



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Державний біотехнологічний університет

В. О. Потапов, В. І. Жила

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ
ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО
Й ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
В ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Монографія

Харків
ДБТУ
2024

Рецензенти:

В.М. Бандура – доктор технічних наук, професор, професор кафедри готельно-ресторанної справи і туризму Національного університету біоресурсів та природокористування України

М.Л. Лисиченко – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії Державного біотехнологічного університету

Рекомендовано до видання вченою радою Державного біотехнологічного університету, протокол № 13 від 20 червня 2024 р.

Потапов В.О.

П 65 Потапов В. О., Жила В. І. Теоретичні та практичні аспекти застосування мікрохвильового й інфрачервоного випромінювання в харчових технологіях:[Електронний ресурс] : монографія. Харків: ДБТУ, 2024. – 136 с.– Електронні текстові дані.

У монографії обґрунтовано теоретичні засади, розроблено науково-методичні та практичні рекомендації щодо теоретичних та практичних аспектів застосування мікрохвильового та інфрачервоного випромінювання в харчових технологіях. Опрацьовано теоретичні засади надвисокочастотного й інфрачервоного нагрівання харчових продуктів, наведено приклади практичних розрахунків і застосування цих методів у харчових технологіях.

Монографію рекомендовано для наукових працівників, фахівців-практиків, викладачів та здобувачів вищої освіти з технологічних та інженерних спеціальностей.

УДК621.384.3.095:537-962:664](02.064)

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	4
Вступ.....	6
1. Переваги використання електромагнітного випромінювання в харчових технологіях.....	8
2. Фізичні закономірності нагрівання в електромагнітному полі	12
3. Селективний механізм дії надвисокочастотного поля на структуру вологи в дисперсному діелектричному матеріалі.....	17
4. Молекулярно-кінетичні розрахунки впливу мікрохвильового поля на структуру вологи в дисперсних матеріалах.....	21
5. Вплив дифракції електромагнітного поля на внутрішні джерела теплоти під час НВЧ-обробки.....	27
6. Наближений метод розрахунку внутрішніх джерел теплоти в діелектрику довільної форми.....	36
7. Дослідження діелектричних характеристик харчових продуктів.....	44
8. Визначення напруженості НВЧ-поля у вологих матеріалах.....	50
9. Кінетика тепломасообміну під час мікрохвильової обробки харчової сировини.....	53
10. Експериментальні дослідження масообміну під час НВЧ-сушіння.....	62
11. Обробка харчової сировини інфрачервоним випромінюванням.....	67
12. Дослідження процесу пастеризації молока інфрачервоним електронагріванням.....	78
12.1. Теоретичні основи пастеризації в установках непрямого нагрівання.....	78
12.2. Пастеризація молока ІЧ-електронагріванням.....	87
12.3. Дослідження теплообміну в секції ІЧ-нагрівання.....	92
12.4. Розрахунок секції ІЧ-електронагрівання пастеризатора молока..	114
12.5 Вплив електропастеризації на фізико-хімічні показники молока...	122
Висновки.....	126
Перелік посилань.....	127

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

НВЧ-нагрів – надвисокочастотний нагрів

ІЧ-нагрів – інфрачервоний нагрів

f – частота електромагнітного поля, Гц;

ϵ' - діелектрична проникність

$\operatorname{tg}\delta$ - тангенс кута втрат

E - напруженість електричного поля, В/м;

F_V - сила Ван-дер-Ваальса

V - об'єм матеріалу, м³;

T – температура, °С;

m – маса молекули, кг;

i – кількість ступенів свободи молекули, в.о.;

r_m – радіус молекули води, м;

$\Delta\tau$ – час зміни, с ;

U_0 – енергія зв'язку

w - питома теплова потужність

ϵ_0 – електрична постійна

c – швидкість світла у вакуумі м/с ;

ω – циклічна частота

\dot{E} – комплексна амплітуда напруженості поля

λ – робоча довжина хвилі, м;

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с ;

C – питома теплоємність матеріалу, Дж/кг·К;

ρ – густина матеріалу, кг/м³;

s – аргумент перетворення Лапласа, в.о.;

P – потужність, Вт;

Π - питомий потік потужності (Вт/м²),

μ_0 – магнітна стала ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

μ – магнітна проникність середовища Гн/м;

S – площа поверхні продукту, м²;

W – вологовміст, г/кг;

∇w – градієнт вологовмісту;

p – тиск, Па ;

α_T – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м² ·°С;

σ_0 – постійна Стефана–Больцмана, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ ;

$\varepsilon_{np.}$ – приведена ступінь чорноти, в.о.;

r' – гідравлічний радіус, м;

$\Phi'_л$ – потік випромінювання, Вт;

R_T – термічний опір, °С/Вт;

ВСТУП

В Україні відбуваються зрушення у зміні у підходах до формування її енергетичної політики: здійснюється перехід від застарілої моделі функціонування енергетичного сектору, в якому домінували великі виробники, викопне паливо, неефективні мережі, недосконала конкуренція на ринках природного газу, електроенергії, вугілля – до нової моделі, в якій створюється більш конкурентне середовище, вирівнюються можливості для розвитку й мінімізується домінування одного з видів виробництва енергії або джерел та/або шляхів постачання палива. Разом з цим віддається перевага підвищенню енергоефективності й використанню енергії, *у тому числі у теплотехнологіях*, із відновлюваних та альтернативних джерел.

У державній економічній політиці України до останнього часу більша увага наголошувалася на понятті «енергозбереження», тоді як у європейських та інших розвинених країнах оперують поняттям дещо іншого і більш комплексного виміру – «енергоефективність», яке розглядається в єдиній системі координат з екологічністю та конкурентоспроможністю.

Оскільки на сьогодні альтернатива енергозбереженню відсутня, тому знання принципів роботи, розрахунку і експлуатації теплоенергетичного і теплотехнологічного обладнання дозволяють визначити основні та приховані ділянки, причини та обсяги втрат енергії, усунення яких дасть можливість підвищити техніко-економічні показники таких установок.

У монографії обґрунтовано теоретичні засади, розроблено науково-методичні та практичні рекомендації щодо теоретичних та практичних аспектів застосування мікрохвильового та інфрачервоного випромінювання у харчових технологіях. Опрацьовано теоретичні засади надвисокочастотного та інфрачервоного нагрівання харчових продуктів, наведено приклади практичних розрахунків та застосування цих методів у харчових технологіях.

Монографія дає відповіді про можливості заощадження теплової енергії, підвищення рівня ефективності використання теплової енергії в

теплотехнологічних установках та пристроях (мікрохвильових печах та інфрачервоних пастеризаторах молока), що використовуються в харчовій промисловості та сільському господарстві.

Монографію рекомендовано для наукових працівників, фахівців-практиків, викладачів та здобувачів вищої освіти.

1. Переваги використання електромагнітного випромінювання в харчових технологіях

Використання мікрохвильової технології в різноманітних галузях народного господарства дозволяє вирішувати актуальні завдання з підвищення економічних показників виробництва: у сільському господарстві – для стимуляції росту насіння, сушіння зерна перед закладкою на зберігання, дезінфекції кормів, пастеризації молока та лікарських форм, знезараження відходів тваринництва і промислових стоків сільськогосподарських виробництв; у промисловості – під час розробки нафтових родовищ, виробництва лісоматеріалів, цегли, бавовни-сирцю, лікарських трав, комбікормів, керамічних, фарфорових та фаянсових виробів, виробів із полімерів, а також обробки питної води [1.1-1.7].

Мікрохвильові технології застосовуються і в харчовій промисловості, зокрема в м'ясному, молочному, консервному, хлібопекарському, кондитерському виробництвах, на підприємствах ресторанного господарства, у дитячих і навчальних закладах під час виробництва широкого спектра харчової продукції загального та спеціального призначення, зокрема оздоровчого, лікувально-профілактичного та дитячого харчування, харчування для спортсменів. Їх використовують для розморожування харчової сировини та готової продукції, теплової обробки (варення, смаження, пастеризація та стерилізація), виробництва харчових концентратів (перших і других страв, соусів, спецій, продуктів швидкого приготування) та сушіння різноманітних харчових продуктів (риби, м'яса, зерна, фруктів та овочів, грибів, круп).

Під час мікрохвильової обробки (НВЧ-обробки) має місце високий ступінь збереження поживних речовин. Також майже повністю знищується мікрофлора, унаслідок чого суттєво збільшується термін зберігання продукту [1.8-1.9]. Тому застосування НВЧ-обробки дозволяє зменшити втрати біологічно активних речовин, вітамінів, смаку, кольору й аромату натурального

продукту. З'являється можливість споживання високоякісної продукції в сезон відсутності свіжих продуктів.

До переваг використання мікрохвильової обробки слід також віднести високу швидкість і рівномірність нагрівання за об'ємом, малу тривалість процесу за відносно низької температури, безінерційність нагрівання, відсутність контакту продукту з теплоносієм. Спрощується технологічна схема виробництва завдяки виключенню процесів і обладнання для підготовки теплоносія, а також шкідливих викидів в атмосферу.

Водночас існує низка недоліків, що обмежують використання мікрохвильових технологій у технологічних процесах: недостатньо високий експлуатаційний ресурс мікрохвильових генераторів (10–15 тис. год), при цьому частка вартості генераторів у загальній ціні установки складає близько 50%; відсутність достатньо дешевої тари з діелектричних матеріалів із високою температурною стійкістю; відсутність достатньої кількості достовірних даних про діелектричні властивості харчових систем та їх зміни при поглинанні електромагнітної енергії; необхідність дозиметричного контролю за рівнем випромінювання.

Неврахування багатьох специфічних особливостей мікрохвильових технологій і недостатнє техніко-економічне опрацювання всього технологічного процесу виробництва інколи призводять до дискредитації прогресивного та високоефективного способу обробки харчової сировини і стримування його впровадження. Таким чином, мікрохвильова технологія є одним із найефективніших методів обробки харчової сировини, зважаючи на значне зниження тривалості приготування продукції, зменшення енерго- і трудовитрат, екологічність, підвищення продуктивності праці, збільшення терміну зберігання продукції без застосування додаткових засобів хімічної обробки, зниження її собівартості.

Іншим прогресивним методом теплової обробки харчових продуктів є термічна обробка інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням, основна дія якого полягає в інтенсивному поглинанні головної частини променевої енергії

вільною вологою, яку містить структура харчових продуктів. Застосування ІЧ-випромінювання інтенсифікує технологічні процеси харчових виробництв унаслідок значного збільшення густини теплового потоку на поверхні продукту і проникнення теплової енергії всередину матеріалу. ІЧ-промені долають шлях від генератора випромінювання до об'єкта опромінювання майже миттєво і забезпечують ефективне нагрівання матеріалу за рахунок інтенсифікації руху атомів і молекул у його поверхневих і глибинних шарах [1.9–1.12].

ІЧ-випромінювання використовують для сушіння, обжарювання, підсушування й копчення м'яса та м'ясних виробів. Обробка харчових продуктів ІЧ-променями має такі переваги [1.13; 1.14]:

- можливість скорочення тривалості процесу завдяки збільшенню потужності теплового потоку;
- розширення зони нагрівання та випаровування завдяки поглинанню променевої енергії граничним шаром матеріалу;
- мала інерційність обладнання з ІЧ-випромінювачами;
- можливість регулювання інтенсивності теплового потоку;
- можливість автоматизації процесу;
- низькі капітальні витрати на створення відповідного обладнання.

Порівняно з нагріванням у традиційних апаратах харчових виробництв ІЧ-обладнання дозволяє:

- створити локальну теплову зону на об'єкті нагрівання або в робочому просторі технологічного процесу, зводячи до мінімуму тепловтрати на нагрівання навколишнього середовища та поверхні поза обраною зоною;
- сформувати теплове поле складної структури на об'єкті нагрівання;
- керувати процесом нагрівання як у часі, так і в просторі, що забезпечується підбиранням потрібних генераторів випромінювання та характеристик рефлекторів.

Головною умовою одержання високоякісної продукції під час ІЧ-нагрівання є рівномірний розподіл теплової енергії на поверхні виробу, який залежить від умов опромінювання в робочих камерах печей, сушарок тощо.

Через нерівномірність розподілу теплоти під час ІЧ-опромінювання виникають «опіки» виробу, що є одним із головних недоліків цього способу, призводячи до обмеженого промислового впровадження ІЧ-устаткування [1.15; 1.16].

Як генератори ІЧ-випромінювання найчастіше використовується високоомні провідники та кварцове скло для виготовлення оболонки випромінювача. Кварцове скло має високу термостійкість (температура розм'якшення понад 1100...2000°C) і гарну проникність в інфрачервоній зоні (у широкому діапазоні хвиль – від ультрафіолетових до інфрачервоних променів). Висока термостійкість і прозорість кварцового скла дозволяє отримати генератори випромінювання порівняно невеликих розмірів (діаметр трубки 10 мм).

Одним із дієвих процесів для застосування енергоефективного ІЧ-випромінювання під час обробки рідких харчових продуктів є пастеризація молока.

Молоко – цінний біологічний продукт із високими енергетичними показниками, до складу якого входять білки високої якості, жирні кислоти, мінеральні речовини, вітаміни та різні мікроелементи. Воно є джерелом необхідних речовин щоденного збалансованого харчування для росту та розвитку організму. Недаремно молоко вважають найлегшою природною їжею, тому воно займає важливе місце в раціоні людини. Дієтологи рекомендують кисломолочні продукти з дієтичним та лікувальним ефектом особливо людям похилого віку.

Пастеризація є одним із найбільш розповсюджених способів пригнічення мікроорганізмів, що спричиняють вади молока, захворювання людей і тварин. Від температури та тривалості її впливу на молоко, а також від засобів та способів нагрівання залежать харчова цінність і технологічні властивості продукту під час подальшої переробки. Для цього необхідне обладнання, що мінімально змінює якісні показники молока, при цьому гарантовано забезпечує його нешкідливість для споживача.

Існуюча практика передбачає теплову обробку молока проводити на молокопереробних підприємствах, а виробники зобов'язані очистити та охолодити продукт до температури 4...8°C. Доставка продукту на молокозаводи здійснюється централізовано транспортом тих же підприємств. Така система заготівлі задовольняє високі санітарно-гігієнічні вимоги до продукту, але погіршує енергоефективність загалом [12.3].

Традиційне обладнання для пастеризації молока переважно відноситься до конвективних теплообмінних апаратів, де як теплоносії використовується гаряча вода або пара. Такі апарати матеріалоємні, громіздкі, складні в експлуатації, мають невисокий ККД (менше 60%) та потребують обладнаної котельні [12.11]. Крім того, у разі їх використання втрачаються якості свіжого молока через нерівномірне нагрівання, що потребує режиму пастеризації з більш високою температурою та термостатованим витримуванням.

Застосування електричних пастеризаторів з ІЧ-нагріванням забезпечує вищий ККД, компактність, меншу матеріалоємність, простоту керування, високу екологічність і значно вищий коефіцієнт готовності до роботи [12.6–12.8]. Крім того, ІЧ-нагрівання дозволяє інтенсивно та одночасно нагрівати об'єм молока, а також забезпечити вибірккову дію теплових променів на мікроорганізми. Тобто майже миттєво бактерії нагріваються до температури знешкодження в той час, коли все молоко має нижчу температуру. При цьому швидкість нагрівання порівняно з традиційними апаратами зростає в десятки разів, а ККД має значення більше 90% [1.13,1.14]. Температура режиму пастеризації знижується на 5...10°C, що зменшує енергетичні витрати на теплову обробку до 2 разів та дає можливість отримати продукт високої якості.

2. Фізичні закономірності нагрівання в електромагнітному полі

Основною корисною особливістю впливу електромагнітного поля на продукт є об'ємний спосіб підведення теплоти. Майже всі харчові продукти є капілярно-пористими тілами, у капілярах яких рідина утримується силами

поверхневого натягу. Саме наявність рідини (води та інших розчинів із полярними молекулами) є причиною взаємодії електромагнітних полів із продуктом. Електромагнітне випромінювання перетворюється в об'ємі оброблюваного продукту в теплоту без безпосереднього контакту між джерелом (генератором) і самим виробом. Відмінності між ІЧ- та НВЧ-нагріванням пов'язані з різною довжиною електромагнітних хвиль, що використовуються за цих методів.

випромінювання, яке проникає у продукт, перетворюється в теплоту за ІЧ-рахунок переходу електронів з одних енергетичних рівнів на інші, а також під час коливального та обертального руху атомів і молекул. Оскільки хімічний склад харчових продуктів досить різноманітний, то кожен продукт має свій індивідуальний спектр поглинання ІЧ-випромінювання, який треба враховувати, вибираючи ІЧ-випромінювач.

НВЧ-нагрівання харчових продуктів здійснюється внаслідок перетворення енергії змінного електромагнітного поля надвисокої частоти в теплову енергію, що генерується по всьому об'єму продукту. На відміну від ІЧ-випромінювання, НВЧ-поле здатне проникати в оброблюваний продукт на значну глибину і здійснювати його об'ємне нагрівання, незалежно від теплопровідності, тобто може застосовуватися для продуктів із різною вологістю. Висока швидкість і великий ККД нагріву роблять його одним із найефективніших способів доведення харчових продуктів до кулінарної готовності. НВЧ-нагрівання називають діелектричним через те, що більшість харчових продуктів погано проводять електричний струм (діелектрики). Інші його назви – мікрохвильове, об'ємне – підкреслюють коротку довжину хвилі електромагнітного поля та сутність теплової обробки продукту, що відбувається по всьому об'єму.

Ефект розігріву харчових продуктів у НВЧ-полі пов'язаний з їхніми діелектричними властивостями, що визначаються поведінкою в такому полі зв'язаних зарядів. Переміщення зв'язаних зарядів під впливом зовнішнього електричного поля називається поляризацією. Найбільші витрати енергії

зовнішнього електричного поля пов'язані з дипольною поляризацією, яка виникає в результаті впливу електромагнітного поля на полярні молекули, що мають власний дипольний момент. Прикладом полярної молекули є молекула води. За відсутності зовнішнього поля дипольні моменти молекул мають довільні напрямки. В електричному полі на полярні молекули діють сили, які прагнуть повернути їх у такий спосіб, щоб дипольні моменти молекул збігалися. Поляризація діелектрика полягає в тому, що його диполі орієнтуються за напрямом електричного поля.

НВЧ-нагрівання використовують для теплової обробки діелектриків, тобто матеріалів, що не пропускають або погано пропускають електричний струм, саме тому НВЧ-нагрівання називають ще діелектричним нагріванням. Більшість харчових продуктів є діелектриками, оскільки погано проводять електричний струм. У діелектриків електричні заряди під дією електричного поля не можуть переміщуватися, а лише зміщуються один відносно одного або повертаються у просторі.

Основною причиною виникнення внутрішнього нагріву в діелектриках, розміщених у змінному електричному полі, є поляризація, за якої під дією зовнішнього електричного поля відбувається зміщення зв'язаних зарядів [2.1]. У разі розміщення діелектрика в електричному полі змінного струму на полярні молекули впливають сили, що прагнуть переміщати молекули відповідно до зміни напрямку поля. При цьому молекули води (диполі) починають здійснювати обертальні й коливальні рухи з частотою поля, орієнтуючись за його електричними лініями. Між молекулами діелектрика відбувається тертя, на подолання якого витрачається частина енергії, що перетворюється в теплоту.

Джерелом енергії для НВЧ-генераторів є електроенергія. Слід зазначити, що ККД перетворення енергії електричного струму в електромагнітну енергію не є високим – до 60%. Тому мікрохвильова обробка є більш доцільною для продуктів із високою вологістю (50% і більше). У цьому діапазоні енергоємність вологовидалення під час НВЧ-обробки нижче порівняно з конвекційним методом, оскільки потоки теплоти та вологи збігаються за

напрямок. Зауважимо, що під час ІЧ-нагрівання потоки теплоти та вологи спрямовані назустріч один одному, що знижує ефективність вологовидалення.

Під час електромагнітного нагрівання вологіші ділянки продукту отримують більшу кількість енергії, унаслідок чого відбувається переміщення вологи та вирівнювання вологості за об'ємом продукту. У результаті теплових ефектів підвищується температура продукту водночас увсьому об'ємі. При цьому швидкість НВЧ-нагрівання більшості продуктів у 20–25 разів перевищує швидкість, що притаманна традиційним методам. Теплота, що виділяється під дією електромагнітного поля, залежить від його частоти та напруженості, а також від діелектричних параметрів продукту, що нагрівається. При цьому напруженість електричного поля є керованою величиною і залежить від вихідної потужності НВЧ-генератора.

Діелектричне нагрівання харчових середовищ та їхнє зневоднювання найбільш ефективні в діапазоні електромагнітних хвиль довжиною від 3 мм до 30 см. Частота НВЧ-генератора обирається з дозволених для промислового застосування частот (915 МГц або 2450 МГц), а також із урахуванням глибини проникнення електромагнітних хвиль у продукт. Зі збільшенням частоти електричного поля зростає швидкість нагрівання, проте зменшується глибина проникнення поля в продукт, тобто втрачається ефект об'ємного прогрівання. Так, для збереження об'ємного прогрівання на стандартній частоті 2450 МГц теплову обробку слід здійснювати за товщини виробів не більше 30–50 мм.

Підведена енергія витрачається на нагрівання продукту до температури кипіння води в ньому і на випаровування вологи. Оскільки волога всередині матеріалу знаходиться здебільшого в замкнених порах, то з початком кипіння води всередині матеріалу підвищується надлишковий тиск, що призводить до підвищення температури кипіння води. Унаслідок надлишкового тиску основна маса вологи рухається до поверхні продукту та видаляється не тільки у вигляді пари, але і в рідкій фазі, що зменшує витрати енергії під час випаровування або сушіння. Якщо технологія обробки продукту потребує підвищеного тиску, то

його можна збільшити в разі розміщення матеріалу в герметичному радіопрозорому контейнері.

Для більшості харчових продуктів як надлишковий тиск, так і підвищена температура є небажаними чинниками. Якщо надлишковий тиск перевищує межу міцності матеріалу при його розтягуванні, то це призводить до утворення розривів, тріщин. Вплив більш високих температур негативно відбивається на фізико-хімічних змінах харчового продукту, особливо якщо тривалість обробки перевищує певну величину.

Слід також урахувати, що швидкість вологовидалення залежить від геометричних розмірів продукту і його діелектричних властивостей. Вологий матеріал має кращу діелектричну проникність, тому нагрівається інтенсивніше. У процесі вологовидалення коефіцієнт діелектричних втрат зменшується, отже, зменшується кількість теплоти, яка виділяється в ньому, що вказує на вибіркочуватність НВЧ-нагрівання.

Вибираючи параметри електромагнітного поля, треба забезпечити підведення до продукту необхідної питомої потужності, потрібну глибину проникнення поля й ефективну роботу НВЧ-генератора. НВЧ-генератором є спеціальний електронний прилад – магнетрон. Окрім нього, застосовуються також інші електронні прилади, серед них: клістри, лампи біжучої та зворотної хвилі, твердотільні пристрої.

У НВЧ-генераторах енергія джерела постійної напруги перетворюється в енергію електромагнітних коливань, передача яких до навантаження (оброблюваного об'єкта) здійснюється НВЧ-трактом (лінія передачі), основними елементами якого є хвилеводи – металеві труби прямокутного або круглого перерізу.

Для рівномірного розповсюдження мікрохвильових хвиль за об'ємом камери біля хвилеводу розміщується дисектор, який обертається від повітряного потоку вентилятора та забезпечує рівномірне нагрівання продукту. Замість дисектора також використовують ротаційний стіл, на якому

розміщується оброблюваний продукт. Промисловістю випускається широка номенклатура НВЧ-генераторів із потужністю від 0,5 кВт до 5 кВт.

Як джерела ІЧ-випромінювання в промислових установках використовуються переважно розпечені тверді тіла, здатні витримати високі температури (1000...3000°C). Тіла розжарювання виготовляються з кераміки або тугоплавких металів та сплавів [2.2–2.4]. Температура тіла визначає, як загальний рівень енергії потоку випромінювання, так і розподіл цієї енергії по довжинах хвиль (спектра). Зі зниженням температури генератора загальний рівень випромінюваної енергії падає, а положення максимумів випромінювання зміщується в бік великих довжин хвиль. Варіюючи матеріалом тіла розжарення і температурою, можна створити джерело ІЧ-випромінювання з максимальною енергією випромінювання в тій чи іншій області спектра. Температурні випромінювачі класифікуються за максимальною довжиною хвилі випромінювання [1.16]:

- короткохвильові випромінювачі (світлі випромінювачі);
- довгохвильові випромінювачі (темні випромінювачі).

Генератори ІЧ-випромінювання з електронагрівом поділяються на випромінювачі з кварцовими трубками, дзеркальні інфрачервоні лампи розжарювання та елементи опору.

Випромінювачі з кварцовими трубками та дзеркальні лампи розжарювання відносяться до світлих випромінювачів, елементи опору – до темних випромінювачів.

3. Селективний механізм дії надвисокочастотного поля на структуру вологи в дисперсному діелектричному матеріалі

Фізичний принцип впливу надвисокочастотного поля на дисперсні діелектричні матеріали, до яких відносяться вологі харчові продукти, пояснюється явищем поляризації. Молекули води та інших полярних рідин мають свій дипольний момент, який, подібно стрілці компаса, намагається

зорієнтувати молекули по силових лініях зовнішнього електромагнітного поля. Така картина характерна для ідеального діелектрика без втрат.

Вода і її розчини, перебуваючи в дисперсній системі, не є ідеальними діелектриками, тому в результаті теплового броунівського руху відбувається утворення короткоживучих водневих зв'язків, виникає тертя, що призводить до виділення тепла і об'ємного нагрівання дисперсного вологого матеріалу під час НВЧ-обробки.

Однак такий загальноприйнятий опис не враховує головну особливість вологих дисперсних матеріалів, а саме неоднорідність такої системи відносно енергій зв'язку. У найпростішій моделі дисперсного вологого матеріалу це два енергетичних стани дисперсного середовища: вільна і зв'язана волога. Їх фізичні властивості істотно відрізняються. На думку низки дослідників, зв'язана вода, адсорбована на поверхні дисперсної фази, за своїми характеристиками наближається до властивостей аморфного льоду [3.1, 3.2]. Зокрема, якщо для вільної води за частоти НВЧ-поля $f = 2450$ МГц відносна діелектрична проникність $\epsilon' = 81$, а тангенс кута втрат $\text{tg}\delta = 0,06$, то для льоду $\epsilon' = 3,19$, а тангенс кута втрат $\text{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-4}$ [3.3]. Навіть якщо припустити, що діелектричні характеристики для зв'язаної води дещо інші, ніж для льоду, все одно існує суттєва різниця в характері взаємодії структурованої води із зовнішнім електромагнітним полем унаслідок величезної різниці в діелектричних характеристиках вільної та зв'язаної води.

Кількісним показником механізму взаємодії надвисокочастотного електромагнітного поля й діелектрика є відношення енергії поля, накопиченої за один період коливань, до енергії теплових втрат (об'ємного нагріву):

$$Q = \frac{f\epsilon_0\epsilon'E^2}{2\pi f\epsilon_0\epsilon'\text{tg}\delta E^2} = \frac{1}{2\pi\text{tg}\delta} \quad (3.1)$$

Якщо підставити в цю формулу значення діелектричних характеристик для вільної та зв'язаної води, то очевидно, що для вільної води $Q \sim 1$, а для зв'язаної води $Q \gg 1$. Це означає, що для вільної води ефект поляризації

(орієнтація молекул по силових лініях напруженості електричного поля E) можна ототожнювати з ефектом об'ємного НВЧ-нагрівання, а для зв'язаної води об'ємним нагріванням можна знехтувати й розглядати тільки орієнтаційну дію поля (без теплових втрат). У цьому, на нашу думку, і полягає селективний механізм високочастотного електромагнітного впливу на структуру вологи в дисперсному вологому матеріалі [3.4].

Проілюструємо вплив НВЧ-поля на мономолекулярний шар зв'язаної води на поверхні дисперсної фази. За відсутності зовнішнього поля на межі поділу дисперсної фази й дисперсійного середовища утворюється об'ємний заряд, викликаний взаємним притяганням молекул води і дисперсної фази. Це одна зі складових сил Ван-дер-Ваальса, яка на макроскопічному рівні проявляється як енергія зв'язку молекул зв'язаної води. Саме наявність цих сил ускладнює процеси переносу маси, енергії та імпульсу.

За відсутності зовнішнього поля ($E = 0$) сили Ван-дер-Ваальса F_V спрямовані за нормаллю до межі поділу фаз і мають максимальне значення (рис. 3.1). Із появою зовнішнього поля ($E \neq 0$) диполі зв'язаної води орієнтуються вздовж осі електромагнітного поля, як показано вище, є майже ідеальними діелектриками. Проекція їх дипольних моментів за нормаллю на поверхню дисперсної фази змінюється за законом косинуса:

$$F_V = F_{V\max} |\cos(a)| \quad (3.2)$$

Тому згідно з (3.2) енергія зв'язку вздовж поверхні дисперсної фази змінюється від максимальної до нуля. У результаті цього для молекул зв'язаної води в середньому зменшуються сили притягання молекул води і дисперсної фази, що приводить до збільшення коефіцієнта масопереносу, а відповідно – до інтенсифікації дифузійних процесів, які спостерігаються в разі застосування НВЧ-обробки у процесах екстракції та сушіння.

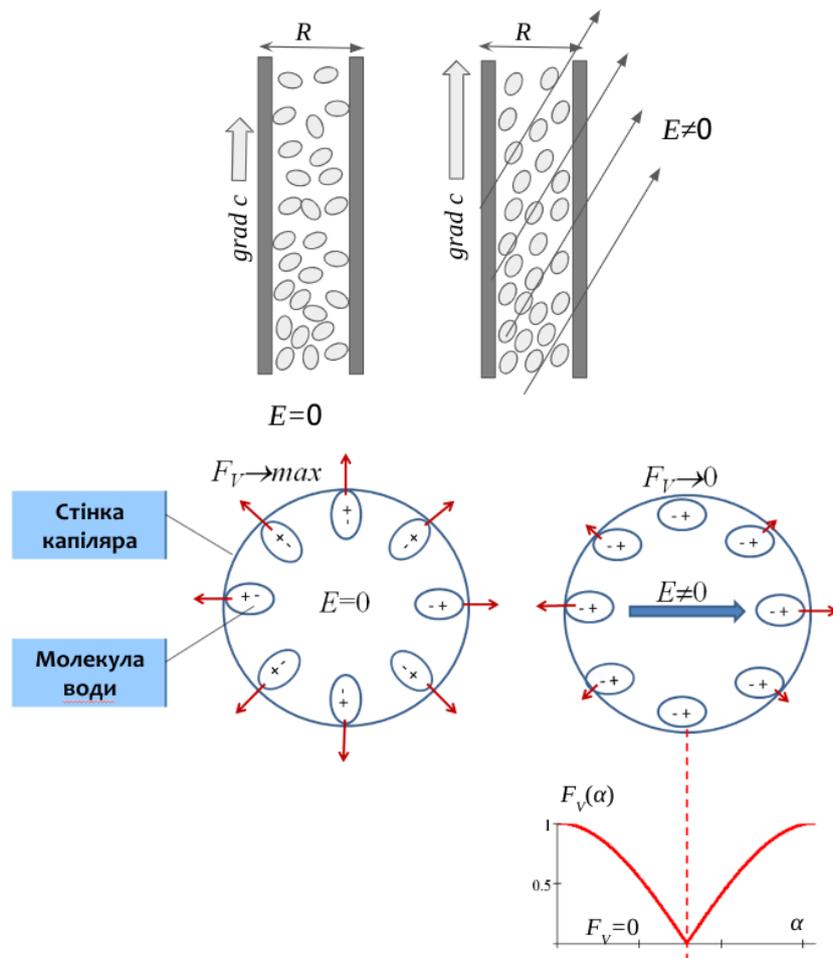


Рисунок 3.1 – Вплив НВЧ-поля на мономолекулярний шар зв'язаної води

Оцінимо середнє значення проєкції дипольних моментів молекул (сил Ван-дер-Ваальса F_V) на нормаль до поверхні дисперсної фази:

$$\bar{F}_V = F_{V_{\max}} \int_0^{2\pi} |\cos(\alpha)| d\alpha = 0,64 F_{V_{\max}} \quad (3.3)$$

Згідно з рівнянням (3.3) сили міжмолекулярної взаємодії мономолекулярного шару в результаті поляризаційної дії НВЧ-поля в середньому зменшаться на 36%.

Отже, об'ємне мікрохвильове нагрівання ефективно насамперед для вільної води в дисперсних матеріалах, тоді як для зв'язаної води об'ємне нагрівання майже відсутнє, а має місце ідеальна поляризація, яка зменшує енергію зв'язку вологи й дисперсної фази та є джерелом інтенсифікації явищ переносу.

4. Молекулярно-кінетичні розрахунки впливу мікрохвильового поля на структуру вологи в дисперсних матеріалах

Кожен дисперсний вологий матеріал можна представити у вигляді певної термодинамічної системи, що має індивідуальний початковий розподіл молекул води на певних енергетичних рівнях, які визначаються відповідними формами зв'язку з дисперсною фазою. Будь-яке явище переносу фізичної субстанції в такій системі є еволюцією в часі відповідних функцій розподілу, які відповідають певному значенню певного термодинамічного потенціалу. При цьому можна вважати, що початковим і кінцевим станами термодинамічної системи є рівновага, а еволюція обумовлена потенціалами маси, енергії та моменту імпульсу в умовах існування зовнішнього збурення у вигляді змінного мікрохвильового електричного поля (мікрохвильового нагріву).

