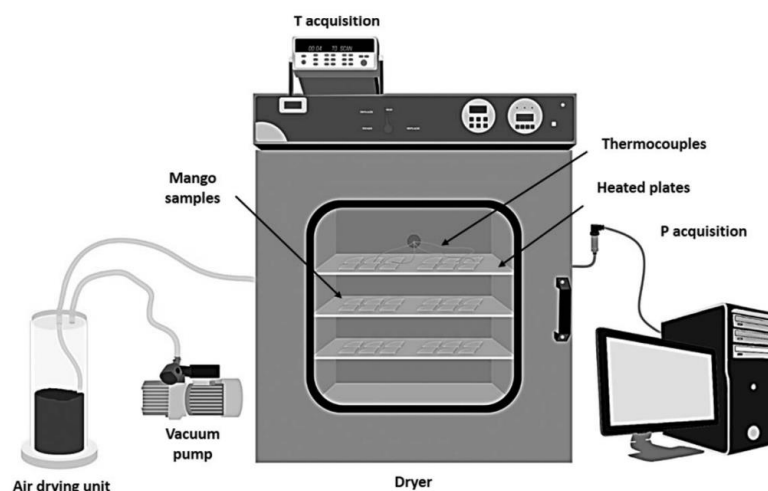


Рис. 1.4. Установка для здійснення кондуктивного сушіння фруктів

Щодо терморадіаційного способу сушіння, то тут фруктова сировина отримує тепло за рахунок інфрачервоних променів. Обробка може проводитися як у камерних установках, так і у тунельних (конвеєрних) системах (рис. 1.5). Процес зневоднення із застосуванням інфрачервоних випромінювачів супроводжується істотним нагріванням поверхні продукту. Це призводить до утворення значного температурного градієнту, який затрудняє дифузію вологи з внутрішніх шарів матеріалу на поверхню. Тому опромінення слід здійснювати періодично з певними паузами для забезпечення переміщення вологи від середини матеріалу до його поверхні.

Основними перевагами інфрачервоного зневоднення є висока продуктивність, гнучкість управління процесом та простота конструкції сушильних установок. Проте, незважаючи на ці позитивні аспекти, цей метод не отримав широкого використання через суттєві недоліки. Серед них - нерівномірний розподіл тепла в продукті, низький коефіцієнт потужності джерел інфрачервоного випромінювання і значна енергоємність процесу — від 1,5 до 2,0 кВт·год на кожен кілограм видаленої вологи.



Рис. 1.5. ІЧ сушильні шафи камерного (а) та конвеєрного (б) типів

Щодо збереження харчової цінності сировини найефективнішим методом зневоднення виступає сублімаційне сушіння у вакуумному середовищі. Ця технологія дозволяє мінімізувати втрати вітамінів та погіршення смакових якостей продукту разом із кольором і текстурою.

Процес сублімаційного сушіння можна поділити на два основні етапи (рис. 1.6). На першому етапі при високому вакуумному тиску вода заморожується й виходить на поверхню матеріалу. Другий етап характеризується активним виділенням тепла для випаровування вологості; льодовики переходять безпосередньо зі стану твердої речовини в газоподібний стан без проходження рідкої фази.

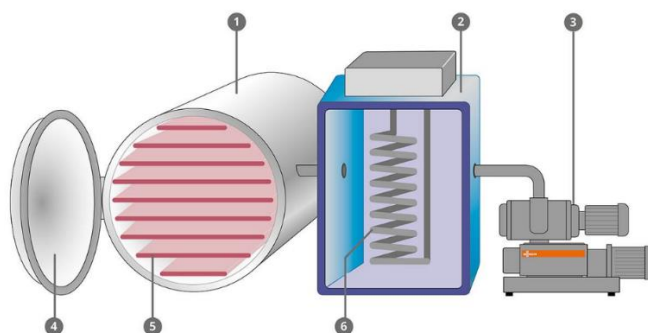


Рис. 1.6. Технологічна схема сублімаційної сушарки:

- 1 – сушильна камера; 2 – конденсатор; 3 – вакуумна система; 4 – герметичні двері шафи;
5 – нагрівальні пластини; 6 – змійовик охолодження

Однак, через високу вартість та складність технологічного обладнання, а також низьку продуктивність, значні капіталовкладення та витрати на виробництво, установки для сублімаційного сушіння не здобули широкої

популярності. Важливою причиною цього також є велика споживана потужність (від 3 до 3,9 кВт·год на 1 кг видаленого вологи).

Сушіння за допомогою струмів надвисоких частот (НВЧ) базується на поляризації молекул матеріалу, що підлягає висушуванню. Схема технологічного процесу конвеєрної НВЧ-сушарки представлена на рис. 1.7. У процесі зневоднення фруктова сировина розміщується на стрічковому конвеєрі всередині вакуумної камери. Під впливом електричного поля з високим рівнем напруги, яке генерує магнетрон, відбувається контрольований нагрів сировини. Видалення вологи здійснюється з усього об'єму висушуваного матеріалу. Одночасно всередині молекул виникають градієнти тиску, які сприяють прискоренню дифузії вологи.

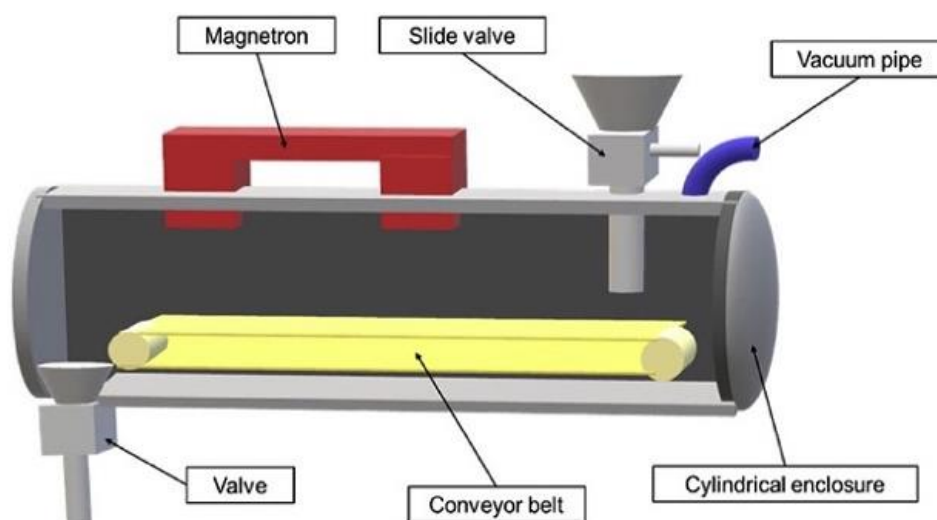


Рис. 1.7. Технологічна схема вакуумної НВЧ-сушарки

Переваги даного методу в порівнянні з конвективним та кондуктивним сушінням включають високу ефективність видалення вологи, а також можливість контролю та підтримання заданої температури сировини. Проте, основні недоліки полягають у складності, високій металомісткості обладнання та значній енергетичній витратності процесу (2,5–5 кВт·год на 1 кг видаленої вологи). Крім того, важливим аспектом є екологічна небезпека, пов'язана з негативним впливом мікрохвильового випромінювання на людський організм та використанням високих напруг, що суттєво підвищує ризик електротравми.

Аналіз наведених аспектів дозволяє класифікувати методи сушіння сільськогосподарської продукції, що детально представлено в додатку А (рис. А.1).

Результати аналізу свідчать про те, що відомі методи часто не відповідають вимогам якості готового продукту, мають високу вартість обладнання та характеризуються великою енергоємністю і низькою ефективністю. Тому проведення наукових досліджень для модернізації існуючих технологій і розробки нових енергоефективних способів сушіння плодоовочевої сировини є актуальним завданням для переробної промисловості.

Однак обробка великих обсягів овочів і фруктів з високим вмістом вітамінів ставить нові вимоги до технологічних процесів і обладнання:

- отримання продукту необхідної якості на виході, що встановлюється за допомогою органолептичної перевірки й досягається шляхом підтримки обмеженої температури матеріалу під час переробки;
- максимальне скорочення часу виконання технологічних операцій для підвищення продуктивності праці та зменшення капітальних витрат;
- зменшення витрат теплової та електричної енергії на видалення 1 кг вологості.

Найбільш перспективним рішенням цієї проблеми є впровадження комбінованого сушіння — поєднання кількох фізичних механізмів передачі енергії для досягнення значного скорочення енергетичних витрат у процесі зневоднення.

1.3. Застосування ультразвукової обробки та прямого електронагріву в процесі зневоднення

У теперішній час усе ширше впроваджуються нетермічні способи попередньої підготовки сировини перед сушінням, серед яких найбільшу увагу привертає обробка у полі ультразвукових коливань. У харчовій галузі зазвичай застосовують низькочастотні ультразвукові хвилі 20–100 кГц, оскільки в цьому діапазоні прояв ультразвукової кавітації є найбільш ефективним. Завдяки своєму специфічному впливу на аграрну продукцію, низькочастотний ультразвук використовують для інтенсифікації процесів заморожування, відтавання та сушіння.

У працях показано, що попереднє ультразвукове опромінення скорочує тривалість зневоднення на 25–40 % та знижує енерговитрати до 35–70 %. Водночас у роботі [63] виявлені суттєві зміни структури матеріалу після сушіння. Під дією ультразвукових коливань усадка зростала з 9 до 11 %, щільність продукту знижувалась на 6–20 %, а пористість збільшувалась на 9–14 % порівняно з необробленими зразками.

Автори відзначили, що застосування ультразвуку під час попередньої обробки яблук у розчині етанолу скорочує тривалість конвективного зневоднення на 18,3 % у порівнянні з контрольною групою. Водночас спостерігалось збільшення електропровідності розчину зі збільшенням часу ультразвукової обробки, що вказує на витік внутрішньоклітинного соку у середовище обробки та на зменшення вмісту поживних речовин у кінцевому продукті.

Дослідження продемонстрували ефективність ультразвукової обробки шматочків яблук перед вакуумно-сублімаційним сушінням. Попередня обробка зразків протягом 5 хв у воді за температури 25 °C та частоти ультразвуку 100 кГц дозволила прискорити сушіння на 25 %. Водночас подовження часу обробки до 10 та 15 хв не давало додаткового покращення і навіть призводило до зменшення швидкості видалення вологи зі зразків. Дослідники пояснюють таку закономірність можливим закриттям поверхневих пор при тривалому впливі ультразвуку, що ускладнює масообмін.

Вивчення електрофізичних властивостей сировини після ультразвукової обробки показує суперечливий вплив ультразвуку на електропровідність матеріалу. У роботі встановлено, що 5-хвилинна ультразвукова обробка підвищувала електропровідність шматочків яблук на 57 % порівняно з контролем. Проте вплив ультразвуку на електропровідність тканин є неоднозначним: збільшення тривалості обробки до 20 хв при тій же частоті зменшувало електропровідність на 12 % відносно контрольного зразка. Це також може бути пояснено явищем закриття пор у матеріалі.

З метою підвищення інтенсивності та зниження енерговитрат усе більше уваги приділяють комбінованим методам сушіння, які поєднують декілька механізмів видалення вологи з оброблюваного продукту.

Однак у цих схемах важко досягти суттєвого зниження питомих енергозатрат на виконання процесу.

У роботах серед альтернативних підходів до сушіння також розглядають попередній нагрів вологих матеріалів шляхом прямого пропускання електричного струму, як спосіб одноразового генерування об'ємного джоулевого тепла у висушуваних об'єктах з високим коефіцієнтом корисної дії. Так, у дослідженні очищені кубики яблук розміром 10×10 мм занурювали в циліндричні резервуари з нержавіючої сталі, заповнені 65 %-м розчином сахарози, з пластиковим дном та двома електродами, підключеними до генератора. Далі осмотичний розчин нагрівали протягом 90 хв пропусканням змінного струму частотою 60 Гц та напругою 100 В, створюючи поле зі напруженістю 13 В/см. Експерименти показали, що омичне нагрівання істотно посилює та прискорює втрату вологи з твердих частин яблук порівняно з контрольними зразками. Проте в роботі не досліджено, як зміниться хід зневоднення при варіюванні напруженості електричного поля омичного нагріву. До того ж застосування розчинів для попередньої обробки значно ускладнює технологічну лінію.

Схожий підхід описано в роботі [73], але з використанням модифікованого обладнання порівняно з [72]. Автори [73] показали, що омичне нагрівання посилює масообмін під час осмотичної дегідратації кубиків яблук. Отримані результати пояснюють здатністю джоулевої теплоти проникати в клітинні мембрани та викликати значні структурні зміни в яблуці, що відображається зростанням електропровідності тканини. Однак, як і в [72], дослідження виконувались лише при одному значенні напруженості електричного поля — 60 В/см. Також лишається невизначеним, як вплине на кінцеву якість продукту можливе утворення цукрового шару на поверхні фруктів унаслідок використання сиропу під час омичного нагріву.

У роботі [74] розглянуто конвективне сушіння, за умов якого яблука, нарізані пластинами $15 \times 15 \times 5$ мм, піддавалися попередньому омичному нагріванню

протягом 1 хв при напруженості електричного поля 20–40 В/см. Порівняно з контрольною групою спостерігалось скорочення часу сушіння на 24 %, 35 % та 29 % для зразків, оброблених полем з напруженістю 20 В/см, 30 та 40 В/см відповідно. Крім того, оброблені яблука краще зберігали форму та мали вищі органолептичні характеристики. Однак під час досліджень для попередньої обробки нарізані яблука занурювали у воду, що викликає питання щодо збереження поживних речовин та вітамінів у сировині через масообмін з водним розчином під час омичного нагріву.

У пластини солодкої картоплі розміром 10×10×5 мм поміщали між двома титановими електродами і нагрівали змінним струмом частотою 60 Гц до заданої температури при напруженості поля 50 В/см, 70 та 90 В/см. Негайно після нагріву зразки відправляли у вакуумну сублімаційну сушильну камеру. Експерименти показали, що попередній нагрів електричним струмом скорочує час зневоднення на 22–24 %. Однак застосування омичного нагріву за вказаних значень напруженості поля призводило до надмірного прогріву сировини, що негативно впливало на якість готового продукту. Додатково використання обладнання для вакуумної сублімаційної сушки значно підвищує вартість технічних засобів.

Автори [76] досліджували вплив попереднього омичного нагріву на конвективне сушіння картопляних тканин монополярними імпульсами майже прямокутної форми з напруженістю до 500 В/см. Встановлено, що при напруженості поля вище 70 В/см через перевищення прикладеної потужності виникає суттєве ушкодження тканин матеріалу. Зниження напруженості омичного нагріву до 50 В/см дозволяє знизити температуру сушіння картоплі приблизно на 20 °С. Проте використання перетворювачів для формування імпульсів заданої форми значно ускладнює конструкцію сушильного обладнання та підвищує його вартість.

У роботі [77] порівнювали вплив попередньої хімічної, мікрохвильової та імпульсної електричної обробки на конвективне сушіння та якість родзинок. Результати показали істотне збільшення швидкості сушіння після попередньої обробки пульсуючим електричним полем (ПЕП). Крім того, зовнішній вигляд,

вміст сухих розчинних речовин та ринкова якість продукції, обробленої ПЕП, були кращими порівняно з хімічною обробкою та з необробленими зразками. Однак імпульсну обробку ПЕП здійснювали при напруженості поля 1 кВ/см.

У зв'язку з підвищеною небезпекою для обслуговуючого персоналу, застосування такого високовольного обладнання значно ускладнюється.

У проаналізованих комбінованих технологіях сушіння сировини з використанням прямого електричного нагріву виявлено позитивний вплив внутрішнього джоулевого нагріву. Водночас найчастіше цей тип нагріву застосовують лише на етапі попередньої обробки без детального вивчення кінетики зневоднення та фізичних процесів, що відбуваються всередині біологічного об'єкта під час сушіння. Через складність таких явищ існує потреба у визначенні залежностей технологічних параметрів від властивостей об'єктів сушіння протягом усього процесу висушування.

Незважаючи на численні дослідження попередньої ультразвукової обробки перед сушінням, її вплив на електрофізичні параметри та структуру висушеної сировини вивчений недостатньо, оскільки результати дії ультразвуку залежать від багатьох факторів: типу висушуваної сировини, методів підведення теплової енергії та технологічних параметрів процесу зневоднення.

1.4. Висновки до першого розділу та завдання дослідження

1. Проведено аналіз наукових досліджень, присвячених сушінню фруктової сировини. Виявлено, що сучасні дослідницькі підходи спрямовані не лише на збільшення обсягів виробництва та зменшення витрат, але й на покращення якості кінцевого продукту.

2. Значними недоліками відомих методів і обладнання для сушіння фруктового матеріалу є недостатня інтенсивність видалення вологи, нерегулярний прогрів сировини та низька енергоефективність. Це призводить до суттєвого зниження теплової ефективності сушильних установок і впливає негативно на якість готової продукції.

3. З огляду на недостатнє вивчення впливу ультразвукової обробки та прямого електричного нагрівання для оптимізації процесу сушіння виникає значний теоретичний та практичний інтерес у розробці електротехнологічного комплексу для висушування фруктової сировини із застосуванням цих методик.

Відповідно до отриманих результатів аналізу літератури та актуальних тенденцій у сфері сушіння плодового матеріалу сформульовано такі завдання для подальших досліджень:

- На основі експериментальних даних визначити параметри електроакустичної системи з живленням, яка забезпечує необхідну швидкість видалення рідини з внутрішньоклітинного простору;
- Розробити одновимірну математичну модель процесу висушування, що враховує внутрішні джерела тепла від прямого електричного нагрівача плодової сировини;
- Експериментально підтвердити і проаналізувати вплив попередньої ультразвукової обробці разом із прямим електричним нагріванням щодо зміни питомого опору й величини струму при безпосередній роботі таких пристроїв задля встановлення меж регулювання характеристик джерел живлення;
- Дослідити зміну мікроструктури сухих проб фрукти під дією ультразвуку і прямих токових потоках за різних режимах їхнього лікування;
- Обґрунтувати структуру й технічне рішення комплексної установки для висушування плодовою сировиною;
- Оцінити економічну вигоду використання цього технологічного комплексу як засобу інтенсифікації процесу висушуванні плодової продукції.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ФРУКТОВОЇ СИРОВИНИ

Незважаючи на досягнення в розробці комбінованих методів та технологій сушіння, наразі не існує оптимального підходу для висушування фруктової сировини. Відповідно, виникає необхідність обґрунтувати найбільш ефективний спосіб для практичного застосування.

