

УДК 004.94:664

№ держреєстрації 0115U006803

Інв.

Міністерство освіти і науки України
Харківський державний університет харчування та торгівлі
(ХДУХТ)
61051, м. Харків, вул. Клочківська, 333;
тел. (057) 336-89-79; факс 337-85-35.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор ХДУХТ

д.т.н., проф. _____ О.І. Черевко

“ ____ ” _____ 2017 р.

З В І Т

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

№ 13-16-17Б

ПРИКЛАДНІ ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВОЇ ІНДУСТРІЇ (остаточний)

Керівник НДР,

д-р техн. наук, професор

В.О. Потапов

Харків – 2017

Рукопис закінчено “ 8 ” грудня 2017 р.

Результати роботи розглянуто на засіданні експертної ради з напрямку
«Розробка і впровадження новітніх інформаційних технологій»

26 грудня 2017 р. №2

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, д-р. техн. наук, професор	_____	В.О. Потапов (вступ, висновки, 1, 2, 3, 4, висновки)
Відповідальні виконавці: д-р. техн. наук, професор	_____	Ю.М. Тормосов (розд. 1, 2, 3)
канд. техн. наук, доцент	_____	С.Ю. Саєнко (розд. 1, 2, 3)
Виконавці: канд. техн. наук, проф.	_____	Д.П. Семенюк (розд. 1, 4, висновки)
канд. техн. наук, доцент	_____	О.В. Петренко, (розд. 4)
канд. техн. наук, доцент	_____	Є.М. Якушенко, (розд. 4)
канд. техн. наук, доцент	_____	І.В. Нечипоренко, (розд. 1)
канд. техн. наук, доцент	_____	І.В. Лебединець, (розд. 3)
канд. техн. наук, доцент	_____	В.А. Куценко, (розд. 3)
канд. техн. наук, доцент	_____	М.В. Жеребкін, (розд. 4)
старший викладач	_____	І.М. Бєляєва, (розд. 4)
старший викладач	_____	С.М. Костенко (розд. 3)
старший викладач	_____	І.П. Педорич (розд. 3)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 93с., 38 рис., 39 джерела.

Об'єкт дослідження – процес променевої теплопередачі з урахуванням одноразового відбиття променів в інфрачервоних апаратах харчових виробництв.

Мета роботи – удосконалення обладнання для тепло та холодопостачання підприємств харчування та торгівлі методами комп'ютерного моделювання технологічних процесів.

Метод дослідження – теорія променевого теплообміну, математичний аналіз та статистика, комп'ютерне моделювання, стандартні методи дослідження харчової сировини.

Результатом НДР є розробка методу розрахунку теплового потоку від циліндричного випромінювача з урахуванням товщини випромінювача та втрат енергії. Запропоновано нову математичну модель питомої теплоємності харчових систем в процесі заморожування, в основу якої покладено модель колоїдних капілярно пористих тіл, процес кристалізації яких контролюється двома конкуруючими процесами виморожування вільної вологи і збільшення енергії зв'язку вологи, яке проявляється в збільшенні в'язкості системи і гелеутворення.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – визначення оптимальних параметрів апарату інфрачервоної обробки харчової сировини та удосконалення технології заморожування харчової сировини.

ХАРЧОВА СИРОВИНА, ІНФРАЧЕРВОНЕ ОБЛАДНАННЯ, ВІДБИВАЛЬНА ПОВЕРХНЯ.

Умови одержання звіту: за договором № 13-16-17Б, м. Харків, вул. Клочківська, 333, ХДУХТ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. СИСТЕМА ПОНЯТЬ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОТІКАННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ	8
1.1. Визначення основних понять.	8
1.2. Основні проблеми моделювання та оптимізації технологічних об'єктів харчової промисловості.	11
1.3. Технологічний процес як об'єкт моделювання	16
1.3.1. Постановка задачі оптимізації технологічних процесів харчової промисловості.	20
1.3.2. Розробка напрямків вирішення проблеми енерго- та ресурсозбереження під час теплової обробки кулінарних виробів.	24
2. МОДЕЛЮВАННЯ РОСПОВСЮДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ	28
2.1. Розрахунок теплового потоку випромінювання від точкового джерела електронагрівника.....	28
2.2. Визначення площі радіальної проекції елементарної площадки координатної площини.....	30
2.3. Метод визначення щільності теплового потоку від циліндричної поверхні скінченних розмірів	33
2.4. Геометричне моделювання процесу променевої теплопередачі в поглинаючих газових середовищах	39
2.4.1. Теоретичні передумови впливу складу газового середовища на теплотехнічні показники променевої теплопередачі.	40
2.4.2. Обґрунтування застосування закону Бугера для розбіжного світлового пучка.....	44
2.4.3. Застосування закону Бугера для сферичної хвилі.	46
2.4.4. Дослідження впливу відносної вологості пароповітряного середовища на розподіл щільності теплового потоку в робочій камері ІЧ- установки.	50
3. ФІЗИЧНЕ ТА АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ	55
3.1. Моделювання теплових процесів у апараті АРЖМ-0.07-1	55
3.2. Моделювання кінетики температури харчової сировини	64
3.3. Системно-динамічне моделювання комплексної оцінки інфрачервоного апарату	69
4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАМОРОЖУВАННЯ	76
4.1. Модель кристалізації при заморожуванні харчових систем.	76

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	91
ДОДАТКИ.....	93

ВСТУП

Серед прогресивних способів теплової обробки харчових продуктів, що дозволяють вирішити низку технологічних проблем, важливе місце посідає термообробка інфрачервоним випромінюванням, яке інтенсифікує більшість технологічних процесів – жарення, сушіння, випікання тощо. Якісна та економна тепла обробка харчової продукції потребує обладнання, яке забезпечить рівномірну густину променевого потоку на поверхні продукту, а також використання теплоти з мінімальними втратами.

Отже, актуальним науково-прикладним завданням є розробка ефективного обладнання для теплового обігрівання шляхом забезпечення густини променевого потоку відповідно до заданих параметрів. Упровадження та використання такого обладнання забезпечить інтенсивний розвиток підприємств харчових виробництв шляхом підвищення якості продукції та економії ресурсів.

Вирішення завдання рівномірності теплового потоку променевої енергії на поверхні продукту довільної опуклої форми має ґрунтуватися на розв'язанні оберненої задачі з визначення форми рефлектора на основі двовимірного підходу, який забезпечує задану густину теплового потоку на продукті з урахуванням довільного закону зміни коефіцієнта поглинання вздовж поверхні відбивача. Це дозволить взяти до уваги реальні умови роботи інфрачервоного обладнання, що застосовується на підприємствах харчових виробництв та ресторанного господарства, з метою створення його прогресивних зразків.

Ще одним важливим напрямком цієї роботи є холодильна обробка харчової сировини. Оскільки кінцевою метою холодильної обробки є максимальне збереження харчової та біологічної цінності продукту, то термодинамічним критерієм цього є ступінь оборотності процесів заморожування-розморожування. Ці процеси в харчових продуктах надзвичайно складні для математичного моделювання, оскільки включають в

себе пов'язані процеси тепло-масопереносу, структурно-механічні зміни, хімічні і біохімічні реакції. У зв'язку з цим, одним із завдань даної роботи є створення адекватних математичних моделей, що дозволяють передбачати вплив технології м'ясних напівфабрикатів на процеси заморожування-розморожування.

Відповідно поставленій меті сформульовано наступні задачі:

- обґрунтувати можливість підвищення енергоефективності процесу інфрачервоної обробки харчової сировини;
- визначити вплив технологічних та конструктивних чинників на інтенсивність процесу інфрачервоної обробки харчової сировини;
- розробити метод визначення щільності теплового потоку від циліндричного випромінювача з урахуванням його діаметра та поглинання теплової енергії;
- створити математичну модель, що дозволяють передбачати вплив технології м'ясних напівфабрикатів на процеси заморожування-розморожування.

Практичне значення отриманих результатів:

- отримані результати дають можливість моделювати процес розподілу теплового потоку у середині теплового апарату;
- виконано фізичне та аналітичне моделювання, яке доводить ефективність створеної методики профілювання відбивача променевого потоку в інфрачервоному обладнанні;
- отримано рівняння кінетики середньої температури внутрішніх шарів продукту у часі, що враховує теплофізичні та геометричні характеристики продукту, а також потужність випромінювача;
- спрогнозувати вплив заморожування на харчову сировину;
- вдосконалити процес заморожування та зберігання харчової сировини.

1. СИСТЕМА ПОНЯТЬ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОТІКАННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

1.1. Визначення основних понять.

Процеси харчових виробництв є складними системами на відміну від простих систем, закономірності яких вивчає фізика.

Процес – це послідовні та закономірні зміни у системі (продукті, матеріалі), що призводять до виникнення в ній нових властивостей.

Класифікація процесів харчових виробництв, зазвичай, відбувається на основі:

- організаційно-технічної структури процесу;
- зміни параметрів процесу в часі;
- кінетичних закономірностей.

У відповідності до першої ознаки процеси розподіляються на три класи: періодичної дії, неперервної дії та комбіновані. Періодичні процеси здійснюються, як правило, в одному апараті, але в певній послідовності. Усі стадії неперервного процесу відбуваються водночас, але рознесені у просторі. Це означає, що неперервні процеси відбуваються або у різних місцях однієї машини, або у різних апаратах, які складають єдину, неперервно діючу установку. Комбіновані процеси на окремих стадіях здійснюються неперервно, а на інших – періодично.

Залежно від зміни параметрів (температури, швидкості, концентрації, консистенції продукту тощо), процеси харчових виробництв розподіляються на усталені (стаціонарні) та неусталені (нестационарні). В усталених процесах значення кожного з параметрів, які їх характеризують, є сталими в часі та залежать лише від положення даної точки системи у просторі. В загальному вигляді це можна записати наступним чином:

$$П = f(x, y, z),$$

де

Π – будь-який параметр системи, яка бере участь у процесі;

(x, y, z) – координати системи.

В неусталених процесах параметри, що їх характеризують, залежать не тільки від положення даної точки системи у просторі, але й від часу

$$\Pi = f(x, y, z, \tau),$$

де τ – час процесу.

Зазвичай, неперервні процеси є стаціонарними, оскільки у кожний момент часу в кожній конкретній точці системи параметри процесу залишаються незмінними. Більшість періодичних процесів є неусталеними.

Усю різноманітність технологічних процесів харчових виробництв, у залежності від закономірностей їх протікання, можна звести до 5 основних груп: гідромеханічні, механічні, теплові, масообмінні (іноді, теплові та масообмінні процеси об'єднують у тепломасообмінні) та біохімічні.

Науковою основою створення нових та удосконалення існуючих процесів харчової технології є кінетика - вчення про швидкості та механізми процесів (йдеться про гідродинамічні, тепло-, масообмінні та біохімічні процеси).

Знання кінетичних закономірностей процесів є необхідним для розрахунків основних розмірів апаратів харчових виробництв. Загальні кінетичні закономірності процесів (за виключенням механічних), формулюються у вигляді загального закону: швидкість процесу прямо пропорційна рушійній силі та зворотно пропорційна опору

$$I = \Delta/R,$$

де I - швидкість процесу;

R - опір;

Δ - рушійна сила процесу.

У загальному випадку рушійною силою процесу є різниця потенціалів, у окремих випадках – перепад тисків Δp між потоком, що входить в апарат та потоком, що виходить з апарату (для гідромеханічних процесів), різниця

температур Δt між теплоносіями, які обмінюються теплотою (для теплообмінних процесів), різниця концентрацій Δc речовини, що розподіляється між фазами (для масообмінних процесів) тощо.

Розрахунок машин та апаратів передбачає визначення масових потоків матеріалів, що переробляються, а також кількості необхідної енергії, оптимальної площі тепломасообмінної поверхні (об'єму) апарату або тривалості процесу, основних розмірів машин та апаратів.

Аналіз процесів, розрахунки машин та апаратів здійснюють у наступній послідовності: складають матеріальний та енергетичний баланси процесу; виходячи із статички, визначають напрям протікання процесу та умови рівноваги; обчислюють рушійну силу; на основі кінетики визначають швидкість процесу. За даними про швидкість процесу та величину рушійної сили при знайденому оптимальному режимі процесу визначають основний розмір апарату – робочий об'єм або робочу площу поверхні. За цим основним розміром визначають всі інші розміри апарату.

Матеріальний баланс складають на основі закону збереження маси. Тепловий баланс – на основі закону збереження енергії. За величинами, що характеризують робочі та рівноважні параметри, визначають рушійну силу процесу, розраховують кінетику та визначають коефіцієнт швидкості процесу.

Під інтенсивністю процесу розуміють його результат, віднесений до одиниці часу та одиниці площі поверхні або одиниці робочого об'єму апарата. Інтенсивність процесу прямо пропорційна рушійній силі. Мірою інтенсивності процесу є коефіцієнт його швидкості.

При вивченні усіх перелічених процесів використовують однотипні диференціальні рівняння та однотипний математичний апарат: диференціальні рівняння, отримані теоретичним шляхом, на основі теорії подібності перетворюють у критеріальні рівняння, які приводять за експериментальними даними до розрахункового вигляду. За критеріальними рівняннями визначають коефіцієнти швидкості процесів, які

використовуються в подальшому для розрахунків робочого об'єму, площі поверхні та інших геометричних характеристик апаратів, що проектуються.

При розробці та проведенні будь-якого технологічного процесу намагаються вибрати найкращі варіанти із множини припустимих, керуючись, головним чином, інтуїцією та досвідом. Якщо вибір спирається лише на досвід та навички, неможливо стверджувати, що він є оптимальним. Розглянути та кількісно оцінити варіанти, які виникають у процесі проектування технологічних об'єктів, можливо лише на основі методів та засобів математичного моделювання. Складність процесів харчових технологій, великий обсяг даних, які потрібно враховувати при будь-якій їх зміні, необхідність встановлення взаємозв'язків між факторами, що впливають на них і т.ін., викликають певні труднощі при створенні оптимальних моделей технологічних об'єктів.

1.2. Основні проблеми моделювання та оптимізації технологічних об'єктів харчової промисловості.

Починаючи з часів промислової революції, прогрес завжди пов'язувався з підвищенням продуктивності праці. Підтримана сьогодні широкими науковими колами нова парадигма розвитку цивілізації визначає прогрес як підвищення продуктивності ресурсів. Мова йде про більш ефективне використання природних ресурсів та ресурсів, що виробляються.

Особливо гостро ця проблема стоїть перед країнами з обмеженими ресурсами. Саме такою є Україна – без експорту нафти та газу нормальне функціонування її економіки неможливе. Тому економіка України має спиратися на наступні основні принципи: як можна менше брати ресурсів, найбільш раціонально їх використовувати та створювати за їх допомогою максимум кінцевих благ. В якості одного з шляхів реалізації нової парадигми пропонується заміна існуючих технологій на більш чисті та менш енерго- та ресурсоемні. Але при теперішньому стані економіки України вирішувати питання широкомасштабної заміни неефективних технологій більш

сучасними абсолютно нереально. Єдине, що можна сьогодні робити, це удосконалювати існуючі виробництва. Найбільш маловитратним шляхом розв'язання цієї проблеми є оптимізація технологічних режимів діючих виробництв.

Оптимальний технологічний процес має забезпечити:

- високу продуктивність виробництва;
- високий вихід продукту;
- мінімально можливі витрати ресурсів;
- мінімально можливі витрати енергії;
- мінімальну вартість продукту;
- високу якість продукції, яка завжди визначається комплексом показників тощо.

Оточуючий нас світ, завдяки саме людській діяльності, є дивовижно неоптимальним з точки зору технології. Практично всі діючі виробництва в різних галузях господарства, і чи не найбільше в АПК, працюють у неоптимальних режимах та мають великі резерви, виходячи з економічних, енергетичних, екологічних, споживчих та інших критеріїв. Виявлення резервів конкретного процесу, зазвичай, пов'язане з його аналізом на основі сучасних методів дослідження та ефективних технічних засобів (зокрема, ЕОМ). При цьому особлива увага приділяється моделям процесів та способам їх побудови.

Однак, ефективність робіт з моделювання та оптимізації процесів діючих виробництв не є сьогодні задовільною. Однією з причин є недостатня взаємодія спеціалістів різного профіля, в першу чергу, математиків та геометрів з інженерами та іншими дослідниками конкретних предметних галузей.

Особливо така взаємодія важлива при постановці задачі дослідження. Досить часто спеціалісти в даній предметній галузі, не знаючи можливостей та обмежень різних математичних методів розв'язання задач, не можуть самі її коректно поставити. Математики ж, не знаючи специфіки даної

предметної області, не можуть коректно формалізувати постановку задачі. Коректна постановка задачі слугує ключем до успіху оптимізаційного дослідження та асоціюється в більшій мірі з мистецтвом, ніж з точною наукою [136]. На практиці доводиться стикатися з великою кількістю некоректно поставлених задач, на розв'язання яких витрачаються значні часові, матеріальні та людські ресурси, а отримані результати не є задовільними.

Крім коректності постановки задачі, остаточний результат істотно залежить від адекватності досліджуваному технологічному процесові математичної моделі, за якою проводиться оптимізація.

Для ефективного аналізу механізму явищ та ефективного керування технологічними процесами необхідно виявити в кількісній формі взаємозв'язок між факторами, що визначають хід процесу. Цей зв'язок, що відображає найбільш істотні сторони процесу, являє собою сукупність рівнянь, умов, алгоритмів, і є математичною моделлю.

Під час математичного моделювання технологічних об'єктів та процесів доводиться розв'язувати три основні задачі:

- побудова математичного опису;
- дослідження математичної моделі;
- прийняття оптимальних рішень.

Відомо, що найбільш складною та відповідальною задачею математичного моделювання є створення математичного опису. Невдачі в побудові математичних моделей корифеї прикладної математики пояснюють тим, що для цього потрібним є не стільки знання математики, скільки глибоке розуміння сутності явищ, що описуються [77].

Детальне вивчення та глибоке розуміння тих фізичних та хімічних закономірностей процесів, що протікають в технологічних об'єктах, притаманне найбільш надійному способу створення математичних описів – теоретичному методу. На відміну від емпіричних, теоретичний метод

дозволяє складати такі математичні описи, що дають змогу зі значною точністю передбачати результати протікання процесів у заданих умовах.

У математичному описі присутні наступні складові (рис.1.1): матеріальний та енергетичний баланси, обмеження, експериментально-аналітичні залежності та умови протікання елементарних процесів.

Матеріальний та енергетичний баланси складаються на основі закону збереження енергії та маси:

“надходження” – “витрати” = “накопичення”.

Обмеження можуть бути обумовлені технологічними, технічними або економічними причинами.

Експериментально-аналітичні залежності – це моделі елементарних процесів, що входять у складний процес, різноманітні коефіцієнти та їх залежності від параметрів.

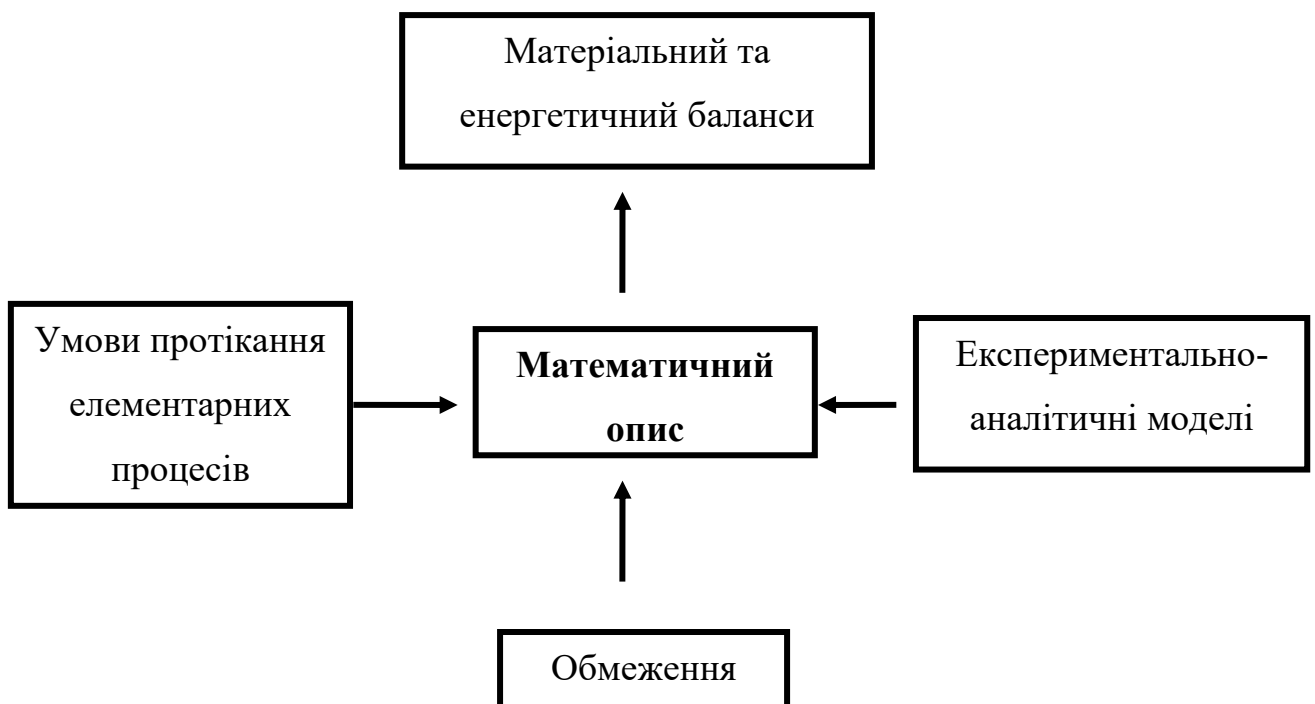


Рисунок 1.1 – Структура математичного опису

Розв'язок рівнянь математичної моделі з використанням ЕОМ знаходять на основі моделюючого алгоритму (машинної моделі). При розробці такого алгоритму вибирають аналітичний або чисельний спосіб розв'язку математичної моделі. Необхідною також є перевірка точності обраного методу розрахунку.

Перевірка адекватності моделі – оцінка достовірності побудованої математичної моделі та дослідження її відповідності об'єктові, що вивчається, – здійснюється на тестових прикладах шляхом порівняння результатів розрахунку за моделлю з результатами експериментів на досліджуваному об'єкті при однакових умовах. Це дозволяє встановити межі застосування побудованої моделі.

Основним етапом у побудові адекватної моделі є ідентифікація математичного опису об'єкта. Задачею ідентифікації є визначення виду моделі та виявлення невідомих її параметрів – окремих констант або їх комплексів, що характеризують властивості об'єкта. Ідентифікація можлива при наявності необхідної експериментальної інформації про досліджуваний об'єкт.