Для отримання відповідної функції розподілу такої системи в першому наближенні будемо виходити із загальноприйнятої класифікації вологи за рівнями енергії з'єднання молекул води з дисперсною фазою (сухим скелетом матеріалу) і ділити воду на вільну і зв'язану. Можна уявити, що молекули зв'язаної води з різними енергіями зв'язку знаходяться в деякій «потенційній ямі» відносно молекул вільної води, які мають нульову (або мінімальну) енергію зв'язку з дисперсною фазою. Така система явно «вироджується» через високу концентрацію молекул води ($n = 3,37 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ для вільної води), а отже, за параметром виродження ($A > 1$) не може бути описана класичною статистикою ідеального газу ($A \ll 1$) [4.1]. Такі системи, як правило, описуються на основі квантово-механічної статистики, де функція розподілу є дискретною функцією енергії, тобто визначає ймовірність знаходження системи в стані із заданою енергією. Однак у разі, якщо взаємодією між частинками можна знехтувати, закони класичної статистики можуть бути застосовані для будь-якої концентрації частинок [4.2].

Як правило, у харчових дисперсних системах енергія зв'язку молекул води із «сухим скелетом» у суперпозиції з потенційною енергією внутрішніх і

зовнішніх силових полів як мінімум на порядок більша енергії їх міжмолекулярної взаємодії. У цьому випадку до таких систем може бути застосована класична статистика Максвелла–Больцмана.

Імовірність знаходження системи в заданому стані dW визначається за допомогою функцій розподілу за координатами $f_r(\vec{r})$ і швидкостями молекул: $f_v(\vec{v})$

$$dW = f_r(\vec{r})f_v(\vec{v})d\vec{v}d\vec{r} \quad (4.1)$$

У роботі [4.3] професором В.О. Потаповим обґрунтовано молекулярно-кінетичну ознаку поділу води на вільну і зв'язану, згідно з якою до зв'язаної води слід відносити молекули, для яких енергія потенційної взаємодії з дисперсною фазою (сухим скелетом) на порядок перевищує енергію теплового руху молекул: $U(\vec{r}) \gg E(\vec{v})$. Тоді частка молекул зв'язаної води в об'ємі матеріалу ΔV з кінетичною енергією в діапазоні $0 \leq mv^2/2 \leq 10U(r)$ на підставі рівняння (4.1) розраховується таким чином:

$$A_b = \frac{N_b}{N} = \int_0^{\Delta V(r)} f_r(\vec{r}) \left[\int_0^{10U(r)} f_v(\vec{v}) d\vec{v} \right] d\vec{r} \quad (4.2)$$

де N_b – кількість молекул зв'язаної води; N – загальна кількість молекул.

Будемо шукати форму функцій $f_r(\vec{r}), f_v(\vec{v})$, аналогічну класичному виведенню розподілу Максвелла–Больцмана:

$$f_r(\vec{r}) = Z_r e^{-\frac{U(r)}{\alpha}} \quad (4.3)$$

$$f_v(\vec{v}) = Z_v e^{-\frac{mv^2}{2\alpha}} \quad (4.4)$$

де множники Z_v, Z_r визначаються з умов нормалізації за об'ємом системи V і простором швидкостей:

$$\int_{r(r)} f_r(\vec{r}) d\vec{r} = 1, \quad (4.5)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_v(\vec{v}) d\vec{v} = 1. \quad (4.6)$$

Запишемо функцію розподілу Максвелла за однією із складових швидкості

$$f_v(v_x) = Z_x \cdot e^{-\frac{mv_x^2}{2\alpha}} \quad (4.7)$$

де v_x – швидкість руху молекули вздовж однієї з координат, причому

$$\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle = \frac{1}{3} \langle v^2 \rangle,$$

де $\langle v^2 \rangle$ – середня квадратична швидкість молекули.

З умови нормалізації (4.6) отримуємо

$$Z_x = \sqrt{\frac{m}{2\pi\alpha}}. \quad (4.8)$$

Множник α визначається з рівняння для середньої кінетичної енергії молекули, яка в цьому випадку є сумою енергії теплового руху і деякого доданка ΔE , викликаного кінетичною дією зовнішнього електромагнітного поля:

$$\frac{m \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3m \langle v_x^2 \rangle}{2} = \frac{i}{2} kT + \Delta E. \quad (4.9)$$

У цьому рівнянні середня квадратична швидкість руху молекули визначається через функцію розподілу:

$$\langle v_x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} v_x^2 f_v(v_x) dv_x, \quad (4.10)$$

де m – маса молекули; k – постійна Больцмана; i – кількість ступенів свободи молекули; T – температура.

Підставивши (4.10) в (4.9) з урахуванням (4.7) та (4.8), отримуємо

$$\alpha = kT \left(\frac{i}{3} + \frac{2 \Delta E}{3 kT} \right) = kT \chi, \quad (4.11)$$

де введене позначення

$$\chi = \frac{i}{3} + \frac{2 \Delta E}{3 kT}.$$

Беручи до уваги вираз (4.11), функція розподілу швидкостей (4.4) матиме такий вигляд:

$$f_v(v_x) = \left(\frac{m}{2\pi kT \chi} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{mv_x^2}{2kT \chi}}. \quad (4.12)$$

Якщо прийняти для одноатомної молекули $i = 3$ та покласти відсутність зовнішнього електромагнітного поля $\Delta E = 0$, отримуємо $\chi = 1$, рівняння (4.12) переходить у класичну функцію розподілу Максвелла для однієї зі складових швидкостей. Таким чином, отримане рівняння є більш загальним та включає в себе як частковий випадок класичну функцію розподілу Максвелла.

Виходячи з цього, імовірність знаходження системи в заданому стані з урахуванням того, що $f_v(v) \doteq f_v(v_x) f_v(v_y) f_v(v_z)$ $dv_x dv_y dv_z = 4\pi v^2 dv$ набуває такого вигляду:

$$dW = \frac{e^{-\frac{U(r)}{2kT \chi}}}{\int_{V(r)} e^{-\frac{U(r)}{2kT \chi}} dr} \cdot 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT \chi} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT \chi}} dv dr \quad (4.13)$$

Визначимо вклад енергії орієнтаційної поляризації під впливом надвисокочастотного електричного поля на збільшення кінетичної енергії молекули. Припускаючи, що характерний час зміни НВЧ-поля порядку часу зміни положення молекул, величину ΔE можна визначити, виходячи зі зміни

моменту імпульсу молекули води ΔL в результаті зіткнень, викликаних орієнтаційною поляризацією:

$$\Delta E = \frac{\Delta L^2}{2I}, \quad (4.14)$$

де $I = \frac{2}{5}mr_m^2$ – момент інерції молекули; r_m – радіус молекули води.

$$\Delta L = p_E E^* \Delta \tau = p_E E^* / f, \quad (4.15)$$

де p_E – дипольний момент молекули; $\Delta \tau$ – характерний час зміни дипольного моменту; f – частота електромагнітного поля.

Таким чином, отримаємо кінцевий вираз для енергетичної добавки ΔE :

$$\Delta E = \frac{5}{4} \cdot \left(\frac{p_E}{fr_m} \right)^2 \cdot \frac{E^{*2}}{m}. \quad (4.16)$$

Проведені розрахунки показують, що для молекул води ($i = 6$) при значеннях напруженості $E^* = 10^5 \dots 10^6$ В/м за стандартної частоти $f = 2.45 \cdot 10^9$ Гц значення величини $\chi = 2 \dots 4$ при $T = 300$ К. Зауважимо, що виходячи з характеру розподілу за швидкостями (4.12), при значеннях $\chi > 1$ крива розподілу молекул за швидкостями згладжується, що характерно для випадку збільшення частки молекул вільної води. Результати цих розрахунків ілюструють графіки, наведені на рис 4.1 [4.4].

Частка молекул A_b зв'язаної вологи в капілярах дисперсного матеріалу радіуса R розраховувалася за рівнянням (4.2) з урахуванням наведеного вище виразу для густини ймовірності (4.13):

$$A_b = \frac{\int_0^R e^{-\frac{U(r)}{kT\chi}} \left[\int_0^{10 \cdot U(r)} \frac{2\sqrt{E}}{\sqrt{\pi(kT\chi)^3}} e^{-\frac{E}{kT\chi}} dE \right] dr}{\int_0^R e^{-\frac{U(r)}{kT\chi}} dr}. \quad (4.17)$$

Для розрахунку енергії зв'язку води в циліндричних капілярах використано вираз, отриманий у роботі [4.3]:

$$U(r) = U_0 \cdot \frac{\int_0^{2\pi} \left(1 + \frac{\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\alpha)}}{2r_m} \right)^{-3} R d\alpha}{\int_0^{2\pi} \left(1 + \frac{\sqrt{2R^2(1 - \cos(\alpha))}}{2r_m} \right)^{-3} R d\alpha}, \quad (4.18)$$

де U_0 – енергія зв'язку мономолекулярного шару в матеріалі.

На рис. 4.1а наведено розрахунковий вміст зв'язаної води в мікрокапілярах у присутності НВЧ-поля і без нього. На рис. 4.1б показана відносна зміна кількості зв'язаної води в капілярах під дією НВЧ-поля, розрахована як відношення A'_b / A_b , де A'_b – частка зв'язаної води в присутності НВЧ-поля.

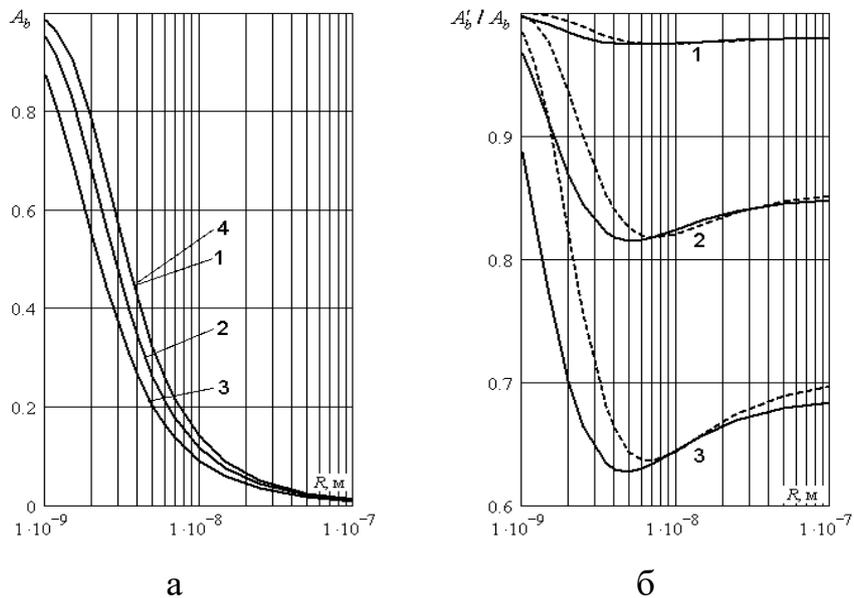


Рисунок 4.1 – Зміни структури води в капілярах дисперсного матеріалу

під дією мікрохвильового поля з частотою $f = 2.45 \cdot 10^9$ Гц:

1 $-E^* = 2 \times 10^5$ В/м; 2 $-E^* = 6 \times 10^5$ В/м; 3 $-E^* = 1 \times 10^6$ В/м; 4 $-E^* = 0$;

— $U_0 = 10$ кДж/моль; - - - $U_0 = 20$ кДж/моль; $T = 320$ К

Як свідчать розрахунки, напруженості електричного поля, менші за $E < 2 \times 10^5$ В/м, не впливають на кількість зв'язаної води в капілярах радіусом $R = 10^{-9} \dots 10^{-7}$ м. Зі збільшенням напруженості електромагнітного поля кількість зв'язаної води в капілярах зменшується. Так, при $E^* = 6 \times 10^5$ В/м відносна частка зв'язаної води в капілярах радіуса $R = 10^{-7}$ м складає $\approx 0,85$ від частки зв'язаної води за відсутності електричного поля $E^* = 0$, а при $E^* = 1 \times 10^6$ В/м вже $\approx 0,7$.

У капілярах із радіусом $R = 4 \dots 5 \times 10^{-9}$ м ефект зменшення кількості зв'язаної води під впливом НВЧ електричного поля максимальний, що пов'язано з характером зміни розподілу вмісту зв'язаної води за радіусом капілярів (рис. 4.1а). Очевидно, що з наближенням характерних розмірів капілярів до мономолекулярного шару та збільшенням енергії зв'язку мономолекулярного шару вплив електричного поля на кількість зв'язаної вологи зменшується.

Таким чином, проведені розрахунки підтверджують селективну дію високочастотного електромагнітного поля на структуру вологи в дисперсному діелектричному матеріалі, а саме: насамперед «польова», а не термічна дія мікрохвильового поля інтенсифікує процеси масоперенесення. Так, під час НВЧ-сушіння зменшення кількості зв'язаної вологи знижує енерговитрати на її видалення, отже, енергоефективність такого процесу зростає за будь-якого варіанта його здійснення.

5. Вплив дифракції електромагнітного поля на внутрішні джерела теплоти під час НВЧ-обробки

Ефективність НВЧ-нагрівання визначається густиною внутрішніх джерел теплоти, які виникають унаслідок поляризаційних явищ у неідеальних діелектриках, до яких належить більшість харчових продуктів.

Питома теплова потужність, що виділяється в продукті під час НВЧ-нагрівання, з одного боку, залежить від електричних параметрів поля (частоти струму і квадрата напруженості електричного поля), з іншого – від

діелектричних параметрів матеріалу (кута діелектричних втрат і відносної діелектричної проникності) та визначається за відомою формулою [5.1]:

$$w = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon t g \delta E^2, \quad (5.1)$$

де ε_0 – електрична постійна ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

f – частота електромагнітних коливань, Гц;

ε – діелектрична проникність середовища, в.о.;

$tg \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат, в.о.;

E – напруженість електричного поля в середовищі, В/м.

Вважається, що товщина d матеріалу в НВЧ-полі не має перевищувати δ для того, щоб нагрівання матеріалу було рівномірним.

$$\delta = \frac{c}{\pi f \sqrt{\varepsilon'} tg \delta} \quad (5.2)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, м/с.

Поняття глибини проникнення має сенс тільки для нескінченно товстого шару діелектрика. При кінцевій товщині матеріалу і наявності стоячих хвиль, характерних для НВЧ-обробки, у резонаторних камерах виникає явище дифракції, яке суттєво змінює розподіл внутрішніх джерел теплоти. Продемонструємо це на прикладі НВЧ-нагрівання вологого діелектричного матеріалу у формі тонкої пластини, симетрично розташованої в одномодовій резонаторній НВЧ-камері [5.2, 5.3].

У першому наближенні будемо вважати, що на пластину діелектрика товщиною d уздовж осі z , яка перпендикулярна її площині, падає плоска електромагнітна хвиля, вектор напруженості електричного поля якої, відповідно, паралельний площині пластини (рис. 5.1). У цьому випадку електромагнітне поле всередині та поза пластиною описується системою рівнянь [5.4]:

$$\frac{d \dot{E}_{in}}{dz} = i\omega\mu_0 \dot{H}_{in}, \quad \frac{d \dot{H}_{in}}{dz} = i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon} \dot{E}_{in}, \quad (5.3)$$

$$\frac{d \dot{E}_{ex}}{dz} = i\omega\mu_0 \dot{H}_{ex}, \quad \frac{d \dot{H}_{ex}}{dz} = i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon} \dot{E}_{ex},$$

де \dot{E} , \dot{H} – комплексні амплітуди електричного (В/м) і магнітного (А/м) полів; індекс *in* відноситься до внутрішнього поля, *ex* – до зовнішнього;

$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon''$ – комплексна відносна діелектрична проникність, в.о.;

$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ – магнітна постійна;

ω – циклічна частота, с^{-1} ; i – уявна одиниця.

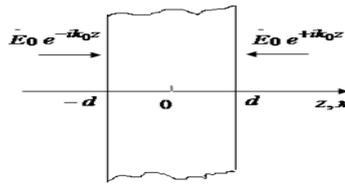


Рисунок 5.1 – Нескінченна пластина діелектрика в полі стоячої електромагнітної хвилі

Граничні умови для системи (5.3) запишемо у вигляді:

$$\left. (\dot{E}_{in} - \dot{E}_{ex}) \right|_{z=\pm d/2} = 0, \quad \left. (\dot{H}_{in} - \dot{H}_{ex}) \right|_{z=\pm d/2} = 0. \quad (5.4)$$

Розв'язок системи рівнянь (5.3) щодо вектора напруженості електричного поля всередині пластини при заданих граничних умовах має вигляд:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_0 e^{ik_0 \frac{d}{2}} \left(1 + \frac{\cos \frac{kd}{2} - i\sqrt{\dot{\varepsilon}} \sin \frac{kd}{2}}{\cos \frac{kd}{2} + i\sqrt{\dot{\varepsilon}} \sin \frac{kd}{2}} \right) \frac{\cos kz}{\cos \frac{kd}{2}} \quad (5.5)$$

де \dot{E}_0 – комплексна амплітуда напруженості поля на поверхні діелектрика, В/м;

$k = k' - ik'' = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon}}{\lambda}$ – комплексна постійна поширення хвилі в діелектрику, м⁻¹;

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ – постійна поширення хвилі в повітрі, м⁻¹;

λ – робоча довжина хвилі, м.

Питома потужність внутрішніх джерел теплоти, яка генерується у вологому діелектрику, визначається квадратом модуля напруженості електричного поля (5.1). Тому на підставі (5.5) маємо:

$$w(z) = w_0(\cosh 2k''z + \cos 2k'z), \quad (5.6)$$

де введено позначення

$$w_0 = \left| \frac{\dot{E}_0 e^{ik_0 d/2}}{\cos kd} \left(1 + \frac{\frac{\cos kd - i\sqrt{\varepsilon} \sin kd}{2}}{\frac{\cos kd + i\sqrt{\varepsilon} \sin kd}{2}} \right) \right|^2. \quad (5.7)$$

де $w(z)$ – питома потужність, яка генерується по товщині пластини матеріалу, Вт/м³;

$$k' = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon'}}{\lambda}; \quad k'' = \frac{\pi\sqrt{\varepsilon'} \operatorname{tg} \delta}{\lambda}; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (5.8)$$

Рівняння (5.6) описує поле внутрішніх джерел теплоти, які генерується в діелектричному матеріалі. Як випливає із цього виразу, мають місце як згасання потужності НВЧ-коливань від поверхні до центра пластини, яке описується гіперболічним косинусом, так і наявність періодичних максимумів потужності,

виражених другою складовою $\cos(2k'z)$. Тому залежно від товщини пластини d густина внутрішніх джерел теплоти в центрі пластини може бути як менше, так і більше, ніж на її поверхні. На рис. 5.2 показано розподіл потужності внутрішніх джерел теплоти за товщиною пластини (5.6) залежно від тангенса кута втрат $\text{tg}\delta$.

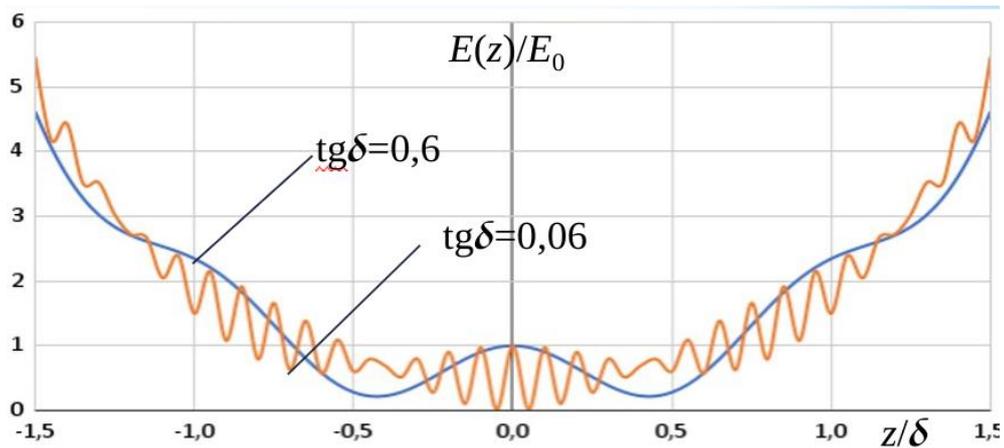


Рисунок 5.2 – Питома потужність, яка генерується по товщині пластини діелектрика з втратами в одномодовій резонаторній НВЧ-камері

Як впливає з наведених даних, залежно від товщини пластини d і незалежно від тангенса кута втрат у разі наявності стоячої хвилі, густина внутрішніх джерел теплоти в центрі пластини може бути навіть більше, ніж на її поверхні. Цей висновок стосується товщини пластин менше ніж $d < \delta$. Саме такий ефект, перегрівання внутрішніх шарів матеріалу, має місце під час нагрівання тонких матеріалів (порівняно з середньою глибиною проникнення електромагнітного поля для харчових продуктів 3–5 см). Зі збільшенням товщини пластини матеріалу до величин $d > 2\delta$ розподіл густини внутрішніх джерел енергії наближається до експоненціального. Цей висновок можна поширювати й на багатомодові НВЧ-камери, в яких збуджуються коливання з різними хвильовими числами, але і в цьому разі локальні зони перегріву мають місце. Щоб їх позбутися застосовують, наприклад, обертання робочого стола мікрохвильової печі або механічний дисектор у входному хвилеводі.

Питання рівномірності НВЧ-нагрівання не можна вирішити тільки завдяки розрахунку густини внутрішніх джерел теплоти, оскільки наявність внутрішнього теплоперенесення формує результуюче поле температур по товщині матеріалу, що нагрівається у НВЧ-полі.

У загальному випадку температурне поле в матеріалі під час НВЧ-нагрівання описується системою рівнянь тепломасоперенесення за умови конвективного теплообміну з навколишнім середовищем [5.5]. Знехтувавши впливом масоперенесення, тиску й електрофізичних характеристик на температурне поле за час, характерний для першого етапу нагрівання, обмежимося розв'язанням рівняння теплопровідності для плоскої пластини діелектричного матеріалу товщиною d_0 , в якій діють внутрішні джерела теплоти $w(z)$:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{w(z)}{C\rho}, \quad (d_0 \leq z \leq d_0) \quad (5.9)$$

із такими крайовими умовами:

$$T(z,0) = T_0, \quad \frac{\partial T(0,\tau)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T(d_0,\tau)}{\partial z} + H[T(d_0,\tau) - T_0] = 0, \quad (5.10)$$

де T – температура матеріалу, K ;

T_0 – температура навколишнього середовища, K ;

τ – поточний час, s ;

a – коефіцієнт температуропровідності, m^2/s ;

C – питома теплоємність матеріалу, $Dж/кг \cdot K$;

ρ – густина матеріалу, $кг/м^3$;

$H = \alpha/\lambda_t$ – відношення коефіцієнта теплообміну до коефіцієнта теплопровідності, $1/m$.

Застосовуючи перетворення Лапласа до рівнянь (5.9) і (5.10), отримаємо:

$$\frac{\partial^2 T_L}{\partial z^2} - \frac{s}{a} \left(T_L - \frac{T_0}{s} \right) = -\frac{w}{aC\rho s}, \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial T_L(0,s)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T_L(d_0,s)}{\partial z} + H \left[T_L(d_0,s) - \frac{T_0}{s} \right] = 0, \quad (5.12)$$

де T_L – температура в просторі зображень Лапласа;
 s – аргумент перетворення Лапласа.

Для того, щоб оцінити нерівномірність температурного поля, спричинену наявністю внутрішніх джерел теплоти, знайдемо частковий розв'язок рівняння (5.11) із джерелом тепла вигляду $w = w_0 \cos(2k'z)$, оскільки саме цим доданком описується вплив дифракції електромагнітних хвиль (рис.5.2). Цей розв'язок має такий вигляд:

$$T_L = \frac{T_0}{s} + \frac{w_0}{C\rho} \left(\frac{1}{s^2} + \frac{\cos 2k'z}{s(s+4k'^2a)} - \frac{1}{ch\sqrt{\frac{s}{a}}d_0 + \frac{1}{H}\sqrt{\frac{s}{a}}sh\sqrt{\frac{s}{a}}d_0} \right) \times \\ \times \left(\frac{1}{s^2} - \frac{\frac{2k'}{H} \sin 2k'd_0 - \cos 2k'd_0}{s(s+4k'^2a)} \right) \cdot ch\sqrt{\frac{s}{a}}z \quad (5.13)$$

Спростимо отриманий розв'язок, розглянувши нестационарний процес НВЧ-нагрівання в початковий момент часу за малих тепловтрат, що характерно в разі мікрохвильового нагрівання матеріалу. У просторі зображень цим умовам

відповідає нерівність $\sqrt{\frac{s}{a}}d_0 \approx \frac{1}{H}\sqrt{\frac{s}{a}} \gg 1$. Тому в рівнянні (5.13) можна замінити гіперболічні функції їх асимптотичними представленнями і спростити його таким чином:

$$T_L \approx \frac{T_0}{s} + \frac{w_0}{C\rho} \left(\frac{1}{s^2} + \frac{\cos 2k'z}{s(s+4k'^2a)} \right). \quad (5.14)$$

Застосувавши обернене перетворення Лапласа до виразу (5.14), отримаємо:

$$T \approx T_0 + \frac{w_0}{C\rho} \left(\tau + \frac{1}{4k'^2 a} (1 - e^{-4k'^2 a \tau}) \cos 2k'z \right). \quad (5.15)$$

З рівняння (5.15) випливає, що зі збільшенням часу нагрівання зменшується нерівномірність температурного поля, яка визначається членом, пропорційним $\cos 2k'z$. Для того щоб зменшити нерівномірність нагрівання матеріалу, викликану дифракцією електромагнітних хвиль, необхідно, щоб виконувалась умова $\exp(-4k'^2 a \tau) \ll 1$. Звідси отримуємо: $4k'^2 a \tau > 2$ або $\tau > (2k'^2 a)^{-1}$. Таким чином, існує гранично мінімальний час нагрівання матеріалу в НВЧ-полі, при якому вплив дифракції електромагнітних хвиль суттєво впливає на температурне поле:

$$\tau_{\min} = \frac{1}{2k'^2 a}. \quad (5.16)$$

Зі збільшенням часу НВЧ-нагрівання $\tau > \tau_{\min}$ вплив дифракції буде зменшуватися за рахунок розвитку теплоперенесення в об'ємі матеріалу.

Для характерних параметрів мікрохвильового нагрівання харчових матеріалів у резонаторній НВЧ-камері: $a = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\varepsilon' = 45$; $\lambda = 12,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, – розрахункове значення $\tau_{\min} \approx 40 \text{ с}$. Тобто за меншого часу нагрівання вплив нерівномірності внутрішніх джерел теплоти на температурне поле найбільший.

Оцінимо відносну температурну нерівномірність за товщиною пластини матеріалу $\Delta\theta$, яка виникатиме за час нагрівання $\tau > \tau_{\min}$.

$$\Delta\theta = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min} - 2T_0}, \quad (5.17)$$

де T_{max} , T_{min} – максимальні й мінімальні температури, які відповідають локальним максимумам і мінімумам температурного поля у формулі (5.15).

Очевидно, що за умови $\tau > \tau_{min}$ членом $\exp(-4k'^2 a \tau) \ll 1$ у виразі (5.15) можна знехтувати; локальний максимум і мінімум температури будуть визначатися максимальним і мінімальним значеннями $\cos(2k'z)$:

$$T_{max} \approx T_0 + \frac{w_0}{C\rho} \left(\tau + \frac{1}{4k'^2 a} \right), \quad T_{min} \approx T_0 + \frac{w_0}{C\rho} \left(\tau - \frac{1}{4k'^2 a} \right). \quad (5.18)$$

Підставивши вирази (5.18) у формулу (5.17), отримаємо:

$$\Delta\theta = \frac{1}{4\pi^2 k'^2 a_\tau}. \quad (5.19)$$

Отже, нерівномірність температури, викликана дифракцією електромагнітних хвиль в об'ємі матеріалу під час НВЧ-нагрівання, зменшується зі збільшенням тривалості нагрівання, його діелектричної проникності (5.15) ε' та коефіцієнта температуропровідності. Величина $\Delta\theta$, розрахована для наведених вище параметрів і тривалості НВЧ-нагрівання $\tau = 100$ с, складає $\Delta\theta = 0,2$. Наприклад, за середньої температури 70°C перепад температур за об'ємом складатиме 14°C , але зі збільшенням тривалості нагрівання у два рази перепад зменшиться вдвічі.

Із проведеного дослідження випливає, що оптимальні умови НВЧ-нагрівання вологого діелектричного матеріалу забезпечуються в разі певного співвідношення між товщиною діелектричного матеріалу і тривалістю НВЧ-нагрівання, оскільки нерівномірність температурного поля, викликана дифракцією електромагнітних хвиль, поступово зменшуються за рахунок внутрішнього теплоперенесення.

6. Наближений метод розрахунку внутрішніх джерел теплоти в діелектрику довільної форми

Однією з проблем при розрахунках процесу мікрохвильової обробки є коректний інженерний розрахунок технологічних режимів процесів – нагрівання, сушіння або концентрування. Точне аналітичне вирішення цього завдання потребує спільного розв'язання рівнянь електродинаміки та тепломасообміну. Зауважимо, що таке рішення можна отримати тільки для тіл, які мають правильну геометричну форму, у разі відомої геометрії їх розташування у НВЧ-камері. Тому отримані в попередньому розділі залежності є досить грубим наближенням до реальних умов обробки харчових продуктів, які мають довільну форму та обробляються в найпоширеніших типах НВЧ-пристроїв – багатомодових резонаторних НВЧ-камерах. Конструкція таких камер передбачає збудження багатомодових електромагнітних коливань, щоб виникаючі максимуми та мінімуми напруженості електромагнітного поля були більш-менш рівномірно розподілені за об'ємом НВЧ-камери. Але розподілення результуючої напруженості поля суттєво залежить від діелектричних характеристик продукту, його геометрії та розташування у НВЧ-камері. Зважаючи на це, неможливо визначити величину E у формулі(5.1), яка зазвичай використовується для розрахунку внутрішніх джерел теплоти. В інженерній практиці для оцінювання напруженості електромагнітного поля в діелектрику найчастіше використовують наближену формулу для розрахунку густини внутрішніх джерел теплоти у вигляді (6.1) разом із рівнянням (5.1):

$$w = \frac{P}{V}, \quad (6.1)$$

де P – потужність НВЧ-генератора, Вт;

V – об'єм продукту, м³.

Ця формула інколи дає непоганий результат, але в більшості випадків має чималу похибку. Це пов'язано з тим, що вона не враховує діелектричних характеристик продукту, зокрема глибини проникнення електромагнітного поля та його геометрії. До того ж, якщо характерний розмір діелектричного матеріалу більше за глибину проникнення, то залежність густини внутрішніх джерел теплоти від координати суттєво впливає на розв'язання задачі про внутрішнє теплоперенесення під час НВЧ-нагрівання.

Нижче наведено наближений метод розрахунку густини внутрішніх джерел теплоти під час НВЧ-нагрівання діелектричного матеріалу, який має довільну форму, довільний об'єм та довільне розташування у НВЧ-камері [6.1].

Спочатку визначимо зв'язок між напруженістю електромагнітного поля, що генерується в резонаторній НВЧ-камері, та потужністю НВЧ-генератора. Для цього скористаємося загальновідомими рівняннями електродинаміки, наведеними в [5.4].

Щільність енергії електромагнітного поля ω_E (Дж/м³), запасена в одиниці об'єму середовища, визначається за формулою:

$$\omega_E = \epsilon_0 \epsilon E^2. \quad (6.2)$$

Питомий потік потужності P (Вт/м²), що переноситься електромагнітною хвилею в середовищі, визначається за формулою:

$$P = v \epsilon_0 \epsilon E^2, \quad (6.3)$$

де $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$ – швидкість світла в діелектричному середовищі, м/с;

$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ – швидкість світла у вакуумі ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с);

μ_0 – магнітна стала ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

μ – магнітна проникність середовища.

У робочому об'ємі НВЧ-камери електромагнітна хвиля переміщується майже зі швидкістю світла у вакуумі, оскільки для повітря діелектрична й магнітна проникності середовища дорівнюють одиниці ($\varepsilon'=\mu=1$). Тому питомий потік потужності (6.3), що переноситься від НВЧ-генератора до продукту, дорівнює:

$$\Pi = c\varepsilon_0 E_0^2, \quad (6.4)$$

де E_0 – напруженість електричного поля в незаповненому об'ємі НВЧ-камери, В/м.

Якщо навантаження резонаторної НВЧ-камери є оптимальним, тобто узгодженим за об'ємом продукту та резонатором (в іншому разі ККД резонатора малий, НВЧ-генератор може вийти з ладу), питому потужність електромагнітної хвилі на межі продукт – робочий об'єм НВЧ-камери можна визначити таким чином:

$$\Pi = \frac{P}{S}, \quad (6.5)$$

де P – потужність НВЧ-генератора, Вт;

S – площа поверхні продукту, м².