Проект електротехнологічного комплексу передбачає попередню ультразвукову обробку сировини з подальшим конвективним сушінням із використанням прямого електронагріву. Дослідження, представлені в роботах , демонструють чітке скорочення тривалості процесу при впровадженні прямого нагрівання струмами промислової частоти протягом всього етапу конвективного сушіння фруктової продукції. Проте результативність запропонованого комбінованого методу залежить переважно від фізико-електричних характеристик матеріалів, які постійно змінюються під час дегідратації і залежать як від вологості, так і температури оброблюваних продуктів.

У зв'язку з цим важливо встановити залежності між технологічними параметрами — такими як характеристики ультразвукового поля, температура теплоносія та інтенсивність електричного поля — й показниками якості процесу сушіння (такими як тривалість дегідратації, швидкість видалення вологи та максимальна температура сировини). Отримати ці залежності можна шляхом моделювання висушуваних матеріалів у вигляді фізико-математичної моделі, яка здатна адекватно описувати тепломасообмінні процеси та електрофізичні явища у біологічному об'єкті під час дегідратації.

2.1. Структурна схема електротехнологічного комплексу

З метою підвищення ефективності сушіння фруктової сировини за допомогою ультразвуку та безпосереднього електричного нагріву розроблено

електротехнологічний комплекс, структурна схема якого зображена на рисунку 2.1.

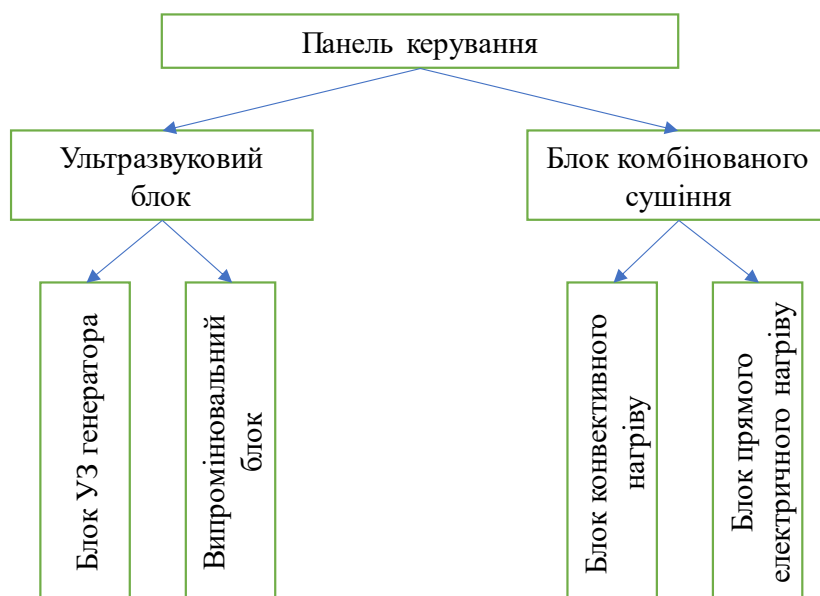


Рис. 2.1. Структурна схема електротехнологічного комплексу

Структурна схема електротехнічного комплексу для сушіння ілюструє основний принцип функціонування пристрою у спрощеному загальному вигляді. Запропонований електротехнологічний комплекс складається з панелі управління, яка з'єднана з блоком попередньої ультразвукової обробки сировини та блоком комбінованого конвективного сушіння, що використовує прямий електричний нагрів..

2.2. Обґрунтування параметрів електроакустичної системи для передсушильної обробки сировини

2.2.1. Складання фізичної моделі електроакустичної системи для ультразвукового впливу на фрукти. Для досягнення кавітаційного режиму, параметри ультразвукового поля, такі як інтенсивність та частота, повинні відповідати визначеним значенням. Дослідження показали, що максимальна ефективність кавітації спостерігається в частотному діапазоні від 20 до 200 кГц. В реальних умовах найчастіше використовуються частоти в межах від 20 до 44 кГц через обмеження технічних можливостей.

У цьому частотному діапазоні для формування ультразвукового поля рекомендується застосовувати п'єзокерамічні перетворювачі. Інтенсивність ультразвуку, необхідна для досягнення кавітаційного режиму в зазначеному діапазоні, має бути в межах від 1 до 5 Вт/см².

Під час теоретичного аналізу була розроблена фізична модель електроакустичної системи (рис. 2.2), яка складається з генератора електричних коливань ультразвукової частоти, електроакустичного перетворювача та камери для попередньої обробки.

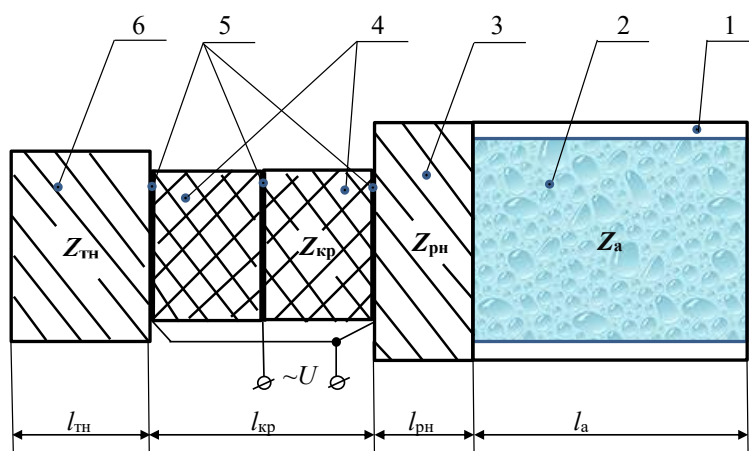


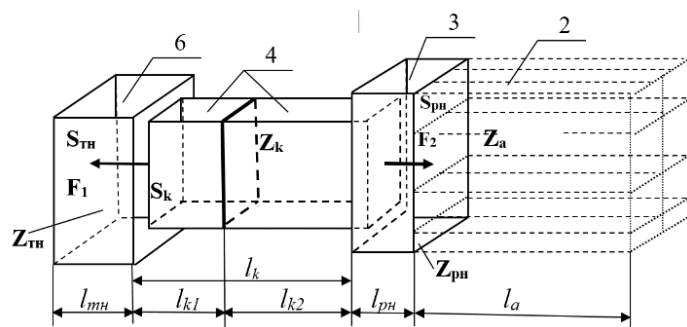
Рис. 2.2. Фізична модель електроакустичної системи для УЗ-обробки фруктів:

1 – корпус робочої камери; 2 – оброблювана суміш; 3 – робоча накладка; 4 – п'єзокерамічні елементи (хвильовод); 5 – електроди для живлення електроакустичного перетворювача; 6 – тильна накладка-демпфер

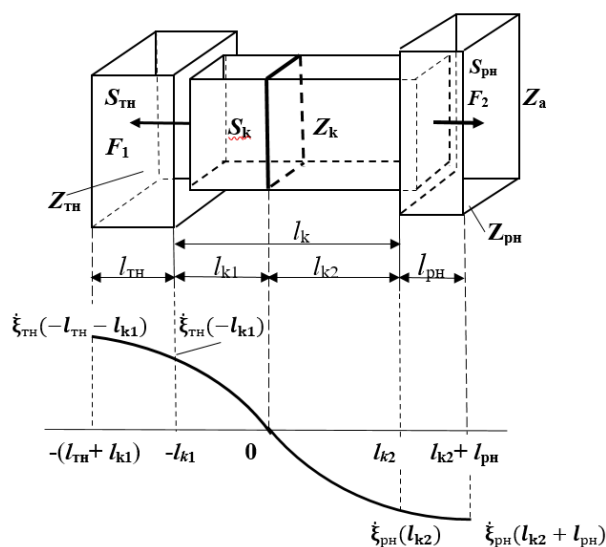
Електроакустична система складається з п'єзокерамічного пакету, що утворений з окремих пластин 4 (хвильовод), випромінюючої (робочої) накладки 3 та тильної (демпфуючої) накладки 6. Обидві накладки прикріплені до торців пакета за допомогою електроізоляційного шару. Суміш, що підлягає обробці, 2 заливається в робочий орган (робочу камеру-бланширатор) 1. Живлення подається через електроди 5.

2.2.2 Обґрунтування характеристик робочого ультразвукового поля.

Структурна схема електроакустичної системи, створена на основі фізичної моделі (рис. 2.2), представлена на рис. 2.3.



а)



б)

Рис. 2.3. Структурна схема фізичної моделі електроакустичної системи для УЗ-обробки фруктів:

а) структурна схема фізичної моделі: 2 – оброблювана суміш; 3 – робоча накладка; 4 – п'єзокерамічні елементи (хвильовод); 6 – тильна накладка – демпфер; б) розподіл амплітуди коливань у напівхвильовому п'єзовипромінювачі

Електрична еквівалентна схема, створена згідно зі структурною схемою, представлена на рисунку 2.4.

Щоб розрахувати акустичні опори замісної еквівалентної схеми, які підведені до вузлової точки п'єзокерамічного випромінювача, потрібно встановити відповідні входні опори компонентів електроакустичної системи .

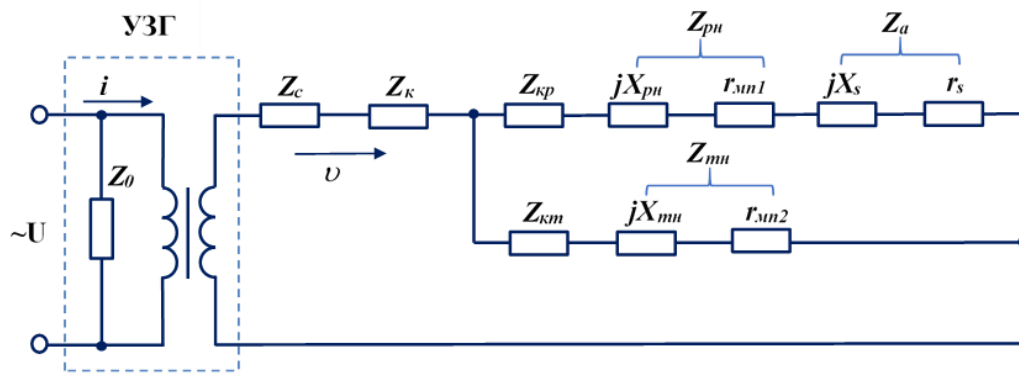


Рис. 2.4. Електрична еквівалентна схема електроакустичної системи

для УЗ-обробки фруктів:

УЗГ – ультразвуковий генератор; Z_c – приведений ємнісний опір стрижня при повздовжньому п'єзоефекті; Z_κ – опір загальної ділянки п'єзокерамічного стрижня; $Z_{кр}=Z_{км}$ – відповідно до опори робочої та тильної ділянок п'єзокерамічного стрижня (до вузлового перерізу); $Z_{рн}, Z_{мн}$ – відповідно опори робочої та тильної накладок; Z_a – опір навантаження (оброблюваної рідини); $r_{мн1}, r_{мн2}$ – опори механічних втрат перетворювача

Опір навантаження Z_a адаптований до вхідного опору робочої поверхні накладки (з боку оброблюваної рідини), розраховується з урахуванням енергетичних втрат від випромінювання в цій рідині. Це передбачає введення комплексного хвильового числа ν_a . Оскільки $Z_a = R_s + jX_s$, то:

$$Z_a = \frac{R_s(1 + tg(\nu_a l_a)) + jX_s \left(1 - \frac{R_s^2}{X_s^2}\right) tg(\nu_a l_a)}{1 + \left(1 - \frac{R_s}{X_s}\right)^2 tg^2(\nu_a l_a)}, \quad (2.1)$$

де R_s, X_s відповідно активна та реактивна складові опору оброблюваної речовини, кг/с;

ν_a – комплексне хвильове число, рад/м;

l_a – висота шару оброблюваної сировини, м.

Активна і реактивна частини опору оброблюваного матеріалу:

$$R_s = \alpha \rho_a c_a S_B; \quad (2.2)$$

$$X_s = \beta \rho_a c_a S_B, \quad (2.3)$$

де α, β – Відповідно, коефіцієнти активного та реактивного опорів випромінювання односпрямованого випромінювача.;

ρ_a – густина оброблюваної речовини, кг/м³;

c_a – швидкість звуку в оброблюваній речовині, м/с;

S_B – площа випромінювальної поверхні, м²; $S_B = S_{pn}$.

Комплексне хвильове число:

$$v_a = \alpha_a + jk_a, \quad (2.4)$$

де α_a – коефіцієнт поглинання оброблюваної речовини, м⁻¹;

k_a – хвильове число матеріалу навантаження, рад/м.

Хвильове число:

$$k = \frac{\omega}{c}, \quad (2.5)$$

де ω – кутова частота, рад/с;

c – швидкість звуку в матеріалі, м/с.

При навантаженні (оброблюваної речовини) висотою 0,2 м та змінній частоті, точне значення акустичних опорів варіює в межах від 230 до 420 кг/с. (рис. 2.5).

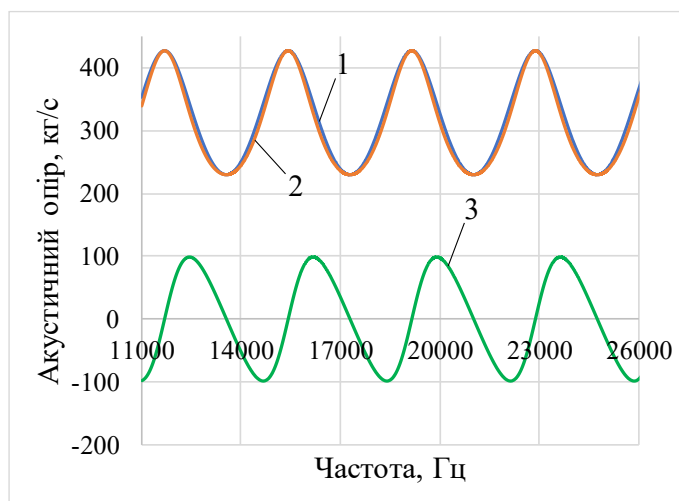


Рис. 2.5. Залежність вхідних акустичних опорів поглинаючого шару оброблюваної речовини від частоти ультразвукових коливань.: 1 – повний опір; 2 – активний опір; 3 – реактивний опір

Дійсна частина виразу (2.1) представляє собою еквівалентний вхідний опір накладки перетворювача (опір випромінювання) і становить::

$$\operatorname{Re} Z_a = R_a = \frac{R_s(1 + \operatorname{tg}(v_a l_a))}{1 + \left(1 - \frac{R_s}{X_s}\right)^2 \operatorname{tg}^2(v_a l_a)} = \frac{R_s}{\cos^2(v_a l_a) + \left(\frac{R_s}{X_s}\right) \sin^2(v_a l_a)}. \quad (2.6)$$

Вхідний опір навантаження, який адаптовано до внутрішньої частини робочої накладки, а саме до вхідної поверхні п'єзoeлемента.:

$$Z_{p_{pn}} = r_{p_{pn1}} + \frac{R_s + jZ_{pn} \operatorname{tg}(k_{pn} l_{pn})}{1 + j \left(\frac{R_a}{Z_{pn}}\right) \operatorname{tg}(k_{pn} l_{pn})}, \quad (2.7)$$

де $r_{p_{pn1}}$ – опір втрат у робочій гілці перетворювача, кг/с;

Z_{pn} – опір робочої накладки перетворювача, кг/с;

k_{pn} – хвильове число матеріалу робочої накладки, рад/м;

l_{pn} – висота робочої накладки, м.

Опір робочої накладки перетворювача:

$$Z_{pn} = -jX_{pn} \operatorname{tg}(k_{pn} l_{pn}), \quad (2.8)$$

де X_{pn} – реактивний опір робочої накладки, кг/с.

$$X_{pn} = \rho_{pn} c_{pn} S_{pn} \operatorname{tg}(k_{pn} l_{pn}), \quad (2.9)$$

де ρ_{pn} – густина матеріалу робочої накладки, кг/м³;

c_{pn} – швидкість звуку в матеріалі робочої накладки, м/с;

S_B – площа робочої накладки, м².

Робоча накладка є частиною перетворювача, і її розміри мають гарантувати адекватну площу перерізу для розширення випромінюючої поверхні та збільшення смуги пропускання.. Для робочої накладки, виготовленої з титанової сплаву марки ВТ-1, що має густину 4500 кг/м³ та швидкість звуку 5250 м/с, при площі перетину

$4,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ і довжині накладки $0,012 \text{ м}$, на рисунку представлені залежності акустичних опорів.. 2.6.