Основні методичні та обчислювальні труднощі при побудові математичної моделі процесу можуть виникнути саме тому, що можливості ідентифікації (побудови моделі процесу за експериментальними даними) є суттєво обмеженими.

Як вже згадувалося, процеси харчової технології є складними. В деяких випадках для їх математичного опису вдається скласти диференціальні рівняння, які, як правило, важко розв'язати. Оскільки диференціальні рівняння описують цілий клас процесів, у межах яких діють певні закони, то вони не враховують частинних особливостей окремих процесів. Для опису частинного процесу диференціальне рівняння потрібно доповнити даними, які характеризують цей процес. Такі дані - умови однозначності - дозволяють із усього класу процесів, які описуються згаданим диференціальним рівнянням, виділити конкретний одиничний процес. До

умов однозначності належать: геометричні умови, що характеризують розміри та форму апарата, в якому відбувається процес; фізичні властивості середовища; граничні умови, які характеризують взаємодію середовища з тілами (продуктами); початкові умови системи, тобто її стан у той момент, коли починається вивчення процесу тощо.

1.3. Технологічний процес як об'єкт моделювання

Дослідження технологічного процесу, як об'єкта моделювання, передбачає розгляд усіх факторів, що впливають на процес та використання усіх законів природи, які описують процес.

На даний час можна виділити численний клас складних технологічних процесів у харчовій промисловості. Ці процеси мають низку загальних рис, основними з яких є наступні:

1. На процес впливає значна кількість вхідних змінних, що визначають якісні показники. Цими змінними можуть бути характеристики сировини, швидкість подачі матеріалів в об'єкт, температура, тиск в апаратах та інші.
2. Частина вхідних змінних може лише реєструватися, тобто тільки вимірюватися, але ними не можна керувати. Наприклад, характеристики сировини, матеріалів, навколишнього середовища тощо.
3. На процес впливають випадкові збурювання, що не можуть бути ні змінені, ні передбачені. Часто невідомою є навіть фізична сутність випадкових збурювань, але їх вплив на процес може виявитися дуже істотним. Наприклад, випадковою перешкодою може бути низька точність контролю та реєстрації технологічних параметрів процесу.
4. На вхідні та вихідні змінні звичайно накладаються технологічні обмеження, вихід за межі яких може привести або до неприпустимого зниження якості готового продукту, або, навіть, до зриву технологічного процесу.

Перед початком розробки моделі технологічного процесу необхідно зрозуміти, що являють собою структурні елементи, з яких вона будується.

У самому загальному вигляді структуру моделі процесу математично можна представити у вигляді:

$$E = \Phi (x, y, a, \xi),$$

де E – результат здійснення процесу;

$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ – вектор вхідних змінних процесу, якими можна керувати;

$y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ – вектор змінних стану (коли вони характеризують стан або умови, що існують в об'єкті моделювання), або вихідних змінних;

$a = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ – вектор внутрішніх параметрів об'єкта;

$\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$ – вектор невизначених параметрів (частина вхідних змінних та внутрішніх параметрів процесу, значення яких точно не відомі), та збурюючого діяння впливу.

Компонентами векторів x та y є витрати та склад потоків речовин, концентрації речовин, температура, тиск у потоках і та ін.; компонентами вектора a – коефіцієнти та параметри, що характеризують властивості речовин, що перероблюються, фізико-хімічні процеси в об'єкті моделювання (константи швидкостей хімічних реакцій, коефіцієнти тепло - та масообміну, дифузії тощо), геометричні розміри та конструктивні особливості технологічного обладнання.

Функціональні залежності Φ описують поведінку змінних та внутрішніх параметрів у межах компонента об'єкта або виражають співвідношення між компонентами об'єкта. Ці співвідношення, або операційні характеристики, за своєю природою є або детермінованими, або стохастичними.

При побудові моделей технологічних об'єктів та процесів звичайно вводять обмеження, які є встановленими границями зміни значень змінних або обмежуючими умовами розподілу та витрат тих чи інших ресурсів (енергії, матеріалів, запасів сировини, часу тощо). Вони можуть вводитися

або розробником (штучні обмеження) або самою системою, внаслідок притаманних їй властивостей (природні обмеження).

Цільова функція або критерій E - це точне відображення цілей або задач об'єкта моделювання та необхідних правил оцінки їх виконання. Для технологічного об'єкта можна вказати на два типи цілей: збереження та придбання. Цілі збереження пов'язані з підтримкою або збереженням яких-небудь ресурсів (часових, енергетичних тощо) або стану, наприклад, якісних показників продукції, що випускається. Цілі придбання пов'язані з придбанням нових ресурсів (прибутку, більш високої якості і т.ін.) або досягненням певного стану, наприклад, зменшення енергоємності виробництва.

Цільова функція (критерій) є органічною складовою моделі. Весь процес маніпулювання з моделлю спрямований на задоволення або поліпшення заданого критерію.

Розходження між математичними моделями (ММ) обумовлюється їх призначенням: дослідження ефективності функціонування технологічних об'єктів; оптимізація усталених (статичних) та перехідних (динамічних) режимів їх роботи; оптимальне проектування технологічних об'єктів та управління ними. Структура та вигляд рівняння ММ залежать від властивостей об'єкта.

Поведінка технологічного об'єкта із зосередженими координатами y, x у статиці та невідомими в часі t властивостями описується рівняннями математичної моделі

$$F[y, x, a, \xi] = 0, \text{ або } y = f(x, a, \xi).$$

ММ статички нестационарного об'єкта із зосередженими координатами (квазістатична модель) являє собою систему рівнянь

$$F[y, x, a(\tau), \xi] \approx 0;$$

$$\frac{da}{dt} = f_1(y, a, \xi).$$

Поведінка технологічного об'єкта із зосередженими координатами y, x у динаміці та незмінними в часі властивостями описується рівняннями

$$F \left[\frac{dy}{dt}, y(t), x(t), a, \xi \right] = 0, \text{ або } \frac{dy}{dx} = f(y(t), x(t), a, \xi).$$

ММ динаміки нестационарного об'єкта із зосередженими координатами являє собою систему рівнянь

$$F \left[\frac{dy}{dt}, y(t), a(t), \xi \right] \approx 0;$$

$$\frac{da}{dt} = f_1(y(t), a(t), \xi).$$

Якщо координати об'єкта x, y розподілені за просторовою змінною l (довжина, радіус, висота) та його властивості є незмінними у часі t , то маємо справу із стаціонарними ММ статички або динаміки технологічного об'єкта з розподіленими координатами, котрі мають вигляд, відповідно:

$$F \left[\frac{dy}{dl}, y(l), x(l), a(l), \xi \right] = 0; \quad F \left[\frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial y}{\partial l}, y(t, l), a(l), \xi \right] = 0.$$

За структурою F математичні моделі розподіляються на лінійні та нелінійні. Розв'язок $y(x, a)$ системи рівнянь ММ, яка є лінійною по y , задовольняє наступним умовам (принципу суперпозиції):

- 1) адитивності $y(x_1 + x_2, a) = y(x_1, a) + y(x_2, a)$;
- 2) однорідності $y(c \times x, a) = c \times y(x, a)$,

де x_1 та x_2 - довільні функції t, l або деякі числа; c - будь-яке дійсне число.

Розв'язок $y(x, a)$ називається лінійним по a , якщо

$$y(x, a_1 + a_2) = y(x, a_1) + y(x, a_2); \text{ та } y(x, c \times a) = c \times y(x, a),$$

де a_1, a_2 - довільні параметри ММ.

Якщо для деякої ММ не виконується хоча б одна з умов принципу суперпозиції, то вона відноситься до класу нелінійних.

Математичні моделі технологічних об'єктів хімічної, мікробіологічної та харчової промисловості частіш за все відносяться до класу нелінійних.

Модель має бути пов'язаною з функціонуванням об'єкта, орієнтована на виконання поставленої задачі (цілеобумовлена) та побудована таким

чином, щоб слугувати підмогою тим, хто проектує об'єкт або управляє режимами його функціонування. Функціонування об'єкта є сукупністю координованих дій, необхідних для досягнення заданої цілі або розв'язання певної задачі. З цієї точки зору технологічним об'єктам, які є предметом досліджень автора, властива цілеспрямованість. Ці обставини потребують від розробників при моделюванні звернути пильну увагу на цілі та задачі, які має вирішувати технологічний об'єкт.

Таким чином, можна сформулювати конкретні критерії, яким має відповідати «гарна» модель:

- простота та зрозумілість;
- цілеспрямованість;
- надійність;
- зручність;
- повнота (з точки зору можливостей розв'язання поставлених задач);
- адаптивність, тобто забезпечення легкого переходу до інших модифікацій або поновлювання даних;
- можливість поступових змін у тому сенсі, що будучи спочатку простою, модель може ставати все більш складною та точною.

Крім того, при пошуку оптимальних розв'язків математична модель повинна відображати залежність вибраного критерію оптимальності від параметрів або факторів, що характеризують даний технологічний процес.

1.3.1. Постановка задачі оптимізації технологічних процесів харчової промисловості.

Якщо розглядати оптимізацію технологічного процесу як керування, то параметри типових процесів слід класифікувати у відповідності до принципів, які прийняті в існуючій теорії керування.

Керовані технологічні об'єкти прийнято представляти параметричною схемою. Параметри об'єкта в цьому випадку будемо називати згідно з

прийнятими в теорії керування: параметрами стану, спостереження, керування та збурювання.

Відповідно, будь-який технологічний процес харчової промисловості може бути представлений як об'єкт оптимізації у наступному загальному вигляді, показаному на рис. 1.2.

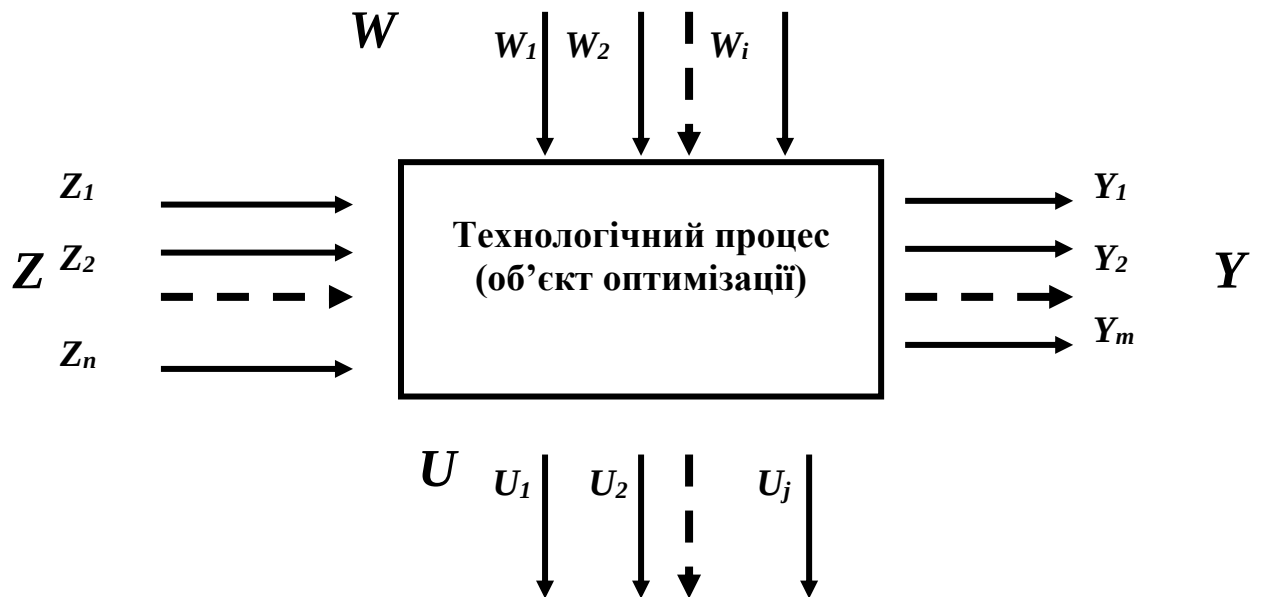


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд об'єкта оптимізації

Параметрами стану або керованими параметрами є параметри Y_1 , Y_2 , ..., Y_m , що залежать від протікання процесу, характеризують його режим, економічну ефективність та технологічні властивості. Такими параметрами можна вважати й характеристики готових продуктів. Групу Y називають також вихідними контрольованими параметрами. Змінні цієї групи часто використовуються як цільові величини при оптимізації процесів.

Параметри $U_1, U_2, \dots, U_j$ назвемо параметрами спостереження. Вони не залежать від протікання процесу і можуть бути як контрольованими, так і не контрольованими, але не використовуються для керування (у нашому випадку, для оптимізації). Такими параметрами можуть бути коефіцієнти теплообміну та масообміну, якість та кількість проміжних продуктів тощо.

Керуючі параметри $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ – параметри, що впливають на процес, і які можна цілеспрямовано змінювати. Такими параметрами можуть бути витрати сировини, характер підведення енергії, параметри елементів апаратів, в яких відбувається технологічний процес тощо.

Групу W ($W_1, W_2, \dots, W_i$) утворюють неконтрольовані збурюючі фактори, що не можуть бути обмірювані, наприклад, неконтрольовані домішки в сировину і т.ін. До збурюючих параметрів можна також віднести такі зовнішні впливи на процес, які неможливо або недоцільно використовувати як керуючі (склад сировини, параметри зовнішнього середовища тощо).

Якщо випадкові збурення є достатньо великими і їх необхідно враховувати, то для оцінки стану конкретного технологічного процесу вдаються до використання статистичних методів.

Параметри стану Y та параметри спостереження U можна вважати вихідними, тому що вони характеризують процес, що відбувається, або продукт, який виробляється. Залежно від мети керування, параметри стану та спостереження можуть мінятися місцями.

Керуючі та збурюючі впливи - вхідні параметри - також змінюються залежно від задачі дослідження. Збурюючі впливи можуть бути зовнішніми та внутрішніми.

Усі змінні можна розглядати як компоненти багатовимірних векторних функцій Y, U, Z, W . Вектори Y, U, Z, W називають, відповідно, векторами стану, спостереження, керування та збурювання.

Математична модель пошуку оптимальних розв'язків або функція оптимальності, тобто залежність вибраного критерію R від параметрів процесу та часу, в загальному випадку буде такою:

$$R = R(Y, U, Z, W, t). \quad (1.1)$$

Якщо випадкові збурення є незначними, і їх вплив на об'єкт можна не враховувати, або якщо збурюючі впливи неможливо змінювати цілеспрямовано, то критерій оптимальності можна уявити як функцію керуючих параметрів та часу (зазвичай, параметри стану та спостереження є заданими)

$$R = R(Z, t). \quad (1.2)$$

При оптимізації усталеного стаціонарного режиму вважають, що критерій оптимальності – це тільки функція керуючих параметрів.

При дослідженні та проведенні технологічних процесів в якості критеріїв оптимізації частіш за все вибирають: витрати енергії, продуктивність, тривалість процесу, вихід та якість продукту, об'єм або масу апарату тощо.

Зрозуміло, що наведені критерії оптимальності часто-густо суперечливі. Далеко не завжди можна отримати оптимальне рішення за всіма показниками. Тоді або приймають компромісне рішення, наприклад, забезпечення найкращої якості при заданій продуктивності, або максимальної продуктивності при заданій якості, або визначають зведений критерій оптимальності як вектор у просторі параметрів (функцій) або у просторі рішень (стратегій).

Розв'язок задачі оптимізації полягає в тому, щоб знайти вектор керування U , що забезпечує екстремальне (найбільше або найменше) значення вибраного критерію оптимальності R при будь-яких змінах некерованих параметрів W і Z та при заданих величинах керованих параметрів Y . Розв'язати задачу оптимізації можливо лише при відомих крайових умовах, які в простих випадках будуть і початковими, і граничними

$$X \in A \quad \text{та} \quad Y \in B. \quad (1.3)$$

Математичний запис крайових умов означає, що зміни параметрів обмежені замкненими областями векторного простору станів B та векторного простору керувань A .

Рівняння (1.2) разом із крайовими умовами (1.3) є математичним описом технологічного процесу, який можна застосовувати для пошуку оптимальних розв'язків.

Задачі оптимізації є дуже актуальними для процесів теплової обробки харчових продуктів, оскільки вони є не тільки найбільш поширеними, але й дуже енергоємними технологічними процесами харчових виробництв. Серед процесів теплової обробки перспективними з точки зору можливостей інтенсифікації процесів, зменшення енерговитрат та підвищення якості готових виробів виявляються електрофізичні способи нагрівання, зокрема, інфрачервоне (ІЧ) випромінювання. Розглянемо особливості технологічного процесу теплової обробки харчових продуктів ІЧ-випромінюванням.

1.3.2. Розробка напрямків вирішення проблеми енерго- та ресурсозбереження під час теплової обробки кулінарних виробів.

Важливість науково-прикладної проблеми зниження витрат енергетичних та матеріальних ресурсів під час виробництва кулінарних виробів неможливо переоцінити. Її розв'язання має бути реалізоване шляхом розробки високоефективних технологічних процесів та обладнання, за практичного впровадження яких може бути отримано відповідний соціально-економічний ефект.

Можна окреслити декілька перспективних напрямків розв'язання вказаної проблеми, які схематично представлено на рис.1.3.

Скорочення споживання енергетичних ресурсів можливе за рахунок підвищення коефіцієнту корисної дії (ККД) процесу внаслідок оптимізації

зовнішнього та внутрішнього теплоперенесення, що досягається шляхом використання різноманітних прийомів.

Наукова проблема

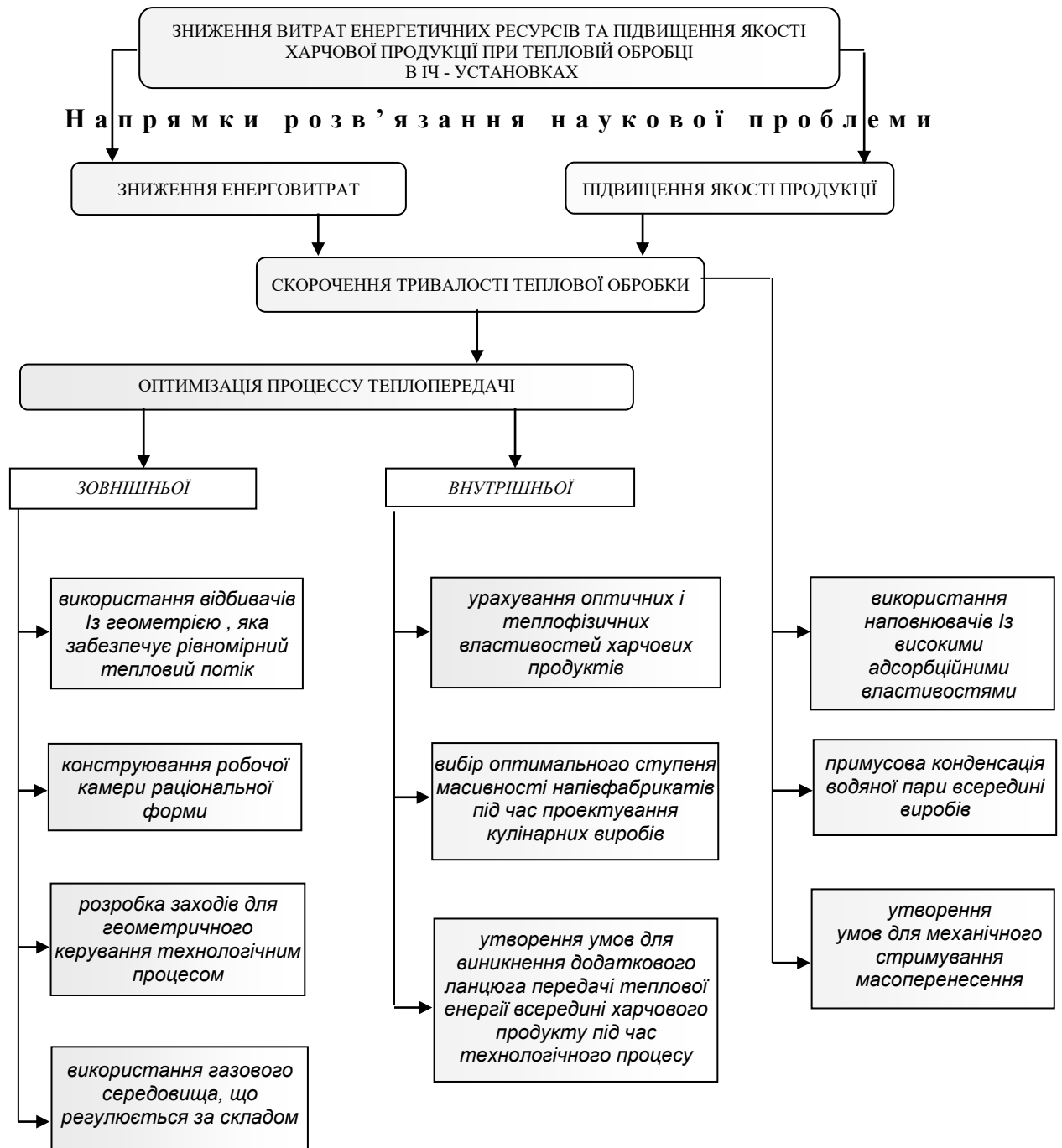


Рисунок 1.3 – Наукова проблема та напрямки її розв’язання

Зокрема, оптимізації зовнішнього теплоперенесення можна досягти ще на етапі розробки ІЧ-установки шляхом виконання низки конструкторських рішень, які враховуватимуть умови даного технологічного процесу, а саме:

- 1) раціональним конструюванням форми робочої камери. При цьому мають враховуватися форма та кількість харчових напівфабрикатів, які підлягають тепловій обробці. Крім того, для зменшення енерговитрат потрібна якісна теплоізоляція, а внутрішні стінки робочої камери повинні мати високу відбивальну здатність;
- 2) обов'язковим використанням відбивачів, які повинні забезпечити рівномірний тепловий потік на поверхні харчового продукту;
- 3) забезпеченням можливості керування щільністю теплового потоку. Це потрібно для дотримання заданого закону зміни щільності теплового потоку на поверхні харчового продукту під час відповідного технологічного процесу.

Останні два напрямки удосконалення конструкцій ІЧ-апаратів можуть бути впроваджені на основі застосування геометричних підходів.

До технологічних рішень можна віднести використання газових середовищ, склад яких може регулюватися. Зауважимо, що теплотехнічні властивості таких середовищ підвищуються за певних умов ІЧ-випромінювання.

Спеціалісти в галузі процесів та апаратів харчових виробництв відмічають, що зовнішнє теплоперенесення та вибір основних конструктивних параметрів ІЧ-апарату мають бути ув'язаними з аналізом внутрішнього теплоперенесення в об'єктах теплової обробки.