Прирівнявши праві частини виразів (6.4) і (6.5), отримаємо вираз для визначення напруженості електромагнітного поля в незаповненому об'ємі НВЧ-камери:

$$E_0 = \sqrt{\frac{P}{\varepsilon_0 c S}} \quad (6.6)$$

Далі визначимо напруженість електромагнітного поля, яка виникає в самому продукті, оскільки вона відрізняється від напруженості на зовнішній межі продукт–середовище НВЧ-камери внаслідок залежності швидкості поширення електромагнітної хвилі від діелектричних характеристик середовища.

У разі оптимального навантаження НВЧ-резонатора вся енергія електромагнітної хвилі поглинається продуктом, тобто питома потужність Π електромагнітної хвилі не змінюється на межі продукт – НВЧ-камера. На підставі виразів (6.3) та (6.4) можна записати таку граничну умову:

$$v\varepsilon\varepsilon_0 E_{i0}^2 = c\varepsilon_0 E_0^2, \quad (6.7)$$

де E_{i0} – напруженість електромагнітного поля на внутрішній межі продукт – середовище.

Звідси, з урахуванням виразу для швидкості світла в діелектричному середовищі, отримуємо:

$$E_{i0}^2 = \frac{E_0^2}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (6.8)$$

З урахуванням виразу (6.6) отримуємо величину напруженості електромагнітного поля на поверхні продукту залежно від потужності НВЧ-генератора:

$$E_{i0} = \sqrt{\frac{P}{\varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon} c S}} \quad (6.9)$$

Цю формулу можна використовувати для розрахунку напруженості електромагнітного поля на поверхні харчового продукту залежно від потужності НВЧ-генератора в резонаторній НВЧ-камері [6.2].

Наступним кроком є визначення розподілу електромагнітного поля та внутрішніх джерел теплоти за об'ємом продукту під час НВЧ-нагрівання. Для цього запишемо баланс потужності для довільного внутрішнього шару продукту об'ємом dV із площею поверхні S_V (рис. 6.1):

$$wdV = -S_V d\Pi \quad (6.10)$$

У рівнянні (6.10) знак « \leftarrow » вказує на те, що потік електромагнітної енергії зменшується внаслідок перетворення на теплоту.

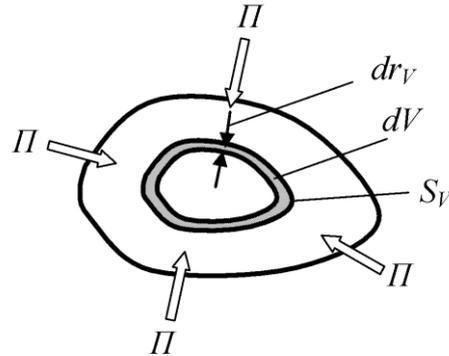


Рисунок 6.1 – Схема розрахунку потужності внутрішніх джерел теплоти для тіла довільної форми

Підставивши в рівняння(6.10) вираз для густини внутрішніх джерел теплоти w із (5.1) та вираз для питомого потоку Π електромагнітної хвилі (6.3), з урахуванням формули для швидкості світла в діелектричному середовищі отримуємо:

$$2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta E_i^2 \cdot dV = -c \varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon} S_V \cdot d(E_i^2). \quad (6.11)$$

У цьому рівнянні виразимо швидкість світла через глибину проникнення НВЧ-енергії в діелектрик [глибина проникнення енергії у 2 рази менша, ніж глибина проникнення електромагнітного поля (5.2)]:

$$\delta = \frac{c}{2\pi f \varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg} \delta} \quad (6.12)$$

На підставі (6.11) отримуємо таке диференціальне рівняння:

$$\frac{d(E_i^2)}{E_i^2} = -\frac{1}{\delta} \frac{dV}{S_V} = -\frac{1}{\delta} dr_V, \quad (6.13)$$

де $dr_V = dV/S_V$ – елементарна товщина шару вздовж нормалі від поверхні до внутрішнього об'єму продукту.

Розв'язок (6.13) за граничної $E_i|_{r_V=0} = E_{i0}$ умовимає вигляд (6.14) та описує розподіл квадрата напруженості електромагнітного поля за радіус-вектором r_V вздовж нормалі від поверхні до внутрішніх шарів продукту:

$$E_i^2 = E_{i0}^2 e^{-\frac{r_V}{\delta}}, \quad (6.14)$$

де r_V – координата поточного шару продукту ($0 \leq r_V \leq V/S$).

Підставивши (6.14) у (5.1) з урахуванням значення напруженості поля на поверхні продукту E_{i0} (6.9), отримуємо розрахункову формулу для визначення розподілу щільності джерел теплоти за внутрішнім об'ємом продукту під час його НВЧ-обробки:

$$w(r_V) = \frac{P}{\delta \cdot S} e^{-\frac{r_V}{\delta}} \quad (6.15)$$

Зауважимо, що отримана формула за фізичним сенсом повністю збігається з відомою формулою для розрахунку густини внутрішніх джерел теплоти, яку подають зазвичай у такому вигляді:

$$w(x) = w_0 e^{-\frac{x}{\delta}}. \quad (6.16)$$

На відміну від (6.16), формула (6.15), по-перше, містить в явному вигляді значення потужності внутрішніх джерел теплоти на поверхні продукту $w_0 = P/(\delta \cdot S)$, по-друге, має універсальне застосування, оскільки отримана для довільної форми продукту, характерним розміром якого є відношення його об'єму до площі поверхні ($R_V = V/S$).

Розрахуємо середнє за об'ємом продукту значення потужності внутрішніх джерел теплоти, бо саме цю характеристику найчастіше використовують у

інженерних розрахунках. На підставі (6.15) для середнього значення питомої потужності визначимо інтегруванням:

$$w = \frac{P}{\delta S R_V} \int_0^{R_V} (e^{-\frac{r_V}{\delta}}) dr_V = \frac{P}{V} (1 - e^{-\frac{R_V}{\delta}}), \quad (6.17)$$

де $R_V = V/S$ – відношення об'єму продукту до площі його поверхні, м.

Порівняємо отриману формулу (6.17) із відомим наближенням для густини внутрішніх джерел теплоти (6.1). Очевидно, що (6.17) збігається з (6.1), якщо $R_V/\delta \gg 1$, тобто за великих об'ємів продукту. Але відомо, що для забезпечення рівномірності НВЧ-нагрівання розміри продукту хоча б в одному вимірі не повинні значно перевищувати глибину проникнення НВЧ-енергії, тому саме в цих випадках формула (6.1) буде давати похибку в розрахунках.

Покажемо це на прикладі розрахунку густини внутрішніх джерел теплоти під час НВЧ-нагрівання плоского тіла з площею поверхні S та товщиною h . Згідно з рівнянням (6.1) густина внутрішніх джерел зі зменшенням товщини тіла прямує до нескінченності:

$$w = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{P}{Sh} \rightarrow \infty. \quad (6.18)$$

Відповідно до формули (6.17) при $h \rightarrow 0$ густина внутрішніх джерел має кінцеве значення, що цілком збігається з точним розв'язком рівнянь електродинаміки (5.6).

$$w = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{P}{Sh} (1 - e^{-\frac{h}{\delta}}) = \frac{P}{S\delta}. \quad (6.19)$$

Отримана формула (6.17) справедлива для тіл довільної геометричної форми із заданою площею поверхні S та довільним об'ємом V . Вона враховує у явному вигляді діелектричні характеристики продукту (через глибину проникнення δ), як і класичний вираз для густини внутрішніх джерел (5.1).

Для перевірки адекватності отриманого рівняння (6.17) проаналізовано експериментальні дані відповідно до джерела [6.3]. У цих експериментах потужність внутрішніх джерел теплоти визначалася за темпом нагрівання води в контейнерах різної геометричної форми, які розміщували в робочій камері НВЧ-печі об'ємом 15 ліз потужністю 500 Вт.

На рис. 6.2 точками показано експериментальні дані, суцільними лініями – розрахунків за формулою (6.17) для кожного виду контейнера. Відхилення розрахункових даних від експериментальних знаходиться в межах 10–15%, що підтверджує фізичну адекватність отриманого рівняння.

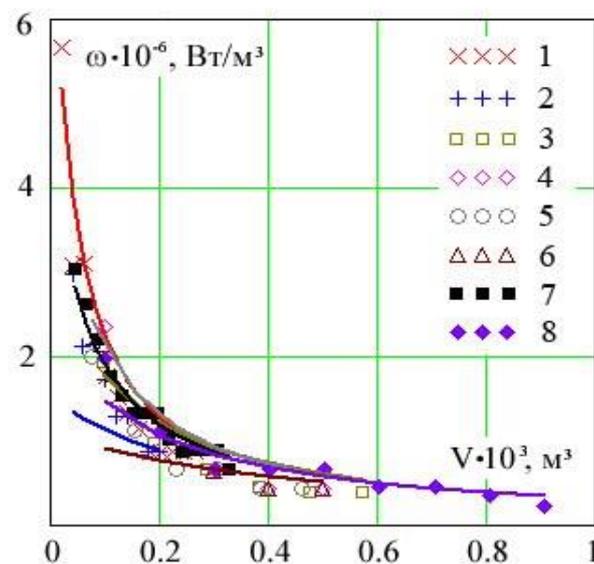


Рисунок 6.2 – Порівняння експериментальних і розрахункових даних густини внутрішніх джерел теплоти під час НВЧ-нагрівання води в контейнерах різної форми: 1 – циліндр $D=57$ мм, $H=10\dots 80$ мм; 2 – паралелепіпед 170×75 мм, $H=3\dots 10$ мм; 3 – циліндр $D=90$ мм, $H=15\dots 90$ мм; 4 – циліндр $D=150$ мм, $H=5\dots 28$ мм; 5 – циліндр $D=70$ мм, $H=20\dots 120$ мм; 6 – циліндр $D=120$ мм, $H=5\dots 28$ мм; 7 – паралелепіпед 97×45 мм, $H=10\dots 75$ мм; 8 – паралелепіпед 120×70 мм, $H=12\dots 108$ мм

Таким чином, наведена спрощена методика розрахунку потужності внутрішніх джерел теплоти у продукті є цілком адекватною. Дозволено її використовувати для продукту довільної форми, характерним розміром якого є відношення об'єму до площі поверхні.

7. Дослідження діелектричних характеристик харчових продуктів

Визначаючи раціональні параметри НВЧ-нагрівання (потужність, навантаження, температура, тривалість), необхідно мати уявлення про діелектричні властивості сировини, що обробляється. Діелектричні властивості описують за допомогою комплексної діелектричної проникності, дійсна частина ϵ' якої впливає на кількість енергії, що може бути накопичена в діелектричному матеріалі у формі електричного поля, а уявна частина (фактор втрат) ϵ'' є мірою того, скільки енергії діелектричний матеріал може розсіяти у формі теплоти.

У колоїдних капілярно-пористих матеріалах, до яких відноситься харчова сировина, електричні параметри, зокрема діелектрична проникність ϵ і тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$, сильно залежать від вмісту води w і стану води в різних формах зв'язку із сухим скелетом. Аналітичне визначення залежностей $\epsilon(w)$ і $\operatorname{tg}\delta(w)$ є складним завданням, оскільки більшість матеріалів є неоднорідними діелектриками й гетерогенними системами. Приблизно діелектричну проникність вологого тіла можна визначити за формулою [7.3]:

$$\epsilon = \epsilon_c \left(1 + \epsilon_b - \frac{\epsilon_c}{a\epsilon_b} + \frac{b\epsilon_c\rho}{\rho_b w} \right), \quad (7.1)$$

де ϵ_c , ϵ_b – відносна діелектрична проникність відповідно сухого матеріалу та води; ρ – густина вологого матеріалу; ρ_b – густина води; w – вміст води в матеріалі; a і b – постійні (для більшості матеріалів $a = 0,01 \dots 0,03$; $b = 0,5 \dots 1,5$).

Дані щодо діелектричних властивостей окремих видів харчової сировини наведено в літературі, зокрема [7.1, 7.2]. Водночас є багато нових видів продукції, у тому числі сумішей з різноманітної сировини, які потребують експериментального визначення діелектричних властивостей при заданих співвідношеннях компонентів.

Для вивчення діелектричних характеристик харчової сировини нами розроблено та створено експериментальний стенд, проведено серію експериментів із визначення діелектричної проникності низки харчових продуктів [7.4]. Схему експериментального стенда наведено на рис. 7.1, зовнішній вигляд показано на рис.7.2.

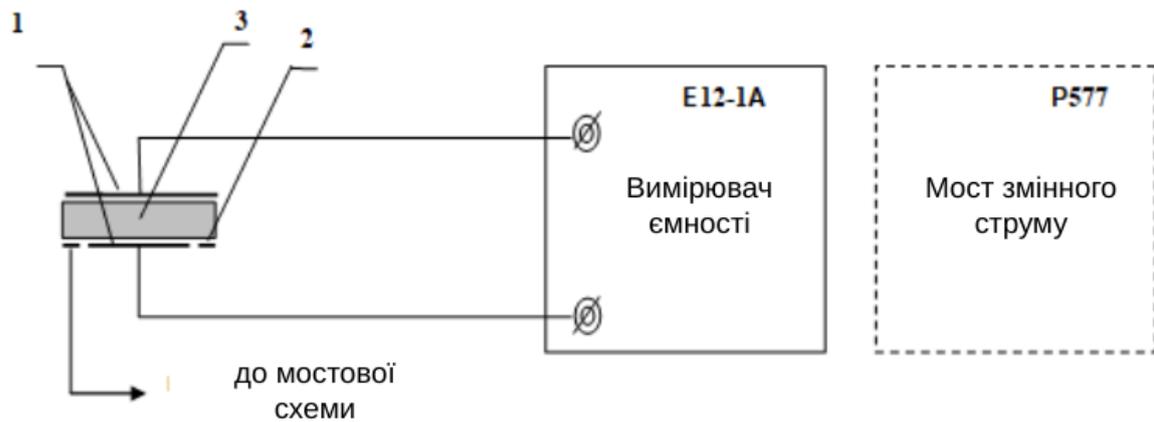


Рисунок 7.1 – Схема вимірювання відносної діелектричної проникності та тангенса кута втрат: 1 – вимірювальні електроди; 2 – охоронний електрод; 3 – досліджуваний зразок



a



б

Рисунок 7.2 – Стенд для вимірювання діелектричних характеристик харчової сировини: *a*– зовнішній вигляд; *б*– вимірювальна комірка

Оригінальною частиною стенда є вимірювальна комірка. Корпус комірки виготовлено з плексигласу. Один із вимірювальних електродів і охоронний

електрод вмонтовані в дно комірки, другий рухомий електрод потрібен для регулювання необхідного зазору між електродами. У схемі вимірювань комірка є плоским конденсатором, між пластинами якого розміщується досліджуваний зразок.

Для вимірювання діелектричної проникності зразків використано резонансний метод, вимірювальна комірка під'єднувалася до стандартного вимірювача ємності Е12-1А. Для вимірювання кута втрат $\text{tg}\delta$ мостовим методом використовувався стандартний міст змінного струму Р577.

Вимірювання проводилися на стандартній частоті 2450 МГц. Нижче наведено діелектричні характеристики рослинних пряно-ароматичних сумішей двох видів за однакових співвідношень компонентів [7.5]:

1 – подрібнені корені петрушки, пастернаку, селери, кропу;

2 – подрібнена зелень петрушки, пастернаку, селери, кропу.

Результати дослідження діелектричних характеристик сумішей коренів пряної сировини наведено на рис. 7.3–7.5, сумішей зелені пряної сировини – на рис.7.6–7.8. Визначено, що збільшення насипної густини суміші коренів пряної сировини призводить до лінійного збільшення відносних значень діелектричних характеристик (рис. 7.3). Так, у діапазоні насипної густини від 300 кг/м^3 до 600 кг/м^3 значення ϵ' збільшується від 18 до 50, ϵ'' – від 2 до 10.

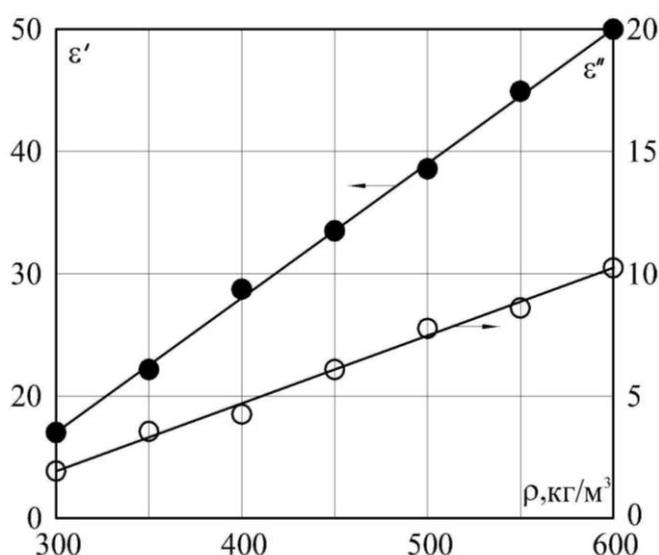


Рисунок 7.3 – Діелектричні характеристики (ϵ' , ϵ'') суміші коренів пряної сировини від насипної густини (за вологовмісту $W=85\%$ та температури $t=20^\circ\text{C}$)

Це може бути пояснено тим, що збільшення насипної густини супроводжується зменшенням об'єму порожнеч, заповнених повітрям. У результаті збільшуються наскрізна провідність і, відповідно, ϵ' та ϵ'' .

Визначено, що з підвищенням температури (рис. 7.4) в діапазоні 20...80°C ϵ' монотонно знижується, зокрема при насипній густині 500 кг/м³– від 40 до 28, при 400 кг/м³– від 29 до 14. Показник ϵ'' для заданих значень насипної густини відрізняється в 1,4–1,5 разу.

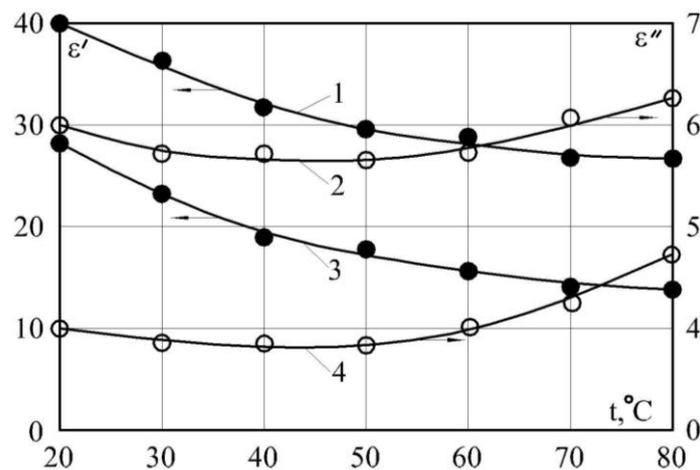


Рисунок 7.4–Діелектричні характеристики (ϵ' , ϵ'') суміші коренів пряної сировини від температури за насипної густини:

1, 2 – 500 кг/м³; 3, 4 – 400 кг/м³

Водночас помітних змін ϵ'' в температурному діапазоні 20...60°C майже не спостерігається і досліджуваний показник знаходиться в межах 5,7–6,0 та 3,8–4,0 відповідно за вищевказаних значень насипної густини. У разі подальшого зростання температури до 80°C ϵ'' збільшується на 11–21%. Показник ϵ'' має характерний мінімум за температури 50°C для досліджених значень насипної густини, що може бути викликано перерозподілом вологи між макро- та мікрокапілярами.

Зменшення ϵ' із підвищенням температури можна пояснити відповідним зменшенням загальної кількості вологи внаслідок її випаровування. Збільшення ϵ'' в температурному діапазоні 60...80°C зумовлено випресовуванням вологи з

клітин та її перерозподілом, унаслідок чого порожнини між частинками заповнюються вологою.

На рис. 7.5 наведено результати дослідження зміни діелектричних характеристик суміші коренів пряної сировини від вологовмісту за температури 20°C. Виявлено, що зниження вологовмісту від 85% до 10% призводить до зменшення ϵ' і ϵ'' .

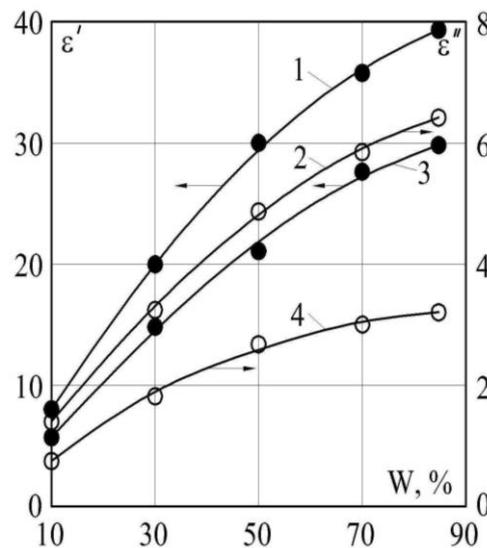


Рисунок 7.5– Діелектричні характеристики (ϵ' , ϵ'') суміші коренів пряної сировини від вологовмісту W (за температури 20°C та насипної густини:

1, 2 – 500 кг/м³; 3, 4 – 400 кг/м³)

Діелектрична проникність ϵ'' зі зменшенням насипної густини також зменшується. Вищевказані закономірності зміни досліджуваних показників можна пояснити поступовим збільшенням порожнин між частинками внаслідок видалення води.

На рис. 7.6–7.8 подано результат дослідження діелектричних характеристик суміші зелених пряних овочів залежно від температури та вологовмісту. Вплив температури досліджували при насипній густині суміші 200 кг/м³ та вологовмісті 85% і 10%. У температурному діапазоні 20...50°C помітних змін ϵ' і ϵ'' не спостерігається. При цьому вихідна та висушена сировина різняться за значеннями ϵ' – в 1,3 разу, ϵ'' – у 3,4 разу.

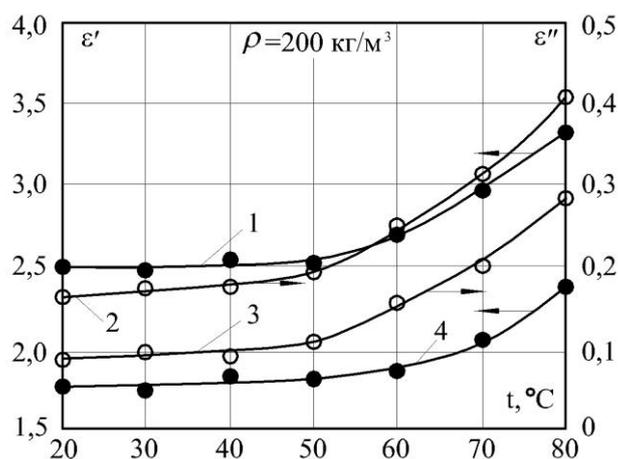


Рисунок 7.6 – Діелектричні характеристики (ϵ' , ϵ'') суміші зелені пряної сировини від температури при насипній густині 200 кг/м^3 та вологовмісті: 1, 2 – 85%; 3, 4 – 10%

Із подальшим підвищенням температури до 80°C спостерігається суттєве збільшення цих показників: ϵ' зростає в 1,4–1,5 разу, ϵ'' – у 2,2–3,6 разу.

Характер наведених кривих залежності ϵ' для суміші зелені прямих овочів (на відміну від ϵ'') не збігається з тими, які наведені для суміші коренів, що можна пояснити особливостями дисперсної структури цієї системи.

Установлено, що зі зниженням вологовмісту від 85% до 10% спостерігається поступове зменшення ϵ' і ϵ'' в 1,3–1,4 разу (рис. 7.5).

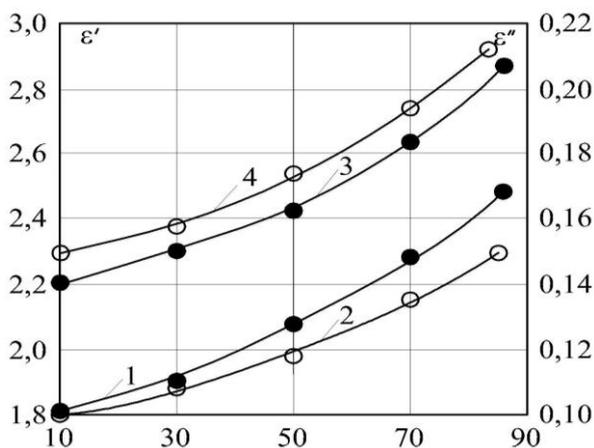


Рисунок 7.7– Діелектричні характеристики (ϵ' , ϵ'') суміші зелені пряної сировини від вологості за температури 20°C та насипної густини: 1, 2 – 200 кг/м^3 ; 3, 4 – 300 кг/м^3

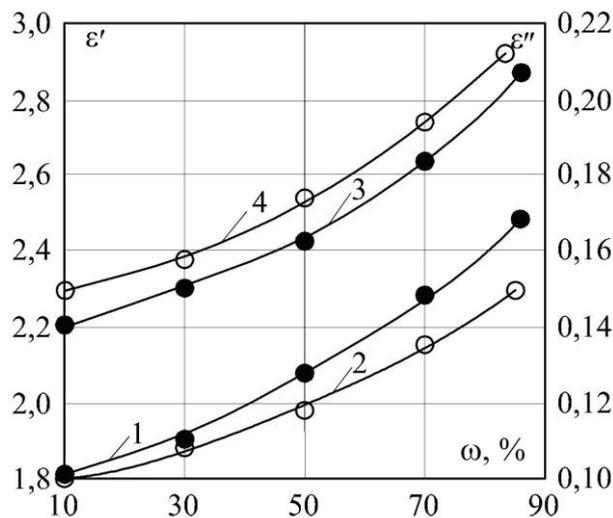


Рисунок 7.8– Діелектричні характеристики (ϵ' , ϵ'') суміші зелені пряної сировини від вологості за температури $t=20^{\circ}\text{C}$ та насипної густини:

$$1, 2 - \rho=200 \text{ кг/м}^3; 3, 4 - \rho=300 \text{ кг/м}^3$$

Результати дослідження свідчать, що характер змін діелектричних характеристик рослинної сировини залежить від низки технологічних факторів: вологості, температури та насипної густини. Серед них найбільш значущим чинником є вологість (рис. 7.5, 7.6, 7.8), зі збільшенням якої діелектричні характеристики збільшуються приблизно за квадратичним законом.

8. Визначення напруженості НВЧ-поля у вологих матеріалах

Під час НВЧ-обробки вологого діелектричного матеріалу в ньому утворюється електромагнітне поле, напруженість якого залежить від вихідної потужності НВЧ-генератора. Напруженість електромагнітного поля в певній точці визначає густину енергії, яка внаслідок поляризації зумовлює перетворення цієї енергії та викликає інтенсифікацію теплоперенесення й масоперенесення у вологому діелектричному матеріалі. Слід зазначити, що для розрахунку теплової дії НВЧ-поля треба визначити густину внутрішніх джерел теплоти. Як показано вище, для інженерних розрахунків достатньо знати потужність НВЧ-генератора згідно з рівнянням (6.17). Але для визначення нетеплової дії електромагнітного поля, зокрема впливу на дифузійні процеси в

мікрокапілярах (рис. 4.1), потрібно знати саме величину напруженості електромагнітного поля, яка генерується в певній точці. Вирішення цього завдання пов'язане з розв'язанням рівнянь електродинаміки, що є майже неможливим у разі обробки харчових продуктів довільної форми та гетерогенної структури.

Раніше була отримана наближена формула (6.9) для розрахунку напруженості мікрохвильового поля, яка генерується на поверхні вологого діелектричного матеріалу, який обробляється в резонаторній НВЧ-камері. Цю формулу можна використовувати в разі виникнення стоячих хвиль у багатомодовому резонаторі. Але в деяких НВЧ-пристроях використовується біжуча хвиля від НВЧ-генератора, розташованого на відстані в декілька довжин хвиль від оброблюваного матеріалу. У цьому випадку використовувати формулу (6.9) не можна.

Якщо відстань перевищує довжину електромагнітної хвилі, то в цій зоні поле електромагнітної хвилі є тільки поперечним, його напруженість у певній точці залежить від відстані до НВЧ-генератора. У цьому випадку характерним розміром для визначення питомого потоку потужності є відстань від НВЧ-генератора, тому потік можна визначити як відношення потужності НВЧ-генератора до площі сфери радіусом R [8.1]:

$$P = \frac{P}{4\pi R^2}, \quad (8.1)$$

де R – відстань від НВЧ-генератора до поверхні діелектричного матеріалу, що обробляється.

Використовуючи рівняння (6.4), отримуємо напруженість електромагнітного поля на відстані R від НВЧ-генератора:

$$E = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{P}{4\pi\epsilon_0 c}} \quad (8.2)$$

Відповідно, ураховуючи граничні умови на поверхні діелектрика подібно до (6.9), отримуємо величину напруженості електромагнітного поля на поверхні діелектрика залежно від потужності НВЧ-генератора в режимі біжучої хвилі:

$$E_{i0} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{P}{4\pi\epsilon_0 c\sqrt{\epsilon}}} \quad (8.3)$$

Цю формулу можна використовувати для розрахунку напруженості електромагнітного поля в разі використання НВЧ-камери, де відстані між НВЧ-генератором і оброблюваним матеріалом більші, ніж довжина хвилі.

Нижче наведено розрахунки з використанням формул (6.9), (8.3) та (6.14), яка враховує зменшення напруженості електромагнітного поля за товщиною діелектрика. Розрахунки проводилися для діелектричних характеристик суміші подрібнених коренів прямих овочів та потужності НВЧ-генератора (500...3000 Вт), який працює в резонаторній камері та в камері біжучої хвилі.

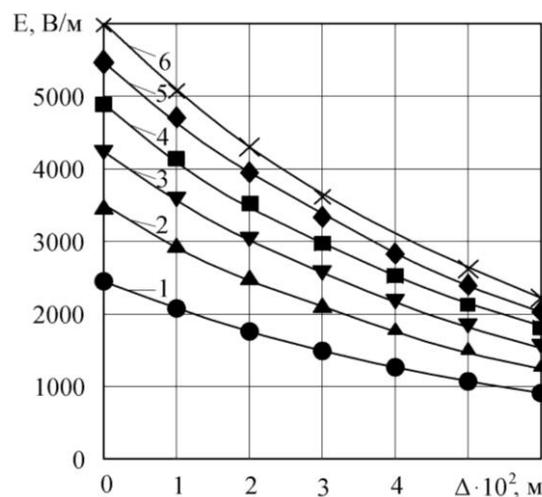


Рисунок 8.1– Напруженість електромагнітного поля в шарі суміші подрібнених коренів прямих овочів за потужності НВЧ-генератора в резонаторній камері (P , Вт): 1 – 500; 2 – 1000; 3 – 1500; 4 – 2000; 5 – 2500; 6 – 3000. Площа поверхні шару продукту 30 см^2

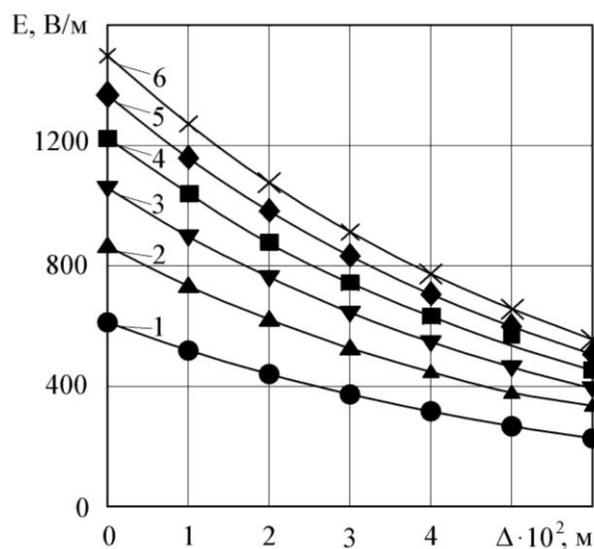


Рисунок 8.2– Напруженість електромагнітного поля в шарі суміші подрібнених коренів прямих овочів за потужності НВЧ-генератора в камері біжучої хвилі (P , Вт): 1 – 500; 2 – 1000; 3 – 1500; 4 – 2000; 5 – 2500; 6 – 3000. Площа поверхні шару продукту 30 см². Відстань до НВЧ-генератора 40 см

Згідно з наведеними розрахунками більші значення напруженості електромагнітного поля досягаються в резонаторній НВЧ-камері завдяки густішій концентрації енергії в об'ємі резонатора порівняно з НВЧ-камерою в режимі біжучої хвилі.

9. Кінетика тепломасообміну під час мікрохвильової обробки харчової сировини

Процеси, що відбуваються під час переробки харчової сировини в НВЧ-полі, є складними для теоретичного аналізу, бо з точки зору термодинаміки необоротних процесів це ряд сполучених явищ передачі маси, енергії, імпульсу в умовах неоднорідності й нелінійності середовища. Тому на практиці в технологічних та інженерних розрахунках використовуються наближені кінетичні моделі, отримані з рядом спрощень. Однак відсутність системного підходу до отримання таких моделей часто призводить до грубих помилок при складанні моделей і, як наслідок – невідповідність експерименту.

Внутрішній потік вологи під час сушіння описується відомим рівнянням А.В. Ликова:

$$j_m = -\rho_0 a_m \nabla w - \rho_0 a_{mT} \nabla T - \rho_0 a_p c_p^a \nabla P, \quad (9.1)$$

де ρ_0 —об'ємна концентрація сухих речовин;

∇w — градієнт вологовмісту;

∇T — градієнт температури;

∇p — градієнт тиску;

a_m — коефіцієнт дифузії вологи;

a_{mT} — коефіцієнт термічної дифузії вологи;

a_p — коефіцієнт конвективної фільтраційної дифузії;

c_p^a — коефіцієнт ємності вологого повітря в пористому тілі.