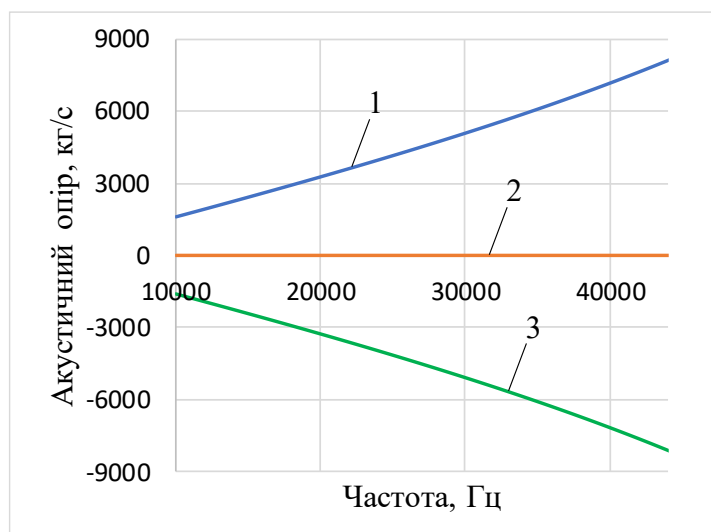


Рис. 2.6. Залежність акустичних опорів робочої накладки, узгоджених з стрижнями п'єзоперетворювача, від частоти ультразвукових коливань: 1 – повний опір; 2 – активний опір; 3 – реактивний опір

Для частотного діапазону від 20 до 44 кГц реактивний акустичний опір робочої накладки коливається в межах 3500–8000 кг/с (див. рис. 2.6). Цей параметр потребує компенсації реактивними опорами інших компонентів електроакустичної системи, що використовується для обробки фруктів.

Оскільки розміри хвиль випромінювальної поверхні значно перевищують довжину хвилі самих випромінювальних коливань [86], формула (2.7) може бути спрощена і набуває наступного вигляду:

$$Z_{pn} = r_{pmn1} + \frac{R_s}{\cos^2(k_{pn} l_{pn})} - jX_{pn} \operatorname{tg}(k_{pn} l_{pn}). \quad (2.10)$$

Тоді опір навантаження, що відноситься до вузлової точки п'єзокерамічного випромінювача в контексті кола робочої накладки:

$$Z_1 = Z_{npn} + Z_{kp} = \frac{Z_{npn} + jZ_{kp} \operatorname{tg}\left(\frac{k_{kp} l_{kp}}{2}\right)}{1 - \left(\frac{Z_{npn}}{Z_{kp}}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{k_{kp} l_{kp}}{2}\right)}, \quad (2.11)$$

де Z_{kp} – опір частини (до вузлової точки) п'єзокерамічного перетворювача, кг/с;

k_{kp} – хвильове число матеріалу п'єзоелементу, рад/м;

l_{kp} – довжина частини (до вузлової точки) п'єзоелементу, м.

Опір частини (до вузлової точки) п'єзокерамічного перетворювача:

$$Z_{kp} = -jX_{kp} \operatorname{tg}\left(\frac{k_{kp} l_{kp}}{2}\right), \quad (2.12)$$

де X_{kp} – реактивна частина опору п'єзокерамічного перетворювача (до вузлової точки), кг/с.

$$X_{kp} = \rho_k c_k S_k \operatorname{tg}\left(\frac{k_{kp} l_{kp}}{2}\right), \quad (2.13)$$

де ρ_k – густина матеріалу п'єзокерамічного перетворювача, кг/м³;

c_k – швидкість звуку в матеріалі п'єзокерамічного перетворювача, м/с;

S_k – площа п'єзокерамічного перетворювача, м².

Враховуючи (2.10) та відповідні перетворення, вираз (2.11) приймає вигляд:

$$Z_1 = \frac{R_s + r_{pml} \cos^2(k_{pn} l_{pn})}{\cos^2(k_{pn} l_{pn})} - jX_{kp} \left(a_1 \operatorname{tg}(k_{pn} l_{pn}) + \operatorname{tg}\left(\frac{k_{kp} l_{kp}}{2}\right) \right), \quad (2.14)$$

де

$$a_1 = \frac{X_{pn}}{X_{kp}}. \quad (2.15)$$

За аналогією, опір кола неактивної накладки, зведений до вузлової точки п'єзокерамічного випромінювача, буде еквівалентним:

$$Z_2 = Z_{mn} + Z_{кр} = r_{рmn2} - jX_{кр} \left(a_2 \operatorname{tg}(k_{mn} l_{mn}) + \operatorname{tg} \left(\frac{k_{кр} l_{кр}}{2} \right) \right), \quad (2.16)$$

де Z_2 – Опір кола неактивної накладки, переведений до вузлової точки п'єзокерамічного випромінювача, кг/с.;

$Z_{кр}$ – опір тильної (неробочої) накладки перетворювача, кг/с;

$r_{рmn2}$ – опір втрат у неробочій гілці перетворювача, кг/с;

k_{mn} – хвильове число матеріалу тильної накладки, рад/м;

l_{mn} – довжина тильної накладки, м.

$$a_2 = \frac{X_{mn}}{X_{кр}}, \quad (2.17)$$

де X_{mn} – реактивна складова опору тильної накладки, кг/с.

$$X_{mn} = \rho_{mn} c_{mn} S_{mn} \operatorname{tg}(k_{mn} l_{mn}), \quad (2.18)$$

де ρ_{mn} – густина матеріалу робочої накладки, кг/м³;

c_{mn} – швидкість звуку в матеріалі робочої накладки, м/с;

S_{mn} – площа робочої накладки, м².

Опір тильної (неробочої) накладки перетворювача:

$$Z_{mn} = -jX_{mn} \operatorname{tg}(k_{mn} l_{mn}). \quad (2.19)$$

Сумарний опір паралельних схем, перерахований до вузлової точки п'єзокерамічного випромінювача.:

$$Z_{12} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (2.20)$$

Після внесення значень з рівнянь (2.14) та (2.16) у вираз (2.20) та виконання певних перетворень, ми отримаємо формули для дійсної та уявної частин:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} Z_{12} = R_{12} = & \frac{r_{pmn2}(R_s + r_{pmn1}A)(R_s + A(r_{pmn1} + r_{pmn2}))}{(R_s + A(r_{pmn1} + r_{pmn2}))^2 + X_{kp}^2 A^2 (a_2 C + a_1 D + 2B)^2} + \\ & + \frac{A \left(X_{kp}^2 (R_s + r_{pmn1}A)(a_2 C + B)^2 + r_{pmn2}A(a_1 D + B)^2 \right)}{(R_s + A(r_{pmn1} + r_{pmn2}))^2 + X_{kp}^2 A^2 (a_2 C + a_1 D + 2B)^2}; \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\operatorname{Im} Z_{12} = -jX_{12} = -jX_{kp} \left\{ \begin{aligned} & \frac{X_{kp}^2 A^2 (a_1 D + B)(a_2 C + B)(a_1 D + a_2 C + 2B)}{(R_s + A(r_{pmn1} + r_{pmn2}))^2 + X_{kp}^2 A^2 (a_2 C + a_1 D + 2B)^2} + \\ & + \frac{A((R_s + r_{pmn1}A)(a_2 C + B)^2 + r_{pmn2}A(a_1 D + B)^2)}{(R_s + A(r_{pmn1} + r_{pmn2}))^2 + X_{kp}^2 A^2 (a_2 C + a_1 D + 2B)^2} \end{aligned} \right\}. \quad (2.22)$$

де $A = \cos^2(k_{pn} l_{pn})$; $B = \operatorname{tg}\left(\frac{k_{kp} l_{kp}}{2}\right)$; $C = \operatorname{tg}(k_{mn} l_{mn})$; $D = \operatorname{tg}(k_{pn} l_{pn})$.

Повний опір механічної сторони п'єзоперетворювача буде дорівнювати:

$$Z_{\Sigma} = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma} = Z_c + Z_k + Z_{12} = R_{12} + j(X_k - X_{12} - X_c), \quad (2.23)$$

де X_k – опір загальної ділянки п'єзокерамічного стрижня, кг/с;

X_c – ємнісний опір стрижня при повздовжньому п'єзоефекті, кг/с.

Опір загальної ділянки п'єзокерамічного стрижня:

$$Z_k = -jX_k = -jX_{kp} \frac{1}{\sin(k_{kp} l_{kp})}. \quad (2.24)$$

Ємнісний опір стрижня при повздовжньому п'єзоефекті:

$$Z_c = -jX_c = -j \frac{n^2}{\omega C_0}, \quad (2.25)$$

де n – коефіцієнт електромеханічної трансформації, А·с/м.

З урахуванням (2.21), (2.22), (2.24), (2.25) та відповідних перетворень повний опір механічної сторони п'єзоперетворювача:

$$\begin{aligned}
Z_{\Sigma} = & \frac{r_{pmn2}(R_s + r_{pmn1}A)(R_s + A(r_{pmn1} + r_{pmn2}))}{(R_s + A(r_{pmn1} + r_{pmn2}))^2 + X_{kp}^2 A^2 (a_2 C + a_1 D + 2B)^2} + \\
& + \frac{A \left(X_{kp}^2 (R_s + r_{pmn1}A)(a_2 C + B)^2 + r_{pmn2}A(a_1 D + B)^2 \right)}{(R_s + A(r_{pmn1} + r_{pmn2}))^2 + X_{kp}^2 A^2 (a_2 C + a_1 D + 2B)^2} - \\
-jX_{kp} \left\{ & \frac{n^2}{X_{kp} \omega C_0} + \frac{X_{kp}^2 A^2 (a_1 D + B)(a_2 C + B)(a_1 D + a_2 C + 2B)}{(R_s + A(r_{pmn1} + r_{pmn2}))^2 + X_{kp}^2 A^2 (a_2 C + a_1 D + 2B)^2} + \right. \\
& \left. + \frac{A((R_s + r_{pmn1}A)(a_2 C + B)^2 + r_{pmn2}A(a_1 D + B)^2)}{(R_s + A(r_{pmn1} + r_{pmn2}))^2 + X_{kp}^2 A^2 (a_2 C + a_1 D + 2B)^2} - \frac{1}{\sin k_{kp} l_{kp}} \right\}.
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Аналіз формули (2.26) вказує на те, що найнижче значення акустичного опору механічної частини п'єзоперетворювача спостерігається при частоті приблизно 21,6 кГц (див. рис. 2.7).

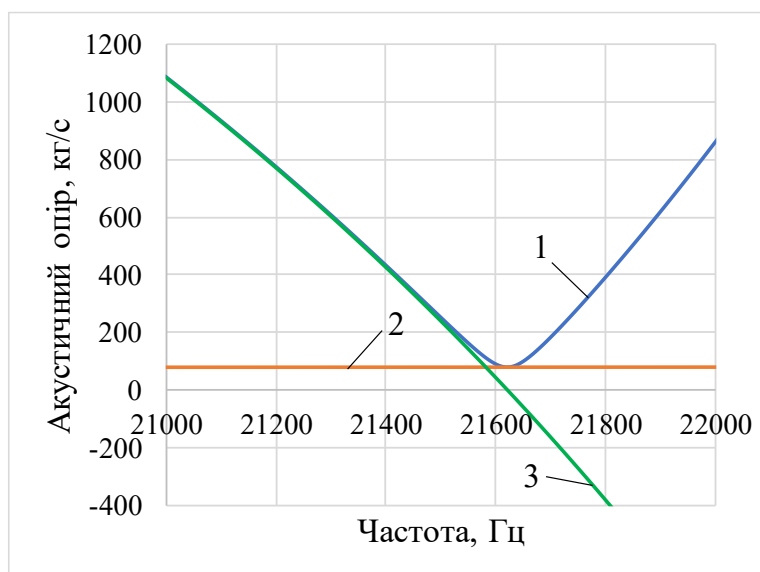


Рис. 2.6. Залежність загального акустичного опору механічної частини п'єзоперетворювача від частоти ультразвукових коливань: 1 – повний опір; 2 – активний опір; 3 – реактивний опір

Для того щоб обґрунтувати оптимальну частоту, яка забезпечує максимальну потужність ультразвукового поля, слід розробити залежності сили та потужності від частоти ультразвукових коливань.

Щоб досягти необхідного рівня інтенсивності в оброблюваному матеріалі

відповідно до схеми заміщення (див. рис. 2.4), коливальна швидкість ультразвукової хвилі повинна становити [85]:

$$\nu = \sqrt{\frac{W \cdot S_B}{Z_m}}, \quad (2.27)$$

де ν – коливальна швидкість ультразвукової хвилі, м/с;

W – інтенсивність ультразвуку, Вт/м².

Сила в стрижні п'єзокерамічного випромінювача відповідно до схеми заміщення (рис. 2.4) складатиме:

$$F = \nu \cdot (Z_c + Z_k + Z_{l2}). \quad (2.28)$$

На рисунку 2.8 представлені залежності активної, реактивної та повної складових сили в стрижні п'єзокерамічного випромінювача в частотному діапазоні від 21,5 до 21,7 кГц.

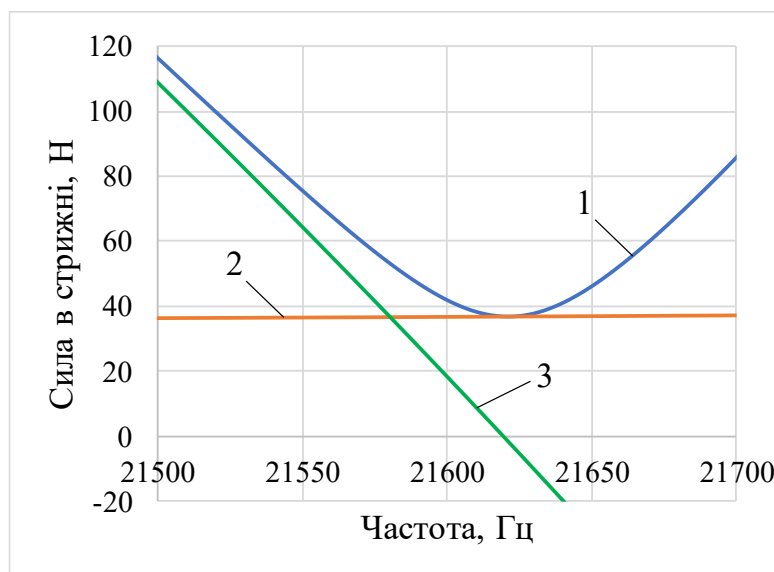


Рис. 2.8. Залежність сили в п'єзокерамічному випромінювачі від частоти при певному рівні інтенсивності ультразвуку в оброблюваному матеріалі 1 Вт/см²:

1 – повна сила; 2 – активна сила; 3 – реактивна сила

Аналіз отриманих залежностей (мал. 2.8) демонструє, що максимальна сила в стрижні досягає свого піку при частоті 21,62 кГц, яка є найбільш підходящою для забезпечення максимальної активної енергії, що вивільняється у шарі оброблюваної речовини. Найменше значення загальної сили, що складає 36,8 Н, відповідає частоті механічного резонансу електроакустичної системи для обробки

фруктів. Комплексна потужність у шарі оброблюваного матеріалу розраховується за наступною формулою:

$$S = v^2 \cdot Z_a. \quad (2.29)$$

На малюнку 2.9 представлені залежності активної, реактивної та повної потужностей в шарі оброблюваного матеріалу при силі, що діє на стрижень п'єзокерамічного випромінювача, рівній 36,8 Н.

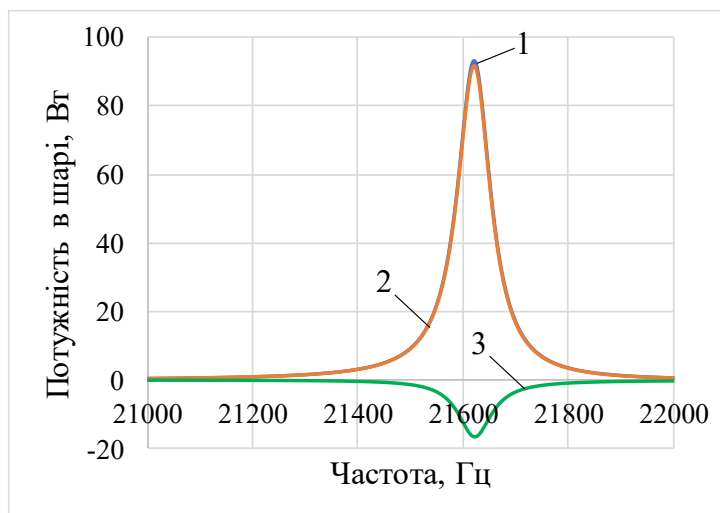


Рис. 2.9. Залежність потужності в шарі оброблюваного матеріалу від частоти ультразвукових коливань при впливі сили на стрижень п'єзокерамічного випромінювача 36,8 Н:

1 – повна потужність; 2 – активна потужність; 3 – реактивна потужність

Отримані залежності (рис. 2.9) вказують на те, що найвищі показники потужності зафіксовані при частоті ультразвукових коливань 21,62 кГц.

2.3. Обґрунтування оптимальних режимів обробки

Для вирішення задачі обґрунтування середньої напруженості електричного поля в процесі прямого електронагріву та температури повітря у сушильній шафі, було проведено моделювання комбінованого сушіння фруктів при різних режимах обробки. В результаті отримано графічні залежності тривалості процесу сушіння, питомих витрат енергії на здійснення електронагріву, максимального струму через зразок і максимальної температури пластин фруктів в умовах змінної напруженості електричного поля та температури повітря (рис. 2.15–2.18).

Діапазон електричного поля для моделювання процесу комбінованого сушіння визначено на основі попередніх експериментів. Дослідження засвідчили, що застосування прямого електронагріву з напругою вище 40 В/см викликає миттєве закипання зразків. Це призводить до потемніння яблучних пластин та їх розм'якшення, що негативно позначається на якості кінцевої продукції.