Оптимізації внутрішнього теплоперенесення можна досягти за рахунок наступних заходів: утворення умов для виникнення додаткового ланцюга передачі теплової енергії; використання теплової енергії додаткового теплоносія, що має подаватися всередину виробу; а також урахування оптичних та теплофізичних властивостей складових компонентів та ступеня масивності напівфабрикатів під час проектування нових видів кулінарної продукції.

Зменшити витрати маси та підвищити якість кулінарних виробів можна наступними шляхами: скороченням тривалості теплової обробки; утворенням

умов для механічного стримування масоперенесення та примусової конденсації водяної пари, яка утворюється всередині виробів; використанням наповнювачів із високими адсорбційними властивостями.

Аналіз запропонованих напрямків розв'язання наукової проблеми доводить, що більшість задач оптимізації зовнішньої теплопередачі є суто геометричними, які можна розв'язувати шляхом застосування методології геометричного моделювання на основі системного підходу.

Пошук оптимального розв'язку потребує створення моделі, яка встановлює зв'язок між вибраними критеріями оптимальності та параметрами процесу. Хоча конкретний метод розв'язання визначається видом моделі та засобами обчислень, разом з тим, існують загальні принципи та підходи до отримання оптимальних розв'язків, які базуються на системному аналізі.

Тому в другому розділі на основі системного підходу запропоновано узагальнену модель технологічного процесу теплової обробки харчових продуктів ІЧ-випромінюванням, визначено основні елементи цієї моделі та взаємозв'язок між ними. Особливу увагу при цьому приділено визначенню місця та ролі геометричного моделювання для розв'язання вищеназваних проблем.

2. МОДЕЛЮВАННЯ РОСПОВСЮДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ

2.1. Розрахунок теплового потоку випромінювання від точкового джерела електронагрівника

Нехай у прямокутній системі координат $Oxyz$ задана система теплотехнічних поверхонь (рис. 2.1а), які беруть участь у променевій теплопередачі. Джерелом теплового випромінювання є кварцовий випромінювач (КВ). Теплоприймач G на координатній площині Oxy задано у вигляді прямокутника $\{0 \leq x \leq A\} \cap \{0 \leq y \leq B\}$, відбивач - функцією $R(x, y, z)$. Нехай для визначеності довжина нагрівача дорівнює L , і він розташований паралельно осі Oy на відстані H від координатної площини Oxy . Сторони прямокутника G розіб'ємо на n та m частин, відповідно. Будемо вважати, що відстань між елементами теплопередачі є досить великою, тому діаметром волоска розжарення нагрівника можна знехтувати.

Виберемо на випромінювачі диференціально малу елементарну частку dL , центральна точка якої має координати $M(x_M, y_M, z_M)$ (рис. 2.1б). Тоді кількість тепла Q (Дж/сек), що випромінюється елементом dL за 1 секунду в усіх напрямках, визначається формулою

$$Q = \frac{N}{L} dL, \quad (2.1)$$

де N - потужність випромінювача (Вт), L - довжина волоска розжарення кварцевого випромінювача (м).

Оберемо на прямокутнику-теплоприймачі G елементарну площадку S_{IJ} , центральна точка T якої має координати $(x_I, y_J, 0)$; символом S_{IJ} будемо позначати площу цієї площадки. Далі побудуємо сферу радіуса $R_{IJ} = \sqrt{(x_M - x_I)^2 + (y_M - y_J)^2 + z_M^2}$ із центром у точці $M(x_M, y_M, z_M)$. Позначимо

через $S_{IJ}^{(R)}$ площу радіальної проекції елементарної площадки S_{IJ} на поверхню побудованої сфери.

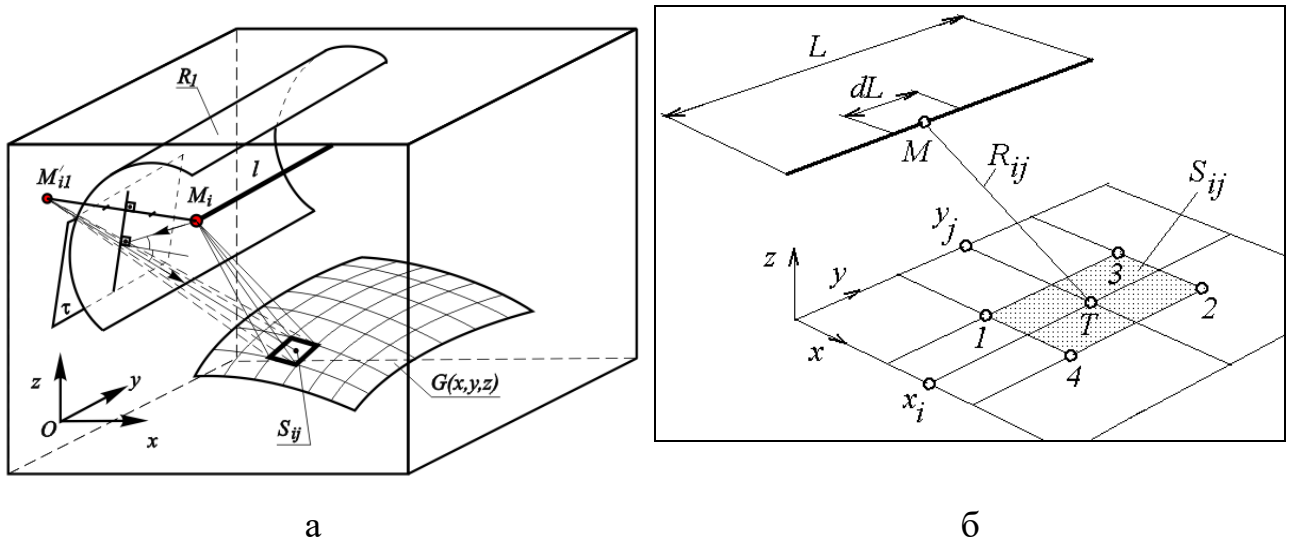


Рисунок 2.1 – Геометричні компоненти теплопередачі

У цьому випадку поверхневу щільність потоку інтегрального випромінювання E_{IJcf} (Дж/м²), який потрапляє на поверхню сфери радіуса R_{IJ} від елемента dL , можна визначити за формулою

$$E_{IJcf} = \frac{Q}{4\pi R_{IJ}^2} = \frac{N}{4\pi R_{IJ}^2 L} dL. \quad (2.2)$$

Відповідно до закону збереження енергії, поверхневу щільність потоку інтегрального випромінювання від елемента dL на елементарну площадку S_{IJ} , з урахуванням виразу (2.2), можна визначити за допомогою формули

$$E_{IJ} = \frac{N}{4\pi R_{IJ}^2 L} \frac{S_{IJ}^{(R)}}{S_{IJ}} dL. \quad (2.3)$$

Таким чином, розрахунок поверхневої щільності потоку інтегрального теплового випромінювання, що надходить від кожного з послідовних елементів dL циліндричного випромінювача до елементарної площадки S_{IJ}

фігури G , зводиться до обчислення послідовних площ $S_{IJ}^{(R)}$ радіальних проєкцій елементарної площадки S_{IJ} на поверхню відповідної сфери радіуса R_{IJ} . Визначення поверхневої щільності потоку інтегрального теплового випромінювання, що надходить від циліндричного випромінювача до елементарної площадки S_{IJ} фігури G , зводиться до обчислення суми площ $S_{IJ}^{(R)}$.

2.2. Визначення площі радіальної проєкції елементарної площадки координатної площини

Нехай теплоприймачем G (рис. 5.1б) є прямокутник $A \times B$, розташований у площині Oxy , де $\left\{ -\frac{A}{2} \leq x \leq \frac{A}{2} \right\}$, $\left\{ -\frac{B}{2} \leq y \leq \frac{B}{2} \right\}$. Розіб'ємо сторони прямокутника, відповідно, на n і m частин. Виберемо “поточну” точку $T(x_T, y_T, 0) \in G$, де $x_T = A(i - 0,5)/n$; $y_T = B(j - 0,5)/m$. При цьому $i = (-n/2+1) \dots n/2$; $j = (-m/2+1) \dots m/2$. На випромінювачі оберемо точку $M(x_M, y_M, z_M)$. Далі позначимо $\Delta x = A/(2n)$, $\Delta y = B/(2m)$ і визначимо на площині Oxy множину вершин елементарних прямокутників $K_1(x_T - \Delta x, y_T - \Delta y)$; $K_2(x_T + \Delta x, y_T + \Delta y)$; $K_3(x_T - \Delta x, y_T + \Delta y)$; $K_4(x_T + \Delta x, y_T - \Delta y)$.

Оберемо на фігурі G для фіксованих значень параметрів i і j конкретну елементарну площадку S_{ij} , центральна точка якої має координати $(x_T, y_T, 0)$, а кутами є певні вершини K_1, K_2, K_3 і K_4 ; символом S_{ij} будемо позначати площу цієї площадки $S_{ij} = 4 \Delta x \Delta y$.

Побудуємо сферу радіуса $R_{ij} = \sqrt{(x_M - x_T)^2 + (y_M - y_T)^2 + z_M^2}$ із центром у точці $M(x_M, y_M, z_M)$. Позначимо через $S_{ij}^{(R)}$ площу радіальної проєкції елементарної площадки S_{ij} на поверхню побудованої сфери. Визначати $S_{ij}^{(R)}$ будемо за допомогою формул сферичної тригонометрії.

Площу елементарної площадки S_{ij} на площині можна визначити як $S_{ij} = S_{\Delta K_1 K_2 K_3} + S_{\Delta K_1 K_2 K_4}$. Тоді $\Delta K_1 K_2 K_3$ проєкціюється на сферу у сферичний

трикутник $\Delta 1_R 2_R 3_R$, а $\Delta K_1 K_2 K_4$, відповідно, у сферичний трикутник $\Delta 1_R 2_R 3_R$ (рис. 2.2).

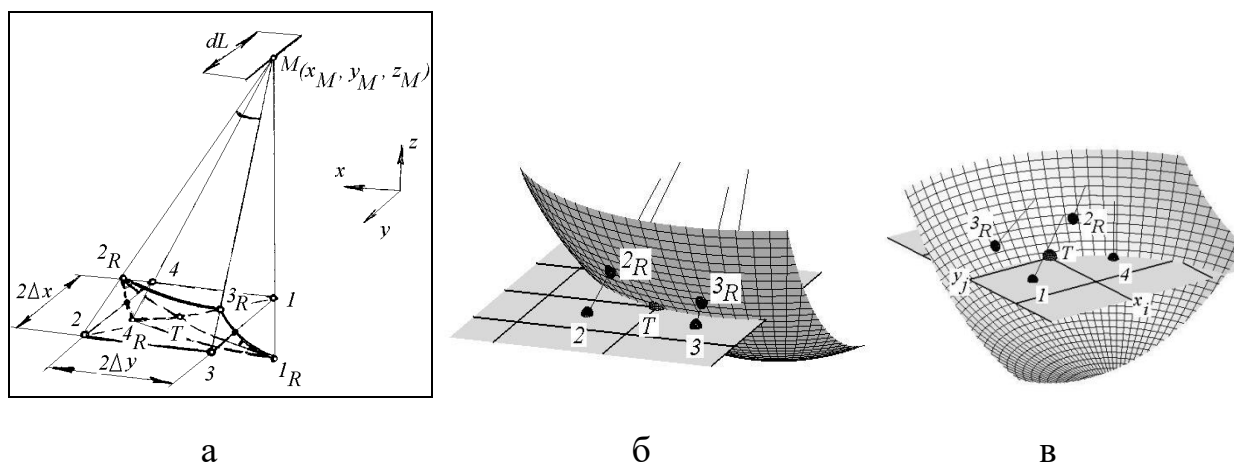


Рисунок 2.2 – Зображення частини сфери і елементарної площадки S_{ij} .

З огляду на властивість адитивності, тобто, якщо сферична фігура розкладена на дві сферичні фігури, то площа даної фігури дорівнює сумі площ цих фігур, маємо тотожність

$$S_{ij}^{(R)} = S_{\Delta 1_R 2_R 3_R} + S_{\Delta 1_R 2_R 4_R},$$

де - $S_{\Delta 1_R 2_R 3_R}$ і $S_{\Delta 1_R 2_R 4_R}$ - площі сферичних трикутників.

Як відомо [1], площа сферичного трикутника дорівнює добутку його кутового надлишку на квадрат радіуса сфери, тому

$$S_{ij}^{(R)} = R_{ij}^2 (\angle 3_R 1_R 4_R + \angle 1_R 4_R 2_R + \angle 4_R 2_R 3_R + \angle 2_R 3_R 1_R - 2\pi). \quad (2.4)$$

Для визначення сферичних кутів скористаємося сферичною теоремою косинусів, яку для простоти при $R=1$ (тобто, для сфери одиничного радіуса) звичайно формулюють так: косинус сторони a сферичного трикутника

дорівнює сумі добутку косинусів двох інших сторін b та c , і добутку синусів сторін b та c на косинус кута A між ними:

$$\cos \frac{a}{R} = \cos \frac{b}{R} \cdot \cos \frac{c}{R} + \sin \frac{b}{R} \cdot \sin \frac{c}{R} \cdot \cos A.$$

Тоді маємо формули для обчислення сферичних кутів $S_{ij}^{(R)}$:

$$\begin{aligned} \angle 3_R 1_R 4_R &= \arccos \left(\frac{\cos \left(\frac{3_R \check{4}_R}{R_{ij}} \right) - \cos \left(\frac{1_R \check{3}_R}{R_{ij}} \right) \cdot \cos \left(\frac{1_R \check{4}_R}{R_{ij}} \right)}{\sin \left(\frac{1_R \check{3}_R}{R_{ij}} \right) \cdot \sin \left(\frac{1_R \check{4}_R}{R_{ij}} \right)} \right); \\ \angle 4_R 2_R 3_R &= \arccos \left(\frac{\cos \left(\frac{3_R \check{4}_R}{R_{ij}} \right) - \cos \left(\frac{2_R \check{3}_R}{R_{ij}} \right) \cdot \cos \left(\frac{2_R \check{4}_R}{R_{ij}} \right)}{\sin \left(\frac{2_R \check{3}_R}{R_{ij}} \right) \cdot \sin \left(\frac{2_R \check{4}_R}{R_{ij}} \right)} \right); \\ \angle 2_R 3_R 1_R &= \arccos \left(\frac{\cos \left(\frac{1_R \check{2}_R}{R_{ij}} \right) - \cos \left(\frac{1_R \check{3}_R}{R_{ij}} \right) \cdot \cos \left(\frac{2_R \check{3}_R}{R_{ij}} \right)}{\sin \left(\frac{1_R \check{3}_R}{R_{ij}} \right) \cdot \sin \left(\frac{2_R \check{3}_R}{R_{ij}} \right)} \right); \\ \angle 1_R 4_R 2_R &= \arccos \left(\frac{\cos \left(\frac{1_R \check{2}_R}{R_{ij}} \right) - \cos \left(\frac{2_R \check{4}_R}{R_{ij}} \right) \cdot \cos \left(\frac{1_R \check{4}_R}{R_{ij}} \right)}{\sin \left(\frac{2_R \check{4}_R}{R_{ij}} \right) \cdot \sin \left(\frac{1_R \check{4}_R}{R_{ij}} \right)} \right). \end{aligned} \tag{2.5}$$

Для визначення сферичних кутів необхідно визначити довжини відповідних дуг $1_R \check{3}_R$, $2_R \check{3}_R$, $1_R \check{4}_R$, $4_R \check{1}_R$, $4_R \check{3}_R$ і $1_R \check{2}_R$.

У $\triangle MK_2 K_3$ кут $\angle K_2 M K_3$ є центральним, що спирається на дугу $2_R \check{3}_R$.

$$2_R \tilde{3}_R = R_{ij} \cdot \angle 2M3 = R_{ij} \cdot \arccos \left(\frac{l_{[M2]}^2 + l_{[M3]}^2 + l_{[23]}^2}{2 \cdot l_{[M2]} \cdot l_{[M3]}} \right). \quad (2.6)$$

$\angle 2M3$ визначено за теоремою косинусів з $\angle 2M3$.

Довжини відрізків

$$\begin{aligned} l_{[M2]} &= \sqrt{(x_M - x_2)^2 + (y_M - y_2)^2 + (z_M - z_2)^2} = \\ &= \sqrt{\left(x_M - \frac{A}{n} \cdot i\right)^2 + \left(y_M - \frac{B}{m} \cdot j\right)^2 + z_M^2} \quad ; \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} l_{[M3]} &= \sqrt{(x_M - x_3)^2 + (y_M - y_3)^2 + z_M^2} = \\ &= \sqrt{\left(x_M - \frac{A}{n} \cdot (i-1)\right)^2 + \left(y_M - \frac{B}{m} \cdot j\right)^2 + z_M^2} \quad ; \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$l_{[23]} = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2} = 2 \cdot \Delta y = \frac{B}{m}$$

Аналогічно визначаються довжини інших дуг.

Якщо вирази (2.5-2.8) підставити до формули (2.4), то отримаємо вираз для визначення радіальної проекції елементарної площадки теплоприймальної поверхні.

На основі вищенаведеного запропоновано алгоритм та складено *Maple*-програму обчислення поля значень щільності потоку інтегрального теплового випромінювання, що надходить від циліндричного випромінювача, розташованого на деякій відстані від площини Oxy , до кожної з елементарних площадок S_{ij} фігури G .

2.3. Метод визначення щільності теплового потоку від циліндричної поверхні скінченних розмірів

Вище було запропоновано метод розв'язання прямої задачі променевої теплопередачі, тобто метод визначення поверхневої щільності потоку

інтегрального теплового випромінювання, який надходить від циліндричного нагрівача до заданої фігури на площині. При розробці розрахункових формул передбачалося, що елементом dL випромінювача є точкове джерело випромінювання. Проте, у реальних установках інфрачервоного випромінювання спіраль кварцового нагрівача (КВ) виготовлена з вольфрамового (або ніхромового) дроту певного діаметра, тому елемент dL вже не можна вважати точковим джерелом випромінювання. Далі під елементом dL будемо розуміти циліндричну поверхню, випромінювання від якої підпорядковується закону Ламберта.

Нехай у прямокутній декартовій системі координат $Oxyz$ задана система теплотехнічних поверхонь, що беруть участь у променевій теплопередачі. Джерелом теплового випромінювання є нагрівач у вигляді трубчастого тіла діаметром $2r$. Теплоприймачем є фігура G на координатній площині Oxy .

Виберемо на випромінювачі елементарну ділянку dL , центральна точка якої має координати $M(x_M, y_M, z_M)$. Тоді кількість тепла dQ (Дж/сек), що випромінюється елементом dL за 1 секунду в усіх напрямках, визначається за формулою

$$dQ = \frac{N}{L} dL, \quad (2.9)$$

де N – потужність випромінювача (Вт), L – довжина спіралі випромінювача (м).

Теплоприймач G розділимо на елементарні площадки. Виберемо одну з цих елементарних площадок S_{ij} , центральна точка T якої в просторовій глобальній системі координат $Oxyz$ має координати $(x_T, y_T, 0)$ (рис. 2.2а). Визначимо поверхневу щільність потоку інтегрального теплового випромінювання від елемента випромінювача dL на площадці S_{ij} об'єкта G .

Через точку M перпендикулярно до елемента dL проведемо площину N . Потік теплового випромінювання від елемента dL буде максимальним у напрямі нормалі до циліндричної поверхні елемента dL , і внаслідок симетрії, цей потік буде однаковим уздовж площини N в усіх напрямках, позначимо його Q_N . Потік також залежить від напрямку випромінювання $\vec{S}$ “не вздовж” площини N . Для обраного напрямку $\vec{S}_T$ (наприклад, на елементарну площадку S_{ij}) він є частиною dQ . Позначимо цей потік як $dQ_{ij} = dQ_N \cdot \cos\theta_{ij}$, де кут $\theta_{ij} = (\vec{MT}, N) = \vec{S}_T, N$ можна обчислити за формулою

$$\theta_{ij} = \arcsin \frac{(x_B - x_A)(x_M - x_T) + (y_B - y_A)(y_M - y_T) + (z_B - z_A)(z_M - z_T)}{\sqrt{[(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2] \cdot [(x_M - x_T)^2 + (y_M - y_T)^2 + (z_M - z_T)^2]}}.$$

Розподіл випромінювання в просторі можна охарактеризувати за допомогою тілесного кута [2]. Для цього побудуємо сферу з центром у точці M і радіусом $R_{ij} = \sqrt{(x_M - x_T)^2 + (y_M - y_T)^2 + (z_M - z_T)^2}$, (у даному випадку $z_T = 0$).

Тілесний кут із верхівкою в точці M є частиною простору, обмеженого бічною поверхнею піраміди або конуса, утвореного променями, що виходять із точки M .

Опишемо навколо напрямку $\vec{S}_T$ тілесний кут $d\omega_{ij}$. Як напрямні конічної поверхні тілесного кута $d\omega_{ij}$ візьмемо лінії, що обмежують елементарну площадку S_{ij} (рис. 2.2а). Бічна поверхня побудованої конічної поверхні з верхівкою в центрі сфери (точка M) виріже на сфері ділянку площею $S_{ij}^{(R)}$, що є радіальною проекцією площадки S_{ij} . Сфері площею $4\pi R_{ij}^2$ відповідає тілесний кут 4π стерадіан, а поверхні $S_{ij}^{(R)} - d\omega_{ij} = S_{ij}^{(R)}/R_{ij}^2$. Тоді тепловий потік від елемента dL , який поширюється в тілесному куті $d\omega_{ij}$ і потрапляє на площадку $S_{ij}^{(R)}$ і S_{ij} , буде дорівнювати

$$dQ_{ij} = J_{ij} d\omega_{ij}, \quad (2.10)$$

де J_{ij} - кутова щільність потоку випромінювання (у напрямі $\vec{S}_T$), або сила випромінювання, Вт/ср - відношення величини потоку в заданому напрямі в межах елементарного тілесного кута до величини цього кута [3].

У загальному випадку J_θ - є щільністю потоку випромінювання вздовж конічної поверхні Ω , внаслідок симетрії випромінювання (рис. 2.3).

Відповідно до закону Ламберта маємо тотожність

$$dQ_{ij} = J_N \cos\theta_{ij} d\varpi_{ij}, \quad (2.11)$$

де J_N - щільність потоку випромінювання в напрямі нормалі до циліндричної поверхні елемента dL (уздовж площини N).

Далі визначимо значення J_N і J_θ .