Для спрощення цього рівняння, зокрема у відомих працях із мікрохвильової обробки харчової сировини [9.1, 9.2], зроблено припущення, що основним механізмом масоперенесення є концентраційна дифузія вологи, а впливом термічної дифузії та фільтраційного перенесення можна знехтувати. Це припущення означає нехтування двох останніх доданків у рівнянні (9.1). Але виникає питання про те, чим пояснити значну інтенсифікацію масообміну при мікрохвильовому сушінні в рамках висловлених припущень, бо саме за таких спрощень рівняння (9.1) використовується для опису звичайного конвективного сушіння.

Аналіз експериментальних даних про коефіцієнти дифузії, включені в (9.1), показує, що має місце співвідношення, $a_p / a_m > 10 \dots 100$; $a_m / a_{mT} > 10 \dots 50$ [9.3]. Тобто основним джерелом інтенсифікації масообміну під час мікрохвильової обробки є саме градієнт надлишкового тиску пари, що виникає всередині тіла. Наявність цього градієнта тиску часто спостерігається на практиці, коли при досить великій потужності електромагнітного поля виникають викиди парогазової суміші з продукту і навіть його механічне руйнування.

З огляду на вищесказане розглянемо модель кінетики тепломасообмінних процесів у НВЧ-полі з урахуванням тиску пари всередині оброблюваного продукту. Для цього скористаємося фізичною моделлю кінетики, заснованої на рівнянні зберігання і перенесення середньої за об'ємом фізичної субстанції (маси, енергії, імпульсу) для колоїдних капілярно-пористих тіл [4.3].

Визначаючи основним механізмом перенесення маси під час НВЧ-обробки градієнт тиску парогазової суміші, будемо нехтувати дифузійним масоперенесенням під впливом градієнта вологовмісту і градієнта температури. Тоді рівняння для кінетики вологовмісту набуває такого вигляду:

$$R_V \rho_0 \frac{dw}{d\tau} = - \frac{\rho_0 a_p c_p^a}{R_V} \Delta p, \quad (9.2)$$

де $\Delta p = p - p_\infty$ – надлишковий тиск пари у вологому тілі; p – середній тиск в об'ємі тіла; p_∞ – тиск у навколишньому середовищі; $R_V = V/S$ – відношення об'єму тіла до його поверхні.

Конвективний потік вологи, спричинений градієнтом тиску, описується законом Дарсі, джерелом маси в цьому випадку є випаровування вологи в капілярах тіла під дією надвисокочастотного поля. З урахуванням зазначеного рівняння кінетики тиску набуває такого вигляду (докладне доведення цього рівняння подано в [9.4]):

$$R_V \rho_0 c_p^a \frac{dp}{d\tau} = - \frac{\rho_0 a_p c_p^a}{R_V} \Delta p + R_V \frac{\chi w}{\varepsilon''(0)} \frac{P_{СВЧ}}{V}. \quad (9.3)$$

У цьому рівнянні враховано залежність діелектричної проникності від вологовмісту у вигляді лінійної залежності:

$$\varepsilon'' = \chi w, \quad (9.4)$$

де χ – емпіричний коефіцієнт на основі експериментальних залежностей діелектричних характеристик від вологості продукту;

$\varepsilon''(0)$ – уявна частина відносної діелектричної проникності в початковий момент мікрохвильової обробки при $w(0) = w_\tau = 0$;

$P_{СВЧ}$ – потужність НВЧ-генератора.

Систему рівнянь (9.2–9.3) запишемо в безрозмірній формі.

$$\frac{dw^*}{d\tau} = -Ra k_{22} p^* , \quad (9.5)$$

$$\frac{dp^*}{d\tau} = k_{21} w^* - k_{22} p^* , \quad (9.6)$$

де $w^* = w/w_0$ – безрозмірний вміст вологи, w_0 – початковий вміст вологи;

$p^* = \Delta p / \Delta p_{\max}$ – безрозмірний тиск, Δp_{\max} – максимальний тиск усередині матеріалу;

k_{ij} – кінетичні коефіцієнти, які мають розмірність c^{-1} .

$$k_{21} = \frac{1}{Ra} \frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r} , \quad (9.7)$$

$$k_{22} = \frac{a_p}{R_V^2} , \quad (9.8)$$

де $Ra = c_p^a \Delta p_{\max} / w_0$ – число Рамзіна;

Q_m – питома НВЧ-потужність на 1 кг сухої речовини;

$Q_m = P_{СВЧ} / m_c$, m_c – маса сухих речовин у продукті;

r – прихована теплота пароутворення.

Розв’язок системи рівнянь (9.5–9.6) за початкових умов $w^*(0)=1$, $p^*(0)=0$ виглядає таким чином:

$$w^*(\tau) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Ra-1}{\sqrt{1+Ra \frac{k_{21}}{k_{22}}}} \right) e^{-\beta_1 \tau} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{Ra-1}{\sqrt{1+Ra \frac{k_{21}}{k_{22}}}} \right) e^{-\beta_2 \tau} , \quad (9.9)$$

$$p^*(\tau) = \frac{1}{2} \frac{k_{21}}{k_{22}} \frac{1}{\sqrt{1 + \text{Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}}} (e^{-\beta_1 \tau} - e^{-\beta_2 \tau}) \quad , \quad (9.10)$$

де

$$\beta_1 = \frac{1}{2} k_{22} \left(1 - \sqrt{1 + 4 \text{Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}} \right), \quad \beta_2 = \frac{1}{2} k_{22} \left(1 + \sqrt{1 + 4 \text{Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}} \right).$$

Рівняння (9.9–9.10) описують кінетику зміни вологовмісту й тиску під час мікрохвильової обробки продукту.

Отримаємо вираз для величини максимального надлишкового тиску парогазової суміші всередині продукту, що обробляється. Оскільки внутрішні джерела виникають миттєво при появі НВЧ-поля, то цей максимум досягається за дуже короткий час. Тому, розкладаючи вираз $dp^*/d\tau=0$ при $\tau \rightarrow 0$ і обмежившись лінійним членом, отримуємо час досягнення максимального тиску:

$$\tau_{kp} = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2} = \frac{1}{k_{22}}. \quad (9.11)$$

Максимальне значення тиску парогазової суміші в цей момент часу становить

$$\max(p^*) = \frac{1}{4} \frac{k_{21}}{k_{22}} \frac{\sqrt{1 + 4 \text{Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}}}{\sqrt{1 + \text{Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}}}. \quad (9.12)$$

З огляду на те, що для безрозмірного тиску за його визначенням $\max(p^*) = 1$, а також із урахуванням формул для кінетичних коефіцієнтів k_{12} , k_{22} , знаходимо взаємозв'язок між числом Рамзіна та режимами НВЧ-обробки:

$$\text{Ra} = \frac{R_V^2}{4a_p} \frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r} \frac{\sqrt{\frac{a_p}{R_V^2} + 4 \frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r}}}{\sqrt{\frac{a_p}{R_V^2} + \frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r}}} \quad (9.13)$$

Як видно з цієї формули, максимальний тиск газу всередині тіла під час мікрохвильової обробки збільшується зі збільшенням потужності НВЧ-генератора та характерних розмірів тіла і зменшується зі збільшенням коефіцієнта конвективної фільтраційної дифузії. За відомих значень структурно-механічних характеристик вираз (9.13) дозволяє оцінити гранично допустиму потужність НВЧ-установки, при якій зберігається механічна цілісність продукту.

Використовуючи такий самий підхід, отримано рівняння температурної кінетики при мікрохвильовій обробці харчової сировини у безрозмірній формі [9.4]:

$$\frac{dT^*}{d\tau} = -k_{31}T^* - \text{Ko} \frac{dw^*}{d\tau} + \text{Ko} \frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r} w^* \quad , \quad (9.14)$$

де $T^* = \Delta T / \Delta T_0 = (T - T_\infty) / (T_0 - T_\infty)$ – безрозмірна температура;

T_\square – температура навколишнього середовища; T_0 – початкова температура тіла; T^* – середня по об'єму тіла температура;

$$k_{31} = \frac{a}{R_V^2} \frac{\text{Bi}}{1 + \text{Bi}} \quad ; \quad (9.15)$$

$\text{Ko} = r(w_0 - w_\infty) / (c\Delta T_0)$ – число Коссовича,

c – зведена питома теплоємність, a – коефіцієнт теплопровідності,

Bi – число Біо.

Підставивши отримане рішення для кінетики вологовмісту (9.9) в рівняння (9.14), отримуємо диференціальне рівняння, рішення якого описує кінетику температури під час НВЧ-нагрівання:

$$T^*(\tau) = (1 - C_1 - C_2)e^{-k_{31}\tau} + C_1e^{-\beta_1\tau} + C_2e^{-\beta_2\tau}, \quad (9.16)$$

де

$$C_1 = \frac{Ko}{2} \left(1 - \frac{Ra-1}{\sqrt{1 + Ra \frac{k_{21}}{k_{22}}}} \right) \left(\frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r} + \beta_1 \right) \frac{1}{k_{31} - \beta_1}.$$

$$C_2 = \frac{Ko}{2} \left(1 + \frac{Ra-1}{\sqrt{1 + Ra \frac{k_{21}}{k_{22}}}} \right) \left(\frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r} + \beta_2 \right) \frac{1}{k_{31} - \beta_2}.$$

Принциповою особливістю отриманих рівнянь кінетики тепломасообміну під час мікрохвильової обробки є врахування впливу надлишкового тиску, що виникає в результаті реакції внутрішніх джерел теплоти під дією НВЧ-поля, і можливості його розрахунку. У практиці НВЧ-нагрівання часто виникає вибухоподібне розширення парогазової суміші, яке призводить до спотворення форми продукту, що обробляється, або його механічного пошкодження. Рівняння (9.13) дозволяє розрахувати максимальні механічні напруження, які при цьому виникають, а отже, визначити максимальну припустиму НВЧ-потужність для цього продукту.

Рівняння (9.9), (9.10), (9.16) дозволяють розрахувати кінетику вологовмісту, тиску і температури продукту за відомими теплофізичними й електрофізичними характеристиками, а також вирішити зворотне завдання – за відомою кінетикою термодинамічних параметрів процесу знайти значення кінетичних коефіцієнтів, а через них – теплофізичні й електрофізичні характеристики.

Розглянемо ще одну спрощену модель кінетики НВЧ-нагрівання, яку можна застосовувати для практичних розрахунків у випадку, якщо основним завданням є визначення тривалості нагрівання достатньо товстих виробів відносно глибини проникнення енергії електромагнітного поля (рис. 9.1).

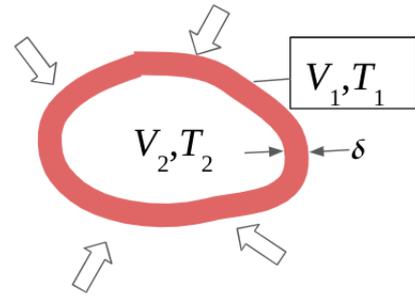


Рисунок 9.1– НВЧ-нагрівання продукту з розмірами, більшими за довжину проникнення електромагнітного поля

Для цього зробимо такі допущення:

–тіло має характерну товщину, що перевищує глибину проникнення електромагнітного поля, тому внутрішні джерела теплоти діють тільки у поверхневій частині об'єму тіла V_1 ;

–об'єм V_1 втрачає теплоту за рахунок конвекції в навколишнє середовище та за рахунок теплопровідності в бік внутрішнього об'єму;

–внутрішній об'єм тіла V_2 розігрівається виключно за рахунок теплоти, яка надходить від поверхневих шарів тіла.

На підставі рівняння кінетики перенесення фізичної субстанції [4.3] з урахуванням внутрішнього джерела теплоти отримаємо таку систему диференційних рівнянь:

$$c\rho V_1 \frac{dT_1}{d\tau} = -\alpha S_1(T_1 - T_\infty) - \frac{\lambda}{R_{V_2}} S_2(T_1 - T_2) + P, \quad (9.17)$$

$$c\rho V_2 \frac{dT_2}{d\tau} = \frac{\lambda}{R_{V_2}} S_2(T_1 - T_2), \quad (9.18)$$

де S_1 – площа зовнішньої поверхні, що охоплює об'єм V_1 ;

S_2 – площа поверхні внутрішнього об'єму $V_2, R_{V_2} = V_2/S_2$;

ρ – густина продукту;

c – питома теплоємність продукту;

T_1, T_2 – середні температури в об'ємах V_1, V_2 відповідно;

T_{∞} – температура навколишнього середовища;

P – НВЧ-потужність, яка поглинається всередині об'єму V_1 .

Щоб спростити розв'язання цієї системи, не будемо враховувати тепловий потік за рахунок теплопровідності λ , який значно менший за два інших потоки у правій частині системи рівнянь (9.17, 9.18).

$$\frac{dT_1}{d\tau} = -k_1(T_1 - T_{\infty}) + \omega, \quad (9.19)$$

$$\frac{dT_2}{d\tau} = -k_2(T_2 - T_1), \quad (9.20)$$

де $k_1 = \frac{\alpha}{c\rho R V_1}$; $\omega = \frac{P}{c\rho V_1}$; $k_2 = \frac{\lambda}{c\rho R V_2^2}$.

Характерні розміри, що входять у ці формули, зв'язані такими співвідношеннями:

$$R_{V_1} = \delta; \quad V_1 = \delta S; \quad R_{V_2} = R_V - \delta,$$

де $R_V = V/S$ – відношення об'єму до площі поверхні тіла.

Розв'язок першого рівняння з початковою умовою $T_1(0) = T_0$ має такий вигляд:

$$T_1 = \frac{\omega}{k_1} + \left(T_0 - \frac{\omega}{k_1} \right) \cdot e^{-k_1 \tau}. \quad (9.21)$$

Підставивши отримане рішення у (9.20), розв'язуємо друге рівняння з початковою умовою $T_2(0) = T_0$:

$$T_2 = \frac{\omega}{k_1} + \frac{T_0 k_1 - \omega}{k_1(k_2 - k_1)} \cdot \left(k_1 e^{-k_2 \tau} - k_2 e^{-k_1 \tau} \right). \quad (9.22)$$

Із формули (9.21) випливає тривалість НВЧ-нагрівання τ_{zom} до заданої температури T_{zom} у поверхневих шарах продукту:

$$\tau_{zom} = \frac{1}{k_1} \ln \left(\frac{T_0 k_1 - \omega}{T_{zom} k_1 - \omega} \right). \quad (9.23)$$

Температуру виробу в центральних шарах продукту T_2^{zom} можна визначити, якщо підставити τ_{zom} у формулу (9.22):

$$T_2^{zom} = \frac{T_{zom} k_1 - \omega}{k_1 (k_2 - k_1)} \cdot \left[k_2 - k_1 \left(\frac{T_{zom} k_1 - \omega}{T_0 k_1 - \omega} \right)^{\frac{k_2}{k_1} - 1} \right]. \quad (9.24)$$

Отримані рівняння дають можливість проводити ефективний аналіз технологічних процесів із використанням електромагнітних полів для пошуку раціональних технологічних режимів і вдосконалення розрахунку обладнання.

10. Експериментальні дослідження масообміну під час НВЧ-сушіння

Для дослідження масообміну під час НВЧ-сушіння за умов вакуумування та перемішування розроблено експериментальну установку, зовнішній вигляд якої наведено на рис. 10.1 [10.1]. Експериментальна установка складається з НВЧ-печі, у робочій камері якої розташована ємність із мішалкою. На верхній поверхні НВЧ-печі встановлено електропривод мішалки й тахометр, на боковій стінці закріплено вихідний трубопровід для відведення конденсату. У системі трубопроводів для відведення конденсату встановлено мановакуумметр і

конденсатовідвідник. Для регулювання відведення конденсату є вентиль. Вакуум підтримується за допомогою вакуумного насоса.



Рисунок 10.1 – Зовнішній вигляд експериментальної установки
НВЧ-сушіння та вакуумування

Як об'єкт дослідження обрано суміші подрібнених коренів прямих овочів. Під час зневоднення суміш від початкової вологості 85% досягала кінцевої вологості 14%, причому її консистенція змінювалася від рідкого до пастоподібного, а потім твердого (порошкоподібного) стану. Саме тому суміш у ємності перемішувалася за допомогою мішалки.

На рис. 10.2 подано результати дослідження впливу потужності НВЧ-нагрівання за глибини вакуумування 80 кПа на кінетику вологовмісту під час зневоднення суміші подрібнених коренів прямих овочів.

Згідно з наведеними даними тривалість процесу зі збільшенням потужності НВЧ-нагрівання в межах 0,5...2,0 кВт скорочується в 3,6...3,8 рази. Характер кінетичних кривих приблизно однаковий, близький до експоненціального в період концентрування суміші в рідкому стані ($W = 600...100\%$) та подальшого сушіння в рідко-твердому стані ($W = 100...10\%$). Водночас вплив потужності НВЧ-нагрівання на тривалість

процесу більш суттєвий у другому періоді, коли суміш знаходиться у твердо-рідкому стані.

На рис. 10.3 наведено результати дослідження впливу глибини вакуумування на кінетику вологовмісту досліджуваної сировини за незмінної потужності НВЧ-нагрівання (1,0 кВт) та різної глибини вакуумування в межах 80...40 кПа. Наведені залежності за різних значень глибини вакуумування є ідентичними за характером і різняться розбіжністю за часом досягнення певних значень вологовмісту, переважно на першій стадії процесу.

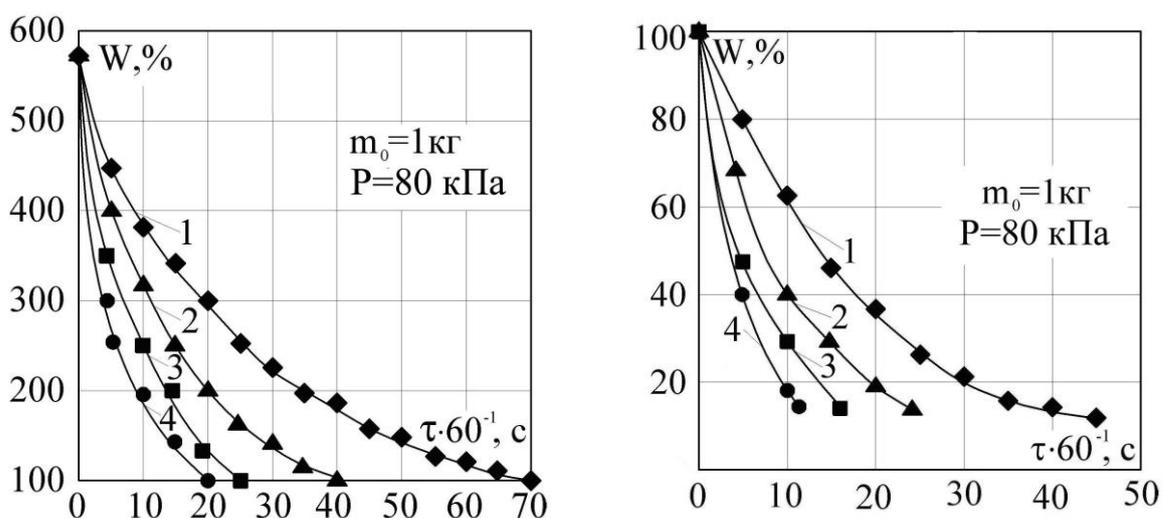


Рисунок 10.2 – Вплив НВЧ-потужності на кінетику зміни вологовмісту W під час НВЧ-сушіння суміші подрібнених коренів пряних овочів ($p=80$ кПа):

1 – $P=0,5$ кВт; 2 – $P=1,0$ кВт; 3 – $P=1,5$ кВт; 4 – $P=2,0$ кВт

Глибина вакууму знижує ефект вологовіддачі в першому періоді зневоднення, коли вільної вологи достатньо багато. Це зумовлено насамперед зниженням температури насичення пари зі зменшенням тиску, відповідно – зменшенням парціального тиску пари і, як наслідок, коефіцієнта дифузії в умовах вакуумування.

Проте на другому етапі зневоднення ($W = 100...10\%$), коли структура продукту змінює свій реологічний стан від рідкого до твердо-рідкого, глибина вакууму майже не впливає на тривалість сушіння. Це пояснюється тим, що тиск

пари в капілярах продукту стає менше насиченого за цієї температури і відповідає тиску менісків мікрокапілярів, що майже не залежить від температури. Тому коефіцієнт дифузії в мікрокапілярах не залежить від тиску у вакуумній системі, відповідно, збільшення глибини вакууму майже не впливає на інтенсивність масообміну.

Для пояснення особливостей кінетичних кривих під час НВЧ-сушіння та вакуумування проаналізуємо залежність швидкості сушіння від квадрата напруженості НВЧ-поля, яка прямо пропорційна тепловій потужності, що виділяється в продукті.

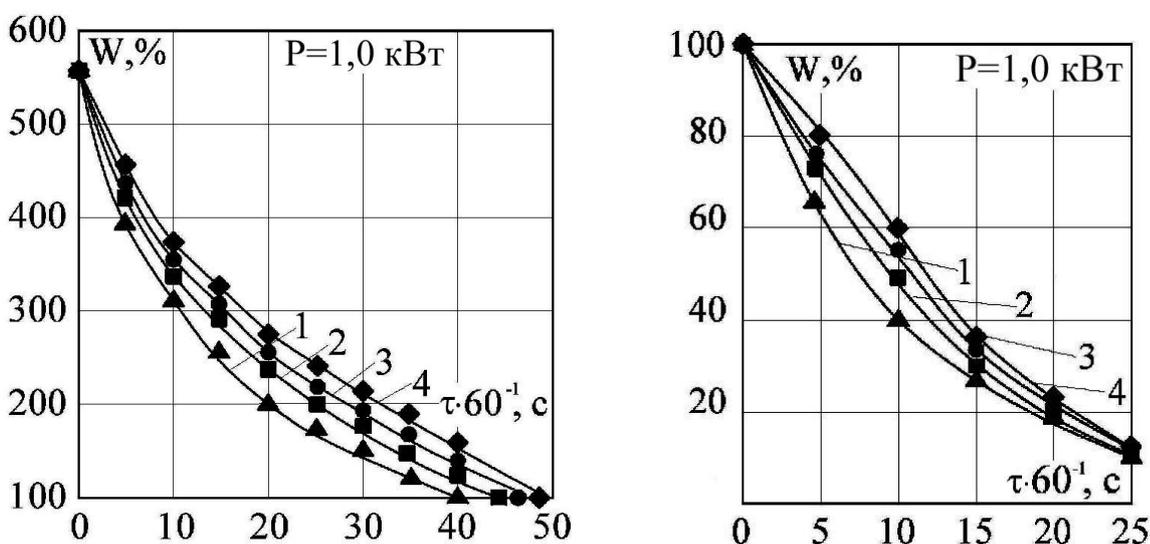


Рисунок 10.3 – Вплив глибини вакуумування на кінетику вологовмісту W під час НВЧ-сушіння суміші подрібнених коренів прямих овочів ($P=1$ кВт):

1 – $p=80$ кПа; 2 – $p=60$ кПа; 3 – $p=50$ кПа; 4 – $p=40$ кПа

Залежність швидкості сушіння від квадрату напруженості НВЧ-поля наведено на рис. 10.4, де напруженість електромагнітного поля розраховано за рівнянням (6.9) для рівнів потужності НВЧ-генератора $P = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ кВт. Наведені на рис. 10.4 лінії підтверджують пряму залежність між потужністю електромагнітного поля та інтенсивністю масообміну під час НВЧ-сушіння з вакуумуванням. Проте існує суттєва відмінність механізму взаємодії електромагнітного поля з гетерогенними системами, такими як досліджений продукт.

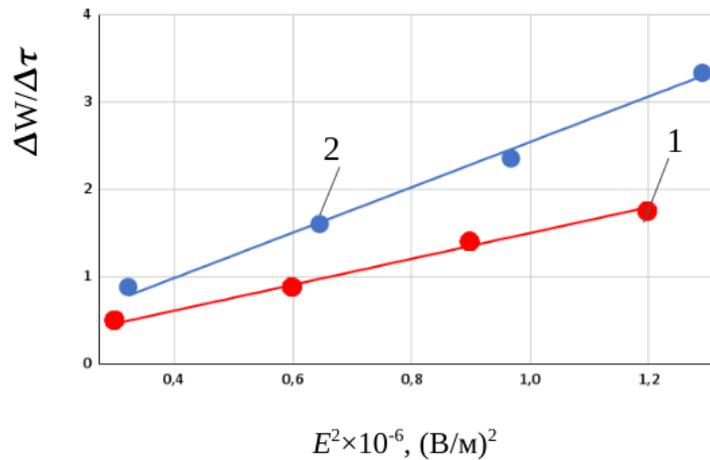


Рисунок 10.4 – Середня швидкість мікрохвильового вакуумного сушіння суміші подрібнених коренів прямих овочів залежно від квадрата напруженості НВЧ-поля: 1 – рідкий стан суміші ($W = 600 \dots 100\%$); 2 – твердо-рідкий стан суміші ($W = 100 \dots 10\%$)

Згідно з отриманими даними коефіцієнт дифузії в рідкому стані суміші ($W = 600 \dots 100\%$) залежить від температури, яка під час кипіння є величиною сталою за постійного тиску. Випаровування відбувається з вільної поверхні суміші у стані насиченої пари. Тому основним механізмом дії НВЧ-поля в цьому періоді зневоднення є об'ємне нагрівання з утворенням конвекційного потоку маси під дією надлишкового тиску.

У другому періоді зневоднення ($W = 100 \dots 10\%$) середня швидкість сушіння приблизно в 1,5 разу більша, ніж у першому періоді. У цьому діапазоні вологовмісту суміш перебуває у твердо-рідкому стані, а волога – переважно у зв'язаному стані. Через значну різницю в діелектричних характеристиках вільної та зв'язаної води має місце різний характер дії НВЧ-поля.

Як зазначалося в розділах 3 та 4, для зв'язаної води основним ефектом є орієнтаційна поляризація, яка призводить до зменшення енергії зв'язку та збільшення коефіцієнта молекулярної дифузії зі збільшенням потужності електромагнітного поля. У другому періоді зневоднення суміш має твердо-рідкий стан, причому внаслідок перемішування суттєво збільшується площа

поверхні масообміну, на відміну від випаровування тільки з вільної поверхні суміші в рідкому стані. Це збільшення площі разом зі збільшенням впливу НВЧ-поля на коефіцієнт дифузії призводить до більшої інтенсивності зневоднення у другому періоді мікрохвильового вакуумного сушіння.

11. Обробка харчової сировини інфрачервоним випромінюванням

Обробка харчових продуктів інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням полягає в інтенсивному поглинанні основної частини променевої енергії вільною водою, яку містить структура харчових продуктів. Використання ІЧ-випромінювання інтенсифікує харчові процеси внаслідок значного зростання щільності променевого потоку на поверхні продукту, а також проникнення теплової енергії всередину матеріалу.

Головною перевагою ІЧ-нагрівання є скорочення терміну теплової обробки, що зменшує енерговитрати та підвищує якість продукту – зменшуються втрати маси продукту та швидкість перебігу небажаних фізико-хімічних змін. Обмеження інтенсифікації ІЧ-жарення зумовлено тим, що за високої щільності випромінювання поверхня може перегрітися та з'являться «опіки», які значно погіршують якість готових виробів. Крім того, як за будь-якої взаємодії електромагнітного поля з продуктом, має місце нерівномірність розподілу енергії за об'ємом продукту, оскільки глибина проникнення поля в середовищі залежить від довжини хвилі. Для ІЧ-випромінювання з довжиною хвилі 10^{-6} м глибина проникнення не перевищує 1 мм. Тому у випадку ІЧ-жарення має місце тільки поверхнєве радіаційне нагрівання, а рівномірність розподілу енергії повністю визначається геометрією взаємного розташування джерела ІЧ-випромінювання та приймача. Для якісної та енергоефективної ІЧ-обробки потрібно створити рівномірну щільність променевого потоку на поверхні продукту та мінімізувати втрати теплоти.

Найпоширенішими ІЧ-установками для жарення харчових продуктів є грилі, шафи, печі та ін. Основними елементами апаратів ІЧ-нагрівання є камера,

випромінювачі (світлі або темні, до спектра яких входить зона відповідно видимих або невидимих променів) і прилади регулювання. Головною проблемою під час розробки ПЧ-установок є профілювання рефлекторів для рівномірного опромінювання продукту.

Сьогодні завдання про опромінювання приймача опуклого профілю (який найбільше відповідає геометрії продукту) розв'язується емпірично [11.1, 11.2]. Як наслідок, існуюче ПЧ-устаткування харчових виробництв у багатьох випадках є невиправдано енергоємним і малоефективним.

Інші дослідники цієї проблеми використовували методики, що не забезпечували рівномірного опромінювання приймача опуклого профілю [11.3–11.6] через наявність так званого «затінку», куди не потрапляло пряме опромінення. Раніше на підґрунті розв'язку зворотної задачі опромінювання було створено методику визначення профілів відбивачів для рівномірного опромінювання напівеліпсу [11.7, 11.8]. Як теплоприймач обрано напівеліпс (рис. 11.1), чия форма найбільше наближена до перерізу м'ясного порційного напівфабрикату (біфштекса та лангета).

Рівномірного розподілу енергії по поверхні теплоприймача можна досягти, якщо нерівномірний розподіл густини прямого потоку, що потрапляє на теплоприймач, скомпенсувати відбитим від поверхні потоком.

Прямий потік q_1 потрапляє лише на ділянку CD , обмежену дотичними від випромінювача до напівеліпса (рис. 11.1). Отже, у зонах «затінку» AC та BD максимальне значення сумарного випромінювання q відповідає значенню відбитого потоку q_2 . У зоні впливу прямого потоку CD треба зменшувати відбитий, щоб складання значень прямого q_1 та відбитого q_2 потоків дало незмінне значення сумарного q .

Розроблена аналітична методика дає можливість отримати рівняння профілю рефлектора, якій відповідає рівномірному розподілу результуючого потоку на поверхні продукту.

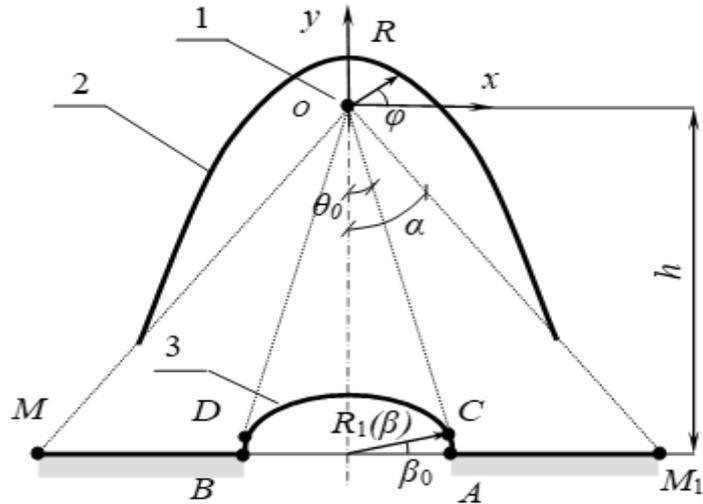


Рисунок 11.1 – Схема теплотехнічної системи:

1 – випромінювач; 2 – відбивач; 3 – приймач теплоти

Отримано диференціальне рівняння, яке пов'язує координати точок поверхні рефлектора та приймаючої поверхні, що забезпечують рівномірне ІЧ-випромінювання:

$$\frac{d\rho}{d\beta} = -\rho \frac{(\rho_1 - \rho) \cos \varphi + \xi(\beta)}{(\rho_1 + \rho) \sin \varphi - \eta(\beta)} \Psi(\beta), \quad (11.1)$$

де

$$\Psi(\beta) = \frac{d\varphi}{d\beta}, \quad \rho = \frac{R(\beta)}{a}, \quad \xi(\beta) = \frac{m \cos(\beta)}{D(\beta)}, \quad \eta(\beta) = \frac{m \sin \beta}{D_1(\beta)} - \chi, \\ \rho_1 = \sqrt{(\rho \cos \varphi - \xi(\beta))^2 + (\rho \sin \varphi - \eta(\beta))^2}. \quad (11.2)$$

$$\xi = \frac{x}{l}, \quad \eta = \frac{y}{l}, \quad \chi = \frac{h}{l}, \quad m = \frac{b}{l},$$

Символами $\rho(\beta) = \frac{R(\beta)}{l}$, $\rho_1(\beta) = \frac{R_1(\beta)}{l}$ позначено відносну радіальну координату поверхні приймача та відносну радіальну координату поверхні рефлектора. Характер і значення густини випромінювання прямого q_1 , відбитого q_2 та сумарного q потоків залежно від безрозмірної відносної координати приймача l наведено на рис. 11.2–11.4.