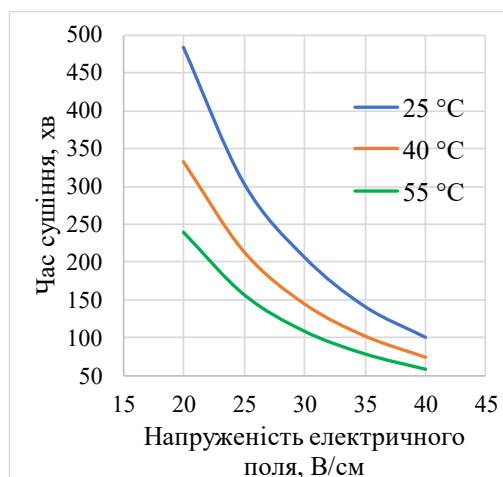


Рис. 2.15. Залежності часу сушіння від усередненої напруженості електричного поля при температурі сушильного агенту 25–55 °C

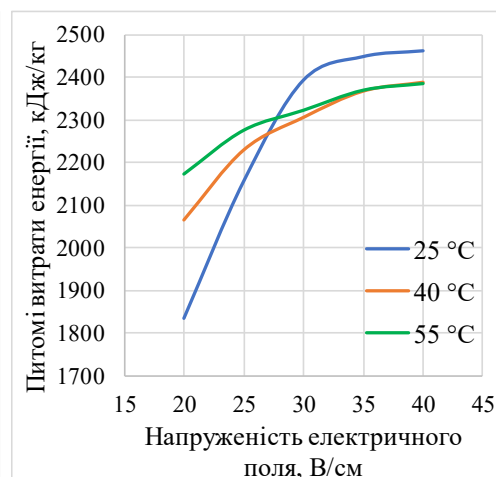


Рис. 2.16. Залежності питомих витрат енергії від усередненої напруженості електричного поля при температурі сушильного агенту 25–55 °C

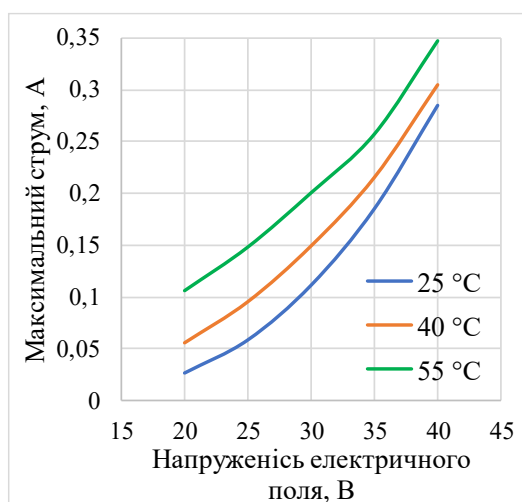


Рис. 2.17. Залежності максимального струму прямого електронагріву від усередненої напруженості поля при температурі сушильного агенту 25–55 °C

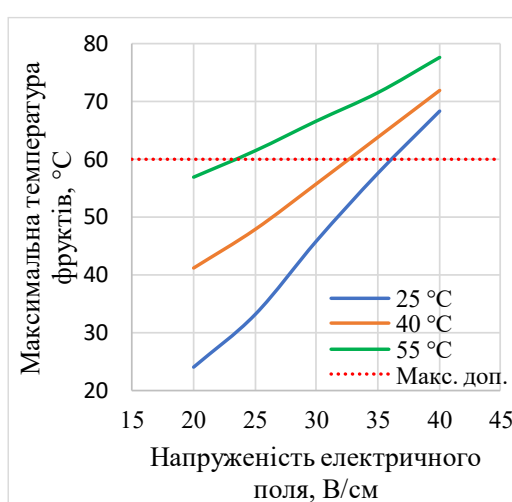


Рис. 2.18. Залежності максимальної температури зразків від усередненої напруженості електричного поля при температурі сушильного агенту 25–55 °C

Результати моделювання вказують на те, що варіювання технологічних параметрів дозволяє ефективно контролювати процес дегідратації для забезпечення необхідної якості продукту і оптимізації роботи сушильної установки.

Як видно з рис. 2.18, використання режимів при температурах зразків понад 60 °C є неприйнятним: значне перевищення температури над показниками повітря в сушильній шафі протягом тривалого часу підвищує питомі витрати енергії на 7–10 % (дивись рис. 2.16), особливо це актуально для умов сушіння при температурі повітря у шафі рівній 25 °C.

Натомість обробка сировини за режимами зі максимально допустимою температурою нижче рекомендованих норм веде до середнього скорочення питомих витрат енергії приблизно на 20 % (рис. 2.16); однак час проведення дегідратаційного процесу збільшується вдвічі або втри рази (рис. 2.15) через домінуючу роль конвекційного нагрівання, що також сприяє додатковим тепловим втратам через стінки оточуючого середовища.

На основі отриманих теоретичних даних можна дійти висновку про те, що комбіноване сушіння фруктового матеріалу із використанням прямого електричного нагрівача слід проводити за такими параметрами: усереднена напруга електричного поля – близько 30 В/см; температура теплоносія у сушильній шафці повинна становити – не більше ніж 40 °C; швидкість руху теплоносія – орієнтовно . За цих умов температура сировини під час комбінованої дегідратації залишається нижче від критичної межі у 60 °C і триває цей процес 140 хвилин — це майже на 70,5% менше порівняно із звичайним конвективним методом при таких же показниках теплонасосу.

2.6. Висновки до другого розділу

1. Для підготовки сировини до сушіння, теоретичні результати дозволяють встановити електричні та механічні характеристики електроакустичної системи, що необхідно для обґрунтування й розрахунку її основних елементів.

2. Досліджено параметри електрики та акустики еквівалентної схеми заміщення в процесі обробки фруктів перед сушінням. Отримано графічні залежності акустичних опорів окремих компонентів і всієї системи, а також сили в стрижневому п'єзокерамічному випромінювачеві і потужності у шарі оброблюваної речовини від частоти ультразвукових коливань.

3. Визначена резонансна частота даної електроакустичної системи; при 21,62 кГц спостерігаються мінімальні значення загального опору системи разом з максимальними силами й потужністю ультразвукового сигналу — це відповідає частоті механічного резонансу.

4. Розроблена одновимірна математична модель комбінованого процесу сушіння за допомогою прямого електричного нагрівання шляхом врахування динаміки зміни питомого електричного опору матеріалу відповідно до температури зразків і їх вологості. У результатах початкової задачі визначені зміни вологості та температури сировини, а також вимоги до джерела живлення комплексу для висушування фруктового матеріалу із застосуванням прямого підігріву.

5. Моделювання показує, що модифікація технологічних параметрів дає змогу ефективно контролювати хід дегідратації задля отримання продукції потрібної якості та оптимізації роботи установки для сушіння.

6. З'ясовано рекомендації щодо умов проведення комбінованого висушування фруктових продуктів із використанням прямого електричного нагріву: середня напруга поля - 30 В/см; температура теплоносія – 40 °С; швидкість його руху – 0,4 м/с. За таких умов температура сировини протягом комбіноване просушуванні залишається нижче за 60 °С зі тривалістю у 140 хвилин — це на 70% менше порівняно з конвективним методом при аналогічній температурі теплоносія.

7. Результати теоретичних досліджень створюють підстави для подальших експериментальних робіт і можливість уточнення основних вимог до джерела живлення комплексу виробництва сухофруктів разом із аргументацією та розрахунками його складників.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ФРУКТОВОЇ СИРОВИНИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРЯМОГО ЕЛЕКТРОНАГРІВУ ТА ПОПЕРЕДНЬОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ

3.1. Мета і завдання запланованих експериментальних досліджень

Практична частина цієї магістерської роботи зосереджена на процесі зневоднення фруктової сировини в умовах комплексного фізичного впливу. Метою проведених експериментів було, перш за все, ретельно підтвердити точність запропонованої математичної моделі того, як процеси сушіння фруктів можуть реалізовуватися при одночасному застосуванні прямого електричного нагріву та ультразвукових коливань. Крім того, робота також прагнула надати наукові докази того, що інтеграція комбінованого теплопостачання з попередньою акустичною обробкою є технологічно здійсненою та енергоефективною для обробки такого роду сировини.

Експериментальна робота також включала лабораторні стенди та сучасні вимірювальні комплекси для моделювання енергетичних та інформаційних ефектів фізичних полів різної природи на сільськогосподарські матеріали.

Відповідно до встановленої наукової гіпотези та сформульованих завдань, велике поле експериментальних випробувань складалося з таких тем: Аналізується кінетика та енергетика процесу: проводиться конкретне дослідження того, як прямий електричний нагрів змінює електрофізичні параметри (а також загальні швидкості видалення вологи) в гібридній енергетичній системі. Ідентифікація аеродинамічних факторів: визначення найбільш підходящого режиму циркуляції теплоносія, вимірювання впливу на ефективність сушіння електричного методу нагріву та гібридного енергетичного методу. Вплив ультразвукової інтенсифікації в попередній підготовці сировини: наукове обґрунтування використання ультразвуку.

3.2. Дослідження впливу ультразвукової обробки фруктової сировини на перебіг конвективного та комбінованого сушіння з використанням прямого електронагріву

3.2.1. Об'єкт і технічна апаратура для дослідження. Об'єктом даного дослідження є процес сушіння фруктової сировини, яка була попередньо оброблена ультразвуком (УЗ). Предметом аналізу виступають закономірності впливу ультразвукової обробки на процес сушіння.

Для проведення ультразвукової обробки використовувалася ультразвукова ванна DSA 50-JY2 (див. рис. 3.12) з такими характеристиками:

- вихідна потужність генератора – 50 Вт;
- інтенсивність УЗ коливань – 1 Вт/см²;
- частота ультразвуку – 22 кГц;
- тип перетворювача ультразвуку – п'єзокерамічний випромінювач;
- об'єм – 1,8 л.



Рис. 3.12. Ультразвукова ванна DSA 50-JY2

3.2.2. Методика здійснення ультразвукової обробки сировини. Методика ультразвукової обробки зразків перед сушінням була реалізована наступним чином.

Експериментальні дослідження, що мали на меті вивчити вплив ультразвукової обробки сировини перед сушінням, проводились за такими режимними параметрами:

- температура повітря у сушильній шафі становила 40 °С;
- усереднена напруженість електричного поля прямого електричного нагріву – 30 В/см;
- швидкість нагрітого повітря – 0,2 м/с.

Попередньо нарізані яблука, після зважування та вимірювання їх електричного опору, занурювались у ємність ультразвукової ванни, заповнену водою до визначеного рівня. Щоб уникнути спливання і забезпечити більшу площу контакту з ультразвуком, досліджувані зразки притискались металевою сіткою (див. рис. 3.13). Після цього вони піддавались ультразвуковій обробці протягом 5, 10 та 20 хвилин.

Після завершення обробки зразки витягувались з ультразвукової ванни і розміщувались на сітчастому піддоні для стікання води. Потім проводилось повторне зважування, після чого здійснювалось їхнє сушіння різними методами відповідно до процедури, описаної в пункті 3.2.3.



Рис. 3.13. Досліджуваний зразок, поміщений у ємність з водою УЗ ванни.

3.2.3. Аналіз результатів впливу попередньої ультразвукової обробки матеріалу на процес сушіння. Результати впливу попередньої обробки сировини в ультразвукових ваннах на процес зневоднення за конвективного та комбінованого методів сушіння представлені на рис. 3.14 та рис. 3.15 відповідно. Числові значення експериментальних даних можна знайти в додатку Е. Повторне зважування

показало, що початкова маса зразків до і після ультразвукової обробки залишається практично незмінною.

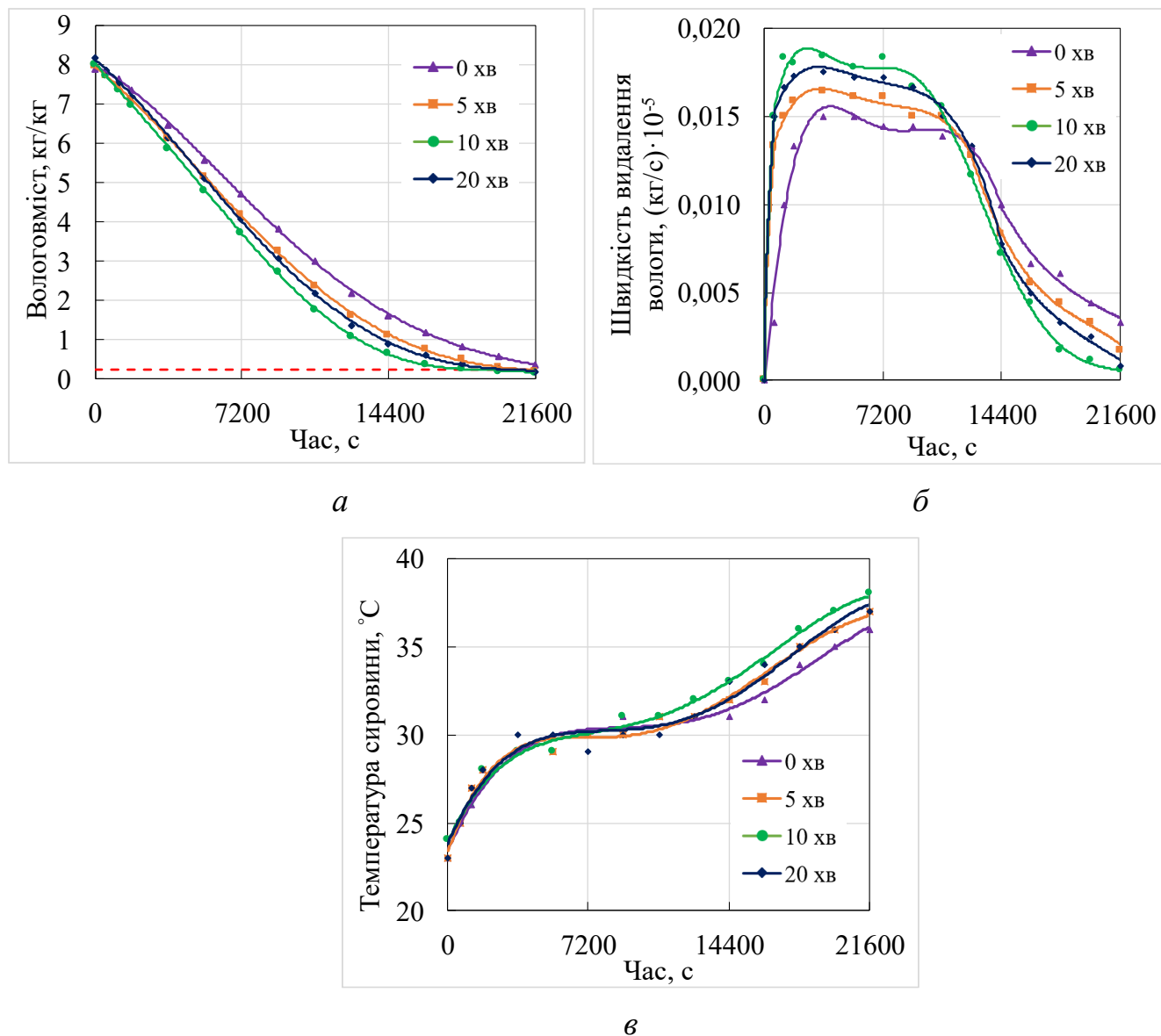


Рис. 3.14. Часові залежності кінетичних характеристик конвективного сушіння при температурі теплоносія 40 °C та попередній обробці в ультразвуковій ванні протягом 0–20 хв: *а* – вологовмісту; *б* – швидкості видалення вологи; *в* – температури сировини

Слід зазначити, що після 20-хвилинної обробки ультразвуком спостерігалось незначне збільшення маси зразків та їх розм'якшення. Це явище можна пояснити «ефектом губки», спричиненим ультразвуковими коливаннями, що викликає зміни в об'ємі матеріалу і веде до формування мікроскопічних каналів. Ці канали

полегшують проникнення тканинних рідин (соку) в навколишнє середовище або, навпаки, дозволяють воді проникати всередину матеріалу [111, 112, 113].

Криві вологості сировини під час конвективного сушіння (див. рис. 3.14, а) показують, що тривалість досягнення рівноважної вологості 0,25 кг/кг становить 395 хвилин. Після попередньої обробки зразків в ультразвуковій ванні протягом 5 та 10 хвилин тривалість сушіння скоротилася на 13,7 % і 27,8 %, відповідно, і складала 340 та 285 хвилин. Хоча попередня обробка ультразвуком протягом 20 хвилин дещо прискорює процес конвективного сушіння, вона має гірший ефект у порівнянні з обробкою тривалістю 10 хвилин. Тривалість зневоднення після обробки протягом 20 хвилин склала 317 хвилин, що на 32 хвилини більше порівняно із результатами після обробки протягом 10 хвилин.

Скорочення часу сушіння можна пояснити згаданим «ефектом губки» та явищем кавітації. Останнє характеризується утворенням дрібних повітряних бульбашок у рідині під дією ультразвуку (див. рис. 3.13). Розрив цих бульбашок викликає різкі локальні перепади тиску та температури, які призводять до пошкодження клітин досліджуваної сировини. Унаслідок цього збільшується шорсткість поверхні зразка та його пористість, що сприяє переміщенню вологи від внутрішніх шарів до поверхні [71, 111–114].

Таким чином, можна стверджувати, що час попередньої обробки сировини в ультразвуковій ванні перед сушінням не повинен перевищувати десяти хвилин.

Збільшення часу конвективного зневоднення після 20-хвилинної ультразвукової обробки пояснюється набуханням сировини під час цього процесу. Крім того, відомо, що триваліший вплив ультразвуку на матеріал може призвести до закриття пір у структурі. Як наслідок, переміщення компонентів клітин (соку) в навколишнє середовище відбувається повільніше. Також тривале вплив ультразвукових коливань зменшує вміст поліфенолів і антиоксидантну здатність сушених фруктів, що негативно позначається на харчовій цінності готової продукції.