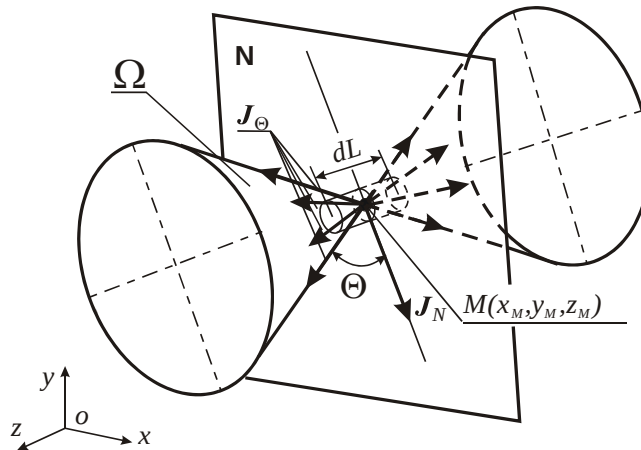


Рисунок 2.3 – Визначення кутової щільності потоку випромінювання.

Відповідно до закону збереження енергії, тепловий потік dQ від елемента dL дорівнює сумі елементарних потоків в усіх напрямках

$$dQ = \iint_S J_N \cos \theta \cdot d\omega = J_N \iint_S \cos \theta \cdot d\omega. \quad (2.12)$$

Елемент тілесного кута $d\omega$ у сферичних координатах (R, θ, φ)

$$d\omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi,$$

де φ і θ змінюються в межах $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$, а подвійний інтеграл за сферичною поверхнею S зводиться до добутку “повторних”

$$\begin{aligned} dQ &= J_N \iint_S \cos \theta \cdot d\omega = J_N \iint_S \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = J_N \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi = \\ &= J_N \cdot 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi = J_N \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin 2\theta \cdot d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi = -J_N \frac{\cos 2\theta}{2} \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} \cdot 2\pi = 2\pi J_N. \end{aligned}$$

Звідси, з урахуванням формули (2.9), отримаємо:

$$J_N = \frac{Q}{2\pi} = \frac{N}{2\pi L} dL; \quad J_\theta = J_N \cos \theta = \frac{N \cos \theta}{2\pi L} dL. \quad (2.13)$$

Тепловий потік від елемента dL , який потрапляє на елементарну площадку S_{ij} поверхні G теплоприймача, дорівнює

$$dQ_{ij} = J_\theta \cdot d\omega_{ij} = J_\theta \frac{S_{ij}^{(R)}}{R_{ij}^2} = \frac{N \cos \theta}{2\pi \cdot L} \frac{S_{ij}^{(R)}}{R_{ij}^2} dL.$$

Поверхневу щільність потоку інтегрального випромінювання від елемента dL на елементарну площадку S_{ij} можна обчислити за формулою

$$dE_{ij} = \frac{dQ_{ij}}{S_{ij}} = \frac{N \cos \theta}{2\pi L R_{ij}^2} \cdot \frac{S_{ij}^{(R)}}{S_{ij}} dL .$$

Таким чином, визначення поверхневої щільності потоку інтегрального теплового випромінювання, що надходить від кожного з послідовних елементів dL до елементарної площадки S_{ij} поверхні теплоприймача G , зводиться до обчислення послідовних площ $S_{ij}^{(R)}$ радіальних проєкцій елементарної площадки S_{ij} на поверхню відповідної сфери радіуса R_{ij} . Визначення поверхневої щільності потоку інтегрального теплового випромінювання від джерела на елементарну площадку S_{ij} поверхні теплоприймача зводиться до обчислення інтеграла

$$E_{IJ} = \int_L dE_{ij} = \frac{N}{2\pi L S_{ij}} \int_L \frac{S_{ij}^{(R)} \cos \theta_{ij}}{R_{ij}^2} dL . \quad (2.14)$$

На основі вищенаведеного було запропоновано алгоритм та складено *Maple*-програму обчислення поля значень щільності потоку інтегрального теплового випромінювання, що надходить від циліндричного випромінювача потужністю $N=200$ Вт, $L=0,4$ м, розташованого на відстані $h=0,1$ м від площини Oxy до кожної з елементарних площадок S_{ij} фігури G (рис. 2.4).

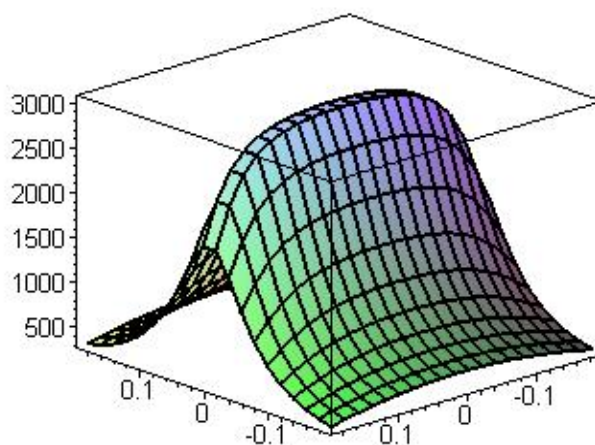


Рисунок 2.4 – Розподіл на площині Oxy щільності потоку інтегрального теплового випромінювання від циліндричного випромінювача

2.4. Геометричне моделювання процесу променевої теплопередачі в поглинаючих газових середовищах

У реальному ІЧ-устаткуванні теплообмін випромінюванням відбувається в поглинаючих газових середовищах, що викликане властивостями триатомних газів у певних діапазонах довжин хвиль поглинати та випромінювати енергію. Таким чином, зміна складу робочого середовища в ІЧ-апаратах може вносити істотну поправку до механізму теплообмінних процесів [4]. Променевий теплообмін у робочій камері ІЧ-апарату досліджувався в різних середовищах: пароповітряному (ППС) [5], двоокису вуглецю [6] тощо. Автори виявили, що при збільшенні парціального тиску двоокису вуглецю та відносної вологості ППС підвищується ефективність використання променевої енергії за рахунок зростання температури середовища, загального коефіцієнту тепловіддачі та загального теплового потоку. Однак, зайве підвищення парціального тиску і відносної вологості двоокису вуглецю та ППС не є бажаним з економічних міркувань, бо збільшує витрати газового середовища та ускладнює апаратне оформлення процесу. Рациональні значення цих показників визначаються за певними методиками. Але розрахунки є досить приблизними та потребують додаткової експериментальної перевірки. До того ж фактичне температурне поле в ІЧ-апараті є суттєво нерівномірним, тому отримані значення є усередненими.

Для дослідження теплообміну в ІЧ-устаткуванні пропонується геометричний підхід. Раніше отримано геометричну модель для розв'язання прямої задачі променевої теплопередачі - визначення поверхневої щільності потоку інтегрального теплового випромінювання, який надходить від електричного нагрівника до заданої фігури на площині. Але геометричне моделювання теплопередачі випромінюванням розглядалося лише для діатермічного середовища. Оскільки вплив середовища у робочій камері на

параметри теплового потоку в ІЧ-устаткуванні є досить значним, невирішеним залишається питання геометричного моделювання променевої теплопередачі в поглинаючих газових середовищах.

Від правильної організації променевої теплопередачі та її інтенсивності багато в чому залежить тривалість теплової обробки, енерговитрати та якість продуктів. На практиці використовуються різні прийоми, серед яких раціональне розміщення ІЧ-випромінювачів і оброблюваного продукту, концентрація енергії у певному напрямку шляхом використання різних за конструкцією відбивачів, застосування імпульсних способів підведення енергії, відповідність оптичних властивостей харчових продуктів та спектральних характеристик ІЧ-випромінювачів тощо. Важливою особливістю ІЧ- випромінювання є його специфічна дія на структуру продуктів. Опромінення продуктів слід розглядати не тільки як метод інтенсивної термічної обробки, але й як процес більш глибокої дії на фізико-хімічну та біологічну природу продукту [7]. Аналіз літературних даних [8, 9] з питання поширення випромінювання в газовому середовищі дозволив визначити додаткові можливості розв'язання вищевказаної проблеми, засновані на використанні закономірностей поглинання та випромінювання триатомних газів, наприклад, двоокису вуглецю чи водяної пари, у певних діапазонах довжин хвиль випромінювання [10]. Тому при розв'язанні задач, пов'язаних з ІЧ-опромінюванням продуктів, доцільно використовувати методи, які базуються на законах не тільки класичної фізики, але й *квантової* теорії.

2.4.1. Теоретичні передумови впливу складу газового середовища на теплотехнічні показники променевої теплопередачі.

Носіями променевої енергії є електромагнітні хвилі, що випромінюються нагрітим тілом у вигляді певних порцій, якими є елементарні частки випромінювання (фотони). Фотон має властивості рухомих часток і нульову масу спокою, а також певну частоту, запас енергії,

імпульс, спін, які запозичуються від випромінюючої його частки. Кінетична енергія рухомих часток перетворюється в енергію випромінювання.

За законом Планка електромагнітне випромінювання, пов'язане з переходом системи з одного стаціонарного стану з енергією E_i в інший з енергією E_k , визначається співвідношенням

$$E = E_i - E_k = h \cdot \nu, \quad (2.15)$$

де E – енергія електромагнітного випромінювання, Дж; h – стала Планка ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); ν - частота електромагнітного випромінювання, с⁻¹.

Електромагнітна хвиля, що є випроміненою тілом, взаємодіє із зарядженими частками поглинального середовища, крізь яке вона поширюється, або з частками тіла, яке вона зустрічає на своєму шляху. Під час цієї взаємодії електрично заряджені частки приходять у рух, результатом чого є процес перетворення електромагнітної енергії в енергію руху заряджених часток. Як наслідок, енергія електромагнітної хвилі перетворюється у теплоту.

Під час проходження теплових променів у поглинальному середовищі відбувається, відповідно до закону Бугера [8], послаблення інтенсивності випромінювання, зумовлене індукційованим (примусовим) поглинанням, тобто

$$I = I_0 e^{-kl}, \quad (2.16)$$

де I , I_0 - відповідно інтенсивності випромінювання, що виходить з шару товщиною l і входить у цей шар, Вт/м²; k - коефіцієнт поглинання ІЧ-випромінювання.

Характерною особливістю газового поглинання є селективність, тобто здатність поглинати енергію лише у певних смугах спектру.

Спектральна поглинальна здатність газового середовища залежить від його фізичної природи, товщини шару, і дорівнює числу поглинених за одиницю часу фотонів $z_{\text{погл}}$, частоти ν , розрахованому на одну частку з енергією E_k та на одиницю щільності випромінювання $\rho(\nu)$:

$$A = 1 - e^{-\alpha l} = \frac{1}{\rho(\nu)} \cdot \frac{z_{\text{погл}}}{n_k}, \quad (2.17)$$

де n_k – кількість часток, що поглинають, нижнього енергетичного рівня в одиниці об'єму; $\rho(\nu)$ – щільність випромінювання, тобто енергія фотонів в одиниці об'єму:

$$\rho(\nu) = z(\nu) \cdot h \cdot \nu, \quad (2.18)$$

де $z(\nu)$ – кількість фотонів частоти ν в одиниці об'єму.

Зі збільшенням температури (при сталому об'ємі) зменшується щільність газу і, відповідно, його поглинальна здатність. Потужність поглинання становить енергію, яка поглинається одиницею об'єму за одиницю часу

$$\eta_n = h \cdot \nu \cdot A \cdot \rho(\nu) \cdot n_k \quad (2.19)$$

Після поглинання фотон перестає існувати як частка, а його енергія, маса, імпульс та спіні передаються частці (молекулі газу), що його поглинула. Результатом цього є перехід частки з деякого нижнього енергетичного рівня E_k на верхній E_i . Маючи надлишок енергії, порівняно з нормальним станом, вона збуджується і стає нестійкою. У цьому стані частка не може знаходитися необмежено довго, навіть за відсутності зовнішнього впливу, і віддає енергію, що можливо двома способами: при зіткненні з іншою

часткою (безвипромінюючий перехід) і шляхом випромінювання фотону (перехід із випромінюванням).

Перехід молекул газу у збуджений стан супроводжується підвищенням їх кінетичної енергії

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{m \cdot \omega_i^2}{2}, \quad (2.20)$$

де m – маса молекул, кг ($m = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг); ω – швидкість поступального руху молекул, м/с; n – загальне число молекул.

Це призводить до збільшення кількості зіткнень з іншими молекулами. У результаті обміну кінетичною енергією з молекулами газового середовища відбувається безвипромінюючий перехід, який супроводжується деяким зниженням енергії збудження, підвищенням середньої температури газового середовища і, відповідно, конвективного теплового потоку від газового середовища до об'єкту, що опромінюється.

У термодинамічно рівноважній системі кількості поглинутої і випроміненої кожним елементарним об'ємом енергії дорівнюють між собою. Тому рівноважні поглинальна $A_{(T)}$ та випромінювальна $\varepsilon_{(T)}$ здатності також є рівними за величиною, тобто $A_{(T)} = \varepsilon_{(T)}$.

Таким чином, наведені відомості переконливо свідчать про те, що зміна складу робочого середовища в ІЧ- апаратах може вносити суттєву поправку до механізму теплообмінних процесів. Це залежить від оптичних властивостей газового середовища, вплив яких має сприяти перерозподілу променевої енергії та зміні співвідношення складових частин променево-конвективного теплового потоку.

У цьому зв'язку подальшими теоретичними та експериментальними дослідженнями необхідно встановити раціональні режими теплової обробки, концентрації газових компонентів робочого середовища, геометричні

параметри опромінюючої системи та робочої камери, які забезпечують економічно ефективно використання теплової енергії.

2.4.2. Обґрунтування застосування закону Бугера для розбіжного світлового пучка.

Відомо, що одно - та двохатомні гази (гелій, водень, кисень, азот тощо) є практично прозорими (діатермічними) для випромінювання. Триатомні гази (у першу чергу H_2O , CO_2 , які присутні у багатьох технологічних процесах харчових виробництв), мають значні випромінювальну та поглинальну здатності. Випромінювання газів носить об'ємний характер, тому їх поглинальна здатність залежить від щільності та товщини газового шару (зі збільшенням щільності та товщини шару його поглинальна здатність збільшується). Крім того, випромінювання газів має селективний характер, тобто здатність поглинати енергію лише у певних смугах спектру.

Під час розповсюдження випромінювання у поглинальному середовищі на деякому відрізку шляху променя dl частина енергії поглинається, тобто переходить в інші форми енергії. Відносне зменшення потоку енергії є пропорційним до шляху, який проходить випромінювання у поглинальному середовищі

$$\frac{dI}{I} = -k \cdot dl. \quad (2.21)$$

Для плоского шару розв'язок рівняння (2.21) називається законом Бугера:

$$I = I_0 e^{-kl}, \quad (2.22)$$

де k - коефіцієнт поглинання, а I та I_0 - інтенсивності плоскої монохроматичної хвилі на вході в шар поглинальної речовини завтовшки l та, відповідно, на виході з нього.

У даній роботі запропоновано метод визначення щільності теплового потоку від диференціально малого елемента джерела випромінювання. При цьому утворюється розбіжний пучок. Отже, виникає питання можливості використання закону Бугера у вигляді (2.22) для розбіжного пучка.

Використаємо наступну схему (рис. 2.5), де S - точкове джерело випромінювання. Розбиваємо заданий пучок на елементарні конічні пучки з кутовою товщиною $d\alpha$, де кут α змінюється від 0 до α_0 . Для кожного елементарного пучка виконується закон

Бугера: $dI = dI_0 e^{-kl(\alpha)}$, де: $dI_0 = I_0 \frac{d\alpha}{\alpha_0}$,

$l(\alpha) = \frac{l_0}{\cos \alpha}$, k - коефіцієнт поглинання

середовища. Інтенсивність пучка на відстані l_0 від джерела дорівнюватиме:

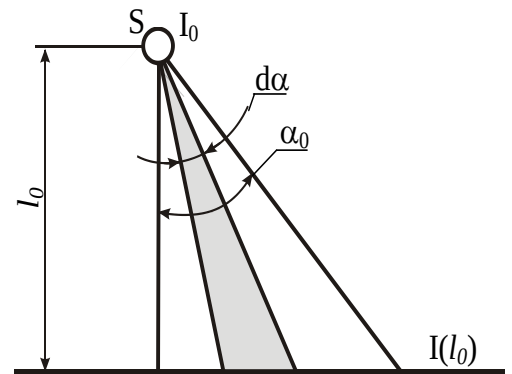


Рисунок 2.5 – Схема випромінювання для слабо розбіжного світлового пучка

$$I(l_0) = \int_0^{\alpha_0} dI_0 e^{-kl(\alpha)} = \frac{I_0}{\alpha_0} \int_0^{\alpha_0} e^{-\frac{kl_0}{\cos \alpha}} d\alpha. \quad (2.23)$$

Інтеграл у рівнянні (5.24) в аналітичному вигляді не виражається. Тому розглянемо випадок слабо розбіжного пучка, для якого $\cos \alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2}$. Ця залежність із точністю до 3% є дійсною для кутів до 50° , чого досить для практичних цілей. Тоді формула (2.23) приймає вигляд:

$$I(l_0) = \frac{I_0}{\alpha_0} e^{-kl_0} \int_0^{\alpha_0} e^{-kl_0 \frac{\alpha^2}{2}} d\alpha. \quad (2.24)$$

Інтеграл у (2.24) також не виражається в аналітичному вигляді, тому розглянемо випадок слабо поглинаючого середовища, для якого $kl_0 \leq 0.35$.

Для $\alpha_0 \leq 50^\circ$ в інтегралі (2.24) з точністю до 3% можна записати:

$$e^{-kl_0 \frac{\alpha^2}{2}} \approx 1 - kl_0 \frac{\alpha^2}{2}. \quad (2.25)$$

Після проведення необхідних розрахунків із (2.24) знаходимо остаточний вираз:

$$I(l_0) = I_0 e^{-kl_0} \left(1 - \frac{kl_0 \alpha_0^2}{6}\right). \quad (2.26)$$

Ця формула відрізняється від закону Бугера поправкою $\frac{kl_0 \alpha_0^2}{6}$.

Зауважимо, що для $\alpha_0 \leq 50^\circ$ та $kl_0 \leq 0.35$, як було прийнято вище, ця поправка складає $\frac{kl_0 \alpha_0^2}{6} \approx 0.06$, тобто менше 10%. Тому застосування закону Бугера $I(l_0) = I_0 e^{-kl_0}$ для слабо розбіжних пучків променів є виправданим у більшості практичних ситуацій.

2.4.3. Застосування закону Бугера для сферичної хвилі.

Розглянемо розповсюдження випромінювання в деякому тілесному куті ω (рис. 2.6).

Потік випромінювання Q (Дж/с) через F_r , тобто кількість енергії, яка переноситься випромінюванням за одиницю часу в межах елементарного тілесного кута ω через поверхню F_r , дорівнює

$$Q = I_r F_r \omega = I_r (r^2 \omega) \omega .$$

Потік випромінювання через поверхню F_r^* становить

$$Q^* = I_r^* F_r^* \omega = I_r^* (r + \Delta r)^2 \omega \omega$$

Закон зміни I_r вздовж r розкладемо в ряд Тейлора

$$I_r^* = I_r + \frac{dI_r}{dr} \Delta r + \dots$$

Тоді

$$Q^* = (I_r + \frac{dI_r}{dr} \Delta r) (r + \Delta r)^2 \omega \omega . \quad (2.27)$$

З іншого боку, відповідно з (2.22)

$$Q^* = Q e^{-k\Delta r} = I_r r^2 \omega \omega e^{-k\Delta r} . \quad (2.28)$$

Порівнюємо (2.28) і (2.29)

$$I_r r^2 e^{-k\Delta r} = (I_r + \frac{dI_r}{dr} \Delta r) (r + \Delta r)^2 .$$

Відкидаючи нескінченно малі величини більш високого порядку, отримаємо:

$$I_r r \left(\frac{1 - e^{-k\Delta r}}{\Delta r} \right) + 2I_r + \frac{dI_r}{dr} r = 0$$

Для $\Delta r \rightarrow 0$ $\lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-k\Delta r}}{\Delta r} = k$, остаточно маємо:

$$\frac{dI_r}{dr} + \left(k + \frac{2}{r}\right)I_r = 0.$$

Розв'язуючи останнє рівняння, отримуємо вираз

$$I_r = C \frac{e^{-kr}}{r^2}. \quad (2.29)$$

Для визначення сталої інтегрування C , припустимо, що N (Вт) - потужність точкового джерела випромінювання. Тоді в тілесному куті ω тепловий потік $Q = \frac{N}{4\pi} \omega$ та

$$I_r = \frac{Q}{F\omega} = \frac{Q}{(r^2\omega)\omega} = \frac{N}{4\pi r^2\omega}. \quad (2.30)$$

Порівнюючи (2.29) та (2.30), отримуємо

$$\frac{N}{4\pi r^2\omega} = C \frac{e^{-kr}}{r^2} \rightarrow C = \frac{N}{4\pi\omega}.$$

Остаточно інтенсивність випромінювання залежно від відстані r визначається формулою

$$I_r = \frac{Ne^{-kr}}{4\pi r^2 \omega}. \quad (2.31)$$

Використаємо отриману залежність для розрахунку щільності теплового потоку на смузї площини від точкового джерела S (рис. 2.7) таким чином:

$$E(x) = \frac{Q^*}{\Delta x^2} = \frac{I_r^* F_r^* \omega}{\Delta x^2} = \frac{I_r^* \Delta x^2 \cos \varphi}{\Delta x^2} \omega = \frac{Ne^{-kr} \cos \varphi}{4\pi r^2}.$$

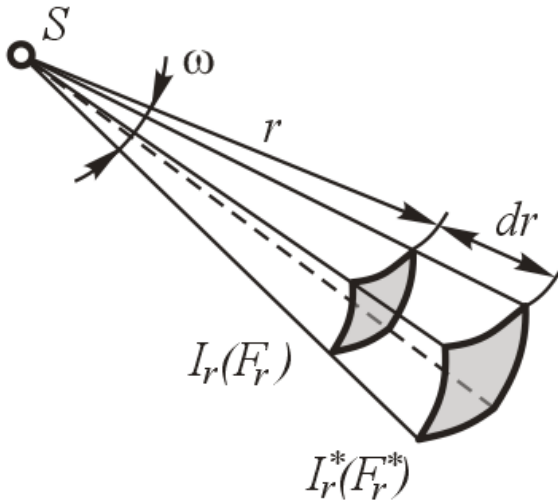


Рисунок 2.6 – Розповсюдження сферичної хвилі у тілесному куті ω .

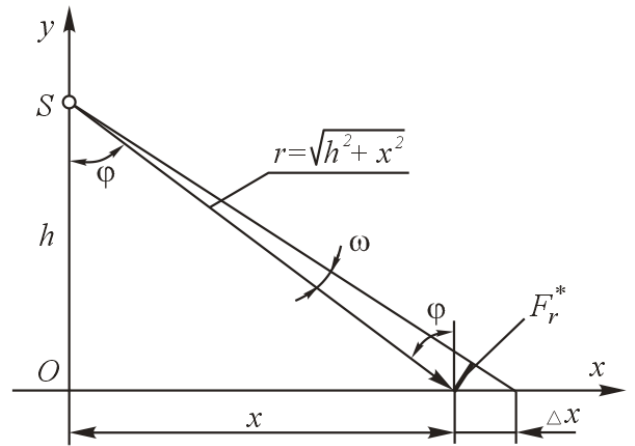


Рисунок 2.7 – До розрахунку щільності теплового потоку від точкового джерела на смузї площини.