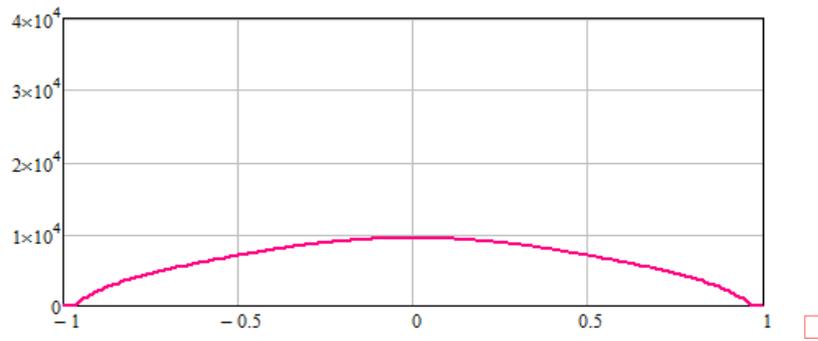


Рисунок 11.2 – Значення прямого потоку ГЧ-випромінювання

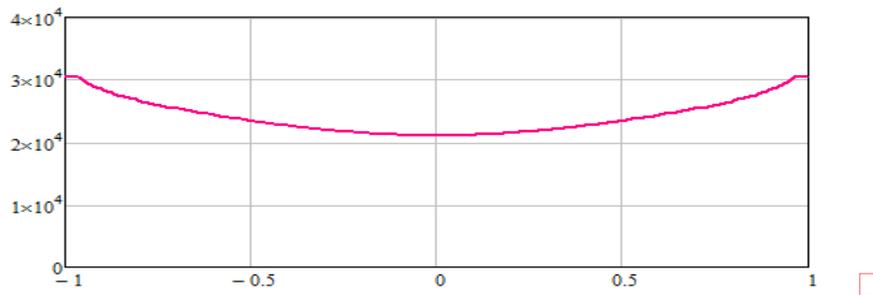


Рисунок 11.3 – Значення відбитого потоку ГЧ-випромінювання



Рисунок 11.4 – Значення сумарного потоку ГЧ-випромінювання

Згідно з розробленою методикою променевий потік рівномірно розподіляється на напівеліптичній поверхні з такою густиною:

$$q = \frac{P}{\pi L} (\pi + \alpha) \times \frac{1}{l_B}, (11.3)$$

де α – половина кута, в якому поширюються промені, що не потрапляють на рефлектор; θ – половина кута, в якому поширюються промені, що потрапляють

на приймач; P – потужність випромінювача; L – довжина половини еліпса; l_B – довжина випромінювача.

Нижче наведено результати експерименту й аналітичного моделювання ПЧ-жарення м'ясних напівфабрикатів із використанням апарата з рефлектором для апарату АРЖМ-0.07-1 [11.9]. Загальний вигляд апарата АРЖМ-0.07-1 наведено на рис. 11.5. Як нагрівач використано випромінювач КИ 220-1000-1, у якого напруга живлення становить 220 В, потужність 1000 Вт, температура випромінювача 2540...2580 К, діаметр спіральної ділянки випромінювача 1,3 мм, довжина спіральної ділянки випромінювача 260 мм, діаметр скляної трубки 10,75 мм, довжина трубчастої частини 295 мм. Сталеві ґрати розміром 375x210 мм устанавлюються на відстані 90 мм від осі випромінювача.

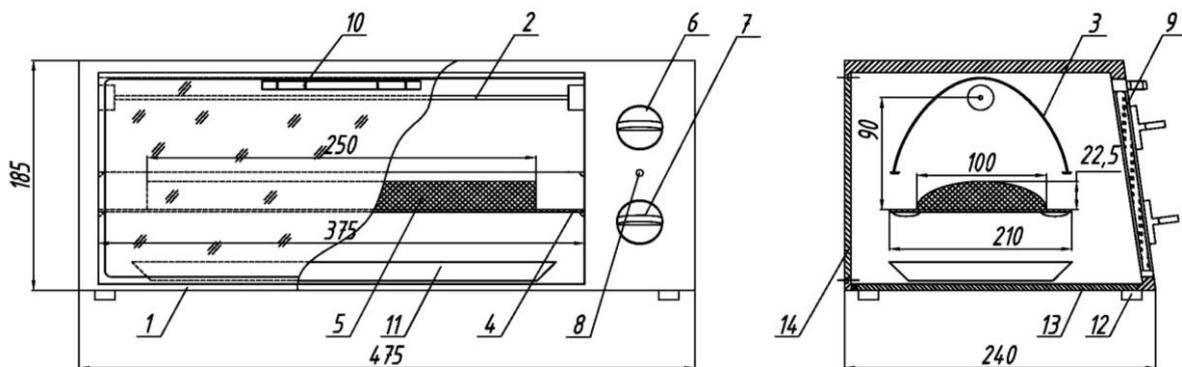


Рисунок 11.5 – Загальний вигляд апарата АРЖМ-0.07-1:

1 – корпус; 2 – випромінювач; 3 – рефлектор; 4 – ґрати; 5 – продукт;
6 – регулятор потужності; 7 – таймер; 8 – індикаторна лампа; 9 – скляні
дверцята; 10 – ручка дверцят; 11 – деко; 12 – ніжки; 13 – відкидний піддон;
14 – знімна кришка

Рефлектор виготовлено з полірованого листа алюмінію розмірами 375x214 мм, що відповідає довжині випромінювача та ширині робочої камери й визначається розв'язком оберненої задачі опромінювання для цієї теплової системи.

Для визначення температурного поля використано датчики температури [11.10] з термопарами хромель-алюмель, зроблені зі сталі 18ХН10Т. Виключення похибки, викликаної стоком теплоти проводами термопар та

розтяжками кріплення приймача в корпусі датчика, забезпечується виконанням розтяжок та робочої ділянки термопар з проволочки діаметром 0.2 мм. За термопарою встановлено екран із полірованого алюмінію з метою виключення стоку тепла випромінюванням із задньої стінки приймача на інші елементи датчика і для підвищення ступеня поглинання. Зачорнений датчик закріплено на вимірювальній панелі стійками малого перерізу, що зменшує стік теплоти (рис. 11.6). Монтаж стійки з датчиками здійснено на відстані 67.5 мм від випромінювача (верхня точка перерізу продукту).

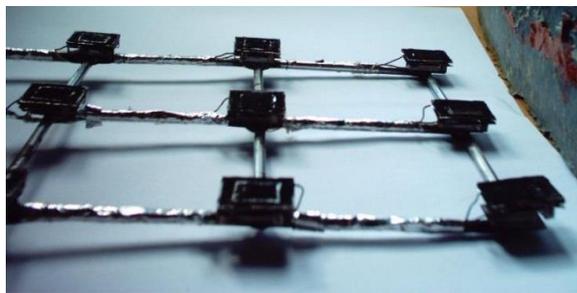


Рисунок 11.6 – Загальний вигляд рамки з датчиками ІЧ-поточку

Нерівномірність температурного поля на поверхні приймача ІЧ-випромінювання визначалася шляхом співставлення кольорового зображення поверхні приймача (рис. 11.7) із даними термопар. Оцифровані результати цього експерименту наведено на рис. 11.8.



а



б

Рисунок 11.7 – Фотографії теплоприймача під час ІЧ-опромінювання:

а – без рефлектора; б – з рефлектором оптимального профілю

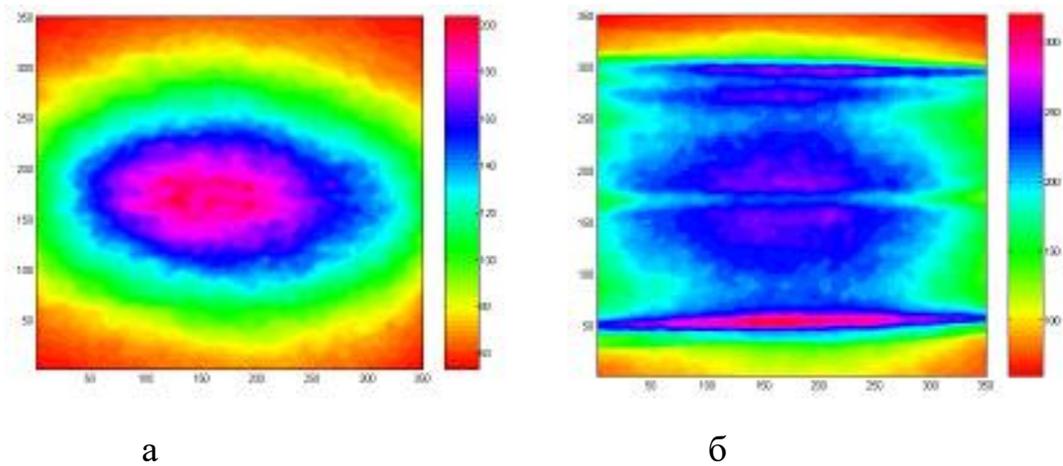


Рисунок 11.8 – Оцифровані поля температур теплоприймача:

а – діаграма температурного поля без рефлектора;

б – діаграма температурного поля з рефлектором оптимального профілю

Порівняння отриманих результатів фізичного й аналітичного моделювання ІЧ-опромінювання опуклого продукту доводить ефективність створеної методики визначення профілю відбивача променевого потоку. Апарат із рефлектором для жарення м'ясних напівфабрикатів АРЖМ-0.07-1 (рис. 11.9) забезпечує на поверхні продукту рівномірну густину променевого потоку значенням (30 ± 0.34) кВт/м².



Рисунок 11.9 – М'ясний напівфабрикат в апараті АРЖМ-0.07-1

Для забезпечення енергетичної ефективності ІЧ-жарення, яке є складним теплообмінним процесом, треба мати методику інженерного розрахунку

температур продукту та тривалості процесу. Отримаємо таку методику на прикладі розробленого апарата для жарення м'ясних напівфабрикатів АРЖМ-0.07-1 [11.11].

Основні допущення щодо моделі апарата для жарення м'ясних напівфабрикатів полягають у наступному:

- електромагнітна енергія поглинається нескінченно малим поверхневим шаром продукту, що відповідає випадку теплообміну із заданим потоком теплоти (граничні умови II роду);
- втрати теплоти з поверхні продукту спричинені конвективним теплообміном із довкіллям незмінної температури (граничні умови III роду);
- унаслідок взаємодії цих двох потоків та малої інертності ІЧ-нагрівання температура поверхні продукту зростає швидше, ніж внутрішніх шарів, які нагріваються лише завдяки теплопровідності;
- втрати маси продукту під час нагрівання вважатимемо малими порівняно з енергією, витраченою на нагрівання, та не враховуватимемо;
- підведення теплоти здійснюється з одного боку (верхня поверхня продукту), втратами теплоти з нижньої поверхні продукту нехтуємо;
- густину потоку ІЧ-випромінювання на поверхні продукту вважатимемо рівномірно розподіленою завдяки використанню рефлектора оптимального профілю.

Запишемо диференціальне рівняння теплового балансу для внутрішніх шарів продукту, які нагріваються завдяки теплопровідності з урахуванням геометрії продукту:

$$c \rho V \frac{dT}{d\tau} = \frac{2 K_F \lambda}{R_x} S (T_S - T), \quad (11.4)$$

де c – питома теплоємність продукту; ρ – густина продукту; λ – коефіцієнт теплопровідності продукту; V – об'єм продукту; S – площа верхньої поверхні продукту; T_S – середня температура поверхні; T – середня температура внутрішніх шарів; τ – час.

Коефіцієнт форми K_F враховує геометрію теплоприймача згідно з [4.3]:

$$K_F = 1 + \frac{R_x}{R_y} + \frac{R_x}{R_z}, \quad (11.5)$$

де R_x – половина товщини продукту; R_y та R_z – половина розміру продукту за двома іншими координатами (R_x , R_y , R_z взаємно перпендикулярні).

Рівняння теплового балансу на поверхні продукту з урахуванням граничних умов, які враховують потік ІЧ-випромінення та конвективні втрати тепла, має такий вигляд:

$$\frac{2 K_F \lambda}{R_x} S (T_S - T) = -\alpha S (T_S - T_A) + \eta P_E, \quad (11.6)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; S – площа зовнішньої поверхні продукту; T_S – середня температура поверхні; T_A – температура повітря всередині апарата; η – коефіцієнт поглинання випроміненої потужності; P_E – потужність ІЧ-випромінювача.

Із рівняння (11.6) знаходимо середню температуру поверхні продукту:

$$T_S = \frac{T + \frac{\eta P_E R_x}{2 K_F S \lambda} + \text{Bi}_F T_A}{\text{Bi}_F + 1}. \quad (11.7)$$

Підставляємо вираз (11.7) у рівняння (11.4), отримуємо диференціальне рівняння кінетики температури

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{2 K_F \lambda}{c \rho R_y R_x} \frac{\text{Bi}_F}{\text{Bi}_F + 1} \left(\frac{\eta P_E}{\alpha S} + T_A - T \right), \quad (11.8)$$

де R_V – відношення об'єму продукту до площини його поверхні;
 $Bi_F = (R_x / (2 K_F \lambda))$ – модифіковане число Біо.

Розв'язок цього рівняння з початковою умовою $T(0) = T_0$ має вигляд:

$$T = \frac{\eta P_E}{\alpha S} + T_A - \left(T_0 - \frac{\eta P_E}{\alpha S} - T_A \right) \cdot \exp \left(- \frac{2 K_F \lambda}{c \rho R_x R_V} \frac{Bi_F}{Bi_F + 1} \tau \right). \quad (11.9)$$

Рівняння (11.9) описує кінетику середньої температури внутрішніх шарів продукту з плином часу.

Якщо задати середню потрібну температуру всередині продукту (температура готовності), то з рівняння (11.9) можна знайти потрібний час жарення:

$$\tau_R = \frac{c \rho R_x R_V}{2 K_F \lambda} \cdot \left(\frac{Bi_F + 1}{Bi_F} \right) \cdot \ln \left(\frac{T_A - T_R + \frac{\eta P_E}{\alpha S}}{T_A - T_0 + \frac{\eta P_E}{\alpha S}} \right), \quad (11.10)$$

де τ_R – час жарення; T_R – середня температура готовності внутрішніх шарів продукту.

Використаємо дані апарата АРЖМ-0.07-1, де приймачем тепла є м'ясний напівфабрикат із нормальним перерізом у вигляді напівеліпса (рис. 11.9). Половини осей напівеліпса напівфабрикату $a = 0.05$ м та $b = 0.0225$ м, довжина напівфабрикату $L_p = 0.2$ м.

Довжина напівеліпса $L_h = \pi (a+b) / 2 = 3.14 (0.05+0.0225) / 2 = 0.114$ м.

Площина напівеліпса $A = \pi a b / 2 = 3.14 \times 0.05 \times 0.0225 / 2 = 1.767 \times 10^{-3}$ м².

Площина верхньої поверхні напівфабрикату становить $S = L_h L_p = 0.114 \times 0.2 = 0.023$ м². Об'єм напівфабрикату $V = A L_p = 1.767 \times 10^{-3} \times 0.2 = 0.35 \times 10^{-3}$ м³.

Приймаємо $R_x = b = 0.0225$ м, $R_y = a = 0.05$ м, $R_z = L_p / 2 = 0.2 / 2 = 0.1$ м. Коефіцієнт форми (11.5) набуває значення

$$K_F = 1 + \frac{0.0225}{0.05} + \frac{0.0225}{0.1} = 1.675 \quad (11.11)$$

У рівнянні (11.4) питома теплоємність яловичини $c = 3.5 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), густина яловичини $\rho = 1100$ кг/м³, коефіцієнт теплопровідності яловичини $\lambda = 0.5$ Вт/(м²·К) [11.12].

У рівнянні (11.6) коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 20$ Вт/(м²·°С), температура повітря всередині апарату $T_A = 20$ °С, коефіцієнт поглинання випроміненої потужності $\eta = 0.2$, потужність ПЧ-випромінювача $P_E = 1000$ Вт.

У рівнянні (11.8) $R_V = V/S = 0.35 \cdot 10^{-3} / 0.023 = 0.016$ м, модифіковане число Біо $Bi_F = (R_x / (2 K_F \lambda)) = 20 \cdot 0.0225 / (2 \cdot 1.675 \cdot 0.5) = 0.269$.

На рис. 11.10 наведено розраховану в програмному комплексі MathCAD кінетику середньої температури внутрішніх шарів продукту T та поверхні продукту T_S за заданої початкової температури внутрішніх шарів продукту $T_0 = 5$ °С та температури готовності внутрішніх шарів продукту $T_R = 75$ °С.

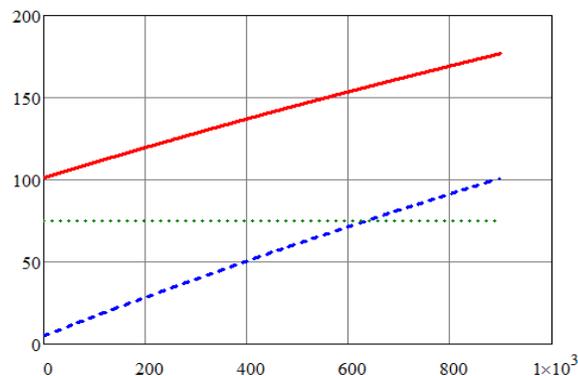
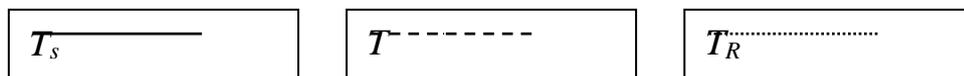


Рисунок 11.10 – Кінетика температури:



Час готовності продукту (11.10) становить $T_R = 634.5$ с, тобто 10.6 хв. Під час жарення м'ясних напівфабрикатів у апараті АРЖМ-0.07-1 готовність продукту наставала через 8...10 хвилин після жарення з кожного боку, що в межах припустимої похибки збігається з розрахунками. Незначна розбіжність

результатів є наслідком неврахованих теплових втрат із нижньої поверхні продукту та втрат маси під час жарення.

12. Дослідження процесу пастеризації молока інфрачервоним електронагріванням

12.1. Теоретичні основи пастеризації в установках непрямого нагрівання

Пастеризація молока є результатом інтегрального тепло- вологовпливу на молоко, незалежно від способу підведення теплоти. Температурно-часові параметри процесу повністю залежать від способу підведення тепла до мікроорганізмів, що знаходяться в молоці та спричиняють його псування (бактерії бродіння) або роблять молоко джерелом захворювань (патогенна флора молока, наприклад, збудники туберкульозу, бруцельозу, лейкозу).

Завдяки різній термостійкості окремих видів мікробів, інактивація кожного виду настає за певної тривалості впливу температури. Причому ці фактори можуть змінюватися.

За законом інтегрального теплового ефекту пастеризація молока може бути тривалою, тобто процес пригнічення мікроорганізмів відбувається при певній температурі θ протягом часу t , або короткочасною (миттєвою). У другому випадку інактивація мікроорганізмів є результатом впливу змінної температури без будь-якої витримки.

В основі вибору існуючих режимів пастеризації молока лежить логарифмічна залежність тривалості процесу від температури, отримана з діаграми, що відображає вплив тепла на мікрофлору молока та його фізико-хімічні властивості (рис. 12.1). По осі абсцис відкладено час у хвилинах, по осі ординат – температуру в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$). Функціональна залежність (рис. 12.2) визначає існуючі режими пастеризації молока з використанням традиційних теплових (пароводяних) апаратів [12.1].

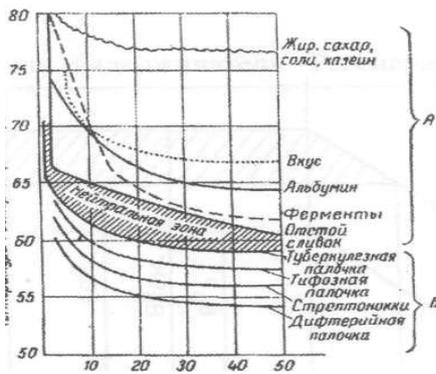
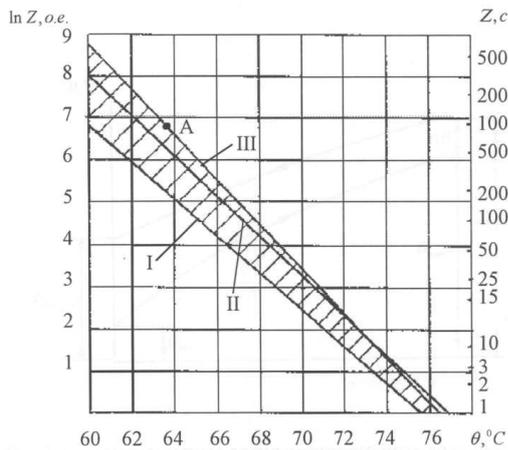


Рисунок 12.1 – Графіки залежності температури пастеризації від тривалості та змін фізико-хімічних властивостей молока [12.1]



Ділянка, виділена на рис. 12.2, забезпечує запас по тривалості 20 хв та по температурі 3,3°C.

Рисунок 12.2 – Графіки режимів пастеризації молока

Аналітичну залежність $\tau=f(T)$

виражено рівнянням:

$$\ln \tau = \alpha - \beta \cdot T \quad (12.1)$$

де α і β – постійні коефіцієнти, що залежать від компонентів продукту та піддаються тепловому впливу, в.о.

Рівняння кривої, що характеризує умови пригнічення мікобактерій туберкульозу, виведене із цієї залежності, має вигляд:

$$\ln \tau = 33,543 - 0,444T \quad (12.2)$$

Крива, що відповідає початку фізико-хімічних змін у молоці, виражається формулою:

$$\ln \tau = 40,764 - 0,534T \quad (12.3)$$

Процеси, які відбуваються між цими двома граничними лініями характеризуються рівнянням

$$\ln \tau = 36,84 - 0,48T \quad (12.4)$$

та відповідають існуючим режимам пастеризації, при яких мікроорганізми пригнічуються, а молоко зберігає свою природну якість.

Необхідною умовою пастеризації є режими, за яких кожна частинка молока піддається повному тепловому впливу, що залежить від виду підведення теплоти до неї та від характеру руху молока в пастеризаційному апараті.

Наведені графічні й аналітичні залежності правильні для непрямого впливу на мікроорганізми, бо нагріванню піддається молоко і тільки через нього тепло передається мікроорганізмам. Використання безпосереднього підведення тепла для вибіркового впливу на мікроорганізми може внести суттєві корективи до цих залежностей. На принципі непрямого підведення теплової енергії теплопровідністю та конвекцією працюють традиційні існуючі пастеризатори.

Широко застосовуються ємнісні та проточні пастеризатори. Проточні пастеризатори більш енергоефективні та краще зберігають природну якість молока. Математична модель пастеризації проточного апарата при непрямому нагріванні молока має враховувати якісні та кількісні характери явищ і може бути представлена рівнянням (12.4) або рівнянням, запропонованим професором Г.А. Куком [12.1]:

$$Pa_{наст} + Pa_{випр} + Pa_{рег} \geq 1, \quad (12.5)$$

де Pa є критерієм Пастера, що вказує на завершення пастеризації на різних етапах теплової обробки продукту.

$$Pa = \int \frac{d\tau}{z}, \quad (12.6)$$

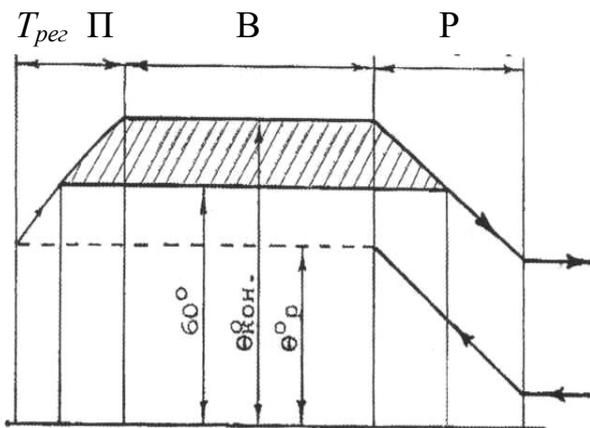
де τ – час дійсного теплового впливу, с;

z – час впливу, достатній для знищення мікроорганізмів, с.

Якщо $\tau = z$, пастеризація завершилася; якщо $\tau > z$, то на процес витрачається надлишок часу; якщо $\tau < z$, процес завершено частково.

Рівняння (12.5) виражає, таким чином, умову завершення пастеризації в існуючих апаратах, основними елементами яких є секція пастеризації ($Pa_{паст}$), витримувач ($Pa_{випр}$) та регенератор ($Pa_{рег}$).

Такі апарати є установками змішаного типу, де молоко підігрівається в регенераторі (Р) до температури $T_{рег}$ (рис. 12.3), потім догрівається в секції пастеризації (П) до $T_{кін}$, при цьому температура пастеризації постійно змінюється. Далі молоко надходить до витримувача (В) (ізотермічне протікання рідини), потім знову до регенератора (Р), де температура також постійно змінюється, причому до відомої межі 59...60°C, поки вона може пригнічувати мікрофлору.



Відповідно до рис. 12.3 інтегральний ефект змінного теплового пастеризатора лежить у межах від 60°C до $T_{кін}$ і виражається як

$$Pa = \int_{60}^{T_{кін}} \frac{d\tau}{z}. \quad (12.7)$$

Рисунок 12.3 – Температурна схема агрегату [12.1]

Потім гаряче молоко витримується за постійної температури у витримувачі з ефектом пастеризації

$$Pa_{випр} = \frac{\tau_{випр}}{z_{випр}}, \quad (12.8)$$

нарешті, молоко піддається впливу в низхідній частині регенератора з ефектом

$$Pa_{pez} = \int_{T_{кин}}^{60} \frac{d\tau}{z}. \quad (12.9)$$

Отже, ефект пастеризації буде повним, якщо сума часткових ефектів у різних ланках агрегату дорівнює одиниці або перевищує її. Більш повно рівняння (12.5) можна представити так:

$$\int_{60}^{T_{кин}} \frac{d\tau}{z} + \frac{\tau_{випр}}{z_{випр}} + \int_{T_{кин}}^{60} \frac{d\tau}{z} \geq 1. \quad (12.10)$$

Зменшення витрат електричної енергії можна отримати, використовуючи додатковий пастеризаційний ефект у висхідній частині регенератора, тобто

$$Pa = \int_{60}^{T_{pez}} \frac{d\tau}{z}. \quad (12.11)$$

Тоді рівняння (12.10) перетворюється в таке:

$$\int_{60}^{T_{pez}} \frac{d\tau}{z} + \int_{60}^{T_{кин}} \frac{d\tau}{z} + \frac{\tau_{випр}}{z_{випр}} + \int_{\Theta_{кин}}^{60} \frac{d\tau}{z} \geq 1. \quad (12.12)$$

Залежно від типу пастеризаційної камери та регенератора (прямотечійний, протитечійний) додатково вводяться рівняння, що описують відповідний процес теплопередачі.

У результаті розрахунку можна отримати вирази, що характеризують залежність між часом, достатнім для завершення пастеризації, та температурою. Приклад для традиційного теплового пастеризатора, що використовує як теплоносій гарячу воду [12.1]:

$$\tau_n = \ln \frac{\Omega - 60}{\Omega - T_{кін}} \times \frac{e^{(\alpha - \beta\Omega)}}{[-E_i(x)]}, \quad (12.13)$$

де τ_n – достатній час при конвективній пастеризації (теплоносій – гаряча вода, пара, ТЕН тощо), с;

$T_{кін}$ – кінцева температура пастеризації, °С;

Ω – параметр, що враховує умови пастеризації, °С;

$[-E_i(x)]$ – функція, що визначається методом Ейлера [12.5], в.о.

$$\Omega = \frac{\frac{G_{м.н.}}{G_M} \cdot \Theta_{поч.т.н.} - c \cdot \Theta_{кін}}{\frac{G_{м.н.}}{G_M} - c}, \quad (12.14)$$

де $T_{поч.т.н.}$ – початкова температура теплоносія, °С;

$\frac{G_{м.н.}}{G_M}$ – відношення витрат теплоносія до витрат молока, що

пастеризується, в.о.; c – питома теплоємність молока, Дж/кг · °С.

Якщо врахувати, що відповідно до рис. 12.4 $T_{поч.т.н.}$ дорівнює

$$T_{поч.т.н.} = T_{кін} + \Delta T,$$

то

$$\Omega = \frac{\frac{G_{м.н.}}{G_M} \cdot \Delta T}{\frac{G_{м.н.}}{G_M} - c}, \quad -\beta(\Omega - T_{кін}) = \beta \frac{\frac{G_{м.н.}}{G_M} \cdot \Delta T}{\frac{G_{м.н.}}{G_M} - c},$$

причому для цього апарата $\frac{G_{м.н.}}{G_M}$, ΔT і межа функції $E_i(x)$ залишаються постійними, то розрахунок можна значно спростити.

Функціональний зв'язок виразу (12.13) не залежить від розмірів апарату і швидкості переміщення рідини. Однак тип апарату визначає вид множника.

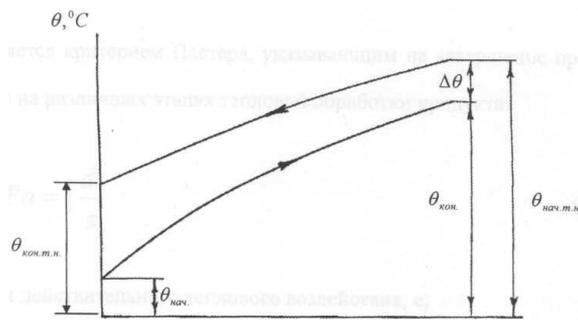


Рисунок 12.4 – Температурна схема протитечійних водонагрівних пастеризаторів [12.1]

Основний зв'язок між тривалістю і кінцевою температурою пастеризації отримано, виходячи з умов, що молоко, яке протікає через пастеризатор, нагрівається відповідно до законів теплопередачі, залежно від параметрів конкретного процесу: витраті води або пари та їх температури, характеру руху пастеризованого молока та теплоносія. При цьому для тривалої пастеризації врахування законів руху рідини необов'язкове, для короткочасної – дуже важливе.

Визначення коефіцієнтів теплопередачі з урахуванням характеру руху пастеризованої рідини полегшується теорією подібності, яка встановлює умови, за яких два процеси протікатимуть у механічному та тепловому відношенні аналогічно.

Якщо пастеризоване молоко перебуватиме в тепловому полі час, який менше t_n , пастеризація буде завершена лише частково.

Рівняння (12.12) правильне для пастеризаторів непрямого нагрівання в разі використання електричної енергії, якщо теплопередача від електричного нагрівача до пастеризованого продукту здійснюється теплопровідністю та конвекцією. Нагрівання продукту в них підпорядковане законам теплопередачі та зазнає суттєвого впливу гідродинамічних явищ. Прикладом таких апаратів є плівкові апарати розробки Полтавського кооперативного інституту [12.2], а також індукційні пастеризатори.

Оскільки в забезпеченні пастеризаційного ефекту установки бере участь і регенератор (12.12), то процес пастеризації починаються в ньому за умови досягнення температури молока 60°C. Для традиційних теплообмінників із протитечійним варіантом теплообміну

$$Pa_{рег} = \frac{\tau_{рег}}{T_z - 60} \times \frac{1}{\beta} \left[e^{(-\alpha + \beta \cdot t)} \right]_{60}^{T_z}. \quad (12.15)$$

Звідси час пастеризації в регенераторі визначається так:

$$\tau_{н.рег} = (T_z - 60)\beta \frac{1}{\left[e^{(-\alpha + \beta \cdot T)} \right]_{60}^{T_z}}, \quad (12.16)$$

де T_z – температура на вході гарячої сторони регенератора, яка перебуває в межах від 60°C до $T = T_{кін}$.

Визначивши час, необхідний для здійснення пастеризації t_n , та задаючись величиною пастеризаційного ефекту Pa , можна визначити час дійсного перебування молока в апараті $t_{дійсн}$ за формулою:

$$Pa = \frac{\tau_{дійсн}}{t_n}; \quad t_{дійсн} = Pa \cdot \tau_n. \quad (12.17)$$

При цьому необхідно також урахувати часткову пастеризацію, яка відбувається в разі нагрівання продукту до температури вище 60°C.

Подальший розрахунок визначає конструктивні розміри установки, що забезпечує необхідний режим пастеризації, для чого використовується рівняння теплового балансу апарату:

$$M \cdot c \cdot \partial T = K_{m.n.} S_{m.o.} (T_n - T_n) \partial \tau, \quad (12.18)$$

де M – маса пастеризованого молока, кг;

c – середня питома теплоємність молока, Дж/кг·°С;

∂T – перепад температур молока під час пастеризації ∂t , °С;

$K_{m.n.}$ – коефіцієнт теплопередачі поверхні $S_{m.o.}$ (м²) теплообмінного апарата від теплоносія до молока, Дж/м²·°С;

$T_n - T_n$ – тепловий напір від теплоносія до молока, °С;

T_n – температура молока під час нагрівання, °С;

$\partial \tau$ – час нагрівання (пастеризації).

Для стаціонарного процесу кількість тепла, що поглинається молоком під час пастеризації, становить

$$Q_m = M \cdot c \cdot (T_{кін} - T_{поч}), \quad (12.19)$$

де $T_{поч}$ – початкова температура молока на вході в пастеризатор, що дорівнює температурі на виході регенератора $T_{рег}$.

Отже,

$$Q_m = M \cdot c (T_{кін} - T_{рег}) = K_{m.n.} H_{m.o.} (T_{в} - T_n) \tau_{дійсн}. \quad (12.20)$$

Із формули (12.18) маємо

$$H_{m.o.} = \frac{M \cdot c (T_{кін} - T_{рег})}{K_{m.n.} (T_{в} - T_n) \tau_{дійсн}}. \quad (12.21)$$

Залежність (12.21) дозволяє визначити конструктивні розміри поверхні теплопередачі апарата залежно від технічних параметрів процесу відповідно до заданого значення ефекту Пастера Pa , що визначає ефективність пастеризації апарата.

Наведена методика розрахунку пастеризатора може використовуватись як для конструктивного розрахунку, так і для перевірного.