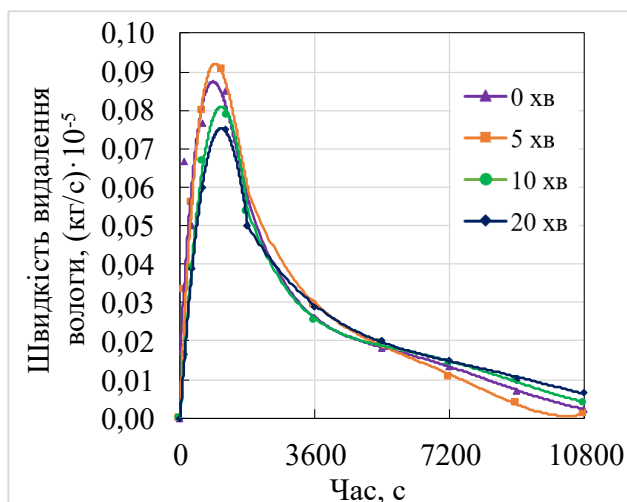
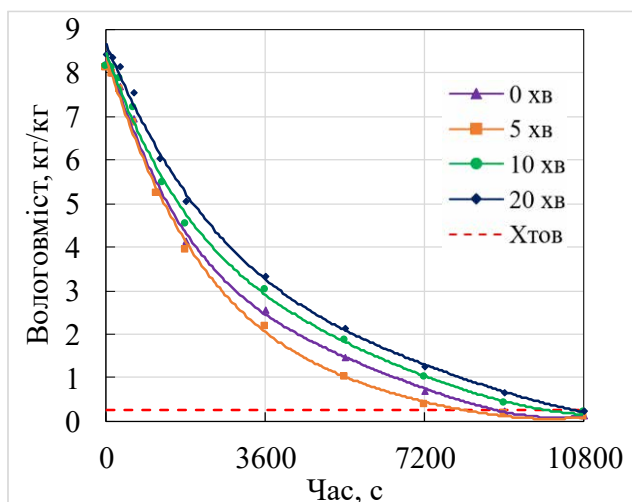
Криві швидкості видалення вологи мають типову форму для конвективного сушіння. Максимальна швидкість видалення вологи збільшується зі збільшенням

часу ультразвукової обробки сировини до 10 хвилин. Одночасно спостерігається скорочення періоду наростаючої швидкості видалення вологи у досліджуваних зразках: для сировини, обробленої в ультразвуковій ванні протягом 10 хвилин, цей період триває близько 20 хвилин, тоді як для необроблених зразків — майже 60 хвилин.

Середня швидкість видалення вологи на початковому етапі сушіння для необробленої сировини становила $0,015 \cdot 10^{-5}$ кг/с. Після попередньої обробки протягом 5 і 10 хвилин ця швидкість зросла до $0,0165 \cdot 10^{-5}$ та $0,019 \cdot 10^{-5}$ кг/с відповідно. Для зразків, оброблених у ванні протягом 20 хвилин, швидкість сушіння на першому етапі становила $0,017 \cdot 10^{-5}$ кг/с.

Аналіз температурних кривих показує схожість температури оброблених і необроблених зразків під час сушіння. Це свідчить про те, що попередня ультразвукова обробка сприяє інтенсифікації процесу конвективного сушіння без підвищення температури в сушильній шафі. Температура зразків поступово збільшується і при досягненні рівноважної вологості майже дорівнює температурі повітря в камері сушіння.

На графіку представлені результати визначення кінетичних параметрів комбінованого сушіння яблучної сировини за допомогою прямого електронагріву після попередньої ультразвукової обробки. Отримані криві демонструють, що тривалість комбінованого сушіння сировини після 5-хвилинної УЗ-обробки склала 130 хвилин — це на 73,5 % менше порівняно із аналогічним режимом без попереднього озвучування.



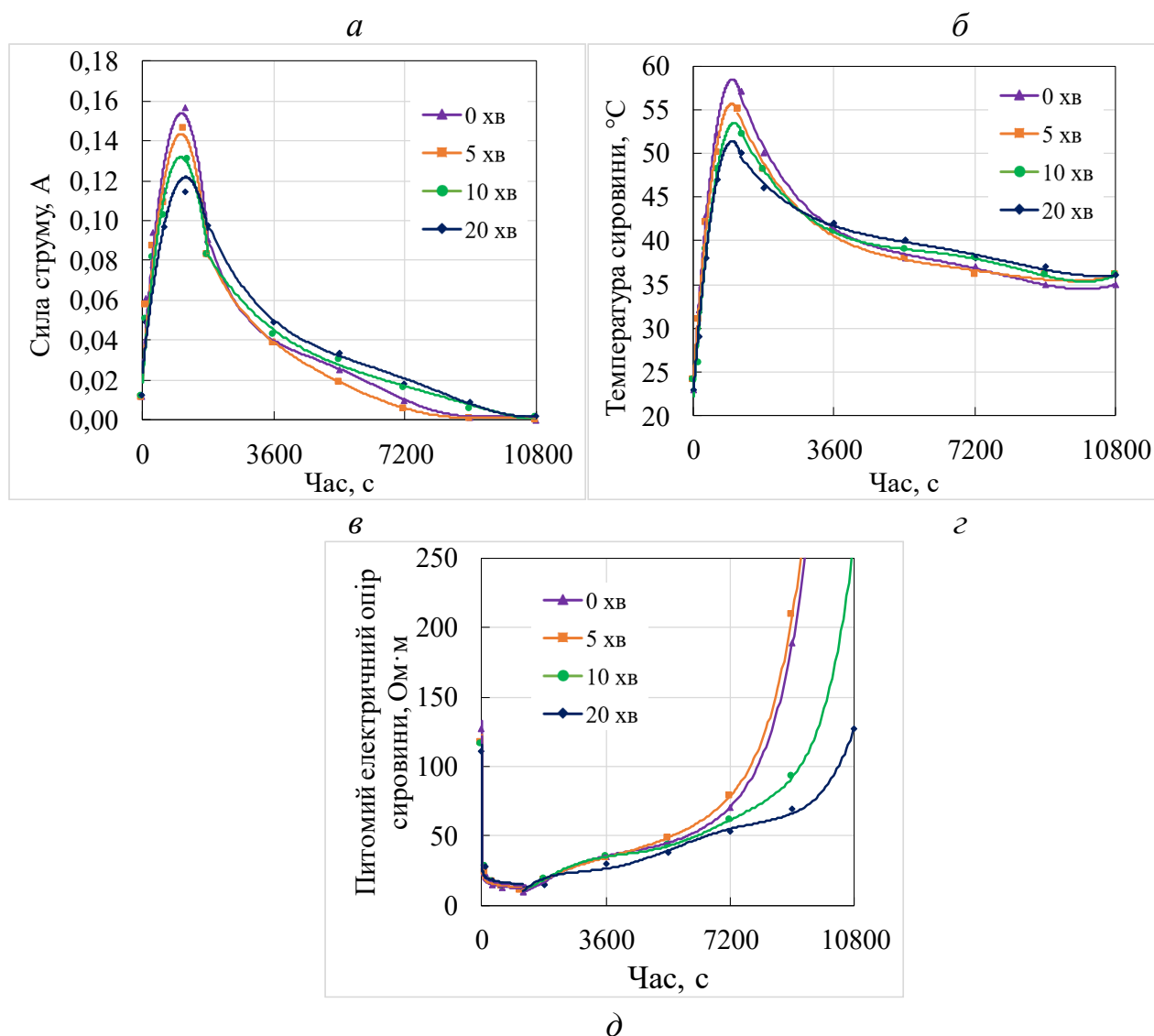


Рис. 3.15. Часові залежності комбінованого сушіння при температурі теплоносія 40 °С, напрузі прямого електронагріву 30 В/см та попередній обробці в ультразвуковій ванні тривалістю 0–20 хв: а – вміст вологи; б – швидкість видалення вологи; в – температура сировини; г – сила струму прямого електронагріву; д – питомий електричний опір сировини.

Збільшення тривалості попередньої ультразвукової обробки зразків до 10 та 20 хвилин при комбінованому нагріванні негативно вплинуло на час сушіння. Для зразків, оброблених протягом 10 хвилин, час зневоднення склав 165 хвилин. Тривалість сушіння яблук після 20-хвилинної обробки становила майже 180 хвилин. Це означає, що при обробці в ультразвуковій ванні протягом 10 хвилин час досягнення необхідного вологовмісту збільшується на 17,2 %, а при обробці протягом 20 хвилин – на 23,4 % у порівнянні із режимом обробки на 5 хвилин. Таке

явище можна пояснити закриттям мікропор у зразках, що погіршує їх соковіддачу [70, 111].

Криві швидкостей видалення вологи, температури та сили струму, який проходить через зразок під час комбінованого нагріву до і після ультразвукової обробки, демонструють піковий характер (рис. 3.15, б–в). При цьому максимальні значення швидкості видалення вологи (рис. 3.15, б) та температури зразків (рис. 3.15, г) відповідають максимальним значенням струму (рис. 3.15, в). Отримані результати підтверджують попередні дослідження [115].

Максимальна швидкість видалення вологи під час комбінованого сушіння без попередньої обробки сировини (рис. 3.15, б) становила $0,085 \cdot 10^{-5}$ кг/с. Після п'ятихвилинної ультразвукової обробки швидкість видалення підвищилась на 5,8 % і склала $0,09 \cdot 10^{-5}$ кг/с. Для зразків із тривалістю обробки у десять та двадцять хвилин максимальні значення швидкості видалення вологи становлять відповідно 0,079 та $0,075 \cdot 10^{-5}$ кг/с. З подовженням часу попередньої обробки спостерігається зменшення максимальної швидкості видалення вологи, що веде до збільшення тривалості сушіння сировини.

Водночас, незалежно від тривалості ультразвукової (УЗ) обробки, спостерігається зниження максимальної температури зразків під час комбінованого сушіння (див. рис. 3.15, г).

Максимальна температура для зразків без попередньої обробки під час сушіння становила 58 °С. Після 5-хвилинної УЗ обробки температура знизилася на 4,3 % до 55,5 °С. Збільшення часу обробки до 10 і 20 хвилин призвело до подальшого зменшення температури до 53 і 51 °С відповідно, що є на 8,6 % та 12 % нижче за контрольні показники.

Це зниження максимальної температури можна пояснити зменшенням сили електричного струму, який проходить через зразок (див. рис. 3.15, в). Максимальний показник сили електричного струму для необроблених зразків при комбінованому нагріванні становив 0,149 А. Після обробки ультразвуком протягом 5 хв максимальна сила струму під час сушіння склала 0,142 А. Подальше збільшення тривалості обробки до 10 і 20 хв привело до зниження максимальних

значень струму під час дегідратації до 0,131 та 0,116 А відповідно. Таким чином, збільшення часу ультразвукової обробки до 20 хв скоротило максимальну силу струму на 18,3 %. Це пов'язано зі збільшенням питомого електричного опору сировини через погіршення її соковіддачі внаслідок закриття пор у матеріалі [70, 111].

Зменшення сили струму під час сушіння може запобігти перегріванню яблучної сировини в процесі дегідратації та позитивно вплинути на якість кінцевого продукту.

Варто зазначити, що вплив УЗ обробки на зменшення сили електричного струму майже не позначається на тривалості електроплазмолізу сировини. Час досягнення пікових значень струму для всіх режимів обробки складає від 15 до 20 хвилин. Це пояснюється пошкодженням оболонок клітин внаслідок УЗ коливань, що веде до їх меншої стійкості щодо струму та тепла.

Аналіз отриманих результатів вимірювання електричного опору сировини показує, що обробка фруктів ультразвуком протягом 5 хвилин спричиняє зменшення їх початкового питомого електричного опору. Середній початковий питомий електричний опір необроблених фруктів становив приблизно 127 Ом·м (див. рис. 3.15, д). Після обробки в ультразвуковій ванні протягом 5 хвилин значення опору знизилося на 7,8 %, досягнувши 117 Ом·м.

Проте подальше збільшення тривалості ультразвукової обробки до 10 та 20 хвилин призвело до підвищення початкових значень питомого електричного опору на 10,4 % і 14,6 % відповідно, які становили 142,21 та 142,5 Ом·м. Це може бути пов'язано з явищем закриття пор у матеріалі, яке було описане в джерелах [70, 111].

Таким чином, рекомендована тривалість попередньої обробки сировини в ультразвуковій ванні перед комбінованим сушінням не повинна перевищувати 5 хвилин, а для чисто конвективного – не більше ніж 10 хвилин. Подовження часу обробки може негативно вплинути на якість готової продукції та збільшити тривалість процесу сушіння.

3.3. Висновки до третього розділу.

1. Отримані в ході експериментів дані повністю корелюють із теоретичними розрахунками та підтверджують високу ефективність використання акустичного впливу. Зокрема, встановлено, що попередня ультразвукова підготовка сировини є стратегічно важливим етапом перед початком термічного зневоднення. Застосування ультразвуку при традиційному конвективному методі дозволяє суттєво скоротити часові витрати на обробку. У випадку ж використання комбінованого енергопідводу, де задіяний допоміжний електричний нагрів, саме ультразвукова активація дозволяє зберегти високу якість продукту, запобігаючи критичному зростанню температури всередині зразків.

2. Аналіз кінетики процесу показав, що раціональне поєднання технологічних факторів дозволяє досягти значної інтенсифікації. При інтеграції ультразвуку та допоміжного електронагріву з напруженістю поля близько 30 В/см та помірній температурі теплоносія (40 °C), загальна тривалість видалення вологи становить 140 хвилин. Це на 70,5 % швидше, ніж при стандартному конвективному сушінні за аналогічних температурних умов. Важливо, що такий режим дозволяє підтримувати температуру сировини в межах безпечних 60 °C, що є критичним для збереження біологічно активних речовин.

3. Дослідження впливу аеродинамічних параметрів виявило, що при поєднанні теплових методів швидкість циркуляції теплоносія в камері не повинна перетинати межу 0,4 м/с. Перевищення цього показника викликає небажаний ефект переохолодження поверхні продукту, що в результаті призводить до штучного затягування циклу сушіння та збільшення енерговитрат. Це підкреслює необхідність точного регулювання інтенсивності потоку повітря в автоматизованих системах керування.

4. Окрему увагу в роботі приділено трансформації електрофізичних характеристик матеріалу. Початкові показники питомого опору фруктової сировини зафіксовані на рівні 110–125 Ом·м. Було виявлено, що інтенсифікація електричного впливу призводить до стрімкого падіння опору: при зростанні

напруженості поля до 40 В/см мінімальні значення опору знижуються на 47–77 % залежно від температури середовища. Однак експериментально доведено, що надмірне підвищення напруженості (понад 30 В/см) провокує різке зростання сили струму, що викликає локальні перегріву. Це ще раз доводить, що саме ультразвукова обробка має виступати основним інструментом інтенсифікації, дозволяючи уникати надмірного електричного навантаження на сировину.

5. У ході магістерського дослідження було доведено, що попередній акустичний вплив у спеціалізованому ультразвуковому обладнанні дозволяє значно прискорити видалення вологи під час конвективного сушіння, не вдаючись до термічного перевантаження сировини. Експериментально зафіксовано, що п'ятихвилинна ультразвукова експозиція скорочує цикл зневоднення на 13,7%. Найкращий результат при традиційному методі сушіння продемонструвала десятихвилинна обробка, яка забезпечила інтенсифікацію процесу на 27,8%. Водночас було виявлено порогове значення експозиції: збільшення часу впливу до 20 хвилин негативно позначається на динаміці вологовидалення, подовжуючи процес на 32 хвилини відносно оптимального десятихвилинного режиму.

6. Особливу увагу в роботі приділено поєднанню ультразвуку з комбінованим енергопідводом. Встановлено, що за таких умов критично важливим є дотримання короткочасного акустичного впливу. Так, п'ятихвилинна обробка в ультразвуковому середовищі забезпечила рекордне скорочення тривалості сушіння — на 73,5%. Проте подальше збільшення часу озвучування (до 10 та 20 хвилин) призводило до зворотного ефекту: тривалість досягнення необхідної вологості зростала на 17,2% та 23,4% відповідно порівняно з контрольними групами. Це свідчить про складні структурні зміни в тканинах сировини, що вимагають суворого дозування енергії ультразвукового поля.

7. Встановлено, що час попередньої обробки сировини в ультразвуковій ванні перед комбінованим сушінням не повинен перевищувати 5 хв, а при чисто конвективному — 10 хв. Збільшення тривалості обробки може призводити до погіршення якості готової продукції та збільшення тривалості сушіння.

8. Встановлено, що після обробки сировини ультразвуком протягом 5 хвилин, початкові значення питомого електричного опору зменшились на 7,8 %. Дослідження показали, що подовження тривалості ультразвукової обробки до 10 і 20 хвилин призвело до збільшення початкових значень питомого опору на 10,4 % і 14,6 % відповідно. Це, у свою чергу, спричинило зниження максимальної сили електричного струму під час прямого електронагріву на 7,7 % та 18,3 %. Зменшення сили струму негативно вплинуло на ефективність прямого електричного нагріву сировини в рамках комбінованого сушіння і викликало затримку в досягненні кінцевого рівня вологості на 23,4 % у порівнянні з режимом обробки протягом 5 хвилин.

9. Аналіз поверхневих знімків висушеної фруктової сировини продемонстрував, що спільне застосування ультразвукової обробки та прямого електронагріву під час сушіння суттєво збільшує шорсткість і пористість яблучної сировини. Це може полегшити вихід вологи з внутрішніх шарів та прискорити процес дегідратації. Було встановлено також, що використання ультразвуку разом із прямим електронагрівом під час сушіння зменшує деформацію матеріалу і усуває розтріскування, характерне для конвективного нагріву. Сухофрукти, отримані таким чином, мають більш привабливі органолептичні характеристики, що може сприяти підвищенню попиту серед споживачів.

РОЗДІЛ 4.

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ФРУКТОВОЇ СИРОВИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРЯМОГО ЕЛЕКТРОНАГРІВУ ТА УЛЬТРАЗВУКУ

4.1 Розробка конструкції створеного електротехнологічного комплексу сушіння фруктової сировини

Електротехнологічний комплекс для сушіння фруктової сировини складається з трьох основних компонентів (деталі див. на структурній схемі комплексу, рис. 2.1):

- панель керування;
- ультразвуковий блок попередньої обробки;
- блок комбінованого сушіння з прямим електронагрівом.