Оскільки $\cos \varphi = \frac{h}{r}$, $r = \sqrt{x^2 + h^2}$, то отримаємо вираз

$$E(x) = \frac{Nhe^{-k\sqrt{x^2+h^2}}}{4\pi(x^2+h^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (2.32)$$

Наведені формули визначення інтенсивності та щільності теплового потоку випромінюванням є інваріантними щодо складу та параметрів поглинаючого газового середовища. Отримані залежності дозволяють удосконалити розрахунки технологічних процесів під час проектування реального ІЧ- устаткування харчової промисловості.

2.4.4. Дослідження впливу відносної вологості пароповітряного середовища на розподіл щільності теплового потоку в робочій камері ІЧ- установки.

За методикою [11] проведено розрахунок розподілу щільності потоку інтегрального теплового випромінювання, що надходить від циліндричного випромінювача потужністю $N=1\text{кВт}$, розташованого на відстані $h=0,06\text{м}$ від плоского шару продукту розміром $0,3\times 0,3\text{м}$ (рис. 2.8). Розрахунок здійснювався за умови діатермічного середовища у робочій камері ІЧ- апарату. Температура спіралі джерела дорівнює 1073К , тому максимум випромінювальної здатності відповідає довжинам хвиль $\lambda=2,7\text{мкм}$.

При наявності водяної пари в робочій камері ІЧ-устаткування важливо провести оцінку ефективності використання променевої енергії з урахуванням поглинальної та пропускної здатності H_2O (залежно від відносної вологості ППС). Виконано ряд обчислювальних експериментів (на базі системи комп'ютерної математики *Maple*) за наступних умов: тиск ППС у робочій камері $p=1,01\text{ МПа}$, відносна вологість має значення: 0% (діатермічне середовище), 20%, 40%, 60%. Теплоприймальна поверхня розбивається на ij елементарних площадок. Щільність потоку інтегрального теплового випромінювання на поверхні ij площадки, який надходить від циліндричного

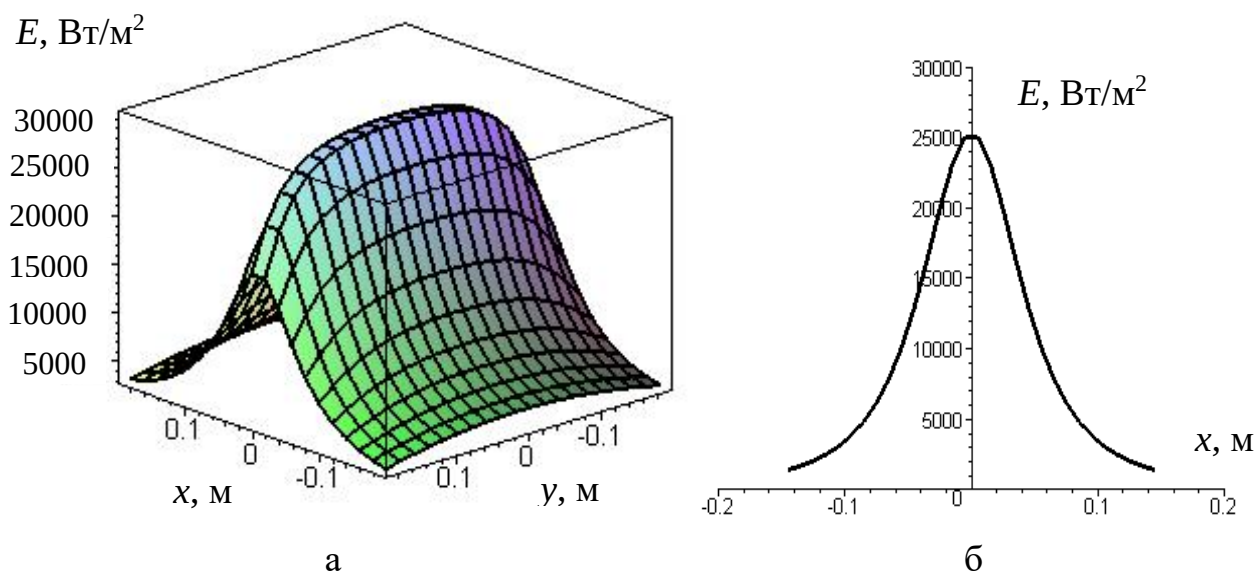


Рисунок 2.8 – Щільність потоку інтегрального теплового випромінювання від циліндричного КВ у діатермічному середовищі робочої камери ГЧ-установки:

а) просторовий розподіл;

б) розподіл у площині, яка є перпендикулярною до центру КВ.

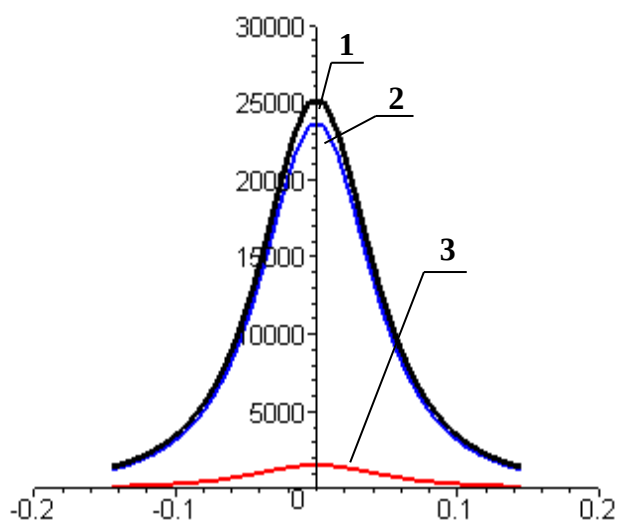


Рисунок 2.9 – Графіки розподілу щільності променевого потоку для:

1 - діатермічного середовища;
2 - ППС з відносною вологістю 20%;
3 – зменшення щільності потоку за рахунок поглинання енергії газовим середовищем

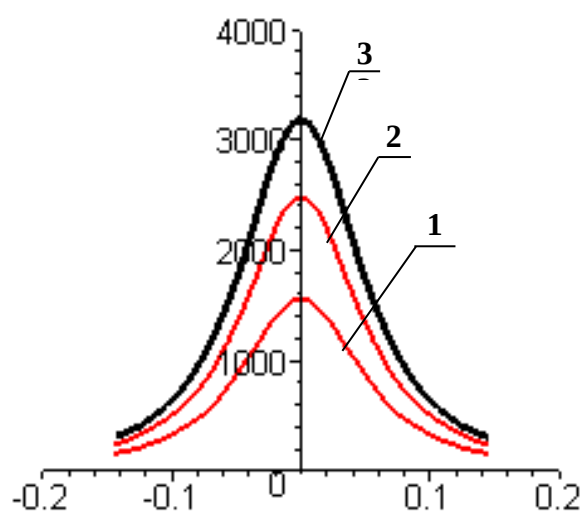


Рисунок 2.10 – Графіки зменшення щільності променевого потоку за рахунок поглинання, залежно від відносної вологості ППС:

1 - 20%, 2 - 40%, 3 - 60%.

випромінювача, з урахуванням поглинальної здатності H_2O визначається за формулою

$$E_{ij} = \frac{N}{\pi^2 L} \int_L \frac{\cos \varphi_{ij}}{l_{ij}^2} e^{-kl_{ij}} dL = \frac{N}{\pi^2 L} \int_L \frac{(1 - a_{ij}) \cos \varphi_{ij}}{l_{ij}^2} dL, \quad (2.22)$$

де N - потужність джерела; L - довжина спіралі джерела; φ_{ij} - кут падіння променя на ij -у площадку; a_{ij} - поглинальна здатність H_2O .

Поглиналина здатність H_2O залежить від температури середовища та значення добутку pl , де p - парціальний тиск H_2O ; l - довжина шляху, який проходить промінь. Таким чином, для кожної ij -ї площадки існує відповідне значення a_{ij} . Поглиналина здатність a_{ij} пароповітряного середовища визначається за номограмами (рис. 2.11, 2.12, 2.13), які побудовані Хоттелем на основі експериментів [12].

На рис. 2.9 наведено графіки розподілу щільності променевого потоку (криві: 1 - для діатермічного середовища, 2 - для пароповітряного середовища з відносною вологістю 20%, 3 - зменшення щільності за рахунок поглинання). На рис. 2.10 наведено графіки зменшення щільності за рахунок поглинання під час збільшення відносної вологості ППС.

Рис. 2.14 ілюструє зростання частки енергії, що поглинається, з віддаленням від джерела випромінювання та збільшенням відносної вологості. Для відносної вологості $\varphi = 20\%$ частка енергії, що поглинається, зростає від 6,2% (у центрі теплоприймача) до 11,4% - на межі). Для відносної вологості $\varphi = 60\%$, ці показники відповідно дорівнюють 12,6% та 21,7%.

Існує така довжина променя $L_0 = l/k$, для якої енергія випромінювання повністю поглинається середовищем. У квантовій інтерпретації вона є середньою довжиною пробігу фотону, або вірогідністю виживання кванта.

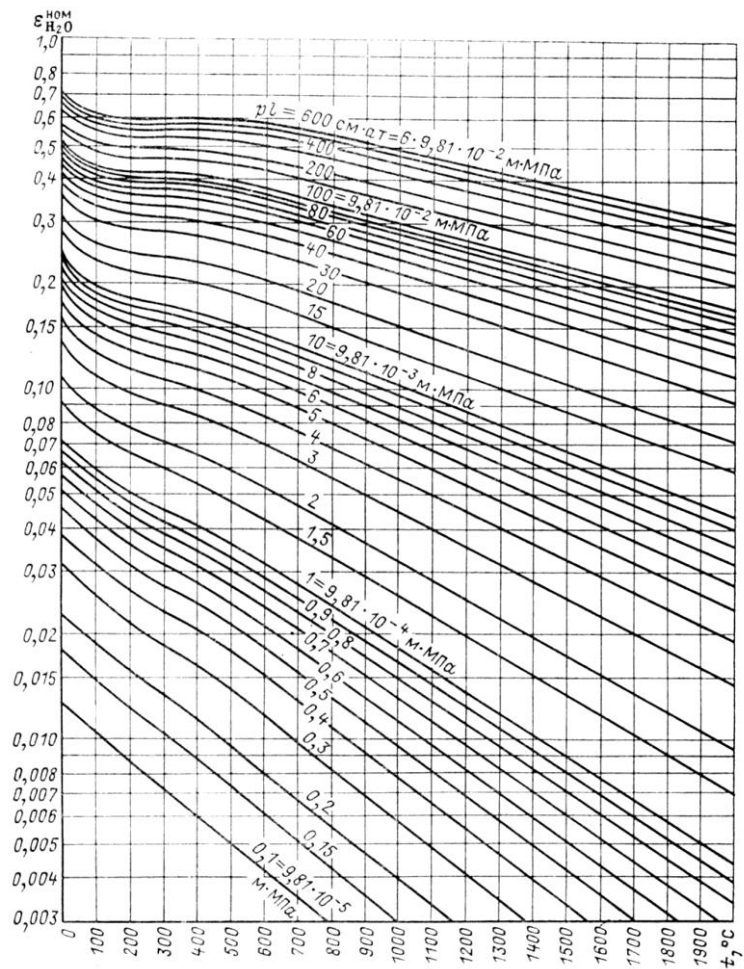


Рисунок 2.11 – Випромінювальна спроможність H_2O , яка приведена до нульового парціального тиску $p = p_{H_2O} \rightarrow 0$; $p_0 = 0,101 \text{ МПа}$.

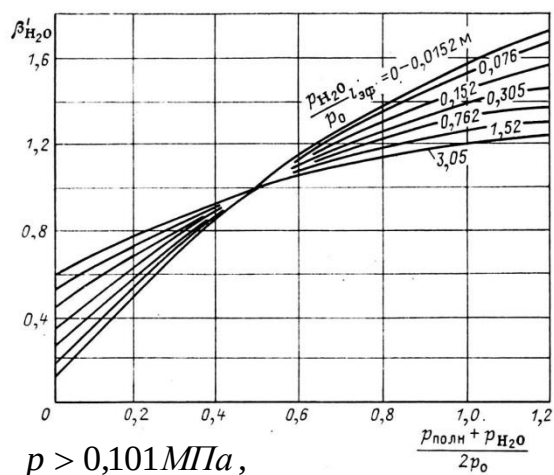


Рисунок 2.12 – Поправка до номограми випромінювальної здатності H_2O , яка враховує вплив повного тиску при та парціального тиску H_2O

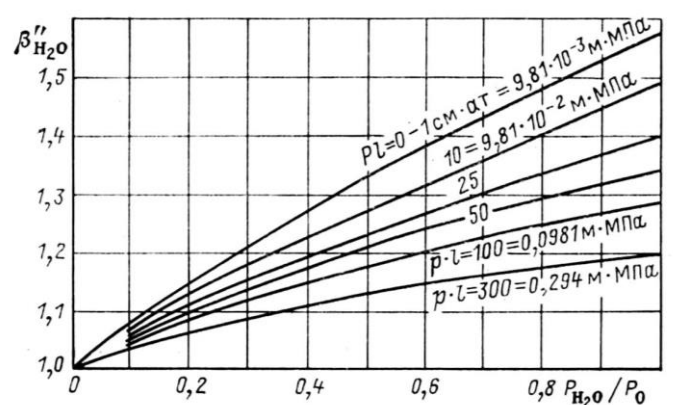


Рисунок 2.13 – Поправка на парціальний тиск при випромінюванні H_2O при загальному тиску суміші $0,101 \text{ МПа}$

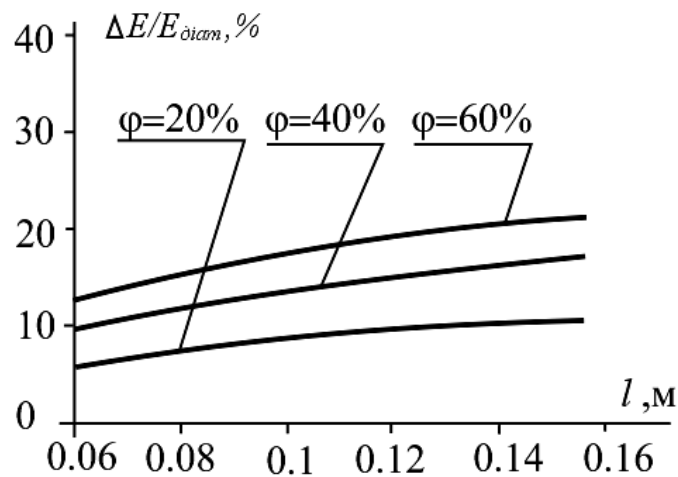


Рисунок 2.14 – Залежність відносного зменшення щільності променевого потоку від відстані до джерела випромінювання та відносної вологості ППС

Таким чином, вплив відносної вологості пароповітряного середовища на щільність теплового потоку випромінювання є досить значним, і цей вплив збільшується зі зростанням відстані від центру випромінювача. Це потрібно враховувати під час конструювання реальних ІЧ-установок з метою оптимізації технологічного процесу теплової обробки харчових продуктів.

3. ФІЗИЧНЕ ТА АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

3.1. Моделювання теплових процесів у апараті АРЖМ-0.07-1

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

Головною перевагою ІЧ жарення 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 густини випромінювання може відбуватися перегрівання поверхні та поява «опіків», які значно погіршують якість готових виробів. Якісна та економна тепла обробка харчової продукції потребує рівномірної густини променевого потоку на поверхні продукту та мінімізації втрат теплоти.

Найпоширенішими ІЧ установками для жарення харчових продуктів є грилі, шафи, печі та інші пристрої. Головними елементами апаратів ІЧ нагрівання є камера, випромінювачі (світлі або темні, до спектра яких входить відповідно зона видимих або невидимих променів), і прилади регулювання. Але основною проблемою при розробці ІЧ установок є профілювання рефлекторів для рівномірного опромінювання продукту.

На сьогодні задача про опромінювання приймача опуклого профілю (який найбільш відповідає геометрії продукту) розв'язується емпірично, тобто за приблизною та витратною методикою [13, 14]. Як наслідок, існуюче інфрачервоне устаткування харчових виробництв є невиправдано енергоємним та малоефективним.

Інші дослідники цієї проблеми використовували методики, що не забезпечували рівномірне опромінення приймача опуклого профілю [15, 16, 17, 18] 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 півеліпсу [19]. Вірогідність методики була доведена шляхом комп'ютерного моделювання за використання комплексу TracePro [20, 21] та фізичного експериментування за допомогою експериментального апарату [22, 23].

Порівняємо результати фізичного експерименту та аналітичного моделювання ІЧ жарення м'ясних напівфабрикатів за використання апарату з рефлектором для АРЖМ-0.07-1 [24].

Загальний вигляд апарату АРЖМ-0.07-1 наведено на рис. 3.1.

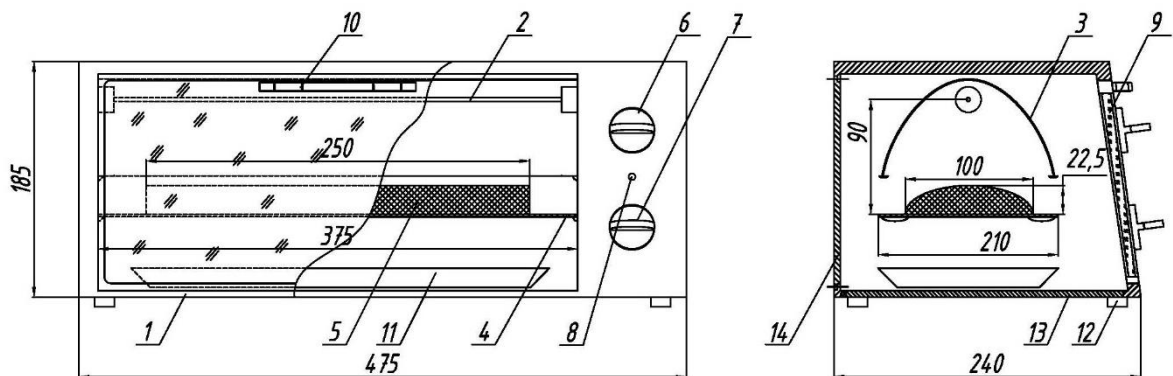


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд апарату АРЖМ-0.07-1:

- 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

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 встановлюються на відстані 90 мм від осі випромінювача.

Рефлектор виготовлено з полірованого листа алюмінію розмірами 375x214 мм, що відповідає довжині випромінювача та ширині робочої камери, а також визначається розв'язком оберненої задачі опромінювання для цієї теплової системи [19, 20].

Для визначення температурного поля було використано датчики температури з термопарами хромель-алюмель, виконані зі сталі 18ХН10Т. Виключення похибки, викликані стоком теплоти проводами термопари та розтяжками кріплення приймача у корпусі датчика, забезпечується виконанням розтяжок та робочої ділянки термопари з проволочки діаметром 0.2 мм. За термопарою встановлено екран з полірованого алюмінію з метою виключення стоку тепла випромінюванням з 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. 3.2). Монтаж стійки з датчиками було здійснено на відстані 67.5 мм від випромінювача (горішня точка перерізу продукту).

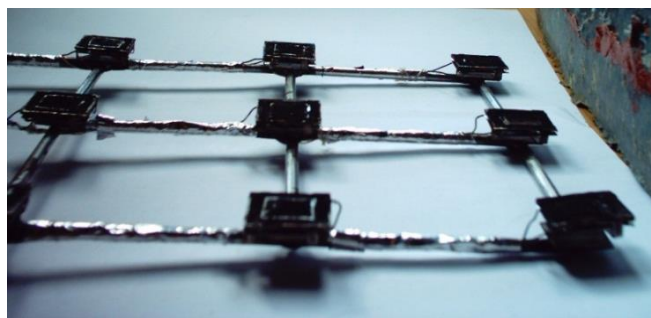


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд рамки з датчиками ІЧ потоку

Щільність променевого потоку було визначено за законом Стефана–Больцмана:

$$q_{\text{пр}} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{д}}} \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_{\text{д}}}{100} \right)^4 \quad (3.1)$$

де $q_{\text{пр}}$ – щільність падаючого променевого теплового потоку, Вт/м²;

$T_{\text{д}}$ – температура датчика, К (визначається термопарами);

$C_0 = 5.67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ – стала Стефана–Больцмана;

$\varepsilon_{\text{д}} \approx 0.96$ – коефіцієнт чорноти датчика.

Температура на дев'ятьох датчиках визначалася через 2 хвилини після вмикання апарату, після чого за формулою (3.1) обчислювалося поле променевого потоку. За незмінних умов експерименту було оцінено середнє арифметичне значення температури $T_{\text{с}}$ та визначено точність вимірювань.

Значення похибки знайденої оцінки середнього арифметичного визначалося довірчим інтервалом $\varepsilon_{\text{в}}$. Вірне значення з заданою довірчою вірогідністю становило $T = T_{\text{с}} \pm \varepsilon_{\text{в}}$. Було обрано довірчу вірогідність $\beta = 0.9$, кількість експериментів становила $n = 6$, кількість ступенів свободи вибіркової дисперсії $f = n - 1 = 5$. За цих умов статистичний критерій Стьюдента $t(\beta, f) = 2.015$.

Обчислення зданих за допомогою прикладного пакету MathCad надало середні значення температури з довірчим інтервалом $\pm 3^\circ\text{C}$, за якими було отримано значення густини опромінювання (рис. 3.3). Збільшення значення густини від середини рамки до країв зумовлено тим, що рамка пласка, на відміну від опуклого продукту.

Густина опромінювання, Вт/м²

$$q_{\text{пр}} = \begin{pmatrix} 4.38 \times 10^4 & 2.844 \times 10^4 & 2.58 \times 10^4 & 2.844 \times 10^4 & 4.38 \times 10^4 \\ 4.77 \times 10^4 & 3.127 \times 10^4 & 2.844 \times 10^4 & 3.127 \times 10^4 & 4.77 \times 10^4 \\ 4.975 \times 10^4 & 3.276 \times 10^4 & 2.983 \times 10^4 & 3.276 \times 10^4 & 4.975 \times 10^4 \\ 4.77 \times 10^4 & 3.127 \times 10^4 & 2.844 \times 10^4 & 3.127 \times 10^4 & 4.77 \times 10^4 \\ 4.38 \times 10^4 & 2.844 \times 10^4 & 2.58 \times 10^4 & 2.844 \times 10^4 & 4.38 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.3 – Значення густини за фізичного експерименту

Згідно з розробленою методикою [19] променевий потік рівномірно розподіляється на еліптичній поверхні з такою густиною:

$$q = \frac{Q}{\pi L} (\pi + \theta - \alpha) \times \frac{1}{l_B}, \quad (3.2)$$

де α – половина кута, в якому поширюються промені, що не потрапляють на рефлектор (рис. 3.4);

θ – половина кута, в якому поширюються промені, що потрапляють на приймач (рис. 3.4);

Q – потужність випромінювача;

L – довжина половини еліпса;

l_B – довжина випромінювача.