12.2. Пастеризація молока ІЧ-електронагріванням

Використання теплопередачі випромінюванням для пастеризації молока в області ІЧ-спектра довжиною хвилі $0,76 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ м дозволяє одночасно інтенсивно нагрівати весь об'єм потоку молока, що активно рухається, а отже, безпосередньо передавати теплову дію продукту.

Вибір довжини хвилі джерела випромінювання, що відповідає максимуму поглинання ІЧ-променів молоком, створює сприятливі умови для інтенсифікації пастеризації при температурно-часових параметрах, менших, ніж в апаратах непрямого нагрівання. Пастеризацію в такому апараті, згідно з викладеними вище теоретичними передумовами, можна аналітично описати рівнянням (12.5):

$$Pa_{наст} + Pa_{внутр} + Pa_{рег} \geq 1.$$

Однак характер теплового впливу при теплопередачі випромінюванням відрізняється від теплопередачі теплопровідністю і конвекцією, тому складові рівняння мають такий вигляд:

$$Pa = \int_{60}^{T_{iч.п.}} \frac{d\tau}{z}, \quad (12.22)$$

$$Pa_{внутр} = \frac{\tau_{внутр}}{z_{внутр}}, \quad (12.23)$$

$$Pa_{рег} = \int_{T_{кін}}^{60} \frac{d\tau}{z}. \quad (12.24)$$

де $T_{iч.п.}$ – температура ІЧ-електропастеризації, що є температурою інактивації мікроорганізмів за безпосереднього теплового впливу на них.

Якщо коефіцієнти поглинання молока й мікроорганізмів неоднакові, $T_{iч.п.}$ має відрізнятися від температури загальної маси молока T_M , що дозволяє за

інших температур отримати бактерицидний ефект [12.13]. У цьому виявляється вибіркова дія ГЧ-променів на мікроорганізми. Таким чином,

$$T_m = T_{i.c.n.} \pm T_{вiб.}, \quad (12.25)$$

а в разі звичайної пастеризації $T_m = T_n$.

Однак не виключено, що поглинальна здатність мікроорганізму та молока порівняна, оскільки до хімічного складу бактерій входять такі елементи, як вода (80...81%), органічні речовини, білок, цукор, жир. Ураховуючи це, рівняння (12.5) може набути вигляду:

$$\int_{60}^{T_{i.c.n.}} \frac{d\tau}{z} + \frac{\psi_{вiмр}}{z_{вiмр}} + \int_{T_m}^{60} \frac{d\tau}{z} \geq 1. \quad (12.26)$$

Оскільки ГЧ-нагрівання молока відбувається одночасно у всьому потоці, витримування, що гарантує рівномірність розподілу температури, можна виключити (короткочасна пастеризація).

Крім того, для зменшення витрат електричної енергії додатковий пастеризаційний ефект можна отримати у висхідній частині регенератора, тобто мати

$$Pa_{пез.} = \int_{60}^{T_{пез.}} \frac{d\tau}{z}. \quad (12.27)$$

Отриманий вираз (12.26) можна подати як

$$\int_{60}^{T_{пез.}} \frac{d\tau}{z} + \int_{T_{пез.}}^{T_{i.c.n.}} \frac{d\tau}{z} + \int_{T_m}^{60} \frac{d\tau}{z} \geq 1. \quad (12.28)$$

Рівняння (12.28) є вихідним для отримання умов оптимізації режимів пастеризації ГЧ-електронагріванням.

Ураховуючи механізм теплопередачі випромінюванням і тепловіддачі від стінки ПЧ-нагрівача рівняння теплового балансу проточного апарата з ПЧ-випромінювачами можна записати так [1.14]:

$$G \cdot c \cdot \rho \cdot \partial T = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{np.} \cdot \partial S_{1-2} \cdot 10^8 \left[\left(\frac{T_{i_{чн.}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ен}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_T (T_{i_{чн.}} - T_{ен}) \partial S_{1-2}, \quad (12.29)$$

де σ_0 – постійна Стефана–Больцмана, що дорівнює $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ ;

∂S_{1-2} – взаємна площа теплообміну, м²;

$\varepsilon_{np.}$ – приведена ступінь чорноти ПЧ-нагрівача та потоку пастеризованої рідини, в.о.;

$T_{i_{чн.}}$, $T_{ен}$ – абсолютні температури ПЧ-тіла розжарення та пастеризованої рідини відповідно, К;

α_T – коефіцієнт тепловіддачі від стінки ПЧ-нагрівача, Вт/м² ·°С.

У рівнянні (12.29) $T_{i_{чн.}} - T_{ен}$ виносимо за дужки, отримаємо:

$$G \cdot c \cdot \rho \cdot \partial T = \left\{ 5,67 \cdot \varepsilon_{np.} \left[\frac{\left(\frac{T_{i_{чн.}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ен}}{100} \right)^4}{T_{i_{чн.}} - T_{ен}} \right] + \alpha_T \right\} (T_{i_{чн.}} - T_{ен}) \partial S_{1-2},$$

В отриманому виразі $5,67 \cdot \varepsilon_{np.} \left[\frac{\left(\frac{T_{i_{чн.}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ен}}{100} \right)^4}{T_{i_{чн.}} - T_{ен}} \right] = \alpha_{пром.}$ – коефіцієнт

теплопередачі випромінюванням. Спростивши, отримаємо:

$$\alpha_{пром.} = 5,67 \varepsilon_{np.} \cdot \Delta T$$

де $\Delta T = (T_{i_{чн.}}^3 + T_{i_{чн.}}^2 T_{ен.} + T_{i_{чн.}} T_{ен.}^2 + T_{ен.}^3) \cdot 10^{-8}$.

У результаті формула (12.29) набуває вигляду:

$$G \cdot c \cdot \rho \cdot \partial T = (\alpha_{\text{пром}} + \alpha_T) \cdot \partial S_{1-2} (T_{\text{вчн.}} - T_{\text{ен.}}). \quad (12.30)$$

Бактерицидний ефект проявляється тільки при $T_{\text{ен.}} > 60$ °С, цій умові відповідає вираз (12.29). Другий доданок визначає умови нагрівання в пастеризаційній камері. Для досягнення потрібного ефекту пастеризації молоко омиває поверхню S_{1-2} за час t . Отже, за час ∂t охопить ∂S площі поверхні теплопередачі. За рівномірного руху $\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{S_{1-2}}{t_{\text{ен.}}}$, звідси $\partial S = \partial t \frac{S_{1-2}}{t_{\text{ен.}}}$. Підставивши до цього рівняння (12.30), отримаємо:

$$G \cdot c \cdot \rho \cdot \partial T = (\alpha_{\text{пром}} + \alpha_T) \cdot \partial t \frac{S_{1-2}}{t_{\text{ен.}}} (T_{\text{вчн.}} - T_{\text{ен.}}),$$

Звідси

$$\partial t = \frac{G \cdot \rho \cdot c \cdot \partial T \cdot t_{\text{ен.}}}{(\alpha_{\text{пром}} + \alpha_T) \cdot S_{1-2} (T_{\text{вчн.}} - T_{\text{ен.}})} = \frac{G \cdot \rho \cdot c \cdot t_{\text{ен.}}}{(\alpha_{\text{пром}} + \alpha_T) \cdot S_{1-2}} \times \frac{\partial T}{(T_{\text{вчн.}} - T_{\text{ен.}})}. \quad (12.31)$$

Величина ∂t входить до інтеграла $Pa = \int \frac{\partial \tau}{z}$ – із виразу (12.28). Згідно з теорією пастеризації (підрозділ 12.1) $\ln \tau = \alpha - \beta \cdot T$, якщо пастеризація завершилася, то $\ln z = \alpha - \beta \cdot T$. Звідси

$$z = e^{(\alpha - \beta \cdot T)}; \quad \frac{1}{z} = e^{(-\alpha + \beta \cdot T)}. \quad (12.32)$$

Підставивши (12.32) в інтеграл $Pa = \int \frac{\partial t}{z}$, отримаємо:

$$Pa = \int \frac{\tau_{\text{ен.}} \cdot G \cdot \rho \cdot c}{(\alpha_{\text{пром}} + \alpha_T) S_{1-2}} \times \frac{\partial T}{(T_{\text{вчн.}} - T_{\text{ен.}})} e^{(-\alpha + \beta \cdot T)}.$$

Виносимо постійні величини за знак інтегралу

$$Pa = \frac{G \cdot \rho \cdot c \cdot \tau_{en}}{(\alpha_{пром} + \alpha_T) \cdot S_{1-2}} \int_{T_{pez.}}^{T_{en.}} e^{(-\alpha + \beta \cdot T)} \frac{\partial T}{T_{ичн.} - T_{ен.}}. \quad (12.33)$$

У разі завершення процесу $Pa = 1$. Тоді час $t_{en.}$, достатній для обробки молока, дорівнює:

$$t_{en.} = \frac{(\alpha_{пром} + \alpha_T) S_{1-2}}{G \cdot \rho \cdot c \int_{T_{pez.}}^{T_{en.}} e^{(-\alpha + \beta \cdot T)} \frac{\partial T}{T_{ичн.} - T_{ен.}}}. \quad (12.34)$$

Значення інтеграла, що стоїть у знаменнику цього виразу, можна отримати, використовуючи наближені методи обчислення визначених інтегралів, наприклад, метод Сімпсона [12.5]. Використовуючи квадратурну формулу, отриману Сімпсоном для наближеного рішення визначених інтегралів, представимо підінтегральний вираз у вигляді суми:

$$\int_{T_{pez.}}^{T_{en.}} e^{(-\alpha + \beta \cdot T)} \frac{\partial T}{T_{ичн.} - T_{ен.}} \approx \frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{6N_s} \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{e^{(-\alpha + \beta \cdot T)}}{T_{ичн.} - T_{pez.}} + 4 \frac{e^{\left[-\alpha + \beta \left(T_{pez.} + \frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{2N_s} \right) \right]}}{T_{ичн.} - \left(\frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{2N_s} + T_{pez.} \right)} \right) + \\ & + 2 \frac{e^{\left[-\alpha + \beta \left(T_{pez.} + 2 \frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{2N_s} \right) \right]}}{T_{ичн.} - \left(T_{pez.} + 2 \frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{2N_s} \right)} + 4 \frac{e^{\left[-\alpha + \beta \left(T_{pez.} + 3 \frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{2N_s} \right) \right]}}{T_{ичн.} - \left(T_{pez.} + 3 \frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{2N_s} \right)} + \\ & + \dots + 2 \frac{e^{\left[-\alpha + \beta \left(T_{pez.} + (2N_s - 2) \frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{2N_s} \right) \right]}}{T_{ичн.} - \left\{ T_{pez.} + (2N_s - 2) \frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{2N_s} \right\}} + \\ & + 4 \frac{e^{\left[-\alpha + \beta \left(T_{pez.} + (2N_s - 1) \frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{2N_s} \right) \right]}}{T_{ичн.} - \left\{ T_{pez.} + (2N_s - 1) \frac{T_{ен.} - T_{pez.}}{2N_s} \right\}} + \frac{e^{(-\alpha + \beta \cdot T_{ен.})}}{T_{ен.} - T_{ен.}} \end{aligned} \right\} \quad (12.35)$$

де $2N_s$ – кількість рівних частин у відрізку від $T_{рез.}$ до $T_{en.}$

Точність результату залежить від кількості $2N_s$, причому похибка наближення за формулою Сімпсона тим менша, чим більше $2N_s$.

Замінивши $\frac{G \cdot \rho \cdot c}{(\alpha_{пром} + \alpha_T) \cdot S_{1-2}}$ буквою $\Omega_{випр.}$, а $\int e^{(-\alpha+\beta \cdot T)} \frac{\partial T}{T_{ичн.} - T_{en.}}$ буквою Θ_I , вираз

(12.34) набуває такого вигляду:

$$\tau_{e.n.} = \frac{1}{\Omega_{випр.} [\Theta_I]_{T_{рез.}}^{T_{e.n.}}} \quad (12.36)$$

Час $t_{e.n.}$ є тією частиною часу перебування молока в апараті, яка відповідає пастеризаційному ефекту, тобто від 60°C до $T_{e.n.}$.

Температура тіла розжарювання $T_{ичн.}$, максимум випромінювальної здатності ІЧ-випромінювача при λ_{max} мають відповідати оптичним характеристикам оброблюваної рідини для того, щоб збільшити глибину проникнення, зменшити втрати на відбивання й, відповідно, збільшити $\alpha_{випром.}$ – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням. У разі невиконання цих вимог ефективність ІЧ-термообробки значно знижується. Тому для обґрунтування режиму ІЧ-пастеризації необхідно узгодити оптичні характеристики молока та спектральні характеристики ІЧ-випромінювача, визначити оптимальні умови теплообміну, після чого за допомогою виразу (12.36) установити час пастеризації $t_{e.n.}$.

12.3. Дослідження теплообміну в секції ІЧ-нагрівання

В установках, що використовують для нагрівання ІЧ-випромінюванням, тепла енергія передається об'єкту променевим потоком, конвекцією та теплопровідністю. Глибина проникнення ІЧ-променів у молоко обмежена (до 2 мм), тому для уникнення пригорання поверхневих шарів продукту до стінок ємності секції ІЧ-нагрівання необхідно створити рівномірне теплове поле в

об'ємі за рахунок узгодженої інтенсивності теплового потоку та відповідного перемішування рідини. Основною перевагою ІЧ-нагрівання є теплообмін випромінюванням. Це означає високу щільність енергії випромінювання, тому стінки ємності, де нагрівається молоко, мають бути прозорими для променів (не нагріватися), а продукт інтенсивно перемішуватися. У протилежному випадку нагрівання перетвориться на теплопередачу теплопровідністю та конвекцією.

Згідно з математичною моделлю електропастеризації ІЧ-випромінюванням, розглянутою в попередніх підрозділах, для обґрунтування основних параметрів секції ІЧ-електронагрівання необхідно визначити:

- коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням $\alpha_{\text{випром}}$;
- коефіцієнт тепловіддачі від стінки випромінювача α_T ;
- термічний опір системи випромінювач–рідина R_T ;
- площу теплообміну камери ІЧ-електронагрівання S .

12.3.1. Вибір конструкції секції ІЧ-нагрівання проточного пастеризатора

Відповідно до вихідних вимог, на основі аналізу існуючих установок і тенденцій у їх розвитку [1.13], до розгляду прийнято конструкції апаратів закритого типу з обмеженим по товщині шаром продукту. Вибір пов'язаний із забезпеченням більшої ефективності теплової обробки, якіснішим збереженням природних властивостей молока. Крім того, у них виключене бактеріальне забруднення продукту через відсутність контакту з повітрям, зведене до мінімуму руйнування вітамінів В, В¹² та С.

1. Секція ІЧ-електронагрівання з трубчастим каналом.

У прозорій трубці з кварцового скла рухається молоко. На зовнішній поверхні трубки накручена ніхромова спіраль, яка нагрівається під час проходження електричного струму й опромінює продукт.

Переваги:

- забезпечено двостороннє опромінення за високої турбулентності потоку;
- обмежено товщину шару продукту, що обробляється;

- чітко витримано термін пастеризації;
- висока інтенсивність термообробки;
- герметичність процесу і висока якість пастеризації.

Недоліки:

- обмежена продуктивність через обмеження діаметра каналу;
- складність ущільнення скляних труб;
- крихкість скляних труб та їх забруднення під час роботи, що призводить до пригорання молока та виходу установки з ладу;
- втрати енергії в навколишнє середовище [1.13, 12.6, 12.11].

2. Секція ІЧ-електронагрівання з кільцевим каналом або пучком трубчастих випромінювачів усередині циліндричного корпусу.

У металевій трубі з харчової нержавіючої сталі розташований пучок ІЧ-випромінювачів у вигляді прозорих скляних трубок, усередині яких знаходиться тіло розжарювання – ніхромова спіраль. Проміжок між випромінювачами забезпечує прохід молока та його нагрівання.

Переваги:

- забезпечено високу турбулентність руху молока і герметичність термообробки;
- витримано заданий час пастеризації за високої інтенсивності термообробки;
- підвищено продуктивність устаткування;
- забезпечено можливість нанесення антипригарного покриття поверхонь;
- зменшено втрати енергії.

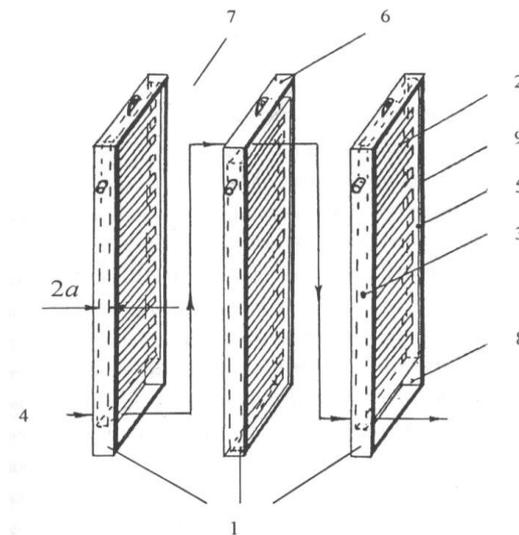
Недоліки:

- крихкість скляних трубок;
- складність розміщення й ущільнення ІЧ-випромінювачів;
- не забезпечено дотримання товщини шару за двостороннього опромінення продукту.

3. Секція ПЧ-електронагрівання з пластинчастим випромінюванням та щілинним каналом.

Найбільш повно технологічним вимогам відповідає апарат із пластинчастими ПЧ-випромінювачами (рис. 12.5).

Елементарний випромінювач являє собою металева рамку 6, усередині якої розташоване тіло розжарювання 2, зроблене з ніхромового проводу, розміщеного на каркасі. Тіло розжарювання та опромінювана рідина розділені захисною оптичною прозорою стінкою колби 5. Між собою пластинчаті елементарні випромінювачі герметизуються ущільнювальною харчовою гумою 9, а весь пакет – притискними пластинами (не показані).



1 – пластинчаті ПЧ-випромінювачі, 2 – тіло розжарювання, 3 – скляний каркас, 4 – вхідний патрубок, 5 – кварцові стінки, 6 – металева рамка, 7 – щілинний канал, 8 – вихідний патрубок, 9 – гума для ущільнення

Рисунок 12.5 – Схема проточної камери нагрівання з пластинчастими ПЧ-випромінювачами

Апарат побудовано за аналогією з пластинчастим теплообмінником. Тому товщина робочого шару молока, що опромінюється, строго регламентована зазором між сусідніми нагрівачами. Забезпечено двостороннє опромінення продукту при його інтенсивному перемішуванні внаслідок турбулентного характеру руху рідини, що розраховується. Використано такі конструктивні матеріали: харчова гума, харчова нержавіюча сталь, фторопласт-

4, кварцове скло, які відповідають медико-санітарним нормам. Блочно-модульний принцип побудови передбачає широкий діапазон продуктивності з мінімальними енергетичними втратами та значною площею теплопередачі.

12.3.2. Дослідження терморадіаційних характеристик молока

Об'єктами досліджень були молоко й окремі його компоненти, а також матеріал оболонки й ІЧ-випромінювача в діапазоні довжин хвиль $\lambda_{\text{випр}}=0,75\text{--}10$ мкм. Визначення оптичних характеристик молока проводилося на спектрофотометрі «Spekord 75 IR» (Карл Цейс) (рис. 12.6) у термостатованих кюветах із віконцями з CaF_2 (флюорит).

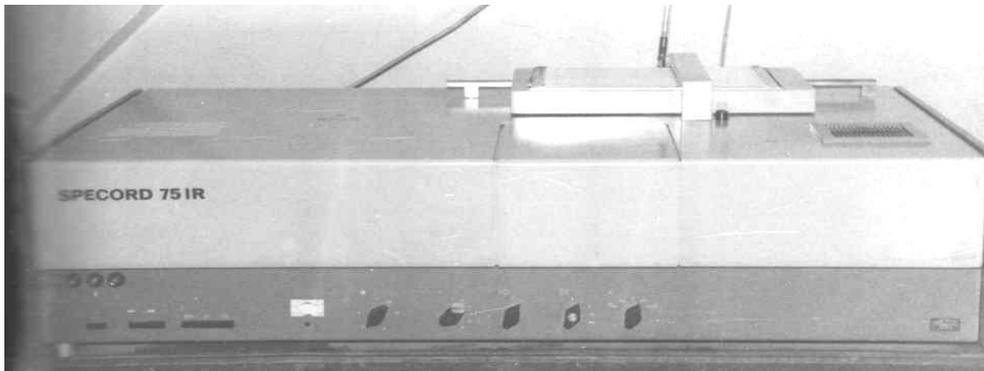


Рисунок 12.6 – Загальний вигляд спектрофотометра

Товщина поглинального шару становить 0,01 мм та 0,1 мм. Для того щоб урахувати відбивання випромінювання, у каналі порівняння розміщували об'єкт (бленда), що повністю компенсував зазначені втрати променевої енергії.

Умови запису:

- масштаб реєстрації – $7,5 \text{ мм}/100 \text{ см}^{-1}$;
- щільова програма – 3;
- підсилення – 3;
- постійна часу – 1 с;
- час запису – 13,2 хв;
- температура молока – $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вимірювання пропускної здатності молока T_λ та інших речовин повторювалося 5–6 разів, отримані дані оброблялися статистично [12.9].

Спектрограму вихідного сирого молока наведено на рис. 12.7.

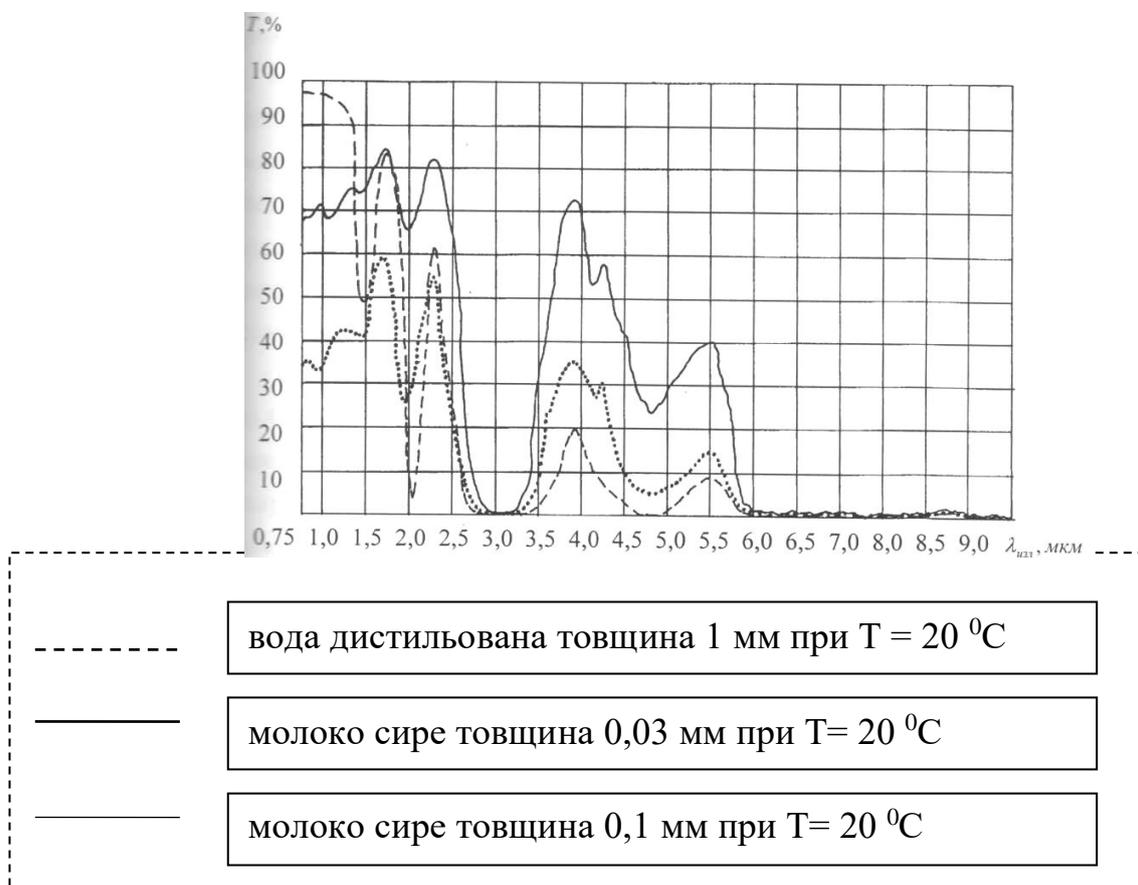


Рисунок 12.7 – Спектрограма пропускання ІЧ-променів молоком із жирністю 3,2% та дистильованою водою

На спектрограмі видно, що найбільш інтенсивна широка смуга поглинання обумовлена валентним коливанням гідроксильної групи води, яка бере участь у створенні водневого зв'язку. Це поглинання настільки інтенсивне, що прилади ледь не зашкалюють. Смуги максимуму знаходяться в межах 2,94 мкм (3400 см^{-1}).

Характерна смуга комбінованих коливань розміщена на довжині 1,93 мкм (5183 см^{-1}), а деформаційні коливання H_2O – на довжині хвилі 6,1 мкм (1645 см^{-1}). Для порівняння розглянемо характеристики молока та води товщиною шару 0,01 мм (рис. 12.8). Крім смуг води в спектрі молока ми бачимо поглинання, викликане такими компонентами молока, як жири, білки,

вуглеводи. При цьому смуги 3,4–3,5 мкм (2920–2850 см⁻¹) обумовлені валентними коливаннями аліфатичних СН–зв’язків. Смуга 5,75 мкм (1740 см⁻¹) характерна для валентних коливань карбонільної групи складних ефірів, які належать жирам.

Смуга 6,83 мкм (1465 см⁻¹) обумовлена деформаційними коливаннями гідроксильних груп, смуга 8,6 мкм (1160 см⁻¹) характерна для валентних коливань СО-зв’язків ефірів. Низькочастотну частину спектра зняти не вдалося через сильне поглинання СаF₂.

Максимальне пропускання ІЧ-випромінювання дистильованою водою та молоком знаходиться на хвилях довжиною 1,35 мкм (7400 см⁻¹), 2,25 мкм (4250 см⁻¹) і 3,85 мкм (2600 см⁻¹). При цьому пропускання води вище ніж у молока. Можливо, це пов’язано з тим, що молоко є колоїдним розчином і розсіювання випромінювання відбувається завдяки найдрібнішим краплинкам жиру.

Пастеризація молока починається в теплообміннику за температури вище 60°C, досягає 80°C в секції опромінення, продовжується в теплообміннику при охолодженні до 60°C. Тобто ІЧ-опромінення молока може відбуватися в діапазоні температур від 60°C до 80°C. При цьому його терморадіаційні характеристики можуть бути іншими, ніж при 20°C. З урахуванням зазначеного були зняті спектрограми молока при 70°C (рис. 12.8). Результати порівняння показали, що інтегральне поглинання зменшується майже по всій області спектра.

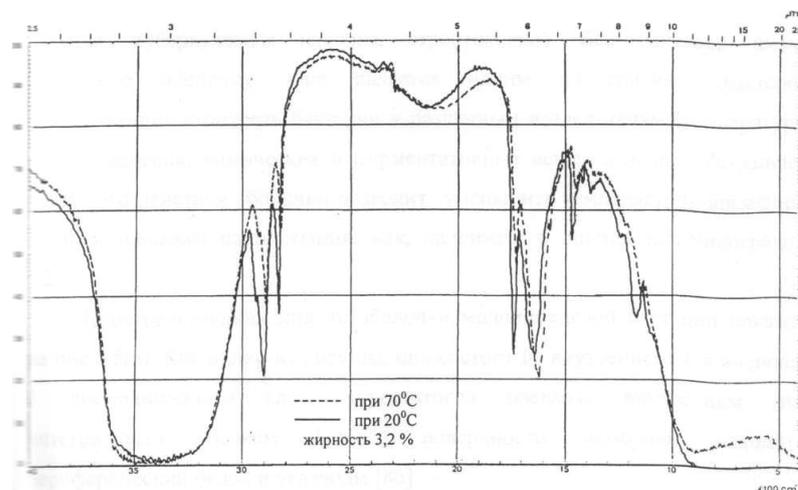


Рисунок 12.8 – Спектрограма пропускання сирого молока товщиною 0,01 мм

Очевидно, це пов'язано зі зменшенням поглинання випромінювання гідроксильними групами води (за високих температур водневий зв'язок частково руйнується) і з тим, що за більш високої температури зменшуються втрати на розсіювання променевої енергії (основні розсіювачі променів – частинки жиру робляться дрібнішими й менше відбивають випромінювання). Таким чином, за підвищеної температури пропускна здатність молока збільшується.

У ході дослідження сухого молока та його складових визначили їхні характерні частоти (рис. 12.9). Результати отримано шляхом пресування сухого молока разом із прозорою основою та експонування у спектрофотометрі. Методика експерименту полягала в тому, що 1 мг порошку сухого молока змішувався зі 100 мг бромистого калію (KBr) та розтирався в агатовій ступці до дрібної пудри. Із отриманої маси пресувалася прозора таблетка на гідравлічному пресі тиском 10000 кг/см^2 . Зразок розміщувався у спектрофотометрі, де проводилося вимірювання при $\theta = 20^\circ \text{C}$.

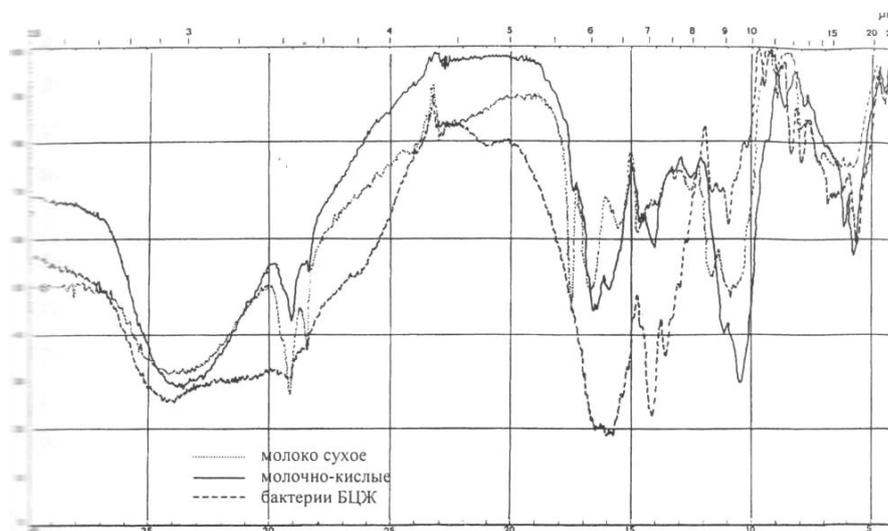


Рисунок 12.9 – Спектрограма пропускання сухого молока, сухих молочнокислих бактерій та ліофілізованої вакцини БЦЖ

Аналіз результатів показав, що пропускання було максимальним при довжині хвилі $4,4 \text{ мкм}$ (2260 см^{-1}). У межах валентних коливань аліфатичних СН-зв'язків при довжині хвилі $3,4\text{--}3,5 \text{ мкм}$ ($2920\text{--}2850 \text{ см}^{-1}$) зміни незначні.

Набагато зменшився вплив води при 2,94 мкм (3400 см^{-1}) та 6,1 мкм (1645 см^{-1}), однак його помітно; це значить, що H_2O присутня в зразку. Загалом спектрограми сирого та сухого молока відповідають характерним частотам продукту.

Бактеріальна частина молока непостійна і залежить від багатьох чинників, у тому числі від утримання, годівлі тварин, стану навколишнього середовища тощо. Серед корисних мікроорганізмів молоко містить кисломолочні бактерії, а патогенні представлені різноманітними коками, паличками (кишечка паличка, туберкульозна паличка, стрептококи). Усі бактерії мають клітинну оболонку. Вона є одним із основних чинників, які визначають стійкість бактерій до різноманітного впливу (температури, вологи, тиску, хімічних та ферментативних речовин та ін.). Усунення захисної дії оболонки дозволяє зменшити температурно-часові режими пастеризації.

Результати експериментально-аналітичного дослідження оптичних і терморадіаційних характеристик молока наведено в табл. 12.1, на їх основі визначено спектральну відбивальну здатність молока (рис. 12.10).