Однією з ключових технічних вимог при створенні цього електротехнічного комплексу було застосування уніфікованих пристроїв і виробів, які виготовляються серійно. Таке рішення дозволить суттєво знизити витрати на реалізацію апарату.

Панель керування базується на сенсорному контролері. Зв'язок між панеллю управління та функціональними одиницями ультразвукової обробки й сушіння здійснюється через блоки аналогових і дискретних сигналів.

Одним із важливих елементів в електротехнічному комплексі комбінованого сушіння фруктів є підсистема ультразвукової обробки, що складається з ультразвукового генератора, випромінювача та ємності для обробки сировини (рис. 4.1).

Ємність для попередньої обробки фруктової сировини (1) виготовлена з нержавної харчової сталі, до днища якої прикріплено випромінювач ультразвукових коливань (2). Для цього використано секційний стрижневий п'єзоелектричний перетворювач із резонансною частотою 22 кГц, що підтверджується теоретичними дослідженнями в розділі 2 магістерської.

Блок ультразвукового генератора 3 виконано на основі електронної друкованої плати, яка виготовляється серійно.

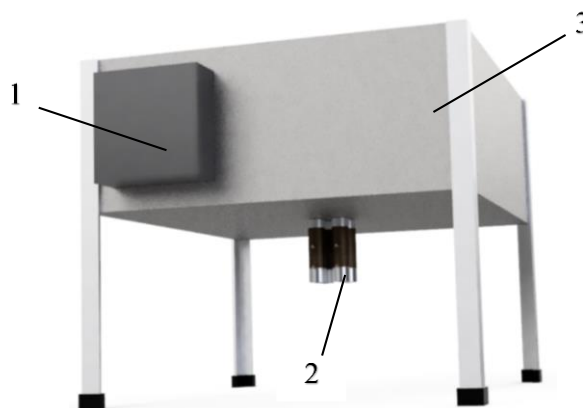


Рис. 4.1. Тривимірна модель блоку ультразвукової обробки сировини:

1 – генератор ультразвуку; 2 – випромінювальний елемент; 3 – ємність для проведення обробки.

Блок комбінованого сушіння передбачає нагрівання висушуваної сировини двома методами: конвективним і безпосереднім, через пропускання електричного струму. Цей функціональний блок складається з конвективної камерної установки та системи сітчастих електродів для прямого електронагріву (див. рис. 4.2).

Система прямого електронагріву включає сітчасті електроди 2, між якими розміщується матеріал для сушіння 1. Електроди виготовлені з нержавіючої харчової сталі. В якості нижнього електрода використовується стандартний сітчастий лоток, що постачається разом із сушильною шафою. Сила притискання електродів, необхідна для забезпечення надійного електричного контакту, досягається за рахунок пружних струмопровідних ламелей 3.

Для зменшення перерізів з'єднувальних провідників рекомендується здійснювати підключення лотків (поличок) в послідовне з'єднання за допомогою ламелей. Це забезпечить однаковий рівень сили електричного струму через всю масу висушуваної сировини та її однорідне нагрівання. Регулювання струму (потужності) прямого електронагріву виконується тиристорним регулятором шляхом зміни напруги на електродах.

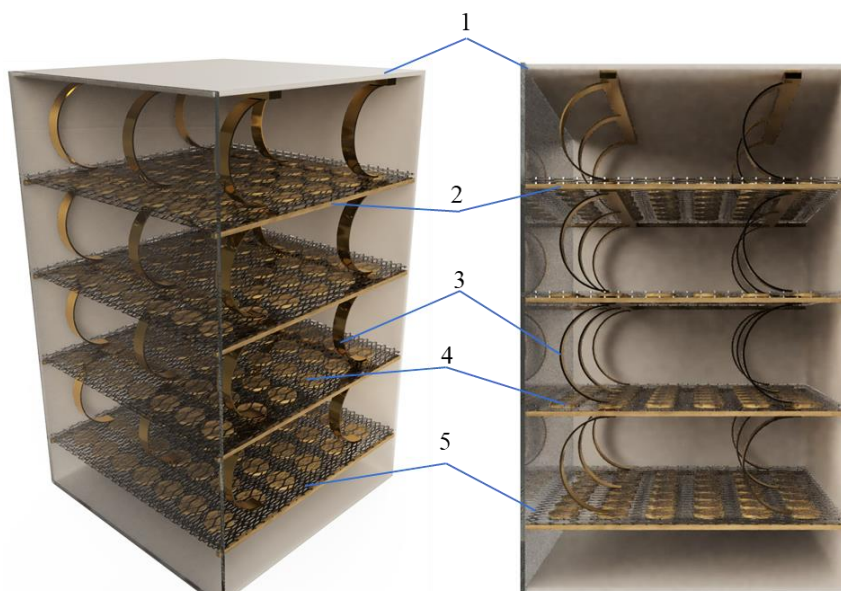


Рис. 4.2. Тривимірна модель комбінованого сушильного блоку: 1 – корпус сушильної установки; 2 – діелектричні елементи; 3 – еластичні ламелі для забезпечення електричного контакту між електродами та сировиною; 4 – висушувана сировина; 5 – сітчасті електроди для прямого електронагріву.

Ізоляція сітчастих електродів для прямого електронагріву 2 здійснюється за допомогою діелектричних вставок 4, які відокремлюють їх від корпусу сушильної шафи 5.

Розроблені технічні рішення гарантують надійну роботу установки, підвищують ефективність технологічного процесу зневоднення фруктової сировини, покращують органолептичні властивості готової продукції та зменшують енергетичні витрати на сушіння.

4.2. Обґрунтування параметрів випромінювача для попередньої ультразвукової обробки

Ємність для попередньої обробки та ультразвуковий випромінювач (основний робочий елемент) взаємопов'язані параметрами ультразвукового поля. Ключовим компонентом у даному робочому органі є ультразвуковий випромінювач. Його характеристики мають бути узгоджені з фізичними

властивостями оброблюваного об'єкта, що вимагає проведення відповідних розрахунків.

Відповідно до рекомендацій, габарити ванни повинні відповідати співвідношенням, які представлені на рисунку 4.3.

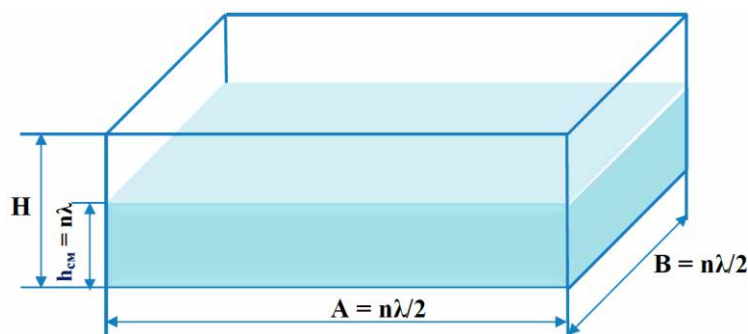


Рис. 4.3. Параметри розмірів ультразвукового робочого елемента

Отже, хвильові розміри ванни будуть такими:

$$A_{\lambda} = \frac{n_A \cdot \lambda_{cm}}{2}; \quad (4.1)$$

$$B_{\lambda} = \frac{n_B \cdot \lambda_{cm}}{2}; \quad (4.2)$$

$$h_{cm\lambda} = n_{cm} \cdot \lambda_{cm}; \quad (4.3)$$

де n_A , n_B , n_{cm} – відповідно, кількість хвильових довжин, які укладаються за довжиною, шириною та висотою оброблюваної суміші;

λ_{cm} – довжина ультразвукової хвилі в суміші, що підлягає обробці, м.

Довжина ультразвукової хвилі в оброблюваній суміші визначається за виразом

$$\lambda_{cm} = \frac{c_{cm}}{f_p}, \quad (4.4)$$

де c_{cm} – швидкість звуку у суміші, м/с;

f_p – резонансна частота ультразвукових коливань, Гц.

На підставі проведених теоретичних досліджень встановлено (див. розділ 2), що резонансною частотою ультразвукових коливань при обробці суміші є частота 21,62 кГц. Для подальших розрахунків приймаємо промислову частоту 22 кГц.

Як випромінювач ультразвукових коливань приймається кругла поршнева система з п'єзокерамічними елементами. Розхил головного пелюстка Θ_0 діаграми спрямованості можна визначити, виходячи із геометричних розмірів робочого органу та додаткових побудов (рис. 4.4).

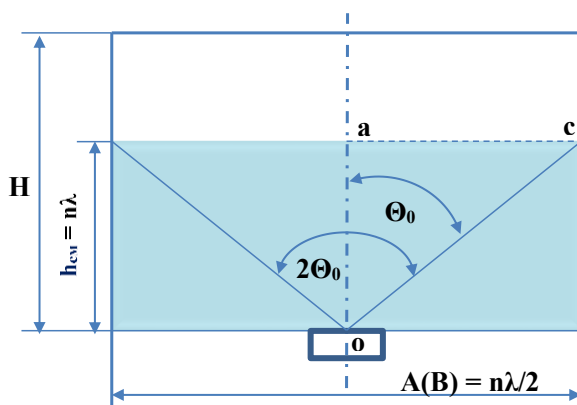


Рис. 4.4. Розрахункова схема параметрів діаграми спрямованості випромінювача робочого органу

Із рис. 4.4 отримаємо:

$$\operatorname{tg} \Theta_0 = \frac{ac}{h_{cm\lambda}} = \frac{0,5 \cdot B}{h_{cm\lambda}}. \quad (4.5)$$

Ефективний звуковий тиск, що має бути створений на відстані висоти оброблюваної суміші, визначається за допомогою формули:

$$p = \sqrt{2I\rho_{cm}c_{cm}}, \quad (4.6)$$

де I – інтенсивність ультразвукових вібрацій, Вт/м²;

ρ_{cm} – густина суміші, кг/м³.

Напруга, що викликає збудження випромінювача, не повинна перевищувати. 220 В ($U \leq 220$ В)

Розмір робочої поверхні випромінювача, який визначається через розраховані кути розхилів головного пелюстка, можна обчислити за допомогою наступної формули.

$$d_{pn} = \frac{1,22 \cdot \lambda_{cm}}{\sin \Theta_0}. \quad (4.7)$$

Відстань між джерелами випромінювання:

$$L \geq (0,5 \dots 0,7) \lambda_{cm}. \quad (4.8)$$

Кількість випромінювальних елементів робочого механізму:

$$N_{po} = \frac{d_{pn}}{L}. \quad (4.9)$$

Діаметр одного з випромінювачів визначається за формулою.:

$$d_{1pn} = \frac{d_{pn} - (N_{po} - 1) \cdot \alpha_{mv}}{N_{po}}, \quad (4.10)$$

де α_{mv} – проміжок між випромінювачами.

Для електроакустичної системи попередньої обробки вибрана четвертьхвильова система з повздовжнім п'єзоефектом. В якості матеріалу випромінювача використано матеріал, призначений для пристроїв середньої потужності, який справляється з тривалим режимом роботи, високими електричними полями та значними механічними напруженнями, а саме ЦТС. – 19

Довжина хвилі в п'єзокерамічному стержні:

$$\lambda_k = \frac{c_{33}^E}{f_p}, \quad (4.11)$$

де c_{33}^E – Швидкість звуку в п'єзокерамічному стержні за умов повздовжнього п'єзоефекту, м/с.

Резонансний розмір п'єзокерамічного стрижня визначається за допомогою співвідношення між стандартною довжиною стрижня l_{cm} та його резонансною частотою f_p

Загальна площа випромінюючого блоку:

$$S_{pn} = \frac{\pi d_{pn}^2}{4}. \quad (4.12)$$

Відповідно, площа кожного з випромінювачів.:

$$S_{1pn} = \frac{\pi d_{1pn}^2}{4}. \quad (4.13)$$

Акустична потужність цілого випромінювального блоку:

$$P_a = \frac{h_{cm}^2 p^2 \lambda_{cm}}{\rho_{cm} c_{cm} S_{pn}}. \quad (4.14)$$

Акустична потужність одного випромінювача:

$$P_{1a} = \frac{P_a}{N_{po}}. \quad (4.15)$$

Питома потужність одного випромінювача:

$$P_{1an} = \frac{P_{1a}}{S_{1pn}}. \quad (4.16)$$

Визначаємо динамічне напруження, що виникає у п'єзокераміці при випромінюванні.

$$\sigma_m = \rho_k c_{33}^E \sqrt{\frac{2P_{1an}}{\psi \rho_{cm} c_{cm}}}, \quad (4.17)$$

де ρ_k – густина матеріалу п'єзокераміки, кг/м³;

ψ – безрозбірний коефіцієнт опору випромінювання поршневою діафрагмою, яка випромінює в один бік.

Коефіцієнт електромеханічної трансформації:

$$n_T = \frac{d_{33} Y_3^E S_{1pn}}{l_{cm}}, \quad (4.18)$$

де d_{33} – п'єзоелектричний модуль при повздовжньому п'єзоефекті, Кл/Н;

Y_3^E – модуль пружності п'єзо матеріалу при повздовжньому п'єзоефекті та постійному електричному полі (коротке замикання електродів), Па.

Напруга, потрібна для ініціації випромінювання на резонансній частоті відповідної питомої потужності для одного з випромінювачів:

$$U = \frac{S_{l_{pn}} \sqrt{\rho_{cm} c_{cm} P_{lan}}}{n_T \eta_{em}}, \quad (4.19)$$

де η_{ea} – електроакустичний ККД системи.

Для зменшення резонансного розміру активного елемента стрижневого перетворювача, необхідно збільшити випромінюючу поверхню, розширити смугу пропускання, узгодити випромінювач із оброблюваним середовищем та забезпечити одностороннє випромінювання. Це досягається шляхом навантаження стрижня двома різними накладками: робочою та тильною.

Товщина накладок встановлюється на основі співвідношення:

$$\frac{\rho_{in} c_{in}}{\rho_k c_{33}^E} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi f_p}{c_{in}} l_{in} \right) = \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi f_p}{2c_{33}^E} l_{cm} \right), \quad (4.20)$$

де l_{in} , ρ_{in} , c_{in} – Відповідно, довжина, щільність та швидкість звуку в покритті..

Із (4.20) маємо:

$$l_{in} = \frac{c_{in}}{2\pi f_p} \operatorname{arctg} \left(\frac{\rho_k c_{33}^E}{\rho_{in} c_{in}} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi f_p}{2c_{33}^E} l_{cm} \right) \right). \quad (4.21)$$

Визначаємо центральний (нейтральний) переріз стержня з накладками (рис. 4.5).

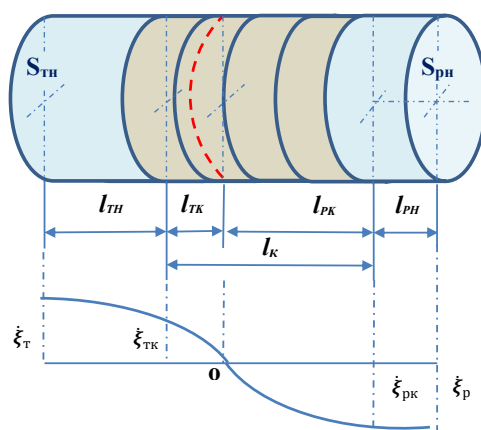


Рис. 4.5. До визначення вузлового (нейтрального) перерізу стрижня з накладками та розподілу зміщення вздовж його довжини.

На основі рис. 4.5 маємо:

$$l_{\Sigma} = l_{TH} + l_{TK} + l_{PK} + l_{PH}. \quad (4.22)$$

Маса еквівалента перетворювача:

$$m_{екв} = \frac{\rho_{TH} l_{TH} S_{TH}}{2} + \frac{\rho_k l_{cm} S_{1pn}}{2} \cdot \frac{\cos^2 \left(\frac{2\pi f_p l_{TH}}{c_{TH}} \right)}{\sin^2 \left(\frac{2\pi f_p l_{TH}}{c_{33}^E} \right)} + \frac{\rho_{PH} l_{PH} S_{PH}}{2} \cdot \frac{\sin^2(k \cdot l_{PK})}{\sin^2(k \cdot l_{TH})} \cdot \frac{\cos^2 \left(\frac{2\pi f_p l_{TH}}{c_{TH}} \right)}{\cos^2 \left(\frac{2\pi f_p l_{PH}}{c_{PH}} \right)}, \quad (4.23)$$

де:

$$(k \cdot l_{TH}) = \arctg \left(\frac{\rho_k c_{33}^E S_{1pn}}{\rho_{TH} l_{TH} S_{TH}} \ctg \left(\frac{2\pi f_p l_{TH}}{c_{TH}} \right) \right); \quad (4.24)$$

$$(k \cdot l_{PH}) = \arctg \left(\frac{\rho_k c_{33}^E S_{1pn}}{\rho_{PH} l_{PH} S_{PH}} \ctg \left(\frac{2\pi f_p l_{PH}}{c_{PH}} \right) \right). \quad (4.25)$$

Механічна якість випромінювача в зоні резонансу:

$$Q_M = \frac{2\pi f_p \eta_{ма} m_{екв}}{\alpha_p \rho_{cm} c_{cm} S_{1pn}}, \quad (4.26)$$

де α_p – Безрозмірний коефіцієнт активного опору випромінювання [85].

Відносна ширина смуги пропускання випромінювача:

$$\frac{1}{Q_M} = \frac{2\Delta f}{f_p}. \quad (4.27)$$

Ширина смуги пропускання випромінювача відповідно:

$$2\Delta f = Q_M f_p. \quad (4.28)$$

Активний опір до випромінювання:

$$r_s = 0,25 \alpha_p \rho_{cm} c_{cm} S_{1pn}. \quad (4.29)$$

Активний механічний опір до випромінювання:

$$r_{am} = \frac{r_s}{\eta_{ma}}. \quad (4.30)$$

де η_{ma} – механікоакустичний ККД.