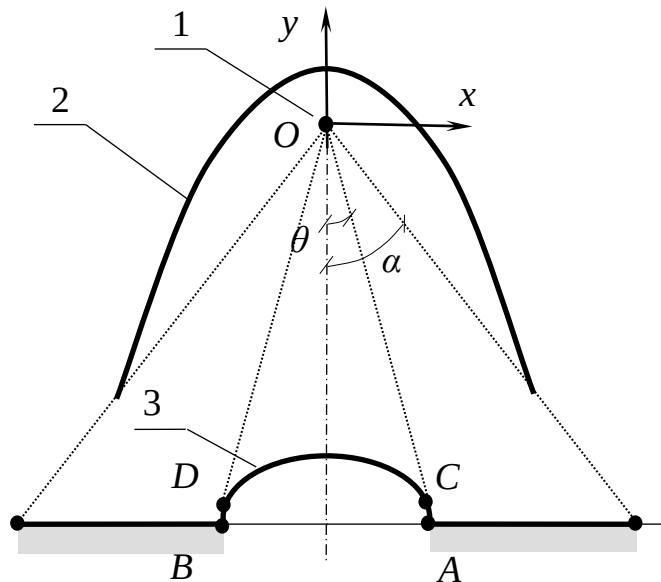


Рисунок 3.4 – Схема теплотехнічної системи:

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

Відповідно до розмірів робочої камери та обраного перерізу продукту (рис. 3.5) $\alpha = 0,838$; $\theta = 0,521$; $L = 118,017$ мм. Для випромінювача потужністю 1 кВт і довжиною 0.25 м, густина променевого потоку складає

$$q = \frac{1000}{3,14 \cdot 118,017 \cdot 10^{-3} \cdot 1} (3,14 + 0,521 - 0,838) \times \frac{1}{0.25} \approx 30,48 \text{ кВт/м}^2. \quad (3.3)$$

На рис. 1.5 координатна сітка відповідає абсолютним розмірам теплотехнічної системи.

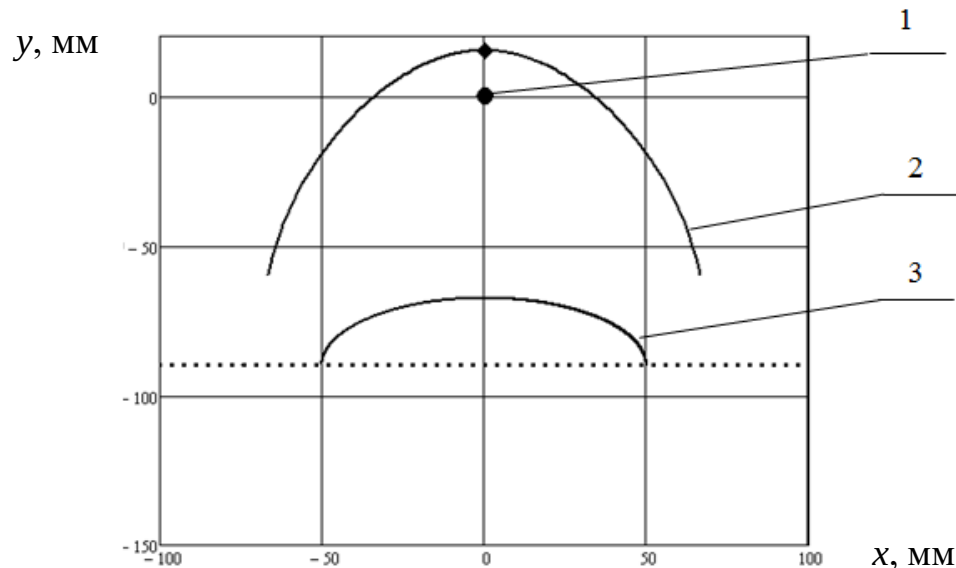


Рисунок 3.5 – Схема апарата АРЖМ-0.07-1:

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

Прямий потік q_1 потрапляє лише на ділянку CD , що обмежена дотичними від випромінювача до півеліпса (рис. 3.4). Отже, у зонах «затінку» AC та BD максимальне значення сумарного опромінення q відповідає значенню відбитого потоку q_2 . У зоні впливу прямого потоку CD ми змушені зменшувати відбитий, щоб складання прямого q_1 та відбитого q_2 потоків надало незмінне значення сумарного q . Розроблена раніше аналітична

методика [19, 20] дає можливість отримати рівняння профілю рефлектора, якій відповідає цим вимогам опромінення.

Характер та значення у Вт/м^2 густини опромінення прямого q_1 , відбитого q_2 та сумарного q потоків залежно від безрозмірної відносної координати приймача ξ [19] наведено на рис. 3.6, 3.7 та 3.8.

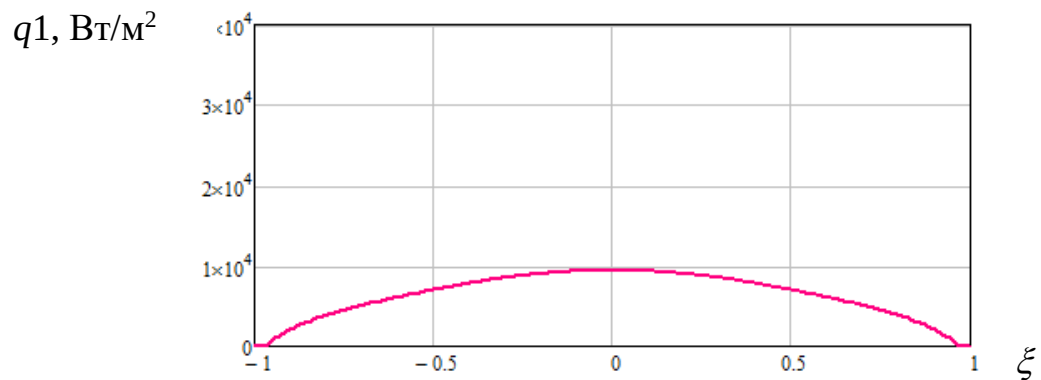


Рисунок 3.6 – Значення прямого потоку ІЧ опромінювання

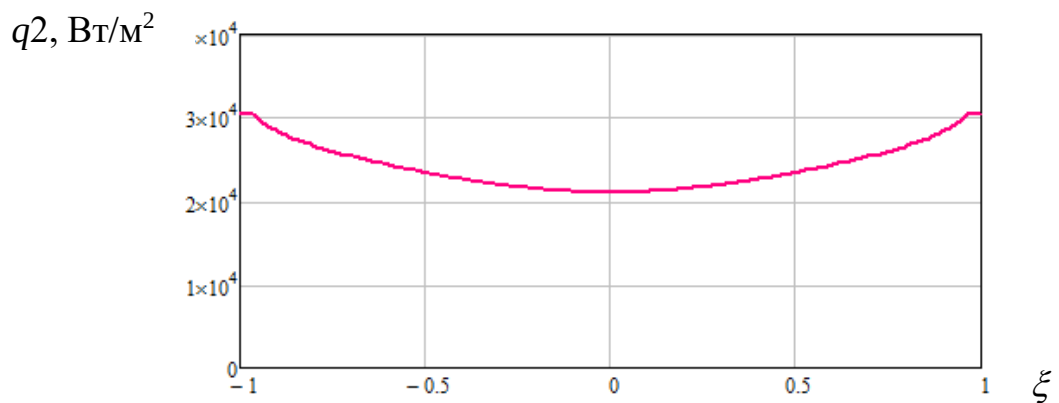


Рисунок 3.7 – Значення відбитого потоку ІЧ опромінювання

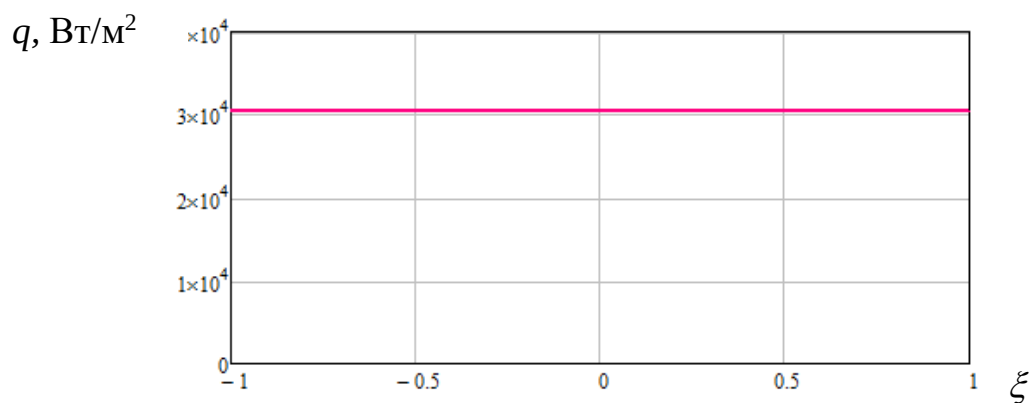


Рисунок 3.8 – Значення сумарного потоку ІЧ опромінювання

Порівняння значень сумарної густини опромінення, отриманих шляхом аналітичного та фізичного моделювання, наведено на рис. 3.9. За горизонтальною віссю відкладено абсолютний розмір приймача x (мм), за прямою віссю – абсолютний розмір приймача y (мм) та значення сумарної густини опромінення q (кВт/м²).

Суцільною лінією вказано півеліптичний профіль приймача, пунктирною – рівномірну аналітичну густину опромінення. Круги надають розташування термопар, кола – значення густини опромінення у цих точках (центральний переріз продукту).

Аналітичний розв’язок було отримано для продукту півеліптичного перерізу з більшою піввіссю 50 мм, а меншою – 22.5 мм, що визначалося рекомендованим значенням завтовшки м’ясного напівфабрикату 20...25 мм. Тобто, співвідношення осей півеліпса приймача становить $22.5 / 50 = 0.45$.

Експериментальний розподіл густини опромінення за плаского розташування термопар має угнутий півеліптичний характер зі значенням у середині 29.83 кВт/м², а на краях 49.75 кВт/м². Таким чином, співвідношення осей півеліптичного розподілу густини опромінення становить $(49.75 - 29.83) / 50 = 19.92 / 50 = 0.4$. Беручи до уваги похибки виготовлення та монтажу відбивача, цей результат можна вважати прийнятним.

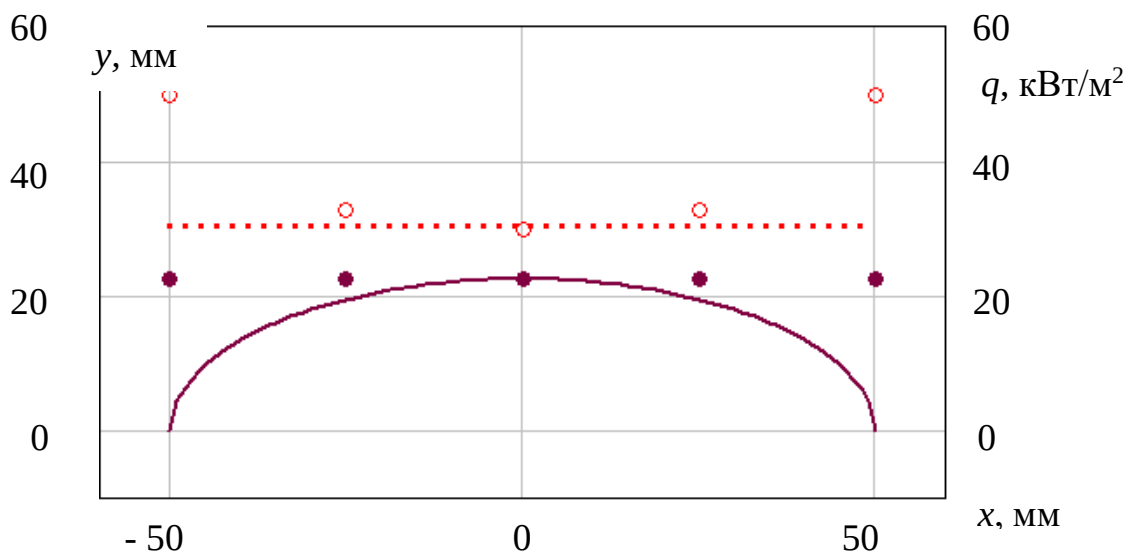


Рисунок 3.9 – Порівняння фізичного та аналітичного моделювання:

- — профіль приймача; – аналітична щільність;
 ● – розташування термопар; ○ – експериментальна щільність

Таким чином, порівняння отриманих результатів фізичного та аналітичного моделювання ІЧ-опромінення опуклого продукту доводить ефективність створеної методики визначення профілю відбивача променевого потоку. Апарат із рефлексом для жарення м'ясних напівфабрикатів АРЖМ-0.07-1 забезпечує на поверхні продукту рівномірну густину променевого потоку значенням $30 \pm 0.343 \text{ кВт/м}^2$.

3.2. Моделювання кінетики температури харчової сировини

Жарення м'ясних напівфабрикатів є складним теплообмінним процесом, який визначається різновидом способів підведення теплоти, нерівномірністю теплового потоку на поверхні продукту, особливостями внутрішнього переносу тепла. Існуючі дослідження пропонують різні моделі жарення, орієнтовані на інженерні розрахунки [16, 17, 18], але питання кінетики температури внутрішніх шарів м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення досліджено недостатньо, що ускладнює забезпечення енергетичної ефективності харчових виробництв.

Розглянемо головні припущення моделі. У випадку ІЧ-нагрівання електромагнітна енергія поглинається нескінченно малим поверхневим шаром продукту, що відповідає випадку теплообміну з заданим потоком теплоти (граничні умови II роду). Втрати теплоти з поверхні продукту спричинені конвективним теплообміном із довкіллям незмінної температури (граничні умови III роду) [19, 20].

Внаслідок 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 будемо вважати малими порівняно з енергією, витраченою на нагрівання, та не будемо їх враховувати.

Підведення теплоти здійснюється з одного боку (верхня поверхня продукту), втратами теплоти з нижньої поверхні продукту нехтуємо.

Густину потоку ІЧ-опромінення на поверхні продукту вважаємо рівномірно розподіленою завдяки використанню відбивача [19, 20].

Запишемо рівняння теплового балансу для внутрішніх шарів продукту, які нагріваються завдяки теплопровідності, тому диференціальне рівняння теплового балансу ІЧ-нагрівання з урахуванням геометрії продукту має наступний вигляд:

$$c \rho V \frac{dT}{d\tau} = \frac{2 K_F \lambda}{R_x} S (T_S - T). \quad (3.4)$$

У рівнянні (3.4) c – питома теплоємність продукту, ρ – щільність 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 [25]:

$$K_F = 1 + \frac{R_x}{R_y} + \frac{R_x}{R_z}, \quad (3.5)$$

де R_x – половина товщини продукту, R_y и 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-опромінення та конвективні втрати тепла, отримує наступний вигляд:

$$\frac{2 K_F \lambda}{R_x} S (T_S - T) = -\alpha S (T_S - T_A) + \eta P_E, \quad (3.6)$$

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

З рівняння (3.6) знаходимо середню температуру поверхні продукту

$$T_S = \frac{T + \frac{\eta P_E R_x}{2 K_F S \lambda} + \text{Bi}_F T_A}{\text{Bi}_F + 1}. \quad (3.7)$$

Підставляємо вираз (3.7) у рівняння (3.4), отримуємо диференціальне рівняння кінетики температури

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{2 K_F \lambda}{c \rho R_V R_x} \frac{\text{Bi}_F}{\text{Bi}_F + 1} \left(\frac{\eta P_E}{\alpha S} + T_A - T \right), \quad (3.8)$$

де R_V – відношення об'єму продукту до площини його поверхні, $\text{Bi}_F = \alpha R_x / (2 K_F \lambda)$ – модифіковане число Біо.

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

$$T = \frac{\eta P_E}{\alpha S} + T_A - \left(T_0 - \frac{\eta P_E}{\alpha S} - T_A \right) \cdot \exp \left(- \frac{2 K_F \lambda}{c \rho R_x R_V} \frac{\text{Bi}_F}{\text{Bi}_F + 1} \tau \right). \quad (3.9)$$

Рівняння (3.9) описує кінетику середньої температури внутрішніх шарів продукту з плином часу.

Якщо задати середню потрібну температуру всередині продукту (температура готовності), то з рівняння (3.9) можна знайти потрібний час жарення

$$\tau_R = \frac{c \rho R_x R_V}{2 K_F \lambda} \cdot \left(\frac{\text{Bi}_F + 1}{\text{Bi}_F} \right) \cdot \ln \left(\frac{T_A - T_R + \frac{\eta P_E}{\alpha S}}{T_A - T_0 + \frac{\eta P_E}{\alpha S}} \right), \quad (3.10)$$

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

Зауважимо, що в цій моделі ми вважаємо, що продукт не перегортається під час жарення, тобто теплообмін здійснюється з одного боку.

Використаємо апарат АРЖМ-0.07-1, де приймачем тепла є м'ясний напівфабрикат із нормальним перерізом у вигляді напівеліпсу (рис. 3.10). Половини осей напівеліпса $a = 0.05$ м и $b = 0.0225$ м. Довжина напівфабриката $L_p = 0.2$ м.



Рисунок 3.10 – М'ясний напівфабрикат

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

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

Площина верхньої поверхні напівфабрикату $S = L_h L_p = 0.114 \cdot 0.2 = 0.023$ м². Об'єм напівфабрикату $V = A L_p = 1.767 \cdot 10^{-3} \cdot 0.2 = 0.35 \cdot 10^{-3}$ 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 (3.5) отримує значення

$$K_F = 1 + \frac{0.0225}{0.05} + \frac{0.0225}{0.1} = 1.675. \quad (3.11)$$

У рівнянні (3.4) питома теплоємність яловичини $c = 3.5 \cdot 10^3$ Дж/(кг °С), щільність яловичини $\rho = 1100$ кг/м³, коефіцієнт теплопровідності яловичини $\lambda = 0.5$ Вт/(м² °С) [26].

У рівнянні (3.6) коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 20$ Вт/(м² °С), температура повітря всередині апарату $T_A = 20$ °С, коефіцієнт поглинання випроміненої потужності $\eta = 0.2$, потужність ІЧ-випромінювача $P_E = 1000$ Вт.

У рівнянні (3.9) $R_V = V / S = 0.35 \cdot 10^{-3} / 0.023 = 0.016$ м, модифіковане число Біо $Bi_F = \alpha R_x / (2 K_F \lambda) = 20 \cdot 0.0225 / (2 \cdot 1.675 \cdot 0.5) = 0.269$.

На рис. 3.11 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.

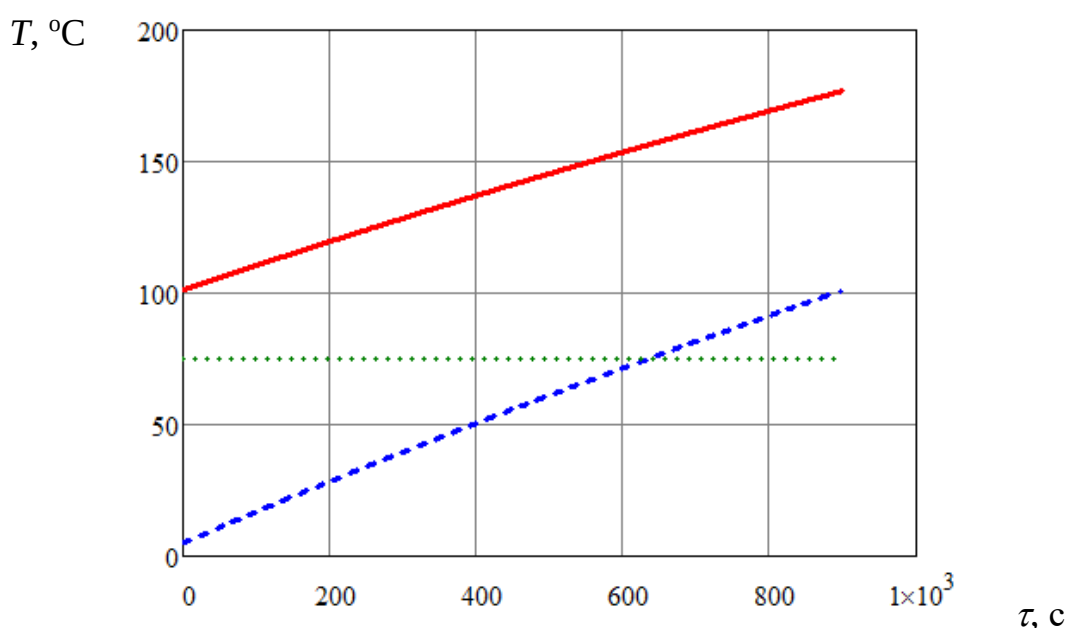


Рисунок 3.11 – Кінетика температури:

————— T_S ; — — — — T ; T_R

Час готовності продукту (3.10) становить $\tau_R = 634.5$ с, тобто 10.6 хвилин. Під час жарення м'ясних напівфабрикатів у апараті АРЖМ-0.07-1 готовність продукту наставала через 8...10 хвилин після жарення з кожного боку [27]. Неоднакові результати є наслідком теплових втрат з нижньої поверхні продукту та втрат маси під час реального жарення.

Порівняння отриманих результатів моделі кінетики температури та реального жарення доводить адекватність створеної моделі.

3.3. Системно-динамічне моделювання комплексної оцінки інфрачервоного апарату

Системний аналіз пов'язує та узагальнює всі засоби вдосконалення процесу виробництва харчової продукції, що дозволяє не тільки одержати кількісну оцінку, але й визначити шляхи оптимізації. Разом з розробкою прогресивних процесів виникає можливість створювати імітаційні моделі, необхідні для вирішення задач оптимізації [25, 26]. На відміну від звичайного моделювання, яке обмежується спостереженням та формальними статистичними зв'язками між елементами системи, імітаційне моделювання реалізує морфологію системи для точної та всебічної динаміки процесу функціонування. Імітаційне моделювання є адекватним інструментом аналізу складних систем зі слабо формалізованими елементами, до яких можна віднести системи харчових виробництв [28, 29].