Таблиця 12.1 – Результати графоаналітичного визначення оптичних і терморадіаційних характеристик молока

λ	$R_{\lambda\infty}$	$T_{1\lambda}$	$T_{2\lambda}$	L_{λ}	K_{λ}/L_{λ}	K_{λ}	$A_{\lambda\infty}$	$\varepsilon'_{\lambda T}$	L_{\max}
мкм	в.о.	%	%	1/мм	в.о.	1/мм	в.о.	$\text{Вт/М}^2\text{°С}$	мм
0,75	0,45	32	68	9,3	0,375	3,5	0,55	$3,12 \cdot 10^{-8}$	1,10
1	0,35	32	68	10,0	0,48	4,8	0,65	$3,7 \cdot 10^{-8}$	1,0
1,25	0,2	43	74	8	0,67	5,36	0,8	$4,5 \cdot 10^{-8}$	1,20
1,45	0,001	38	76	9,5	0,995	9,45	0,999	$5,66 \cdot 10^{-8}$	1,0
1,7	0,06	58	85	5,5	0,88	1,84	0,94	$5,33 \cdot 10^{-8}$	1,8
1,95	0,002	25	66	13,8	0,99	13,7	0,998	$5,66 \cdot 10^{-8}$	0,7

2,25	0,02	55	82	6	0,95	5,7	0,98	$5,56 \cdot 10^{-8}$	1,7
2,5	0,007	20	61	16	0,98	15,68	0,993	$5,63 \cdot 10^{-8}$	0,6
2,75	0,01	1	25	46	0,97	44,6	0,99	$5,61 \cdot 10^{-8}$	0,20
3,8	0,02	35	73	10,5	0,95	10,0	0,98	$5,56 \cdot 10^{-8}$	0,9
4,5	0,01	9	42	29	0,97	28,1	0,99	$5,61 \cdot 10^{-8}$	0,3
5,0	0,005	6	25	46	0,98	45,0	0,995	$5,64 \cdot 10^{-8}$	0,20
5,25	0,01	15	40	30	0,97	29,1	0,99	$5,61 \cdot 10^{-8}$	0,30

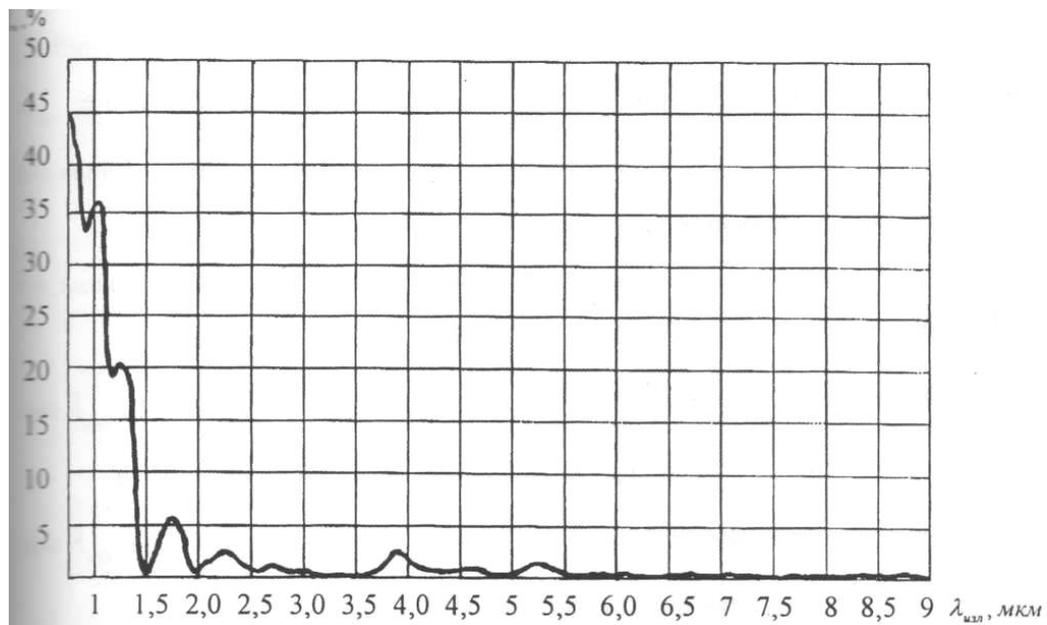


Рисунок 12.10 – Спектральна відбивальна здатність молока $R_{\infty} = f(\lambda_{\text{випр.}})$

Із рисунку 12.10 видно, що молоко інтенсивно поглинає ІЧ-промені починаючи з довжини хвилі $\lambda_{\text{випр.}} > 1,375$ мкм. Зі зменшенням довжини хвиль зростає відбивальна здатність продукту. ІЧ-промені ефективні в оптично тонкому шарі молока при $L\lambda \ l_{\text{пр.}} < 10$ у всьому діапазоні ближньої області спектра (0,76–2,50 мкм). Переважна глибина проникнення випромінювання менше 1 мм із максимумом при $\lambda_{\text{випр.}} = 1,95$ мкм (1,8 мм) та $\lambda_{\text{випр.}} = 2,25$ мкм (1,7 мм). Оптично товстий шар для молока при $L\lambda \ l_{\text{пр.}} > 10$ становить 2,0 мм і більше.

Із отриманих результатів можна визначити необхідні характеристики молока, а саме:

а) відбивальна здатність безкінечно товстого шару R_{∞} :

при $\lambda_{\text{випр.}} > 1,375$ мкм менше 5%; при $0,9 < \lambda_{\text{випр.}} < 1,3$ мкм складає 20–35%;

б) поглинальна здатність безкінечно товстого шару A_{∞} :

при $\lambda_{\text{випр.}} > 1,375$ мкм більше 95%; при $0,9 < \lambda_{\text{випр.}} < 1,3$ мкм складає 65–80%;

в) випромінювальна здатність (коефіцієнт чорноти) $\varepsilon'_{\lambda r}$:

при $\lambda_{\text{випр.}} > 1,375$ мкм більше $5,5 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² · °С; при $0,9 < \lambda_{\text{випр.}} < 1,3$ мкм складає $3,1$ – $4,5 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² · °С.

Молоко характеризується оптично тонким шаром із оптичною товщиною $L_{\lambda} \cdot l_{\text{пр.}} < 10$ та максимальною глибиною проникнення ІЧ-випромінювання менше 2 мм. Максимум пропускання знаходиться на довжинах хвиль $\lambda_{\text{випр.}} = 1,95$ мкм та $\lambda_{\text{випр.}} = (2,2$ – $2,3)$ мкм і дорівнює 1,7–1,8 мм. У інших діапазонах ІЧ-випромінювання молоко найбільш прозоре при $\lambda_{\text{випр.}} = 3,8$ мкм (глибина пропускання $\approx 0,9$ мм);

– коефіцієнт ослаблення L_{λ} у діапазоні $0,76 < \lambda_{\text{випр.}} < 2,5$ мкм змінюється від 6 мм⁻¹ до 16 мм⁻¹;

– при $\lambda_{\text{випр.}} > 2,5$ мкм $L_{\lambda} = 25$ мм⁻¹ і більше (за винятком $\lambda_{\text{випр.}} = 3,85$ мкм із $L_{\lambda} = 10,5$ мм⁻¹).

Проведені дослідження дозволяють визначити температуру розжарювання джерела ІЧ-випромінювання і довжини хвиль робочого діапазону для пастеризації молока. При цьому необхідно врахувати таке:

1. Основний вплив ІЧ-випромінювання спрямовано на інактивацію мікроорганізмів.

2. Діапазон довжини хвиль ІЧ-випромінювання має забезпечувати максимальну глибину проникнення променів у молоко для рівномірного прогрівання його внутрішніх шарів.

3. ІЧ-промені не повинні нагрівати і змінювати якості цінних компонентів молока (білків, жирів, лактози).

4. Джерело має забезпечувати мінімальні втрати променевої енергії в результаті відбивання.

5. Робочий діапазон довжин хвиль випромінювача, що концентрує більше 95% випромінюваної енергії знаходиться в таких межах: $0,4 \lambda_{\text{випр.мах}} < \lambda_{\text{випр.мах}} < 4 \lambda_{\text{випр.мах}}$.

6. ІЧ-випромінювач для пастеризації молока має мати оболонку, яка може забезпечити максимальне пропускання випромінювання, відповідати медико-санітарним нормам та перешкоджати контакту рідини з тілом розжарювання.

Заданим вимогам найбільше відповідає діапазон ІЧ-хвиль у діапазоні $1 \text{ мкм} < \lambda_{\text{випр.}} < 6 \text{ мкм}$ із максимальним випромінюванням на довжині $\lambda_{\text{випр.мах}} = (2,2-2,4) \text{ мкм}$. За законом Віна такі параметри має темний випромінювач із робочою температурою $T_{\text{ічн.}} = 1020^\circ\text{C}$ та діапазоном випромінювання $0,9 \text{ мкм} < \lambda_{\text{випр.}} < 9 \text{ мкм}$.

12.3.3. Визначення гідродинамічних характеристик потоку молока

Згідно з літературними даними, найбільш детально вивчено рух рідини по круглих трубах. Канали інших видів досліджуються шляхом уведення відповідних поправочних коефіцієнтів до розрахункових виразів для круглих труб.

Пастеризаційно-охолоджувальні установки проточного типу мають трубчасте або пластинчасте виконання з рухом молока в циліндричному або щілинному каналі. Для дослідження візьмемо щілинні моделі секції нагрівання, в яких тепло підводиться ззовні та спрямовується в середину перерізу.

Модель турбулентного потоку (рис. 12.11) має три ділянки: в'язкий прошарок із ламінарним рухом 4, перехідна ділянка з перехідним режимом (є ламінарний і турбулентний режими) 5, ділянка розвинутого турбулентного ядра потоку 6. На ефективність нагрівання впливатиме товщина в'язкого прошарку, де змішуваність між шарами майже відсутня (ламінарний режим руху). Чим більша товщина ламінарного прошарку, тим менша кількість ІЧ-променів проникає в турбулентне ядро 6.

За результатами експериментальних досліджень знаходимо товщину в'язкого прошарку за формулою:

$$\delta_{л.с.} = N_N \frac{\nu}{g_d}, \quad (12.37)$$

де $\delta_{л.с.}$ – товщина в'язкого прошарку, м;

N_N – безрозмірний коефіцієнт, беремо від 10,5 до 11,1 в.о. [12.10];

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м²/с;

g_d – динамічна швидкість (швидкість тертя), м/с.

$$g_d = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho_p}}, \quad (12.38)$$

де τ_o – дотичні напруження на стінках потоку в межах в'язкого прошарку, Н/м²;

ρ_p – густина рідини, кг/м³.

Дотичні напруження на стінках «правильного русла», які мають круглі, квадратні, прямокутні, параболічні та інші перерізи, за умови, що мокра поверхня цих русел має однакову шорсткість, знаходимо за емпіричною формулою:

$$\tau_o = \frac{\rho \xi_{зм}}{8} g_p^2, \quad (12.39)$$

де ξ – гідравлічний коефіцієнт тертя, в.о.;

g_p – середня швидкість руху потоку рідини, м/с.

Узявши середнє значення $N_N=10,6$ із урахуванням формул (12.38) та (12.39), рівняння (12.37) набуває вигляду:

$$\delta_{л.с.} = \frac{30\nu}{g_{ср.} \sqrt{\xi_{зм}}} = \frac{30d_{рус}}{Re \sqrt{\xi_{зм}}} = \frac{120r'}{Re \sqrt{\xi_{зм}}}. \quad (12.40)$$

Для визначення гідравлічного коефіцієнту тертя ξ використовуємо формулу Шевельова для гідравлічних русел (пластмасових труб) [12.10]:

$$\xi_{zm} = 0,287 / \text{Re}^{0.226}, \quad (12.41)$$

де Re – число Рейнольдса, що характеризує турбулентність руху потоку рідини, в.о.

Число Рейнольдса для каналу будь-якого перерізу визначається як

$$\text{Re} = \frac{4g_p r'}{\nu}, \quad (12.42)$$

де r' – гідравлічний радіус, м;

кругла труба $r' = 1/2r_1$;

кільцевий канал $r' = \frac{r_1 - r_2}{2}$;

плоска щілина $r' = \frac{b_1 b_2}{2(b_1 + b_2)}$.

У наведених виразах: r_1 – радіус зовнішньої труби, м; r_2 – радіус внутрішньої труби, м; b_1 , b_2 – товщина та ширина щілини відповідно.

Різницю температур між стінкою каналу та ядром визначимо, спираючись на аналогії Рейнольдса про єдність процесів перенесення теплоти та швидкості руху в турбулентних потоках [12.12], тобто

$$\Phi = c_m \tau_o \frac{T_{p.ст.} - T_{ядр}}{g_{ядр} - g_{p.ст.}}, \quad (12.43)$$

де $T_{p.ст.}$ – температура молока в пристінному прошарку, °С;

$T_{ядр}$ – температура молока в ядрі потоку, °С;

g_p – середня швидкість руху молока в пристінному прошарку, м/с.

Біля стінки існує в'язкий прошарок, де переважають сили молекулярної в'язкості, а дотична напруга τ_o постійна. За законом Ньютона τ_o має вигляд:

$$\tau_o = \mu \frac{g_{p,cm}}{\delta_{л.с}}, \quad (12.44)$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с.

Підставивши вираз (12.40) у (12.44), отримаємо:

$$\tau_o = \mu \frac{g_{cm} g_p \sqrt{\xi_{z.m.}}}{30\nu}. \quad (12.45)$$

Оскільки $\nu = \mu/\rho$, то з урахуванням формули (12.39) знаходимо відношення між середніми швидкостями в турбулентному ядрі та пристінному шарі:

$$\frac{g_{p,cm}}{g_p} = 3,75 \sqrt{\xi_{z.m.}}. \quad (12.46)$$

Вираз (12.43), ураховуючи (12.46), має вигляд:

$$\Phi = \frac{c_m \tau_o}{g_p} \times \frac{T_{p,cm} - T_p}{1 - 3,75 \sqrt{\xi_{z.m.}}}. \quad (12.47)$$

Звідси маємо:

$$T_{p,cm} - T_p = \frac{\Phi g_p}{c_m \tau_o} (1 - 3,75 \sqrt{\xi_{z.m.}}). \quad (12.48)$$

Отриманий вираз правильний, якщо швидкість рідини біля стінки дорівнює 0. Але випробуваннями встановлено, що в пристінному прошарку швидкість молока не дорівнює 0, тому і $T'_{p,cm}$ не дорівнює температурі стінки

$T_{p.cm.}$; отже, рівняння (12.48) перетворимо в систему рівнянь з урахуванням різних рухів у прошарку:

$$\begin{aligned} T'_{p.cm.} - T_p &= \frac{\Phi g_p}{c_m \tau_o} (1 - 3,75 \sqrt{\xi_{z.m.}}) \\ T_{p.cm.} - T'_{p.cm.} &= \Phi \frac{\delta_{лс.}}{\lambda_{т.м.}}, \end{aligned} \quad (12.49)$$

де $T'_{p.cm.}$ – реальна температура рідини в пристінному прошарку, °С.

У результаті почленного додавання рівнянь отримаємо:

$$T_{p.cm.} - T_p = \frac{\Phi g_p}{c_m \tau_o} (1 - 3,75 \sqrt{\xi_{z.m.}} + \frac{c_m \tau_o \delta_{лс.}}{\lambda_{т.м.} g_p}). \quad (12.50)$$

Останній доданок у дужках правої частини рівняння (12.50) можна перетворити за допомогою рівнянь (12.39) та (12.40). Тоді

$$T_{p.cm.} - T_p = \frac{\Phi g_p}{c_m \tau_o} [1 - 3,75 \sqrt{\xi_{z.m.}} (Pr-1)]. \quad (12.51)$$

Із цього виразу знаходимо коефіцієнт конвективного теплообміну рідини α_p :

$$\alpha_p = \frac{c_m \tau_o}{g_p [1 - 3,75 \sqrt{\xi_{z.m.}} (Pr-1)]}. \quad (12.52)$$

12.3.4. Визначення параметрів теплообміну в секції ІЧ-нагрівання

У загальному випадку теплообмін між ІЧ-випромінювачем і молоком включає в себе (рис. 12.11) тіло випромінювання 1, прозору колбу 3, потік рідини 6. При цьому залежно від конструктивних особливостей між випромінюючим тілом та колбою може знаходитися газовий або вакуумний прошарок 2, спеціальне антипригарне покриття роздільної стінки та пристінний

прошарок рідини, характер руху якого відрізняється від основного потоку [12.12]. Це має додатковий вплив на теплообмін в ІЧ-нагрівачі.

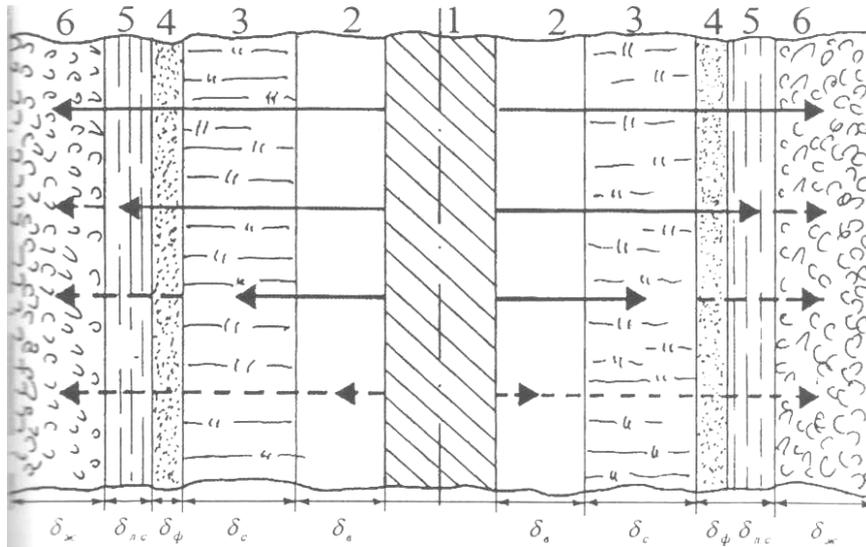


Рисунок 12.11 – Схема теплообміну «ІЧ-випромінювач – молоко» в секції ІЧ-нагрівання [12.13]

У цьому випадку рівняння теплового потоку має вигляд:

$$\Phi_T = \frac{\lambda_{Текв.}}{\delta_6} S (T_{ич.н} - T_{ен}), \quad (12.53)$$

де $\lambda_{Текв.}$ – коефіцієнт еквівалентної теплопровідності, Вт/К·м;

δ_6 – зазор між тілом розжарювання та внутрішньою стінкою колби, м.

Розділивши $\lambda_{Текв.}$ на коефіцієнт теплопровідності середовища λ_T (повітря) отримаємо:

$$\zeta_K = \frac{\lambda_{Текв.}}{\lambda_T}, \quad (12.54)$$

де ζ_K – коефіцієнт конвекції, але

$$\zeta_K = f(Gr_n \cdot Pr_n),$$

де

$$Gr = \frac{g \delta_6^3 \beta_6 \Delta T}{\nu^2}, \quad (12.55)$$

де Gr – число Грасгофа;

g – прискорення земного тяжіння, м/с²;

δ_n – повітряний зазор, м;

$\beta_{\epsilon} = \frac{1}{273+T_{cp}}$ – коефіцієнт об'ємного розширення повітря, 1/°C;

ΔT – перепад температури між тілом розжарювання та колбою, °C;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, $\nu=8 \cdot 10^{-6}$ м²/с [2.2];

$T_{cp} = \frac{T_{ич.н} + T_c}{2}$ – середня температура, °C.

$$Pr = \frac{\nu}{a_{T_{\epsilon}}} = \frac{\mu c}{\lambda T_{\epsilon}} \quad (12.56)$$

де Pr – число Прандтля;

$a_{T_{\epsilon}}$ – коефіцієнт температуропровідності, м³/с;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості повітря, Па·с.

$$Gr_{\epsilon} Pr_{\epsilon} = \frac{g \delta_{\epsilon}^3 \Delta T}{\nu a_{T_{\epsilon}} (273+T_{cp})} \quad (12.57)$$

Розрахувавши вираз (12.54), робимо висновок, що при $\delta_n \leq 10$ мм, $Gr_n Pr_n < 1000$.

Звідси слідує, що $\zeta_{\kappa}=1$ [2.2], тобто перенесення теплоти від тіла розжарювання до колби здійснюється теплопровідністю повітря, а конвекцією можна знехтувати. Прозора стінка колби, антипригарне покриття та ламінарний прошарок мають різну пропускну здатність і коефіцієнт теплопровідності. В якості антипригарного покриття використовуємо тонкі фторопластові плівки [12.13], які прозорі на всьому діапазоні випромінювання. Тому втратами випромінювання в них можна знехтувати.

$$\left. \begin{aligned}
\Phi'_T &= (T_{ичн} - T_{C1}) \left(\frac{\lambda_{T\phi} + \alpha'_L \delta_\phi}{\delta_\phi} \right) S_{12}; \\
\Phi'_T &= (T_{C1} - T_{C2}) \left(\frac{\lambda_{Tc} + \alpha'_L \delta_c}{\delta_c} \right) S_{12}; \\
\Phi'_T &= (T_{C2} - T_\phi) \frac{\lambda_{T\phi}}{\delta_\phi} H_{12}; \\
\Phi'_T &= (T_\phi - T_{лс}) \left(\frac{\lambda_{Tл} + \alpha''_L \delta_{лс}}{\delta_{лс}} \right) S_{12}; \\
\Phi'_T &= (T_{лс} - T_{жс}) \alpha_{жс} H_{12}.
\end{aligned} \right\} \quad (12.58)$$

де $\Phi'_T = \Phi_{Tc} + \Phi'_{л}$;

Φ'_T – тепловий потік, що передається від випромінювача до рідини, Вт;

Φ_{Tc} – тепловий потік, що передається від тіла розжарювання до рідини теплопровідністю, Вт;

$\Phi'_{л}$ – потік випромінювання від випромінювача, Вт;

$\alpha_{л}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням від тіла розжарювання до колби, Вт/м²·°C;

$\alpha'_{л}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням прозорої стінки, Вт/м²·°C;

$\alpha''_{л}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням ламінарного прошарку, Вт/м²·°C;

$\lambda_{Tн}, \lambda_{Tc}, \lambda_{T\phi}, \lambda_{Tл}$ – коефіцієнти теплопровідності повітря $\lambda_{Tн}=5,2 \cdot 10^{-2}$ Вт/м²·°C; скла кварцового $\lambda_{Tc}=1,45$ Вт/м²·°C; фторопласта $\lambda_{T\phi}=5,2 \cdot 10^{-2}$ Вт/м²·°C; молока $\lambda_{Tл}=5,2 \cdot 10^{-2}$ Вт/м²·°C;

$\delta_n, \delta_c, \delta_\phi, \delta_{лс}$ – товщина зазорів відповідно: повітряного, між тілом розжарювання та стінкою колби; стінки колби; фторопластового покриття; ламінарного прошарку, м;

$T_{ичн}, T_{c1}, T_{c2}, T_\phi, T_{лс}, T_p$ – температура відповідно: тіла ПЧ-електронагрівача; стінки колби, зверненої до нагрівача; зовнішньої стінки колби; фторопластового покриття; пристінного прошарку; пастеризованої рідини, °C;

S_{1-2} – взаємна площа теплопередачі, м².

Згідно з отриманим виразом розподіл променевого потоку має вигляд:

$$\Phi_{\lambda} = H_{12} \int_{\lambda_{\text{випр.к}}}^{\lambda_{\infty}} f_{\lambda} \partial \lambda_{\text{випр}} + H_{12} \int_{\lambda_{\text{випр.0}}}^{\lambda_{\text{випр.лс}}} f_{\lambda} \partial \lambda_{\text{випр}} + H_{12} \int_0^{\lambda_{\text{випр.м}}} f_{\lambda} \partial \lambda_{\text{випр}}, \quad (12.59)$$

де f_{λ} – спектральна інтенсивність випромінювання, Вт/мкм;

$\lambda_{\text{випр.0}} - \lambda_{\text{випр.лс}}$ – діапазон поглинання пристінного прошарку, мкм;

$0 - \lambda_{\text{випр.м}}$ – діапазон поглинання молока, мкм;

$\lambda_{\text{випр.к}} - \lambda_{\infty}$ – діапазон поглинання колби, мкм.

З урахуванням формули Планка [1.14] вираз (12.59) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \Phi_{\lambda} = & H_{12} \int_{\lambda_{\text{випр.к}}}^{\lambda_{\infty}} \frac{c_1 \lambda_{\text{випр}}^{-5}}{c_2} \partial \lambda_{\text{випр}} \frac{1}{e^{\frac{\lambda_{\text{випр}} T_{\text{випр}}}{c_2} - 1}} + H_{12} \int_{\lambda_{\text{випр.0}}}^{\lambda_{\text{випр.лс}}} \frac{c_1 \lambda_{\text{випр}}^{-5}}{c_2} \partial \lambda_{\text{випр}} \frac{1}{e^{\frac{\lambda_{\text{випр}} T_{\text{випр}}}{c_2} - 1}} + \\ & + H_{12} \int_0^{\lambda_{\text{випр.м}}} \frac{c_1 \lambda_{\text{випр}}^{-5}}{c_2} \partial \lambda_{\text{випр}} \frac{1}{e^{\frac{\lambda_{\text{випр}} T_{\text{випр}}}{c_2} - 1}}, \end{aligned} \quad (12.60)$$

де c_1 – перша постійна формула Планка, $c_1 = 4,99 \cdot 10^{-22}$ Дж·см;

c_2 – друга постійна формула Планка, $c_2 = 1,44$ мкм·К;

$T_{\text{випр.}}$ – абсолютна температура випромінювача, К.

Визначивши характерні оптичні діапазони для речовин та підставивши їх у рівняння (12.60), отримуємо потік випромінювання від випромінювача Φ_{λ} . Розрахунок підінтегральних виразів забезпечується з використанням обчислювальної техніки, для інженерних розрахунків можна використати наближений графоаналітичний метод. Цим методом визначається величина відносного пропускання речовини в заданому діапазоні випромінювання $\Delta\lambda$, тобто величина

$$F_{\text{від}} = \frac{\Phi_{\lambda \Delta\lambda}}{\Phi_{\lambda 0-\infty}}, \quad (12.61)$$

де $F_{\text{від}}$ – відносне пропускання речовини, в.о.;

$\Phi_{\Delta\lambda}$ – потік випромінювання в заданому діапазоні $\Delta\lambda$, Вт;

$\Phi_{10-\infty}$ – загальний потік випромінювача, Вт.

Визначивши величину відносного пропускання речовини в заданому діапазоні випромінювання ми можемо визначити коефіцієнти тепловіддачі випромінюванням:

$$\begin{aligned}\alpha_{\Delta\lambda} &= 5,67 \varepsilon_{np,r1} \Delta T \\ \alpha'_{\Delta\lambda} &= 5,67 \varepsilon_{np,r2} \Delta T F_{\text{від}} \\ \alpha''_{\Delta\lambda} &= 5,67 \varepsilon_{np,r3} \Delta T F'_{\text{від}},\end{aligned}\tag{12.62}$$

де $\varepsilon_{np,r}$ – приведений коефіцієнт чорноти тіл, що беруть участь у теплообміні, в.о.;

$F_{\text{від}}$ – відносне пропускання прозорої роздільної стінки, в.о.;

$F'_{\text{від}}$ – відносне пропускання пристінного шару молока, в.о.

Для найпростішого випадку теплообміну випромінюванням між двома паралельними площинами, які мають однакові розміри, що значно переважають відстань між ними, приведений коефіцієнт чорноти дорівнює [1.14]:

$$\varepsilon_{np,r} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_{r2}} - 1}.$$

Таким чином,

$$\alpha_n = \frac{5,67 \Delta T}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_{r2}} - 1}; \quad \alpha'_n = \frac{5,67 \Delta T F_{\text{від}}}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_{r3}} - 1}; \quad \alpha''_n = \frac{5,67 \Delta T F_{\text{від}} F'_{\text{від}}}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_{r4}} - 1}, \tag{12.63}$$

де ε_{r1} – відносний коефіцієнт чорноти випромінювача, в.о.;

ε_{r2} – відносний коефіцієнт чорноти повітря, в.о.;

ε_{r3} – відносний коефіцієнт чорноти прозорої роздільної стінки, в.о.;

ε_{r4} – відносний коефіцієнт чорноти молока, в.о.

Ураховуючи, що $\delta/\lambda_m = R_m$ – термічний опір теплопередачі, із системи рівнянь (12.58) визначаємо температурний напір на кожній ділянці системи складної теплопередачі:

$$\begin{aligned}
 T_{i,n} - T_{C1} &= \Phi'_T R_{T6} / S_{1-2} \\
 T_{C1} - T_{C2} &= \Phi'_T R_{ck} / S_{1-2} \\
 T_{C2} - T_{\phi} &= \Phi'_T R_{T\phi} / S_{1-2} \\
 T_{\phi} - T_{lc} &= \Phi'_T R_{Tlc} / S_{1-2} \\
 T_{lc} - T_{ж} &= \Phi'_T R_{Tж} / S_{12}.
 \end{aligned}
 \tag{12.64}$$

Отриманий вираз дозволяє визначити розподіл температурного поля між випромінювачем і потоком рідини. Сумарний температурний напір ПЧ-нагрівання дорівнює:

$$T_{i,n} - T_{ж} = \frac{\Phi_T R_T}{S_{1-2}}, \tag{12.65}$$

де

$$\begin{aligned}
 R_T &= \frac{\delta_{\theta}}{\lambda_{\theta} + \frac{5,67\Delta T_{\theta} \delta_{\theta}}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_{r2}} - 1}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c + \frac{5,67\Delta T F_{\theta} \delta_c}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_{r2}} - 1}} + \frac{\delta_{\phi}}{\lambda_{cp.}} + \\
 &+ \frac{\delta_{lc}}{\lambda_{Tm} + \frac{5,67\Delta T F_{\theta} F'_{\theta} \delta_{lc}}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_{r2}} - 1}} + \frac{1}{\alpha_{ж}}.
 \end{aligned}
 \tag{12.66}$$

Використовуючи вирази, отримані в попередніх підрозділах, терморадіаційні характеристики молока та результати аналітичного розрахунку теплового перенесення в секції ПЧ-електронагрівання, можна визначити основні параметри теплоперенесення. Для цього задаємо певні конструктивні значення елементів випромінювача, а саме:

- товщина повітряного прошарку між випромінювачем та скляною колбою $\delta_b = 2\text{мм}$ ($0 < \delta_b < 5\text{мм}$);
- товщина стінки прозорої колби $\delta_c = 2\text{мм}$ ($2\text{мм} < \delta_c < 5\text{мм}$);
- товщина фторопластового покриття $\delta_f = 0,025\text{мм}$ ($0,02\text{мм} < \delta_f < 0,3\text{мм}$);
- товщина щілиноподібного каналу камери нагрівання $e = 6\text{ мм}$ (у разі двостороннього опромінення);
- температура випромінювача $T_{\text{ен}} = 1020^\circ\text{C}$, температура пастеризації $T_{\text{еп}} = 80^\circ\text{C}$.

Швидкість нагрівання молока визначаємо з виразу:

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{P_{\text{ов}}}{\rho \cdot c} = \frac{2\Phi}{S_{12} \cdot \rho \cdot c},$$

де $\frac{\Delta T}{t}$ – швидкість нагрівання молока, $^\circ\text{C}/\text{с}$;

ρ – густина молока, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c – теплоємність молока, $\text{Дж}/\text{кг}^\circ\text{C}$.

12.4. Розрахунок секції ІЧ-електронагрівання пастеризатора молока

12.4.1. Вихідні технічні вимоги до пристрою

Секція ІЧ-електронагрівання призначена для використання в проточній пастеризаційній установці з метою знищення патогенної мікрофлори та подовження строків зберігання в умовах молочних ферм сільськогосподарських підприємств різних форм власності. Секція ІЧ-електронагрівання замінює парову секцію пастеризатора ОПФ-1-300.

Умови роботи.

1. Секція ІЧ-електронагрівання використовується для термообробки нормалізованого та незбираного молока або відвійок у приміщеннях із

температурою навколишнього середовища від 3°C до 35°C і відносною вологістю до 95%.

2. Камера ІЧ-електронагрівання може бути включена до існуючої технологічної лінії обробки молока замість парової (традиційної) секції пастеризації.

3. Камера ІЧ-електронагрівання може використовуватися в умовах підвищеної небезпеки зараження обслуговуючого персоналу (при знищенні збудника туберкульозу) і має повною мірою відповідати вимогам техніки безпеки при роботі з інфікованим матеріалом.

4. Час безперервної роботи за зміну – 4 години.

5. Електропостачання від мережі трифазного змінного струму напругою 380/220 В, частотою 50 Гц, із коливанням напруги $\pm 5\%$.

Якісні показники технологічного процесу пастеризації.

1. Секція ІЧ-електронагрівання в комплекті з теплообмінним устаткуванням має забезпечувати якість пастеризації молока відповідно до вимог ДСТУ 2661:2010 «Молоко коров'яче питне», установка має забезпечувати повне знищення в молоці патогенної мікрофлори, зокрема збудника туберкульозу.

2. Безрозбірна санітарна обробка устаткування має забезпечувати чистоту апарата відповідно до інструкції щодо санітарної обробки устаткування на підприємствах молочної промисловості.

Техніко-експлуатаційні вимоги й показники, що регламентують надійність.

1. Камера ІЧ-електронагрівання є складовою частиною пастеризаційно-охолоджувальної установки, що складається з:

- секції регенерації з коефіцієнтом регенерації $> 0,81$;
- зрівнювального бака;
- молочного насоса;
- трубопроводних арматур і комунікацій;
- пульта керування.

2. Технологічна схема пастеризації молока передбачає такі операції: запуск установки на воді, пастеризацію молока, миття й стерилізацію установки.

3. Продуктивність секції ПЧ-електронагрівання 1000 л/год.

4. Установлена електрична потужність секції ПЧ-електронагрівання 18 кВт.

5. Режим руху потоку молока в каналах секції ПЧ-нагрівання є турбулентним ($Re = 20000-30000$), без доступу повітря.

6. Максимальна товщина оброблюваного шару продукту (у разі одностороннього опромінення) 2 мм (+1 мм).