Ширина смуги пропускання випромінювача відповідно.:

$$R_M = \frac{r_{am}}{n_T^2 q^2}, \quad (4.31)$$

де q – Взаємозв'язок активних опорів між накладкою та п'єзокерамічним випромінювачем.

$$q^2 = \left(\frac{\rho_{PH} l_{PH} S_{PH}}{\rho_k c_{33}^E S_{1pn}} \right)^2. \quad (4.32)$$

Ємність п'єзокерамічного стрижня, що складається з циліндричних дисків з п'єзокераміки.:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{33}^\sigma (1 - k_{33}^2) N_{po}}{l_{1cm}}, \quad (4.33)$$

де ε_{33}^σ – Величина діелектричної проникності вільного стержня, Ф/м

k_{33} – коефіцієнт електромеханічного зв'язку;

l_{1cm} – Довжина одного елемента п'єзокерамічного стержня в метрах.

Еквівалентний опір діелектричних втрат:

$$R_\Pi = \frac{1}{2\pi f_p C_0 \operatorname{tg} \delta}. \quad (4.34)$$

Повний активний опір, приведений до електричної сторони:

$$R = \frac{R_M R_{II}}{R_M + R_{II}}. \quad (4.35)$$

Ємнісна складова опору:

$$X_c = \frac{1}{j2\pi f_p C_0}. \quad (4.36)$$

Повний електричний опір:

$$Z_p = \frac{RX_c}{R + X_c}. \quad (4.37)$$

Відповідно, модуль загального електричного опору:

$$|Z_p| = \sqrt{R^2 + X_c^2}. \quad (4.38)$$

Електрична енергія електроакустичної системи:

$$P_e = \frac{P_a}{\eta_{ea}}. \quad (4.39)$$

Електрична потужність окремого випромінювача:

$$P_{1e} = \frac{P_a}{N_{po}\eta_{ea}}. \quad (4.40)$$

Числові розрахунки ультразвукового випромінювача, виконані за формулами (4.1)–(4.40). Основні параметри розрахунків випромінювача представлені в таблиці. 4.1.

Розрахункові технічні параметри ультразвукового випромінювача

№ п/п	Параметр	Значення параметру
1	2	3
1.	Електрична потужність випромінювача, Вт	525
2.	Електрична потужність одного випромінювача, Вт	131,2
3.	Акустична потужність випромінювача, Вт	419,8
4.	Акустична потужність одного випромінювача, Вт	105
5.	Напруга живлення, В	211
6.	Кількість випромінювачів, шт	4
7.	Активний опір випромінювача, Ом	328, 2
8.	Активний опір одного випромінювача, Ом	82,05
9.	Реактивний опір випромінювача, Ом	0,021
10.	Повний опір випромінювача, Ом	326,7
11.	Активний опір випромінювання, кг/с	$0,174 \cdot 10^3$
12.	Активний механічний опір випромінювання, кг/с	$0,218 \cdot 10^3$
13.	Активний механічний опір випромінювання, приведений до електричної сторони, Ом	328,2
14.	Еквівалентний опір діелектричних втрат, Ом	$0,423 \cdot 10^6$
15.	Повний активний опір випромінювання, адаптований до електричної частини., Ом	327,94
16.	Ємність п'єзокерамічного стрижня, Ф	$1426,7 \cdot 10^{-12}$
17.	Механікоакустичний ККД	0,8
18.	Електромеханічний ККД	1,0
19.	Електроакустичний ККД	0,8

4.3. Розробка системи автоматизованого керування цим електротехнічним комплексом

Оскільки електротехнологічний комплекс є пристроєм, що інтегрує кілька технологічних процесів, важливо забезпечити ефективне управління та моніторинг сушіння фруктових сировини.

Система управління цим комплексом повинна автоматично контролювати ключові параметри процесу зневоднення, зокрема температуру та вологість сушильного агента, а також напругу прямого електричного нагріву.

Головною метою сушіння фруктових сировини є видалення надлишкової вологи з фруктів. Тому контроль цього показника має критичне значення; система автоматизації повинна здійснювати збір даних із датчиків, їх обробку та надсилання сигналів виконавчим механізмам для підтримки основних параметрів на рівні, визначеному оператором. Для досягнення цього система повинна виконувати такі функції:– збір, аналіз, зберігання та вивід інформації про параметри електротехнологічного комплексу сушіння в режимі реального часу;

- надання інформації про процес роботи персоналу.

Система управління комплексом сушіння повинна контролювати такі параметри:

- температуру гарячого повітря в сушильній шафі;
- частоту обертання вентилятора, яка залежить від вологості повітря в камері;
- середню напруженість електричного поля прямого електронагріву;
- силу електричного струму, що проходить через сировину.

Система управління комплексом сушіння також повинна забезпечувати автоматичне регулювання:

- температури повітря в сушильній шафі;
- швидкості обертання вентилятора;
- середньої напруженості електричного поля прямого електронагріву.

Структурна схема запропонованої автоматизованої системи управління електротехнічним комплексом для сушіння фруктових сировини представлена на рис. 4.6. До цієї структурної схеми автоматизації входять кілька контурів регулювання:

- контур регулювання частоти обертання вентилятора (швидкість руху теплоносія);
- контур регулювання температури повітря в шафі;
- контур регулювання середньої напруженості електричного поля прямого електронагріву.

Регулювання швидкості руху теплоносія здійснюється за допомогою осьового вентилятора, який контролюється частотним перетворювачем (ПЧ). Цей перетворювач змінює частоту живлення вентилятора залежно від відносної вологості повітря у шафі. Керуючий сигнал для перетворювача формується відповідно до програми користувача ПЛК і базується на значенні відносної вологості повітря, що вимірюється промисловим датчиком температури та вологості ДТВ1.

КММ слугує контролером-монітором мережі, УЗГ – ультразвуковим генератором, а УЗВ – ультразвуковим випромінювачем. ЄДО використовується як ємність для обробки сировини.

Уніфікований струмовий сигнал від датчика вологості ДТВ1 надходить до модуля вводу аналогових сигналів МВВ(АС)1, звідки він передається на сенсорний панельний контролер для подальшої обробки та формування вихідного сигналу, який з'єднує систему із зовнішнім об'єктом. Регулюючий сигнал генерується на виходах модуля виводу аналогових сигналів МВД(АС)1. Крім того, схема передбачає можливість ручного управління вентилятором і має систему сигналізації про його зупинку.

Адаптація температурних умов у сушильному обладнанні. Температура та вологість повітря в сушильній шафі контролюються за допомогою промислового датчика ДТВ2, який вимірює ці параметри. Струмові сигнали, що відображають температуру, передаються до модуля вводу аналогових сигналів МВВ(АС)2.

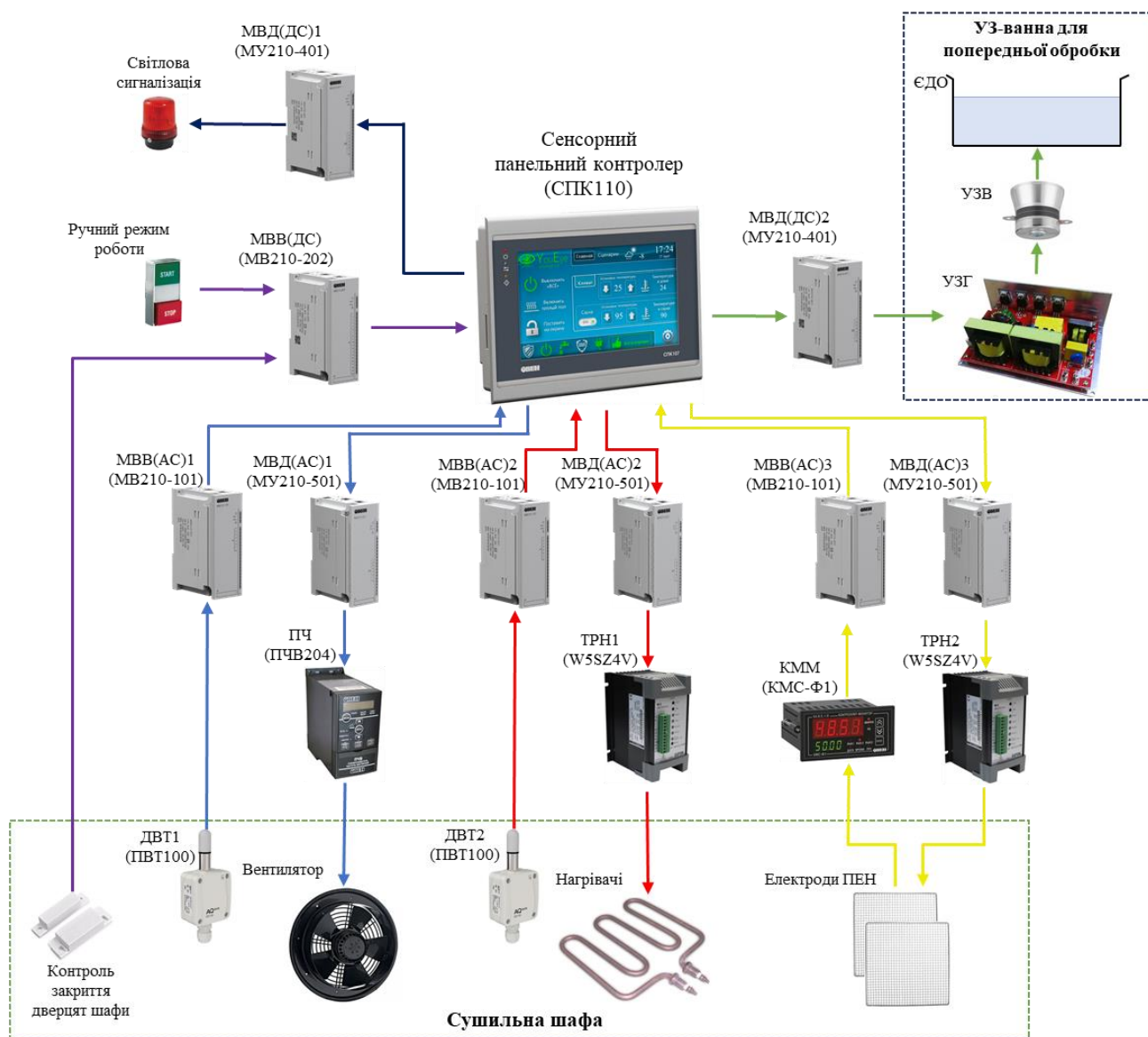


Рис. 4.6. Структурна модель автоматизованої системи управління електротехнологічним комплексом для сушіння фруктової сировини:

МВВ(АС)1...МВВ(АС)3 – це модулі, які призначені для вводу аналогових сигналів; МВД(АС)1...МВД(АС)3 – модулі виводу аналогових сигналів; МВВ(ДС) – модуль для вводу дискретних сигналів; а МВД(ДС)1 та МВД(ДС)2 – це модулі виводу дискретних сигналів. ПЧ виступає як перетворювач частоти, тоді як ДВТ1 і ДВТ2 є датчиками вологості та температури повітря. ТРН1 і ТРН2 функціонують як тиристорні регулятори напруги.

Після цього дані надходять до сенсорного панельного контролера для обробки та реєстрації відповідно до налаштувань користувача. Стабілізація температури в сушильній шафі здійснюється шляхом регулювання потужності нагрівачів шляхом зміни величини напруги живлення. Формований на виходах модуля виводу аналогових сигналів МВД(АС)2 регулюючий сигнал передається до тиристорного регулятора напруги ТРН1, до якого підключені нагрівачі.

Автоматизаційна схема також передбачає можливість ручного управління нагрівачами та попередження про мінімальні й максимальні рівні температури.

Регулювання середньої напруги електричного поля прямих електронагрівальних систем. Контроль температури сировини під час сушіння виконується шляхом регулювання середньої напруженості електричного поля прямого електронагріву, що залежить від сили струму, який проходить через матеріал. Моніторинг напруги та струму в системі прямого електронагріву здійснюється за допомогою контролера-монітора мережі КММ. Уніфіковані сигнали струму з КММ, які пропорційні до значень напруги і сили електричного струму, передаються на вихід модуля вводу аналогових сигналів MBV(AC)3. Інформація потім надходить до сенсорного панельного контролера для обробки, відображення та реєстрації відповідно до налаштувань користувача. Регуляція сили струму у процесах прямого електронагріву реалізована зміною напруги на електродах з використанням тиристорного регулятора ТРМ2. Система автоматизації також забезпечує можливість ручного управління електродами разом із сигналізацією про максимальне значення силу току при безпосередньому нагріванні.

У системах захисту передбачено контроль за закриттям дверей шафи через датчики відкривання; стан перевіряється з використанням сигнальної арматури. Процес не буде розпочато, якщо двері залишаються відкритими.

Керування ультразвуковою ванною для попередньої обробки сировини здійснюється на основі команди від ПЛК через модуль виводу дискретних сигналів МВД(ДС)2. Тривалість процесу попередньої обробки встановлюється на сенсорному панельному контролері відповідно до технології обробки. Система автоматизації також включає світлову сигналізацію, яка сповіщає про роботу УЗ ванни.

Людино-машинний інтерфейс реалізовано за допомогою сенсорного панельного контролера, де представлено головну мнемосхему процесу разом з індикаторами та самописцями.

Запропонована система управління є уніфікованою і може бути адаптована з мінімальними змінами конфігурації для інших технологічних процесів виготовлення харчових продуктів із застосуванням прямого електронагріву, таких як концентрація соків.

4.5. Висновки до четвертого розділу

1. Розроблено структуру, визначено ключові характеристики та описано технічні рішення для електротехнологічного комплексу сушіння фруктової сировини, що використовує пряме електронагрівання разом із попередньою ультразвуковою обробкою.

2. Обґрунтовано параметри джерела живлення і робочого елемента електроакустичної системи передсушильної обробки сировини. Встановлено, що для одноразового завантаження 20 кг фруктів необхідно виконати ультразвукову обробку в системі з такими характеристиками: інтенсивність – 1 Вт/см^2 ; потужність джерела живлення – 525 В; вихідна напруга – 211 В; частота коливань – 22 кГц; акустична потужність випромінювача – 420 Вт.

3. Створено структурну й функціональну схему автоматизованої системи управління, яка дозволяє регулювати параметри джерела живлення електротехнологічного комплексу відповідно до змін у процесі сушіння. Для цього були вибрані методи та системи контролю технологічних параметрів цього процесу.

5. Аналіз енергетичної ефективності використання електротехнічного комплексу для сушіння фруктів виявив, що застосування попередньої ультразвукової обробки разом із прямим електричним нагрівом дозволяє зменшити витрати енергії на видалення 1 кг вологи на 47,67 %, при цьому продуктивність процесу сушіння підвищується у 2,6 рази. Техніко-економічна вигода від скорочення прямих експлуатаційних витрат на сушку становить 105,24 грн за кожен кілограм висушених фруктів. Загальна собівартість готового продукту досягає 135,21 грн/кг, що є на 43 % нижче порівняно з конвективними електроустановками.

РОЗДІЛ 5.

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ

5.1. Розрахунок енергетичної ефективності

На основі І-х діаграми визначаємо питомі витрати енергії для видалення 1 кг вологи при конвективному сушінні за температури повітря у 40 °С та відносній вологості повітря 0,8:

$$W_{\text{конв.}} = \frac{H_2 - H_1}{x_2 - x_1} = \frac{65 - 45}{0,015 - 0,01} = 4000 \text{ кДж / кг} \quad (5.1)$$

де H_1, H_2 – ентальпія холодного та нагрітого повітря, кДж/кг; x_1, x_2 – початковий та кінцевий вологовміст повітря, кг/кг.

З урахуванням втрат через огорожуючі конструкції сушарки, які знаходяться на рівні 15%, загальні питомі витрати енергії при конвективному сушінні становлять 4600 кДж/кг або 1,28 кВт·год/кг.

Питомі витрати енергії при комбінованому сушінні:

$$W_{\text{комб.}} = W_{\text{уз.}} + W_{\text{EH.}} + W_{\text{пов.}}, \quad (5.2)$$

де $W_{\text{уз.}}$, $W_{\text{EH.}}$, $W_{\text{пов.}}$ – питомі витрати енергії на ультразвукову обробку, прямий електронагрів сировини та нагрів повітря в шафі відповідно, кДж/кг.

При комбінованому сушінні з використанням прямого електричного нагріву температура сировини вище або майже дорівнює температурі теплоносія в сушильній шафі. Тому основною задачею нагрітого повітря при комбінованому сушінні є не нагрів матеріалу, а видалення випаруваної вологи за межі сушильного апарату. Тому прийнято, що процес сушіння здійснюватиметься за ізотермічним законом, а питомі витрати енергії на видалення 1 кг вологи при температурі повітря 40 °С та відносній вологості повітря 0,8 становитимуть:

$$W_{\text{пов.}} = \frac{65 - 45}{0,04 - 0,01} = 667 \text{ кДж / кг}$$

Витрати енергії на здійснення прямого електронагріву визначаються на основі залежностей сили електричного струму прямого електричного нагріву в процесі сушіння за виразом:

$$W_{EH} = \sum U_{EH} I_i \Delta \tau_i, \quad (5.3)$$

де U_{EH} – напруга прямого електричного нагріву, В; I_i – середнє значення сили струму на проміжку часу (див. додаток Г), А; $\Delta \tau_i$ – проміжок часу, с.

Для комбінованого сушіння з параметрами напруженості поля нагріву 30 В/см, температурі повітря в сушильній шафі 40 °С та попередньою обробкою ультразвуком протягом 5 хв питомі витрати енергії на прямий електронагрів становлять 2374 кДж/кг.

Електрична потужність розробленої електроакустичної системи для обробки фруктів перед сушінням становить 525 Вт. Разове завантаження сировини – 20 кг, тривалість обробки – 5 хв. В перерахунку на 1 кг вологи питомі витрати енергії на ультразвукову обробку становлять $W_{vз.} = 0,0025$ кВт·год/кг.