Імітаційне дослідження дозволяє поєднувати особливості експериментального підходу і специфіку засобів комп'ютерної підтримки. Програмний комплекс Vensim має підґрунтям потокову концепцію системної динаміки, за якої об'єкт — це динамічна система, що складається з накопичувачів, пов'язаних між собою керованими потоками. Кількісно кожний накопичувач описується рівнем його змісту, а кожний потік — темпом переміщення на основі інформації про вміст резервуарів [30, 31].

Таким чином, використання імітаційних системно-динамічних моделей дозволяє оптимізувати процес виробництва харчової продукції за обраними

реакціями шляхом комп'ютерного експерименту зі зміною та комбінуванням значень критеріїв, забезпечуючи якісний продукт.

Шляхом системно-динамічного моделювання розглянемо комплексну оцінку апарата АРЖМ-0.07-1 та порівняємо його з пристроєм без рефлектора. Інструментальною базою моделювання обрано системно-динамічну технологію потокового типу (програмний комплекс Vensim).

Одиницею виміру часу в моделі є хвилина, що відповідає терміну найменшої затримки. Термін моделювання складає 20 хвилин. Загальний вигляд моделі наведено на рис. 3.12.

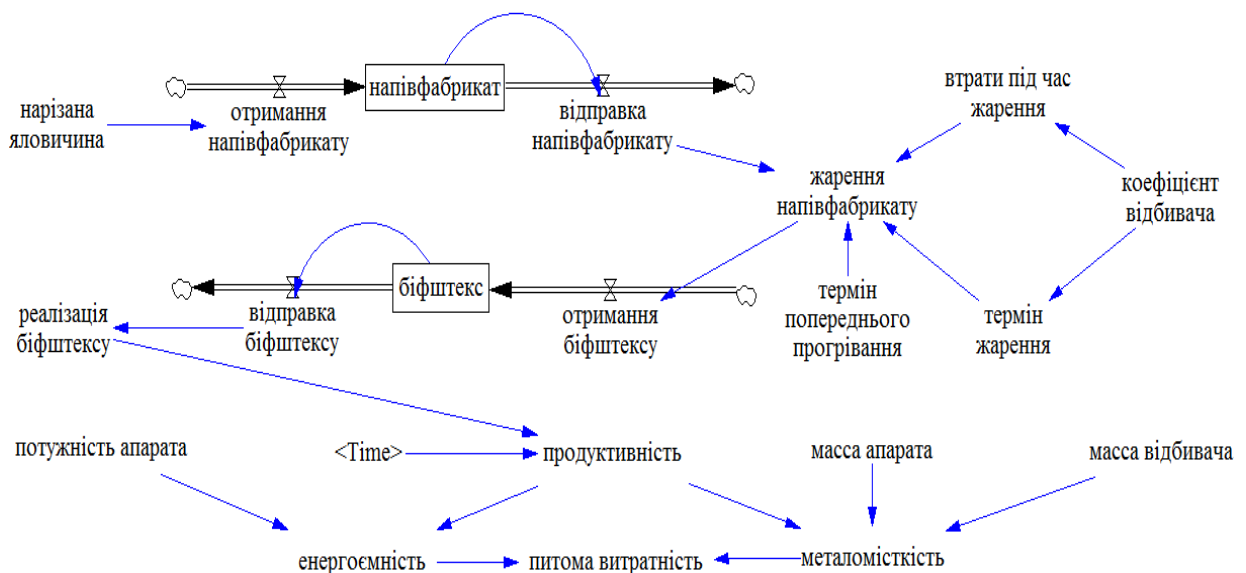


Рисунок 3.12 – Імітаційна модель у Vensim

Припущення [32, 33]:

- 1) поставка яловичини є разовою пульсуючою;
- 2) затримки на операціях відповідають рекомендаціям з експлуатації;
- 3) терміни теплової обробки відповідають типовому обладнанню;
- 4) втрати на операціях відповідають експериментальним дослідженням;
- 5) залишок продукту відсутній.
- 6) якість продукту незмінна.

Екзогенні керовані змінні [34]:

- 1) масові компоненти (нарізана яловичина, маса апарата, маса відбивача);
- 2) енергетичні компоненти (коефіцієнт відбивача, потужність апарата, термін попереднього прогрівання).

Ендогенні керовані змінні [34]:

- 1) втрати під час жарення становлять 33 %, помножені на коефіцієнт відбивача;
- 2) термін жарення становить 15 хв, помножені на коефіцієнт відбивача;
- 3) жарення напівфабрикату визначається фіксованою затримкою відправки напівфабрикату на суму термінів попереднього прогрівання та жарення з урахуванням втрат під час жарення;
- 4) продуктивність визначається реалізацією біфштексу за годину;
- 5) енергоємність визначається відношенням потужності апарата до продуктивності;
- 6) металомісткість визначається відношенням суми мас апарата та відбивача до продуктивності;
- 7) питома витратність визначається множенням енергоємності та металомісткості.

Моделним відгуком, або реакцією моделі була питома витратність [33]. Всі фактори мають ефект взаємодії, тобто комбінованого впливу на реакцію моделі. Було використано наступні рівні факторів:

- нарізана яловичина складалася з двох шматків по 200 г кожний;
- маса апарата складала 3.5 кг;
- маса відбивача складала 0.5 кг;
- коефіцієнт відбивача становить 0.6, тобто відношення терміну жарення м'ясного напівфабрикату в апараті з відбивачем (9 хв) до терміну жарення у апараті без відбивача (15 хв);
- термін попереднього прогрівання апарату становить 2 хв;

– потужність обладнання становить 1 кВт.

Експеримент проводився для апарата без відбивача (коефіцієнт відбивача 1, маса відбивача 0 кг, Current 1) та апарата з відбивачем (коефіцієнт відбивача 0.6, маса відбивача 0.5 кг, Current 06).

Значення реалізації біфштексу наведено на рис. 3.13.

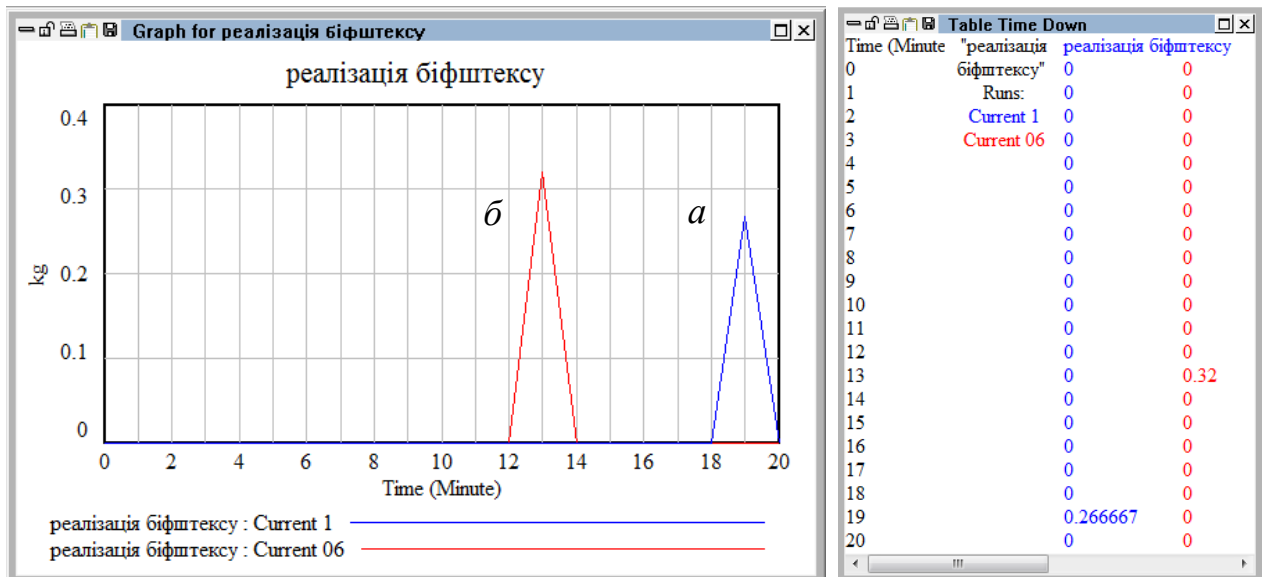


Рисунок 3.13 – Реалізація біфштексу (кг):

а – Current 1, б – Current 06

Значення продуктивності наведено на рис. 3.14.

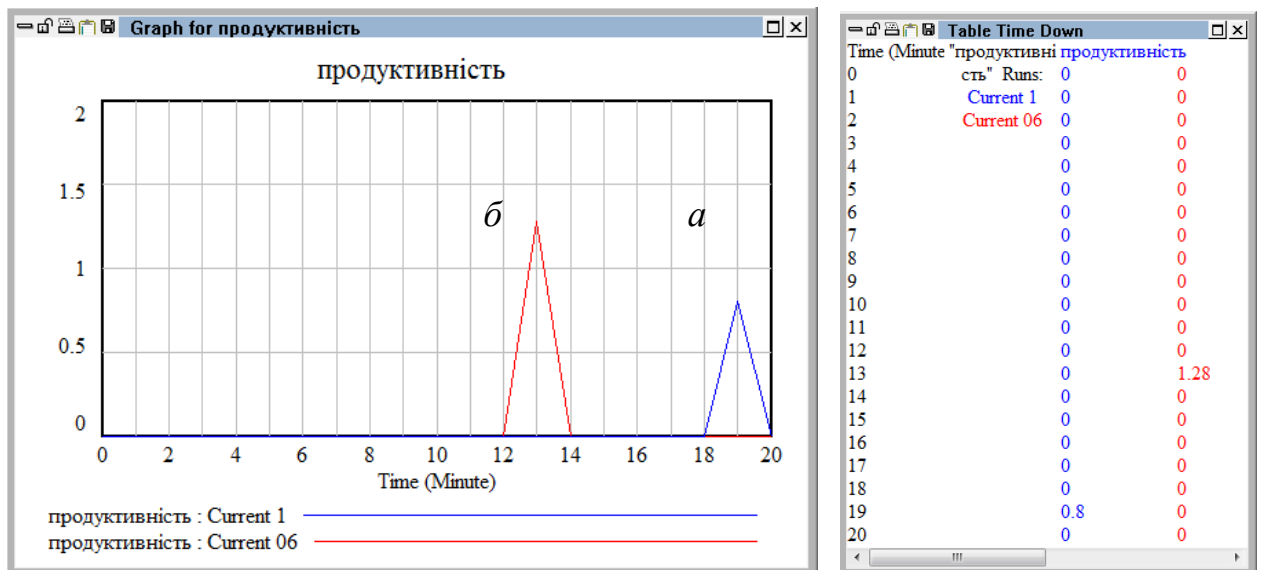


Рисунок 3.14 – Продуктивність (кг / год):

а – Current 1, б – Current 06

Значення енергоємності наведено на рис. 3.15.

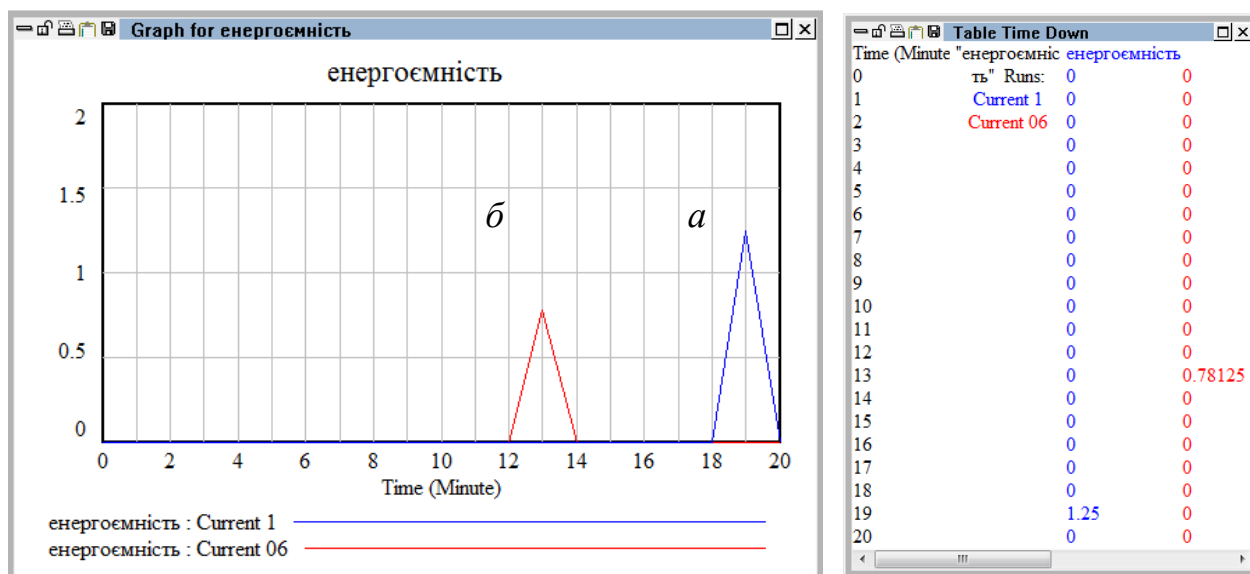


Рисунок 3.15 – Енергоємність (кВт год / кг):

a – Current 1, *б* – Current 06

Значення металомісткості наведено на рис. 3.16.

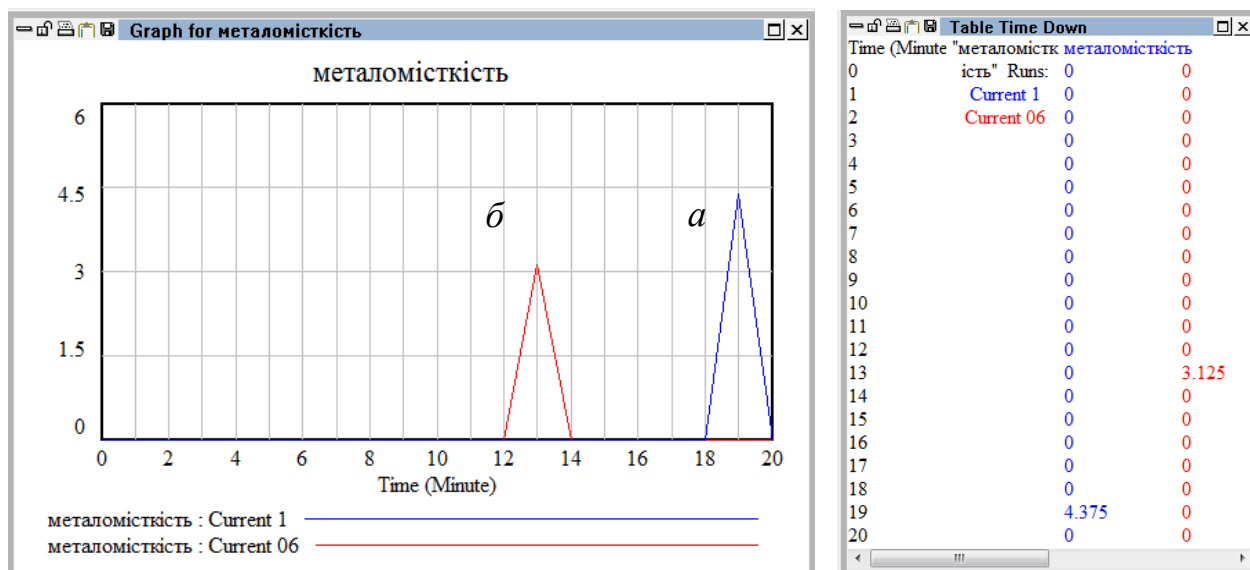


Рисунок 3.16 – Металомісткість (кг год / кг):

a – Current 1, *б* – Current 06

Значення питомої витратності наведено на рис. 3.17.

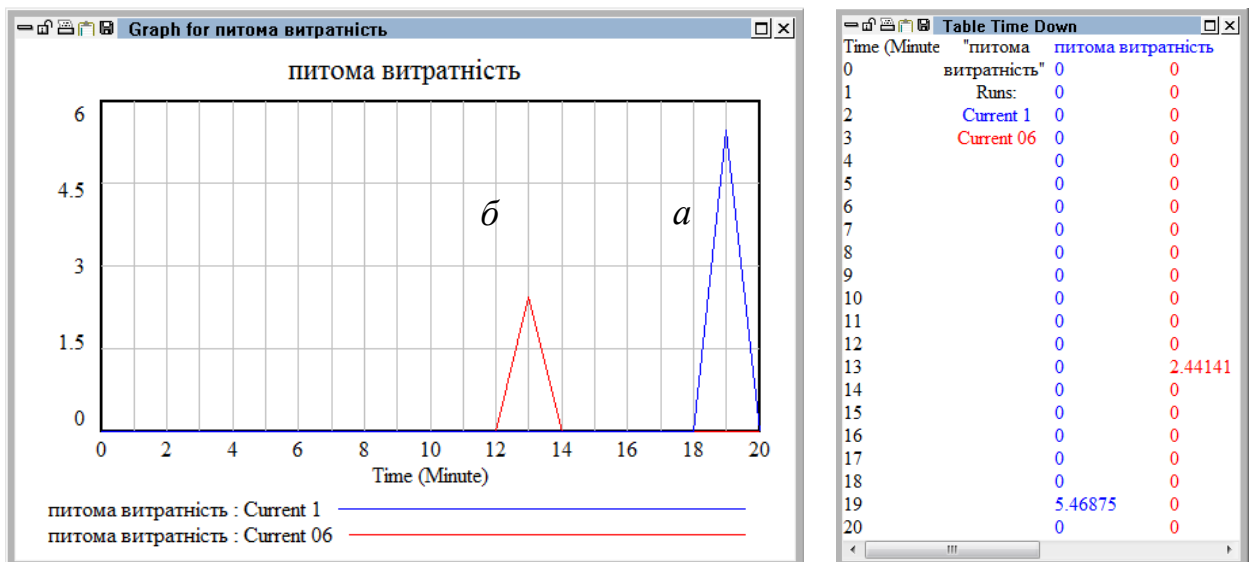


Рисунок 3.17 – Питома витратність (кВт кг год / кг):

a – Current 1, *б* – Current 06

Отже, використання відбивача променевого потоку призводить до наступних переваг:

- збільшення реалізації біфштексу (рис. 3.2) на $0.32 / 0.27 - 1 = 1.2 - 1 = 0.2$, тобто 20%;
- збільшення продуктивності (рис. 3.3) на $1.28 / 0.8 - 1 = 1.6 - 1 = 0.6$, тобто 60%;
- зменшення енергоємності (рис. 3.4) на $1.25 / 0.78 - 1 = 1.6 - 1 = 0.6$, тобто 60%;
- зменшення металомісткості (рис. 3.5) на $4.38 / 3.13 - 1 = 1.4 - 1 = 0.4$, тобто 40%;
- зменшення питомої витратності (рис. 3.6) на $5.47 / 2.44 - 1 = 2.24 - 1 = 1.24$, тобто 124%.

Використання системно-динамічного моделювання для порівняння комплексних якісних характеристик апарата з відбивачем АРЖМ-0.07-1 і апарата без відбивача доводить, що наявність відбивача призводить до збільшення продуктивності, а також зменшення енергоємності та металомісткості. Це істотно знижує питомі витрати з поліпшенням якості

харчових продуктів. Комплексна оцінка та оптимізація інфрачервоного обладнання харчових виробництв є неможливими без системно-динамічного моделювання. Надалі для більш повної оцінки необхідно розширити кількість факторів, що впливають на реакцію моделі.

4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАМОРОЖУВАННЯ

4.1. Модель кристалізації при заморожуванні харчових систем.

Оскільки кінцевою метою холодильної обробки є максимальне збереження харчової та біологічної цінності продукту, то термодинамічного критерієм цього є ступінь оборотності процесів заморожування-розморожування. Ці процеси в харчових продуктах надзвичайно складні для математичного моделювання, оскільки включають в себе пов'язані процеси тепло-масопереносу, структурно-механічні зміни, хімічні і біохімічні реакції. Тому будь-які технологічні процеси, що передують заморожування продукту відбиваються на кінетиці протікання внутрішніх явищ переносу. У зв'язку з цим, одним із завдань даної роботи є створення адекватних математичних моделей, що дозволяють передбачати вплив технології м'ясних напівфабрикатів на процеси заморожування-розморожування.

Як відомо найбільш простим експериментом, що дозволяє оцінити ступінь термодинамічної незворотності продукту при його холодильної обробці, є визначення динаміки температури по термограмі процесу заморожування і розморожування. У той же час математичний опис такого процесу, як зазначалося, набагато складніше, ніж сам експеримент. Професорами Онищенко В.П. [35] показано, що при математичному моделюванні процесів холодильної обробки слід відмовитися від використання через відоме граничної умови Стефана, яке включає наявність джерела теплоти на рухомий кордоні контакту двох температурних полів для охолодженого і замороженого шару продукту, оскільки реально такої межі при заморожуванні продуктів не існує. Не існує і значень істинний теплоємності продуктів, в яких би ще раз не враховувалася теплота фазового переходу. Тому, ґрунтуючись на цій концепції, нами в якості основного теплофізичні параметра, що описує процеси заморожування-

розморожування, була обрана питома теплоємність, яка визначається наступним чином

$$c = \frac{dH}{dT}, \quad (4.1)$$

де c – питома теплоємність, Дж / (кг·К);

dH – зміна ентальпії в даному процесі, Дж;

dT – нескінченно мала зміна температури в даному процесі, К.

Як відомо питома теплоємність величина адитивна, тому будь-які зміни в складі харчових систем при заморожуванні, надають на неї безпосереднє лінійне вплив, крім того будь-які можливі хімічні або біохімічні реакції як правило мають парниковий ефект і, таким чином, також безпосередньо позначаються на величині теплоємності.

Для аналізу термограм заморожування-розморожування отримаємо модель кінетики даного процесу з урахуванням ефективної теплоємності. Скористаємося методом аналізу кінетики явищ переносу в нерівноважних термодинамічних системах [36] і запишемо рівняння теплового балансу для тіла довільної форми в процесі конвективного заморожування-розморожування

$$R_V \frac{d}{d\tau}(\rho c t) = -\alpha(t_s - t_\infty) - R_V L_\omega \frac{d}{d\tau}(\rho w_0 \omega), \quad (4.2)$$

де t – середня за обсягом тіла температура, °С;

t_s – температура поверхні тіла, °С;

t_∞ – температура навколишнього середовища (що охолоджує або гріє), °С;

R_V – відношення обсягу тіла до його поверхні, м;

ρ – щільність, кг / м³;

c – питома теплоємність, Дж / (кг·К);

α – коефіцієнт теплообміну, Вт / (м²·К);

L_ω – питома теплота фазового переходу вода-лід, $L_\omega = 3,35 \cdot 10^5$ Дж / кг;

w_0 - початкова вологість в частках від загальної маси;

ω – частка вимороженої (або розплавленої) вологи по відношенню до загальної масі води;

τ – поточний час, с.