7. Джерела ПЧ-електронагрівання вироблені з резистивного матеріалу з розрахунковою температурою 1020°C та терміном служби не менше 4000 годин. Максимальне значення спектральної випромінювальної інтенсивності інтегрального потоку ПЧ-випромінювання лежить у діапазоні 2–2,5 мкм. Питома поверхнева потужність електронагрівання $10,5 \cdot 10^4 - 12,5 \cdot 10^4$ Вт/м². Швидкість нагрівання молока $9^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

8. Зовнішня поверхня випромінювачів, що контактує з молоком у секції ПЧ-електронагрівання, виготовляється з матеріалу, що є термостійким до робочої температури 1020°C , має електроізоляційні властивості, дозволений медичними й санітарними нормами до контакту з харчовими продуктами.

9. Конструкція камери нагрівання має забезпечувати максимальну площу теплопередачі; рівномірність опромінення; монтаж, демонтаж або заміну вузлів, універсальність і модульний принцип побудови; необхідний діапазон продуктивності.

10. Деталі й вузли секції ПЧ-електронагрівання, як і пастеризаційної установки в цілому, мають бути стійкими до дезінфікуючих і мийних засобів, що використовуються згідно з чинними інструкціями, і не чинити шкідливого впливу на оброблюваний продукт.

11. Уся установка має відповідати вимогам «Правил і будові електроустановок», «Правил техніки безпеки й правил технічної експлуатації

електроустановок споживачів».

12.4.2. Розрахунок параметрів секції ІЧ-електронагрівання з пластинчастими випромінювачами та щілинним каналом

Відповідно до результатів дослідження, викладених у підрозділі 12.3, беремо до розробки секцію ІЧ-електронагрівання з пластинчастими випромінювачами та щілинним каналом.

Секція нагрівання працює так (рис. 12.5). Молоко (рідкий харчовий продукт) надходить через патрубок 4 усередину апарата і, рухаючись по щілинному каналу 7, омиває прозорі стінки 5 випромінювача 1, при цьому опромінюється, нагріваючись відповідно до режиму пастеризації. Потім молоко, виходячи із секції, прямує для подальших технологічних операцій.

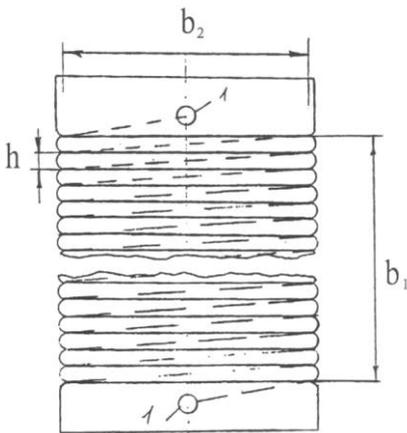
Зовнішня поверхня прозорої для ІЧ-променів стінки вкрита антипригарним покриттям із фторопласту Ф-4МБ, що істотно зменшує можливість пригорання молока під час тривалої роботи установки. Висока прозорість стінки, тобто мінімальне нагрівання, створює невеликий градієнт температур між молоком та зовнішньою поверхнею нагрівача, що запобігає пригоранню продукту.

Для проходу молока в нижній частині елементарного ІЧ-випромінювача передбачено технологічний отвір 8. Розміри і параметри кожного з нагрівачів однакові, тому при виході з ладу або ремонті вони легко замінюються. Розбірність конструкції дозволяє робити необхідне технічне обслуговування, промивання та дезінфекцію обладнання.

Електрична потужність і продуктивність секції ІЧ-нагрівання забезпечуються необхідною кількістю елементарних випромінювачів та можуть змінюватися в широких межах шляхом паралельно-послідовного з'єднання.

Електричні параметри випромінювача знаходимо на основі теплотехнічного та гідравлічного розрахунку секції ІЧ-нагрівання. Термічний опір системи теплообміну з рівняння (12.66) не враховує конструкцію джерела

випромінювання і характеризує теплопередачу між двома суцільними стінками, які мають відповідно температуру T_{en} та T_{cm} .



Якщо випромінююче тіло не суцільне, а виготовлене, наприклад, із ніхромового проволу, навитого на плоский керамічний або скляний каркас (рис. 12.12), термічний опір системи змінюється. Провід навито на каркасі паралельними нитками з кроком h_{uu} .

Рисунок 12.12 – Схема електричного ПЧ-випромінювача

Згідно з [1.14] термічний опір R_{TL} від нагрівального проволу довжиною L_{np} до стінки колби визначається так:

$$R_{TL} = \frac{1}{2\pi L_{np} \lambda_{Tв}} \ln \left[\frac{2h_{uu} Sh \left(\frac{\pi a}{h_{uu}} \right)}{\pi d_{np}} \right], \quad (12.67)$$

де R_{TL} – термічний опір нагрівального проволу, °C/Вт;

$\lambda_{Tп}$ – теплопровідність повітря;

h_{uu} – крок навивки, м;

d_{np} – діаметр проволу, м;

$2a$ – відстань між внутрішніми стінками колби, м;

$$Sh \frac{\pi a}{h_{uu}} = \frac{e^{\frac{\pi a}{h_{uu}}} - e^{-\frac{\pi a}{h_{uu}}}}{2} - \text{гіперболічний синус.}$$

Відповідно, термічний опір 1 м² площі поверхні нагрівального проволу дорівнює:

$$R_{TH_{np.}} = \frac{d_{np.}}{2\lambda_{Tв}} \ln \left[\frac{2h_{uu} Sh \left(\frac{\pi a}{h_{uu}} \right)}{\pi d_{np.}} \right], \quad (12.68)$$

де R_{THnp} – термічний опір 1 м^2 площі нагрівального проводу, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$.

З урахуванням теплопередачі випромінюванням термічний опір повітряного проміжку між випромінювачем та стінкою колби дорівнює:

$$R_{Tв.нр} = \frac{d_{np} \ln \left[\frac{2h_{ш}}{\pi d_{np}} Sh \left(\frac{\pi a}{h_{ш}} \right) \right]}{2\lambda_{Tв} + \left(\frac{5,67\Delta T}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_{r2}} - 1} \right) d_{np} \ln \left[\frac{2h_{ш}}{\pi d_{np}} Sh \left(\frac{\pi a}{h_{ш}} \right) \right]} \quad (12.69)$$

Аналіз отриманого виразу та рівняння (12.66) показує, що їх тотожність можлива при рівності:

$$\delta_{в} = \frac{1}{2} d_{np} \ln \left[\frac{2h_{ш}}{\pi d_{np}} Sh \left(\frac{\pi a}{h_{ш}} \right) \right]. \quad (12.70)$$

Потужність одного нагрівача дорівнює:

$$P_{ен} = \frac{P_{ycm}}{N} = \frac{G\rho c(T_{ен} - T_{рег.})}{N\eta}, \quad (12.71)$$

де $P_{ен}$ – потужність електронагрівача, Вт;

N – кількість нагрівачів, шт.;

η – ККД установки, в.о.

Використовуючи результати розрахунків, визначаємо взаємну площу теплообміну S'_{12} одного випромінювача відповідно до динаміки потоку з відношення

$$S'_{1-2} = \frac{P_n}{P_{ен}}, \quad (12.72)$$

де $P_n = \frac{\Phi}{H_{12}}$ – питома потужність випромінювача.

Оскільки випромінювач омивається з обох боків, площа тіла випромінювання дорівнює половині взаємній площі теплообміну, тобто $S_{1-2} = 2S_{ен}$. Далі визначаємо довжину випромінювача:

$$l_{ен} = S_{ен} / b_2. \quad (12.73)$$

При цьому треба враховувати, що $l_{ен} / 4r' \geq 50$ та $b_2 / b_1 = 1-40$ [1.14], в іншому разі умови теплообміну порушуються. Знаходимо мінімальну довжину каналу секції нагрівання.

$$l_{к.н.мін} = \nu_{ср} \cdot t_{ен}. \quad (12.74)$$

Отримане значення порівнюємо з реальною довжиною $l_{к.н.} = l_{ен} \cdot N$. Якщо $l_{к.н.мін} < l_{к.н.}$, продовжимо визначення додаткових параметрів секції ІЧ-електронагрівання. В іншому разі збільшимо кількість електронагрівачів N . Далі визначаємо переріз нагрівального проводу $s_{пр.}$, задаючи крок витків $h_в$ ($h_в = 0-10$ мм):

$$s_{пр.} = \frac{L_{пр.} \cdot P_{ен}}{\gamma_{\theta} U^2}, \quad (12.75)$$

де $L_{пр.}$ – довжина проводу, м;

γ_{θ} – питома провідність проводу, 1/Ом·м;

U^2 – напруга електричного живлення, В.

Згідно зі способом укладання проводу його довжина $L_{пр.}$ дорівнює:

$$L_{пр.} = 2n \left(\sqrt{b_2^2 + h_{ви}^2} + \delta_{к} \right), \quad (12.76)$$

де $\delta_{к}$ – товщина каркаса випромінювача, м;

$n = \frac{l_{ен}}{h_{к}} = \frac{S_{ен}}{b_2 h_{ви}}$ – кількість витків нагрівального проводу, шт.

Підставивши значення n у рівняння (12.76), а потім у (12.75), отримуємо:

$$s_{np.} = \frac{2S_{ен} \left(\sqrt{b_2^2 + b_{uu} + \delta_\kappa} \right) P_{ен.}}{U^2 \gamma_\theta b_2 h_{uu}} \quad (12.77)$$

Звідси діаметр нагрівального проводу дорівнює $d_{np.} = 2 \sqrt{\frac{s_{np.}}{\pi}}$.

Вибираємо з довідкової літератури найближче значення діаметра ніхромового проводу, уточнюємо його реальну довжину та кількість витків за формулами:

$$L_{np.} = \frac{U^2 s_{np.} \gamma_\theta}{P_{ен.}} \quad (12.78)$$

$$n = \frac{L_{np.}}{2 \left(\sqrt{b_2^2 + h_{uu} + \delta_\kappa} \right)} \quad (12.79)$$

Відстань між внутрішніми стінками колби $2a$ вибираємо з рівняння (12.70) відповідно до отриманих значень. Правильність вибору параметрів ПЧ-випромінювача перевіряємо з рівняння, що враховує умови теплообміну:

$$T_{ен} = \frac{P_{уст.}}{H_{ич.н}} \left\{ \frac{d_{np} \ln \left[\frac{2h_{uu}}{\pi d_{np}} Sh \left(\frac{\pi a}{h_{uu}} \right) \right]}{2\lambda_{T_6} + \left(\frac{5,67\Delta T}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_{r2}} - 1} \right) d_{np} \ln \left[\frac{2h_{uu}}{\pi d_{np}} Sh \left(\frac{\pi a}{h_{uu}} \right) \right]} + \frac{\delta_c}{\lambda_{Tc} + \frac{5,67\Delta T F_{від} \delta_c}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_{r3}} - 1}} + \frac{\delta_\phi}{\lambda_{T\phi}} + \frac{\delta_{лс}}{\lambda_{Tн} + \frac{5,67\Delta T F'_{від} \delta_{лс}}{\frac{1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{1}{\varepsilon_4} - 1}} + \frac{1}{\alpha_{жс}} \right\} + T_{ен.} \quad (12.80)$$

Відповідність заданої температури випромінювача $T_{iч.н}$ та отриманого значення $T_{iч.н}$ свідчить про правильність розрахунку конструктивних розмірів. У разі невідповідності необхідно змінити крок навивки, а отже, діаметр і довжину проводу.

12.5 Вплив електропастеризації на фізико-хімічні показники молока

Результати оцінки якості молока, обробленого ІЧ пастеризатором показали, що у його складі значно зменшено кількість мікроорганізмів, а різниця та властивості сирого та пастеризованого молока не істотна. Термін придатності обробленого молока до 10 діб при температурі 4-5 °С. Пастеризоване молоко можна використовувати для виготовлення кисломолочної та інших видів молочної продукції. Пастеризаційний ефект (99,98 %) отриманий на установці ІЧ нагрівання, відповідає режиму пастеризації затвердженому Головним управлінням ветеринарної медицини України №15-1-1-2/129 від 06.04.94р., як спосіб для знищення збудника туберкульозу.

Визначення ефекту пастеризації молока на моделі установки показало, що при електропастеризації знешкоджуються 99,98% мікроорганізмів в порівнянні з сирим молоком (табл. 12.2).

Конструкція устаткування забезпечує проведення санітарної обробки. В одному мілілітрі змивів із внутрішніх патрубків секції пастеризації та охолодження містилося від 9,5 до 40,5 мікроорганізмів (табл. 12.3).

Стійкість пастеризованого молока при різних умовах його зберігання наведено в таблиці 12.4.

Результати проведених досліджень показали, що застосування електропастеризаторів з ІЧ нагріванням забезпечує підвищення ефективності обробки молока шляхом раціонального використання електричної енергії та обладнання. Уточнені терморадіаційні характеристики молока забезпечили визначення робочого діапазону ІЧ випромінювача $\lambda_{\text{випр}} = 1 \dots 6$ мкм з максимальною випромінювальною здатністю при $\lambda_{\text{max}} = 2,3$ мкм, максимальною

Таблиця 12.2 - Основний склад і якість молока до і після електропастеризації

Показники	Вихідне сире молоко	Молоко оброблене паром при 85°C	Молоко, оброблене в секції ІЧ нагрівання
Зовнішній вигляд	Однорідна рідина без осаду	Однорідна рідина без осаду	Однорідна рідина без осаду
Смак і запах	Чисті, притаманні природному молоку	Чисті, з явно вираженою пастеризацією	Чисті, зі слабо вираженою пастеризацією
Колір	Від білого до слабо жовтого	Від білого до слабо жовтого	Від білого до слабо жовтого
Кислотність	16,4	16,5	16,1
Строк зберігання, діб, при +5 °С, в темряві	3	до 8	більше 10
Вміст жирів, %	3,2	3,2	3,2
Загальний білок	3,18	3,12	3,16
Густина, г/м	1,028	1,028	1,028
Вміст вітаміну С, мг/л	14,9	14,0	14,6
Ступінь чистоти по еталону, якість	1	1	1
Загальна кількість бактерій в 1 мл	431000	375	86
Залишкова мікрофлора пастеризованого		0,09	0,01995
Ефект пастеризації		99,91	99,98

Таблиця 12.3 - Санітарний стан електропастеризатора після циркуляційного промивання

Показники	Дні відбору проб для аналізу після генерального промивання					Санітарні норми	Примітки
	2	4	6	11			
Водопровідна вода:							
Кількість мікробів в 1 мл	15	11	15	11	до 100		
Колі-титр	300	300	300	300	до 300		
Змивна вода (к-сть							

мікробів в 1 мл) Колі-титр	18 300	110 300	370 300	2800 300	до 100 до 300	
Молоко до пастеризації: Кількість мікробів в 1 мл: Колі-титр	310000 0,01	90000 0,1	380000 0,001	7·10 ⁶ 0,001	До 500000	
Молоко після пастеризації: Кількість мікробів в 1 мл: ІЧ (всього) А)секція нагрівання: Патрубки Коліна Б)секція охолодження: А)патрубки Б)коліна Колі-титр	88 9,5 24,2 13,8 40,3 3	87 9,5 24,2 13,8 40,3 3	88 9,5 23,9 13,5 40,1 3	170 19,2 48,5 26,8 75,4 3	До 50000 не < 3	

Таблиця 12.4 - Стійкість пастеризованого молока при різних умовах його зберігання

		Тривалість зберігання молока без зміни його показників у днях і годинах					
						По сортності	
Умови зберігання	Спосіб пастеризації	За кислотністю	За виглядом й запахом	За стійкістю	За бактеріальним забрудненням	За класом з урахуванням мікробіального забруднення	За кислотністю
В холодильнику при 4-5 °С	ІЧ	15дн.	16дн.	16 дн.	3дн.	9дн.	17дн.
	Паров.	8дн.	12дн.	14дн.	3дн.	8дн.	11 дн.
В кімнаті при 18°С	ІЧ	1дн.	2дн.	2дн.	-	-	Ідн.
	Паров.	Ідн.	2дн.	2дн.	-	-	Ідень
В термостаті при 55°С	ІЧ	19год.	19год.	19год.	-	-	19год.
	Паров.	19 год.	19 год.	19 год.	-	-	19год.

глибиною проникнення в молоко 1,7 мм та робочою температурою випромінюючого тіла - 1020 °С.

Розроблена математична модель процесу теплопередачі в секції ІЧ нагрівання проточного електропастеризатора. Її застосування забезпечує:

- Збільшення питомої потужності ІЧ випромінювання до $P_{\text{пит.}} = 10,7 - 12,5 \text{ Вт/см}^2$,
- Збільшення швидкості нагрівання молока до $8,8 - 10,4 \text{ °С/с}$.

Результати оцінки якості молока, обробленого ІЧ пастеризатором показали, що у його складі значно зменшено кількість мікроорганізмів, а різниця та властивості сирого та пастеризованого молока не істотна. Термін придатності обробленого молока до 10 діб при температурі 4-5 °С.

ВИСНОВОК

Накопичені знання про механізм дії різних видів електромагнітного нагрівання речовин на молекулярному, клітинному, тканинному рівнях дали можливість описати теоретичні підходи до розуміння теплових процесів, запропонувати найбільш раціональні способи обробки харчової сировини, обґрунтувати конструкцію та параметри установок, забезпечити підвищення енергоефективності технологічних процесів та високу якість продукції.

Застосування представлених розробок забезпечує більш високий рівень організації виробництва, зниження собівартості та постачання населенню якісної харчової продукції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1.1. Robert F. Schiffmann Microwave Technology a Half-Century of Progress / F. Robert // Food Product. – 1997. – № 6. – P. 15-17.
- 1.2. Neil H. Mermelstein Microwave processing of food / H. Neil // Food Technology. – 1999. – Vol. 53, № 7. – P. 114-121.
- 1.3. Lin Y. E. Studies on popping of popcorn in a microwave oven / Y. E. Lin, R. C Anantheswaran // J. Food Sci. – 1988. – P. 1746.
- 1.4. Microwave Oven Radiation. – Rockville: Center for Devices and Radiological Health, Department of Health and Human Services. – 2003. – 5 p.
- 1.5. Рогов И. А. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И. А. Рогов, С. В. Некрутман, Г. В. Лысов. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 199 с.
- 1.6. Microwaves in the industry processes. Biennial Report // Publications of Environmental Technology Centre. – Toronto: Canada, 1998. – 23 p.
- 1.7. Параскова П. Возможности современных микроволновых технологий для переработки пищевых продуктов и консервирования / П. Параскова, Т. Чекаров // Мікрохвильові технології в народному господарстві: Впровадження. Проблеми. – Одеса : ОКФА, 1996. – С. 31-34.
- 1.8. Игнатов В. А. Влияние электромагнитных полей СВЧ диапазона на бактериальную клетку / В. А. Игнатов, В. И. Панасенко, А. П. Пиденко, Ю. П. Радин, Б. А. Шендеров. – Саратов: СГУ, 1978. – 76 с.
- 1.9. Барышев М. Г. Влияние электромагнитного поля на биологические системы растительного происхождения / М. Г. Барышев. – Краснодар : КубГУ, 2002. – 303 с.
- 1.10. Сперроу Э. М. Теплообмен излучением /Сперроу Э.М., Сесс Р.Д. – Л.: Энергия, 1971. – 294 с.
- 1.11. Андрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена / Андрианов В.Н. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.
- 1.12. Зигель Р. Теплообмен излучением/ Зигель Р., Хауэлл Дж. – М.: Мир, 1975. – 934 с.

1.13. Рогов А.И. Применение инфракрасного излучения в отраслях пищевой промышленности (Обзор) / А.И. Рогов, Н.Н. Жуков. – М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1971. – 78 с.

1.14. Ильясов С. Г. Физические основы ИК-облучения пищевых продуктов / Ильясов С.Г., Красников В.В.– М.: Пищевая промышленность, 1978. – 359 с.

1.15. Левитин И.Б. Применение инфракрасной техники в народном хозяйстве / Левитин И.Б. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. – 264 с.

1.16. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 272 с.

2.1. Мешков И. Н. Электромагнитное поле / И. Н. Мешков, Б. В. Чириков.– Новосибирск : Наука, 1987. – Ч. 1. –200 с.

2.2. Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел / Брамсон М. А.– М.: Наука, 1996. – 225 с.

2.3. Борхерд Р. Техника инфракрасного нагрева / Борхерд Р., Юбиц В.– М.: Гос.энерг. изд-во, 1963.– 312с.

2.4. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности / А.С.Гинзбург. – М.: Пищевая пром-сть, 1973. - 527 с.

3.1. Вода в дисперсных системах/ Б.И. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко и др. – М.: Химия, 1989. – 288 с.

3.2. Применение дифференциально термического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии при изучении воды в пищевых продуктах/ Д. Симатос, М. Фоур, И. Бонжур, М. Коуч //Вода в пищевых продуктах : Пер. с англ. – М.: Пищевая пром-сть, 1980. – С.156-170.

3.3. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика. Теория и практика / Диденко А. Н. – М.: Наука, 2003.

3.4. Потапов В.А. Селективный механизм высокочастотного электромагнитного воздействия на структуру влаги в дисперсном материале / В.А. Потапов, В.В. Качалов // Вода в харчових продуктах і для харчових

продуктів: всеукр. наук.-практ. конф., 16-17 травня 2013 р.: тези.– Х.: ХДУХТ, 2013. – С. 65-66.

4.1. Фізика діелектриків / А.Н.Губкін.– М.: Вища школа, 1971. – 272 с.

4.2. Куні Ф.М. Статистична фізика і термодинаміка: підручник /Ф. М. Куні.– М.: Наука,1981. – 352 с.

4.3. Потапов В.А. Кинетика явлений переноса в процессе сушки: монография/ В.А. Потапов // LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland.– 2013. – 319 с.

4.4. Потапов В.А. О механизме влияния СВЧ-поля на структуру влаги в процессе сушки. Нестационарные, энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии / В.А. Потапов, Н.М. Цуркан // НЕРПО-2011 : 2-я Междунар. науч.-техн. конф., 12-14 апреля.– МГОУ, 2011. – С. 204-209.

5.1. Рогов И. А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И. А. Рогов. – М. : Агропромиздат, 1988. – 272 с.

5.2. Потапов В. О. Дослідження умов рівномірного нагрівання харчової сировини у функціональній місткості НВЧ-сушарки / В. О. Потапов, Н.М. Цуркан // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / ХДУХТ. – Харків, 2012. – Вип. 1(15). – С. 112-119.

5.3. Потапов В. О. До питання розрахунку внутрішніх джерел теплоти під час мікрохвильової обробки харчових продуктів / В. О. Потапов, В. В. Качалов, С. В. Михайлова // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць. – Вип. 1(17),ч. 2. – Х. : ХДУХТ, 2013. – С. 73-81.

5.4. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников/ А. В. Нетушил и др. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1956.– 480 с.

5.5. Романовский С.Т. Конвективный и комбинированный тепло- и массообмен при термической обработке капиллярнопористых материалов/ С.Т. Романовский. – Минск : Наука и техника, 1977.– 155 с.

6.1. Потапов В. О. До питання розрахунку внутрішніх джерел теплоти під час мікрохвильової обробки харчових продуктів /В. О. Потапов, В.В.Качалов, С.В. Михайлова // Прогресивні техніка та технологія харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр.– Харків : ХДУХТ, 2013. – Вип. 1 (17),ч.2. – С.73-81.

6.2. Потапов В. О. Обґрунтування фізичної моделі поширення електромагнітного поля за об'ємом харчових напівфабрикатів довільної форми / В. О. Потапов, В. М. Михайлов, С. В. Михайлова // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг : Міжнар. наук.-практ. конф., присв. 75-річчю з дня народж. ректора ун-ту (1988-1991 рр.), д.т.н., проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ Беляєва М.І., 19 листопада 2013 р. : тези доп. у 2 ч. – Х. : ХДУХТ, 2013. – Ч. 1. – С. 360-361.

6.3. Погожих Н. И. Определение напряженности СВЧ-поля по темпу нагрева модельного тела / Н. И. Погожих, В.А. Потапов, Н. М. Цуркан, О. Ю. Гриценко // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2011.– Вип. 39. – Т. 2. – С. 22-25.

7.1. Электрофизические оптические и акустические характеристики пищевых продуктов / И. А. Рогов, В. Я. Адаменко, С. В. Некрутман и др. // Легкая и пищевая промышленность. – М., 1981. – 288 с.

7.2. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов.– М.: Агропромиздат, 1988. – 272 с.

7.3. Эме Ф. Диэлектрические измерения/ Ф.Эме. –М.: Химия, 1967.– 223с.

7.4. Потапов В. А. Исследование состояния «системной воды» методами диэлькометрии / В. А. Потапов, Н.М. Цуркан, С.А. Шевченко // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2012.– Вип. 41, т. 1. – С. 98-101.

7.5. Діелектричні характеристики сумішей з прямих овочів / В. М. Михайлов, В. О. Потапов, Ю. І. Єфремов, С. В. Михайлова // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / Донец. нац. ун-т екон. і торг. ім. М. Туган-Барановського. – Донецьк : ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. – Вип. 29. – Т. 2. – С. 260-266.

8.1. Substantiation of a physical model of electromagnetic field interaction with a food product of an arbitrary form / V. O. Potapov, V. M. Mykhailov, S. V. Mykhailova, A. O. Borisova // Acta Mechanica Slovaca by Faculty of Mechanical Engineering : International Journal of Engineering – V. 19, № 1. – Slovak Republik, 2014. – P. 12-18.

9.1. Рогов И.А. Сверхвысококачественный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман – М.: Агропромиздат, 1986.–351 с.

9.2. Беляев М.І. Теоретичні основи комбінованих методів термічної обробки харчових продуктів / М.І. Беляев, П.Л. Пахомов – Харків: ХІОП, 1991. – 160 с.

9.3. Потапов В.А. Экспериментальное определение движущих сил кинетики сушки / В.А. Потапов, Н.И. Погожих, Н.М. Цуркан //Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) : Труды Междунар. науч.-практ. конф. Т.2. –М.: МГАУ. 2002. – С.118-121.

9.4. Потапов В.А. Модель кинетики тепломассопереноса в процессе СВЧ-обработки пищевого сырья / В.А. Потапов, Ю.И. Ефремов, Н.С. Одарченко, А.Н. Одарченко //Вестник ХНТУ. Инженерные науки. – №1(30). – Херсон, 2008. – С. 387-391.

10.1. Пат. на корисну модель 57028 Україна, МПК А 23 L 1/025. Установка для концентрування (сушіння) харчових систем з використанням НВЧ-нагріву і вакуумування / О. І. Черевко, Ю. І. Єфремов, В. М. Михайлов, В.О. Потапов, С. В. Михайлова, В. В. Качалов (Україна) ; заявник та патентовласник Харк. держ. ун-т харч. та торг. – № 201008088 ; заявл. 29.06.2010 ; опубл. 10.02.2011 ; Бюл. № 3. – 4 с.

11.1. Пат. 4317441 США, МКИ А 47 J 37/00. Broiler apparatus. Устрoйство для жарення м'яса / Roger M. Berg (США). – № 67368; заявл. 17.08.79; опубл. 02.03.82, НКИ 126/41. – 12 с.

11.2. Пат. 4664923 США, МКИ А 23 L 1/01. Method of infrared tunnel oven cooking of food products. ИК-аппарат для приготoвлення пици / Wagner Dennis, Wells Harold D. (США). – № 778350; заявл. 24.10.85; опубл. 12.05.87, НКИ 426/233. – 14 с.

11.3. Lawson D. A. An accurate program for radiation modelling in the desigh of high-temperasature furnaces / D. A. Lawson, C. D. Ziesler // IMA J Management Math. – 1996. – № 7(2). – С. 109–116.

11.4 Sheridan P. Application of far infra-red radiation to cooking of meat products / P. Sheridan, N. Shilton // Journal of Food Engineering. – 1999. – Vol. 41(3). – С. 203–208.

11.5. Тормосов Ю. М. Дослідження диференціального рівняння для опису форми профілю рефлектора, що забезпечує заданий закон розподілу відбитих променів / Ю. М. Тормосов // Прикладна геометрія та інженерна графіка : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2003. – №73. – С. 110–115.

11.6. Плевако В. П. Визначення форм рефлекторів теплотехнічних установок, які забезпечують заданий розподіл тепла на приймачах довільних перерізів / В. П. Плевако, С. Ю. Саєнко // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків : ХДУХТ, 2007. – Вип. 17. – С. 75–90.

11.7. Плевако В. П. Фрагментований рефлектор для рівномірного опромінювання приймача з напівеліптичною формою перерізу / В. П. Плевако, С. М. Костенко, І. П. Педорич // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / ХДУХТ. – Харків, 2008. – Вип. 2(8). – С. 266–275.

11.8. Плевако В. П. Рефлектор для рівномірного опромінювання приймача з урахуванням втрат теплоти / В. П. Плевако, С. М. Костенко, І. П. Педорич // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / голов.

ред. О. О. Шубін ; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. – 2010. – Вип. 24. – С. 137–146.

11.9. Костенко С. М. Комплексна оцінка якості апарата АРЖМ-0.07-1 / С. М. Костенко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / ХДУХТ. –Харків, 2014. – Вип. 2(20). – С. 168–173.

11.10. Physical and analytical modeling of infrared frying in arjm-0.07-1 apparatus/ Potapov V., Plevako V., Kostenko S., Pedorich I., Arkhipova V. // Industrial Technology and Engineering / M. Auezov South Kazakhstan State University. –2016. –№ 3(20). –P. 54-61.

11.11. Потапов В.О. Кінетика температури м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення / В.О. Потапов, С. М. Костенко // Chemical Technology and Engineering (Хімічна технологія та інженерія): зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф., 26–30 червня 2017 р. – Львів: Львівська політехніка, 2017. – С. 170–171.

11.12. Теплофизические характеристики пищевых продуктов : справочник / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – 3-е изд., доп. и перераб. – М. : Агропромиздат, 1990. – 287 с.

12.1. Кук Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности / Г.А. Кук. – 2-е изд. перераб. и доп.– М. : Агропромиздат, 1997. – 768с.

12.2. Мурзин В.К. Электрообогреватели из токопроводных нитей и тканей / В.К. Мурзин, А.А. Матвейчук // Механизация и электрификация сельского хозяйства.–1988. – №6. –С. 18-21.

12.3. Нападівська Л. А. Молочна та молочно-переробна промисловість: сучасний стан, проблеми безпеки, якості харчування, екології довкілля та шляхи їх розв'язання в Україні / Л. А. Нападівська, А. П. Пашков, В. Д. Волошанович, П. І. Пашков // Безпека життєдіяльності. – 2015. – № 6. – С. 21–25.

12.4. Василенко С. М. Основи тепломасообміну : підручник / С.М. Василенко, А.І. Українець, В.В. Ольшевський. – К.:НУХТ, 2004. – 250 с.

12.5. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. –Лейпциг: Тойбнер; Москва: Наука, 1981.–718 с.

12.6. Лисиченко М.Л. Лазерна установка для подовження терміну зберігання молока / М.Л. Лисиченко, В.І. Жила //Актуальні проблеми автоматики та приладобудування :матеріали ІІ Міжнар. наук.-техн. конф.,6-7 грудня 2018. – Харків, 2018. – С. 70-71.

12.7. Пат. 145547 Україна МПК А 23С 3/07, А23С 7/04. Знезаражувач-молокоочисник / ЖилаВ.І., Лисиченко М.Л., Холін В.В., Шаленко Я.А. – № и 2020 02644; заявл. 30.04.2020; опубл. 28.12.2020, Бюл. №24.

12.8. Жила В.І. Удосконалення знезаражувача-молокоочисника / В.І. Жила, В.М. Задорожна, М.Л. Лисиченко // The 32th International scientific and practical conference “Technologies for the development of modern ideas and opinions regarding world trends” (August 15-18, 2023). –Vancouver, Canada: International Science Group, 2023. –Р. 244-246.

12.9. Постановка експерименту та обробка результатів: навч. посібник для студ. фіз. спец. вищ. навч. закл. / А.В. Дехтярьов, М.Г. Кокодій, В.О. Маслов, В.О. Тіманюк. – Х.: ХНУ ім.В. Н. Каразіна, 2017. – 176 с.

12.10. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский – М. ; Л.: Энергия, 1970. – 414с.

12.11. Домарецкий В. А. Технологические процессы в пищевой промышленности : монография / В. А. Домарецкий, В. А. Поддубный, А. Е. Шевченко, Р. Н. Леус ; под ред. В. А. Домарецкого ; Национальный университет пищевых технологий. – Київ : Аскания, 2010. – 664 с.

12.12. Альтшуль А.Д. Критическое число Рейнольдса / Альтшуль А.Д., Ляпин В.Ю. // Изв. АН СССР.Энергетика и транспорт. –1983.–№4.– С.83-86.

12.13. Пат. 26329 Україна, МКИ 6А23С/02. Пастеризаційно-охолоджувальна установка для теплової обробки молока інфрачервоним електронагрівом / Жила В.І., Магда В.Й., Григоренко В.І. (Україна). – Заявл.19.05.1999; опубл.30.08.1999, Бюл.№5.

12.14. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева.
– М.: Энергия, 1977. – 344 с.

Наукове електронне видання
Можна використовувати в локальному та мережному режимах

ПОТАПОВ Володимир Олексійович
ЖИЛА Віктор Іванович

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ
МІКРОХВИЛЬОВОГО Й ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
В ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Монографія

В авторській редакції

Підп. до друку 2.04.2024 р. Об'єм даних 16,2 Мб.

Державний біотехнологічний університет
Вул. Алчевських, 44, Харків, 61002