Тоді сумарні витрати енергії в розробленому електротехнологічному комплексі становитимуть (із втратами в навколишнє середовище) 3096,7 кДж/кг або 0,86 кВт·год/кг.

Таким чином, за рахунок використання попередньої ультразвукової обробки та прямого електричного нагріву в процесі сушіння питомі витрати енергії на видалення 1 кг вологи зменшилися на 47,67 %.

5.2. Розрахунок економічної ефективності

За питомими витратами сукупної енергії під час виробництва сухофруктів доцільно проводити енергетично-економічну оцінку, оскільки вона характеризує технологічний процес у сукупності з кінцевим продуктом.

Таким чином, критерієм обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів технічних засобів сушіння вибрано мінімум прямих експлуатаційних витрат:

$$\Pi_{EB} = B_A + B_{TO} + B_{ЗП} + B_{ЕЛ} \rightarrow \min,$$

де B_K – витрати на амортизацію обладнання, грн/кг; B_{TO} – витрати на технічне обслуговування і ремонт, грн/кг; $B_{ЗП}$ – витрати на заробітну плату персоналу,

що його обслуговує, грн/кг; $B_{ЕЛ}$ – витрати за використану електроенергію, грн/кг.

Витрати на амортизацію обладнання:

$$B_A = \frac{K \cdot \alpha_A}{100 \cdot k_3 \cdot C_B \cdot Q}, \quad (5.4)$$

де K – капітальні витрати на сушильне обладнання, грн; α_A – відсоток амортизаційних відрахувань, % ($\alpha_A = 12,5$ %); k_3 – коефіцієнт використання часу зміни, ($k_3 = 0,85$); C_B – сезонне використання сушильного обладнання, год ($C_B = 1500$ год); Q – продуктивність апарату, кг/год.

Капітальні витрати на сушильне обладнання:

$$K = \beta \cdot C, \quad (5.5)$$

де C – вартість обладнання та матеріалів, грн; β – коефіцієнт врахування витрат на виконання будівельних та монтажних робіт, грн ($\beta = 1,2$).

Продуктивність сушарки:

$$Q = \frac{m_B}{\tau}, \quad (5.6)$$

де m_B – маса видаленої вологи (або готового продукту) за цикл сушіння, кг;
 τ – тривалість циклу сушіння, год.

Витрати на технічне обслуговування і ремонт:

$$B_{TO} = \frac{K \cdot \alpha_{TO}}{100 \cdot k_3 \cdot C_B \cdot Q}, \quad (5.7)$$

де α_{TO} – процент відрахувань на поточний ремонт та технічне обслуговування, % ($\alpha_{TO} = 9$ %).

Витрати на заробітну плату персоналу, що обслуговує його:

$$B_{зп} = \frac{З_{зп} \cdot n \cdot k_{дзп}}{Q}, \quad (5.8)$$

де $З_{зп}$ – заробітна плата персоналу, грн/год ($З_{зп}=40,46$ грн/год); n – кількість персоналу, осіб; $k_{дзп}$ – коефіцієнт додаткової заробітної плати ($k_{дзп}=1,2$).

Витрати на використану електроенергію:

$$B_{ел} = Ц_{ел} \cdot W_{ел}, \quad (5.9)$$

де $Ц_{ел}$ – тариф на електроенергію, грн/кВт·год; $W_{ел}$ – питомі витрати енергії на видалення 1 кг вологи в сушильному апараті, кВт·год/кг.

Зниження експлуатаційних витрат:

$$\Delta\Pi_{ЕВ} = \frac{\Pi_{ЕВ.Б.} - \Pi_{ЕВ.М.}}{\Pi_{ЕВ.Б.}} \cdot 100\%, \quad (5.10)$$

де $\Pi_{ЕВ.Б.}, \Pi_{ЕВ.М.}$ – наведені експлуатаційні затрати базового й модернізованого варіантів, грн/кг.

Розрахунки показників економічної ефективності проводимо для умов промислового виробництва. За базовий варіант прийнято сушильний комплекс із 4 сушарок конвективного типу «Садочок-1М Плюс», технологічна схема й конструкція яких забезпечує високий відсоток видалення вологи із збереженням якісних показників висушених фруктів. Технічні характеристики сушарки такі: номінальна напруга живлення – однофазна змінна 220В, 50Гц; встановлена потужність – 950 Вт; площа сушильної поверхні – 1,7 м²; розміри піддонів – 430х260х20 мм. Вартість сушарки 23500 грн.

Отже, під час застосування електротехнологічного комплексу сушіння з використанням прямого електронагріву та ультразвуку продуктивність апарату збільшується в 2,6 разів, а питомі витрати енергії на видалення 1 кг вологи зменшуються 47,67 %. Техніко-економічна ефективність від зниження прямих експлуатаційних витрат на сушіння складає 105,24 грн/кг висушених фруктів. Собівартість висушеної продукції становить 135,21 грн/кг, що на 43 % менше порівняно з електричною плодоовочевою сушаркою конвективного типу.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання, що полягає в обґрунтуванні та створенні енергоефективного електротехнологічного комплексу для комплексного зневоднення фруктової сировини. Ключовою особливістю розробленої системи є інтеграція попередньої ультразвукової підготовки та допоміжного прямого електричного нагріву. Такий підхід має вагоме значення для модернізації технічних засобів переробки плодоовочевої продукції, дозволяючи значно підвищити продуктивність обладнання за рахунок інтенсифікації фізичних процесів усередині матеріалу.

На першому етапі дослідження проведено критичний огляд існуючих методів та технічних рішень у галузі сушіння рослинної сировини. Було підтверджено, що для збереження поживних властивостей фруктових зразків пікова температура в процесі обробки суворо обмежена межею у 60 °С. Аналіз виявив низку системних недоліків традиційних установок: надмірні масогабаритні параметри, нерівномірний розподіл теплових полів, низьку швидкість вологовидалення та високу питому енергоємність. Зазначені фактори сумарно призводять до зниження загального коефіцієнта корисної дії та втрати якості кінцевого продукту.

Для подолання цих технологічних бар'єрів у роботі запропоновано та детально описано вдосконалений електротехнологічний комплекс. Його принципова відмінність від аналогів полягає в пріоритетному використанні енергії ультразвукового поля як інструменту попередньої деструкції капілярної структури сировини, що підсилюється дією прямого електронагріву. Це дозволяє досягти стабільного зниження енергетичних витрат на виробництво, гарантуючи при цьому високу якість готової продукції завдяки делікатному температурному режиму та скороченню часу перебування сировини в камері.

2. У межах магістерського дослідження встановлено, що попередню підготовку фруктової сировини в ультразвуковому полі слід проводити з урахуванням допустимих меж деструкції клітинних мембран. Експериментально доведено, що для ефективної обробки партії вагою 20 кг доцільно використовувати

електроакустичну систему з інтенсивністю випромінювання на рівні 1 Вт/см^2 , частотою коливань 22 кГц та вихідною напругою джерела 211 В при споживаній потужності 525 Вт . Тривалість процедури варіюється залежно від обраного методу сушіння: для конвективного зневоднення оптимальним є час 10 хвилин, тоді як для комбінованого процесу достатньо 5 хвилин. Дотримання таких параметрів стимулює вихід внутрішньоклітинної вологи, що дозволяє скоротити цикл сушіння на $27,8\%$ та $73,5\%$ відповідно без потреби у підвищенні температури чи напруженості електричного поля.

На основі комплексного аналізу в роботі визначено, що найбільш раціональні умови перебігу комбінованого процесу досягаються при середній напруженості електричного поля 30 В/см та температурі повітряного потоку $40 \text{ }^\circ\text{C}$. При цьому швидкість циркуляції теплоносія в камері має бути зафіксована на позначці $0,4 \text{ м/с}$. Впровадження вказаних параметрів гарантує, що термічний вплив на сировину не перетне поріг у $60 \text{ }^\circ\text{C}$, а загальний час зневоднення скоротиться до 140 хвилин. Це забезпечує підвищення продуктивності процесу на $70,5\%$ порівняно зі стандартними конвективними методами, що підкреслює високу ефективність запропонованих у магістерській роботі рішень.

3. Було встановлено, що вихідні параметри питомого електричного опору сировини перед початком термічної обробки становлять від 110 до $125 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Дослідження динаміки процесу показало, що посилення напруженості електричного поля з 20 до 40 В/см веде до суттєвого зниження мінімального опору фруктових зразків. Так, при температурі теплоагента $25 \text{ }^\circ\text{C}$ цей показник зменшився на 77% , тоді як за умов нагріву повітря до 40 та $55 \text{ }^\circ\text{C}$ падіння склало 62% та 47% відповідно.

Результати аналізу вказують на те, що застосування режимів із напруженістю поля понад 30 В/см є недоцільним, оскільки це мінімізує питомий опір і провокує різке зростання сили струму. Такий ефект призводить до інтенсивного перегріву матеріалу під час зневоднення, що негативно впливає на якість. Враховуючи це, основний акцент у забезпеченні швидкості сушіння зміщено на попередню

ультразвукову обробку, яка дозволяє досягти необхідної інтенсифікації без ризику термічного пошкодження структури продукту..

4. Встановлено, що попередня акустична підготовка сировини протягом 5 хвилин сприяє зниженню вихідних показників питомого електричного опору на 7,8 %. Водночас виявлено, що триваліший вплив ультразвуком, зокрема протягом 10 та 20 хвилин, призводить до зворотного ефекту — підвищення початкового опору на 10,4 % та 14,6 % відповідно. Такі структурні зміни в матеріалі стали причиною спаду максимальних значень сили струму під час застосування електронагріву на 7,7 % та 18,3 %.

Зменшення параметрів сили струму негативно вплинуло на продуктивність допоміжного електричного нагріву в межах комбінованого методу зневоднення. Як наслідок, це спровокувало уповільнення процесу та збільшило час, необхідний для досягнення цільових показників вологості, на 23,4 % порівняно з оптимальним п'ятихвилинним режимом озвучування. Це ще раз підтверджує необхідність суворого дотримання часових регламентів ультразвукового впливу для забезпечення енергоефективності процесу.

5. Аналіз знімків мікроструктури висушених зразків, виконаний за допомогою растрової електронної мікроскопії, продемонстрував значні зміни поверхневого шару. Встановлено, що поєднання попереднього ультразвукового впливу та допоміжного електричного нагріву сприяє суттєвому зростанню пористості та шорсткості тканин. Такі структурні перетворення полегшують вихід вологи на поверхню, що стає ключовим фактором інтенсифікації всього циклу зневоднення.

Проведені лабораторні випробування отриманої продукції підтвердили її повну відповідність вимогам ДСТУ 8494:2015 щодо сушених насіннячкових фруктів. Оскільки всі фізико-хімічні та органолептичні показники якості знаходяться в межах чинних стандартів, можна зробити висновок про високу ефективність запропонованих рішень. Таким чином, розроблена технологія та відповідне обладнання є перспективними для впровадження у виробничий процес на підприємствах галузі.

6. У роботі детально представлено структуру та визначено технічні характеристики електротехнологічного комплексу, призначеного для зневоднення фруктових сировини. Запропоновано конструктивну схему системи, яка поєднує попередню ультразвукову активацію та нагрів шляхом проходження змінного струму через матеріал під час конвективного обдування. Таке технічне рішення спрямоване на мінімізацію енергетичних витрат при збереженні високих якісних показників готового продукту.

Особливу увагу приділено системі автоматизації: розроблено її структурну та функціональну схеми, що дозволяють гнучко корегувати параметри джерела живлення відповідно до поточної динаміки процесу. Для забезпечення точного керування об'єктом було створено програмне забезпечення для контролера в середовищі CODESYS, а також реалізовано візуалізацію інтерфейсу керування комплексом. Це дозволяє в режимі реального часу контролювати та оптимізувати всі етапи сушіння.

8. Результати оцінки енергетичної ефективності впровадженого комплексу свідчать, що інтеграція попереднього ультразвукового впливу та допоміжного електричного нагріву дозволяє скоротити питомі енерговитрати на випаровування 1 кг вологи на 47,67 %. Водночас продуктивність процесу зневоднення зростає у 2,6 рази порівняно з базовими методами.

Економічний аналіз підтвердив суттєве зниження прямих експлуатаційних витрат, що забезпечує ефект на рівні 105,24 грн на кожному кілограмі готової продукції. Підсумкова собівартість висушених фруктів за запропонованою технологією становить 135,21 грн/кг. Це на 43 % нижче за показники традиційних електроустановок конвективного типу, що підкреслює високу конкурентоспроможність розробленої системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables. (2019). In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/c2016-0-04653-3>.
2. Євлаш, В. В., Прісс, О. П., Сердюк М. Є., Павлоцька, Л. Ф., Дуденко, Н. В., & Сухаренко, О. І. (2019). *Біохімія плодів та овочів*. Мелітополь: Люкс.
3. Льовшина, Л. Д., Михайлов, В. М., & М'ячиков, О. В. (2016) *Товарознавство плодоовочевих товарів, пряно-ароматичних рослин та прянощів*. Київ: Ліра-К.
4. Пузік, Л. М., Куц, О. В., Бондаренко, В. А., & Щербина, С. О. (2022). *Товарознавство плодоовочевої продукції*. Харків: ДБТУ, ІОБ НААН.
5. Banti, M. (2020). Review on electrical conductivity in food, the case in fruits and vegetables. *World Journal of Food Science and Technology*, 4, 80. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20200404.11>.
6. Chandramohan, V. (2020). Convective drying of food materials: An overview with fundamental aspect, recent developments, and summary. *Heat Transfer – Japanese Research*, 49(3), 1281–1313. <https://doi.org/10.1002/htj.21662>.
7. Петрова, Ж. О. (2014). Інноваційні технології виробництва функціональних рослинних порошків. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*, 46, 64–69.
8. Bhatta, S., Janezic, T. S., & Ratti, C. (2020). Freeze-Drying of Plant-Based Foods. *Foods*, 9(1), 87. <https://doi.org/10.3390/foods9010087>.
9. Link, J. V., Tribuzi, G., & Laurindo, J. B. (2018). Conductive multiflash drying of mango slices: Vacuum pulse conditions on drying rate and product properties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42, Article e13440. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13440>.
10. Huang, D., Pei, Y., Tang, X., Luo, L., & Sundén, B. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science and Technology*, 110, 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039>.

11. Salehi, F., & Satorabi, M. (2021). Influence of Infrared Drying on Drying Kinetics of Apple Slices Coated with Basil Seed and Xanthan Gums. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 519–527. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202>.
12. Rajoriya, D., Shewale, S. R., Bhavya, M., & Hebbar, H. U. (2020). Far infrared assisted refractance window drying of apple slices: Comparative study on labor, nutrient retention and drying characteristics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 66, 102530. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102530>.
13. Ma, Y., Yi, J., Jin, X., Li, X., Feng, S., & Bi, J. (2022). Freeze-Drying of Fruits and Vegetables in Food Industry: Effects on Phytochemicals and Bioactive Properties Attributes – A Comprehensive Review. *Food Reviews International*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2122992>.
14. Taghinezhad, E., Kaveh, M., Szumny, A., Figiel, A., & Blasco, J. (2023). Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43358-6>.
15. Савойський, О. Ю., Яковлєв, В. Ф., & Сіренко, В. Ф. (2019) Дослідження комбінованого процесу сушіння високоволової яблучної сировини. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 9(1). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-33>.
16. Савойський, О. Ю., & Яковлєв, В. Ф. (2019). Електрофізичний метод інтенсифікації процесу сушки фруктів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 9, 219–224.
17. Ensminger, D., Bond, L. J. (2012). *Ultrasonics – Fundamentals, Technologies, and Applications*, 3rd Ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
18. Mattiat, O. E. (2012). *Ultrasonic transducer materials*. Springer.
19. Gallego-Juarez, J. A., Graff, K. F., & Lucas, M. (2023). *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*. Woodhead Publishing.
20. Cheeke, J. D. N. (2017). *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC Press.

21. Степанюк, А. Р., & Гулієнко, С. В. (2018). *Процеси та обладнання хімічних технологій – 1. Базові принципи теорії тепломасообміну*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
22. Raso, J., Heinz, V., Alvarez, I., & Toepfl, S. (2022). *Pulsed electric fields technology for the food industry: Fundamentals and Applications*. Springer Nature.
23. *Фрукти насіннячкові сушені. Технічні умови: ДСТУ 8494:2015*. (2017). Київ: Науково-дослідний та проектний інститут стандартизації і технології екобезпечної та органічної продукції.
24. *Яблука сушені. Технічні умови та методи випробування: ДСТУ ISO 7701:2019*. (2019). Київ: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості»
25. Флауменбаум, Б. Л., Безусов, А. Т., Сторожук, В. М., & Хомич Г. П. (2006). *Фізико-хімічні і біологічні основи консервного виробництва*. Одеса: Друк.
26. Пилимчук, М. І., Григор'єв, А. С., & Шостак, В. В. (2007). *Основи наукових досліджень*. Київ: Знання.
27. Witrowa-Rajchert, D., Wiktor, A., Sledz, M., & Nowacka, M. (2014). Selected Emerging Technologies to Enhance the Drying Process: A Review. *Drying Technology*, 32(11), 1386–1396. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.903412>.
28. Tüfekçi, S. & Özkal, S. G. (2020). Investigation of Effect of Ultrasound Pretreatment on Drying and Rehydration Characteristics and Microstructure of Apple Slices. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 30, 950–962. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.698826>.
29. Savoiskyi, O., Yakovliev, V., & Sirenko, V. (2021). Determining the kinetic and energy parameters for a combined technique of drying apple raw materials using direct electric heating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(11(109)), 33–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224993>.
30. Savoiskyi, O., & Sirenko, V. (2023). Revealing the influence of ultrasonic processing on the kinetic parameters of convective and combined drying of raw apple materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(11(122)), 91–98. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276748>.