Запишемо рівняння (4.2) в термінах ефективна ентальпія – ефективна теплоємність. Вважаючи, що щільність харчових систем в процесі заморожування-розморожування практично не змінюється [37], перетворимо рівняння (4.2)

$$\rho R_V \left[\frac{d}{d\tau} (ct) + L_\omega \frac{d}{d\tau} (w_0 \omega) \right] = -\alpha (t_s - t_\infty), \quad (4.3)$$

звідки

$$\rho R_V \frac{d}{d\tau} H_e = -\alpha (t_s - t_\infty), \quad (4.4)$$

де $H_e = ct + L_\omega w_0 \omega$ - ефективна ентальпія системи, Дж/кг.

Теплоємність харчового продукту при холодильній обробці записують звичайно в такий спосіб [37]

$$c(t) = c_0 - (c_w - c_i) w_0 \omega(t), \quad (\text{при } t < t_{кр}) \quad (4.5)$$

$$c = c_0, \quad (\text{при } t > t_{кр}) \quad (4.5a)$$

де c_0 - питома теплоємність при температурах t вище криоскопічної $t_{кр}$, Дж/(кг·К),

c_w - питома теплоємність води, $c_w = 4190$ Дж/(кг·К).;

c_i - питома теплоємність льоду, $c_i = 2100$ Дж/(кг·К).

Відповідно на підставі визначення (4.1) і з урахуванням (4.5) ефективна питома теплоємність C_e дорівнює

$$C_e(t) = c_0 - (c_w - c_i)w_0\omega(t) + L_w w_0 \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.6)$$

$$C_e = c_0, \quad (\text{при } t > t_{кр}) \quad (4.6a)$$

Визначена таким чином ефективна питома теплоємність враховує всі види теплових ефектів, які мають місце в процесі заморожування-розморожування системи, тому, визначивши її, можна проводити аналіз впливу технології підготовки харчових систем на оборотність процесу заморожування-розморожування.

Для її практичного використання необхідно знати температурну залежність величини $\omega(t)$.

У теплофізичних розрахунках процесів холодильної обробки використовують дві моделі для частки вимороженої вологи: модель, заснована на рівнянні Рауля для істинних розчинів

$$\omega(t) = 1 - \frac{t_{кр}}{t}; \quad (4.7)$$

и емпіричну модель Чижова-Латишева

$$\omega(t) = \frac{1,105}{1 + \frac{0,714}{\ln(t + 1 - t_{кр})}}; \quad (4.8)$$

Диференціюючи останні два рівняння, отримуємо вирази для швидкості кристалізації в моделі Рауля

$$\left| \frac{d\omega}{dt} \right| = \frac{t_{кр}}{t^2}, \quad (4.9)$$

в моделі Чиждова-Латишева

$$\left| \frac{d\omega}{dt} \right| = \frac{0.789/(t+1-t_{кр})}{[\ln(t+1-t_{кр})+0.714]^2}. \quad (4.10)$$

Підставляючи вирази для швидкості кристалізації (4.9), (4.10) і частки вимороженої вологи (4.7), (4.8) в рівняння (4.6), отримуємо такі вираз для розрахунку ефективної питомої теплоємності

У моделі Рауля

$$C_e(t) = c_0 - (c_w - c_i)w_0 \left(1 - \frac{t_{кр}}{t} \right) + L_w w_0 \frac{t_{кр}}{t^2}, \quad (\text{при } t < t_{кр}) \quad (4.11)$$

$$C_e = c_0. \quad (\text{при } t > t_{кр}) \quad (4.11a)$$

в моделі Чиждова-Латишева

при $t < t_{кр}$

$$C_e(t) = c_0 - (c_w - c_i)w_0 \left[\frac{1,105}{1 + \frac{0.714}{\ln(t+1-t_{кр})}} \right] + L_w w_0 \frac{0.789/(t+1-t_{кр})}{[\ln(t+1-t_{кр})+0.714]^2}, \quad (4.12)$$

$$\text{при } t > t_{кр} \quad C_e = c_0 \quad (4.12a)$$

На рис. 4.1 наведені графіки питомої теплоємності, побудовані за рівняннями (4.11), (4.12) з використанням теплофізичних характеристик яловичини, наведених Роговим А.І. [37].

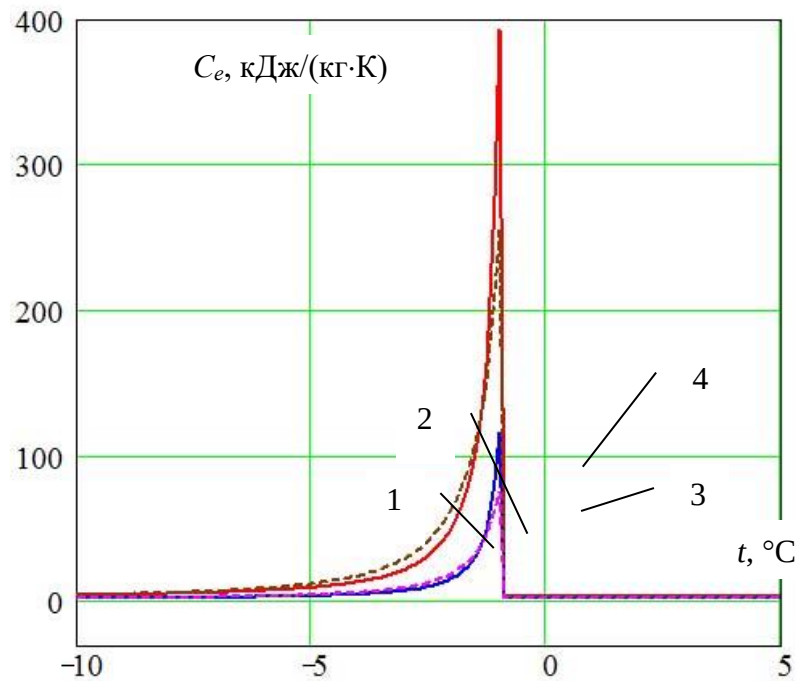


Рисунок 4.1 – Розрахункові значення питомої теплоємності яловичини згідно класичним моделям: 1,3 - модель Рауля (11), 2,4 модель Чижева-Латишева (12), при різному вмісті води (w_0 в частках від маси): 1,2 - $w_0 = 0,75$; 3,4 - $w_0 = 0,22$.

На рис.4.2 наведені експериментальні дані калориметричних вимірювань питомої теплоємності яловичини, отримані Ріделем [38].

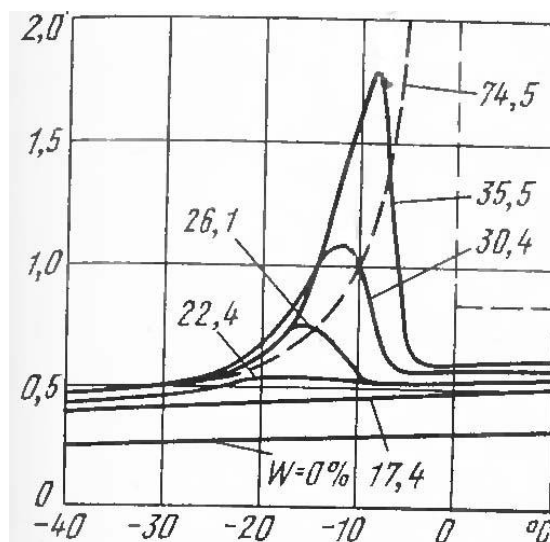


Рисунок 4.2 – Залежність питомої теплоємності знежиреної яловичини при різному вмісті води W (в % від маси) від температури [38]. Пунктиром по-казана питома теплоємність води.

Порівняння цих графіків демонструє істотну відмінність теоретичних розрахунків за рівняннями (4.11), (4.12) від експериментальних даних. Відзначимо, що наші вимірювання питомої теплоємності для яловичини мають вигляд аналогічних графіками, наведеними на рис. 4.2.

Характерною відмінністю експериментальних даних є більш широкий криоскопічний інтервал, в якому спостерігається фазовий перехід, зміщення максимуму швидкості кристалізації води і криоскопічної температури зі зменшенням вологості зразка в область більш низьких температур, менша швидкість зміни теплоємності в криоскопічній області. На нашу думку така істотна відмінність температурної залежності теплоємності викликана у досить грубій моделі харчового продукту, яка витікає з рівняння Рауля. У класичних моделях теплоємності (4.11), (4.12) продукт ототожнюється з істинним розчином, який в процесі заморожування повільно концентрується аж до евтектичної температури. Однак загально-прийнятої моделі харчових продуктів є колоїдне капілярно пористе тіло (ККПТ), характерною особливістю якого є гетерогенність по структурно-механічними властивостями, хімічним складом і енергією зв'язку. Вода в харчових продуктах знаходиться в динамічній взаємодії з дисперсною фазою і може змінювати свою енергію зв'язку в результаті не тільки зміни температури, але і процесів денатурації білків, перетворення полісахаридів, ферментативних реакцій [36]. Комплекс цих процесів не може бути описаний в рамках теорії виморожування істинних розчинів, що і є причиною, описаних вище, розбіжностей теоретичних і експериментальних даних.

Згідно існуючим теоріям процес кристалізації в складних термодинамічних системах [39], до яких відносяться і харчові системи, слід розглядати як накладення декількох конкуруючих процесів. У разі ККПТ це як мінімум два основних процеси – виморожування вільної води (основний процес) і конкуруючий процес збільшення енергії зв'язку для зв'язаної води, яке проявляється як збільшення в'язкості системи і гелеутворення.

Причому ці два процеси по-різному залежать від температури, якщо швидкість основного процесу (виморожування вільної вологи) зі зменшенням температури знижується, то швидкість конкуруючого процесу (зв'язування вологи) зростає. Графічно це ілюструє рисунок 4.3.

Виходячи з цієї фізичної моделі процесу заморожування харчових систем, нами запропонована математична модель для швидкості кристалізації у вигляді добутку двох експонент

$$\left| \frac{d\omega}{dt} \right| = A \cdot e^{-k_1 t} \cdot e^{-\frac{1}{k_2 t}}, \quad (4.13)$$

де A , k_1 , k_2 – емпіричні константи;

t – температура (по модулю), °C.

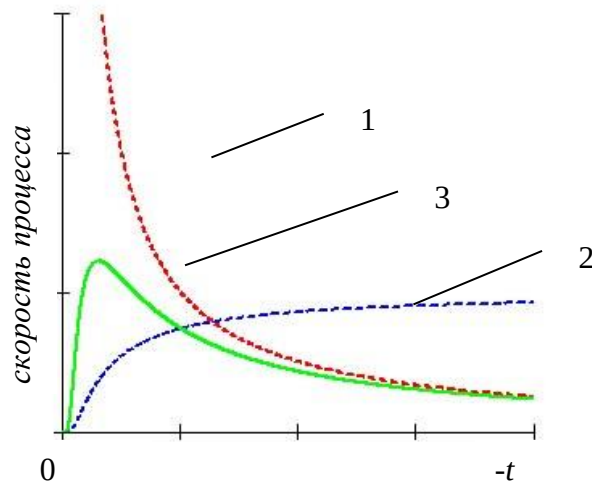


Рисунок 4.3 – Швидкість кристалізації при заморожуванні харчових систем. 1 – швидкість виморожування вільної вологи; 2 – швидкість зв'язування вологи; 3 – швидкість кристалізації.

Величина k_1 задає швидкість основного процесу (швидкість виморожування вільної вологи), величина k_2 задає швидкість конкуруючого процесу (швидкість зв'язування вологи).

З урахуванням отриманого виразу для швидкості кристалізації, ефективна питома теплоємність при заморожуванні запишеться в наступному вигляді

$$C_e(t) = c_0 - (c_w - c_i)w_0(1 - e^{-k_1 t}) + L_w w_0 A \cdot e^{-k_1 t} \cdot e^{-\frac{1}{k_2 t}}. \quad (\text{при } t < t_{\text{кр}}) \quad (4.14)$$

$$C_e = c_0. \quad (\text{при } t > t_{\text{кр}}) \quad (4.14a)$$

У рівнянні (4.14) враховано, що теплоємність при виморожування вільної води також змінюється за законом експоненти.

Характер температурної залежності питомої теплоємності $C_e(t)$, що описується рівнянням (4.14) наведено на рис. 4.4.

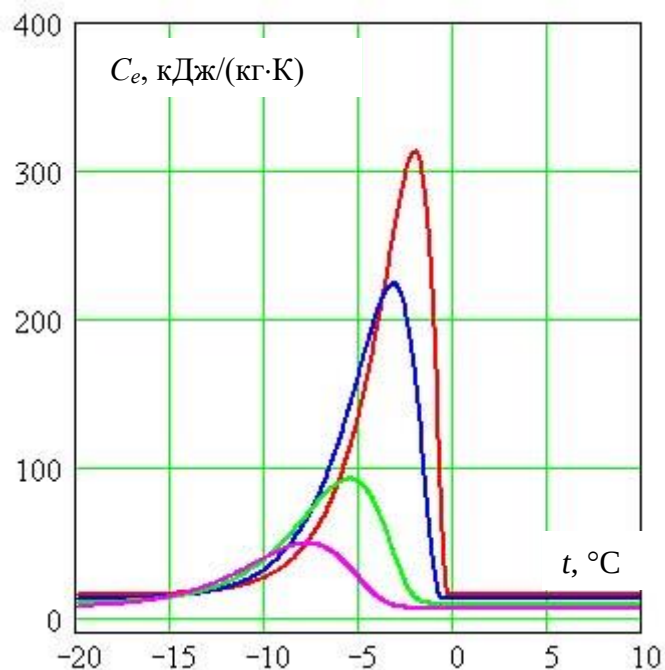


Рисунок 4.4 – Характер температурної залежності ефективної питомої теплоємності харчової системи, що описується рівнянням (4.14)

Як видно запропонована модель температурної залежності питомої теплоємності, набагато ближче відображає експериментальний характер

кривих наведених на рис. 4.2, ніж класичні моделі Рауля і Чижова-Латишева (рис. 4.1).

Визначимо характерні точки швидкості кристалізації описуваної рівнянням (4.13). Прирівнявши похідну від швидкості кристалізації (4.13) по температурі нулю,

$$\frac{d}{dt} \left(A \cdot e^{-k_1 t} \cdot e^{-\frac{1}{k_2 t}} \right) = 0, \quad (4.15)$$

знаходимо положення максимуму швидкості кристалізації (центр кріоскопічного інтервалу температур)

$$t_{kp} = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}, \quad (4.16)$$

і максимальну швидкість кристалізації

$$\left| \frac{d\omega}{dt} \right|_{\max} = A \cdot \exp \left(-\frac{2k_1}{\sqrt{k_1 k_2}} \right). \quad (4.17)$$

Підставляючи (4.16) в (4.14), знаходимо максимальну ефективну теплоємність

$$C_{e\max} = c_0 - (c_w - c_i) w_0 \left(1 - e^{-\frac{k_1}{\sqrt{k_1 k_2}}} \right) + L_w w_0 A \cdot e^{-\frac{2k_1}{\sqrt{k_1 k_2}}}. \quad (4.18)$$

Таким чином, запропонована модель кристалізації харчових систем дозволяє проводити адекватний аналіз термограм заморожування-розморожування з метою встановлення оптимальних рецептур і технологічних операцій при виробництві заморожених напівфабрикатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Серeda Н.І. Геометричне моделювання перебігу променів в еліптичних та параболічних відбивальних системах. Дис....канд. техн. наук. - Київ: КНУБА, 1999 - 174 с.
2. Кришер О. Научные основы техники сушки: Пер. С нем. - М.: Изд-во иностр. лит., 1961.- 539 с.
3. Hottel H.C., Sarofim A.F. Radiative Transfer. Nev York: McGraw-Hill Book Company, 1967.
4. Черевко А.И., Пахомов П.Л., Михайлов В.М., Бабкина И.В. Теоретические исследования влияния газовой среды на интенсификацию тепловой обработки /Холодильная техника и технология, 1999.-Вып.60.- С.57-60.
5. Черевко О.І., Михайлов В.М., Лебединець І.В. Експериментальні дослідження теплової обробки харчових продуктів інфрачервоним випромінюванням у пароповітряному середовищі //Обладнання та технології харчових виробництв: Зб. наук. пр.- Донецьк: ДонДУЕТ, 2002.- Вип.7.- С.365-372.
6. Михайлов В.М. Вплив двоокису вуглецю на енерговитрати при інфрачервоному жарінні //Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”.- Вип.10.-Харків: ХДТУСГ, 2002.- С.318-326.
7. Черевко А.И., Михайлов В.М., Бабкина И.В. ИК-нагрев как перспективное направление в пищевых технологиях // Актуальні науково-методичні проблеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікації для торгівлі і харчування: Зб. наук. пр. - Ч. 1. – Харків: ХДАТОХ, 1997. - С. 155-156.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергоиздат, 1981. - 416 с.

9. Лабай В.Й. Тепломасообмін.- Львів: Тріада Плюс, 1998. - 260 с.
10. Черевко О. І., Михайлов В. М., Лебединець І. В. Дослідження комбінованого способу теплової обробки харчових продуктів // Вестник национального технического университета “ХПИ”: Сб. науч. тр. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2002. – С. 149-153.
11. Тормосов Ю.М. Метод визначення щільності теплового потоку від циліндричної поверхні скінчених розмірів.// Вестник Херсонского государственного технического университета. Вып. 2(15).- Херсон: ХГТУ, 2002.- С.469-473.
12. Hottel H.C., Sarofim A.F. Radiative Transfer. Nev York: McGraw-Hill Book Company, 1967.
13. Пат. 4317441 США, МКИ А 47 J 37/00. Broiler apparatus. Устройство для жарения мяса [Текст] / Roger M. Berg (США). – № 67368; заявл. 17.08.79; опубл. 02.03.82, НКИ 126/41. – 12 с.
14. Пат. 4664923 США, МКИ А 23 L 1/01. Method of infrared tunnel oven cooking of food products. ИК-аппарат для приготовления пищи [Текст] / Wagner Dennis, Wells Harold D. (США). – № 778350; заявл. 24.10.85; опубл. 12.05.87, НКИ 426/233. – 14 с.
15. Lawson, D. A. An accurate program for radiation modelling in the design of high-temperature furnaces [Text] / D. A. Lawson, C. D. Ziesler // IMA J Management Math. – 1996. – № 7(2). – С. 109–116.
16. Sheridan, P. Application of far infra-red radiation to cooking of meat products [Text] / P. Sheridan, N. Shilton // Journal of Food Engineering. – 1999. – Vol. 41(3). – С. 203–208.
17. 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.
18. 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.

19. Плевако, В. П. Фрагментований рефлектор для рівномірного опромінювання приймача з напівеліптичною формою перерізу [Текст] / В. П. Плевако, С. М. Костенко, І. П. Педорич // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / Харківський держ. ун-т харчування і торгівлі. – Харків : ХДУХТ, 2008. – Вип. 2(8). – С. 266–275.

20. Плевако, В. П. Комп'ютерне моделювання процесу опромінювання приймача напівеліптичного перерізу [Текст] / В. П. Плевако, С. М. Костенко; голов. ред. О. О. Шубін; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. – 2009. – Вип. 22. – С. 269–273.

21. Плевако В. П. Верифікація методики профілювання відбивача / В. П. Плевако, С. М. Костенко, С. Ю. Саєнко // Наукові праці ОНАХТ. Серія Технічні науки / Голов. ред. Б. В. Єгоров ; Одеський національний університет харчових технологій. – 2012. – С. 157–159.

22. Плевако В. П. Експериментальне доведення методики визначення профілю відбивача / В. П. Плевако, С. М. Костенко, С. О. Лобов // 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. – 2012. – Вип. 29. – С. 48–52.

23. Плевако В. П. Перевірка методики для визначення профілю відбивача променевого потоку / В. П. Плевако, С. М. Костенко, І. П. Педорич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків, 2013. – Том 6, № 5 (66) – С. 42–45.

24. Костенко С. М. Комплексна оцінка якості апарата АРЖМ-0.07-1 [Текст] / С. М. Костенко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / [редкол. :

О. І. Черевко (відпов. ред.) та ін.]. Харків : ХДУХТ, 2014. – Вип. 2 (20). – С. 168–173.

25. Потапов В.А. Кинетика явлений переноса в процессе сушки : монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland / Германия. 2013, – 319 с.

26. 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. : ил.

27. Нові технічні рішення в проектуванні обладнання для теплової обробки харчової сировини: монографія в 3 ч. Ч. 3. Підвищення ефективності теплового обладнання з інфрачервоним нагріванням / В. П. Плевако, С. М. Костенко, І. П. Педорич ; за заг. ред. О. І. Черевка, В. М. Михайлова. – Х. : ХДУХТ, 2012. – 130 с.

28. Системные исследования технологий переработки продуктов питания / О.Н. Сафонова, Ф.В. Перцевой, О.А. Гринченко, А.Л. Фошан, П.П. Пивоваров, А.В. Богомоллов, Л.Н. Тищенко, Б.Ч. Гарнцарек. – Харьков: 2000. – 200 с.

29. Антонов А.В. Системный анализ: Учебник для вузов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 2006. – 452 с.

30. Биткова Т.В. Построение системно-динамических моделей в среде Vensim. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Имитационное моделирование» для студентов специальностей «Экономическая кибернетика» и «Прикладная экономика». – Х.: ХНУ, 2004 – 52 с.

31. Меркулова Т. В. Экономико-математическое моделирование: учебное пособие / Т. В. Меркулова, Т. В. Биткова, Е. Ю. Кононова. – [2-е изд., дораб.] – Х.: Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2011. – 276 с.

32. Черевко О.І., Михайлов В.М., Бабкіна І.В. Процеси та апарати жаріння харчових продуктів: Навч. посібник, Харк. держ. акад. технол. та орг. харчування. – Харків, 2000. – 332 с.: іл.; табл.

33. Перцевий Ф.В. та ін. Технологія продукції харчових виробництв: Навч. посібник / Ф.В. Перцевий, Н.В. Камсуліна, М.Б. Колеснікова, М.О. Янчева, П.В. Гурський, Л.М. Тіщенко / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2006. – 318 с.: табл.

34. Плевако В. П. Експериментальне доведення методики визначення профілю відбивача / В. П. Плевако, С. М. Костенко, С. О. Лобов // 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. – 2012. – Вип. 29. – С. 48–52.

35. Оніщенко В.П. Наукові основи процесів та апаратів холодильної технології харчових продуктів. Дис... д-ра техн. наук: 05.18.14.- Одеса, 2000.– 415 с.

36. Потапов В.А. Кинетика явлений переноса в процесс сушки: монография/ LAPLAMBERT Academic Publishing, Deutschland/ Германия. – 2013, 319 с.

37. Рогов И. А., Куцакова В. Е., Филиппов В. И., Фролов С. В. Консервирование пищевых продуктов холодом (теплофизические основы).— 2-е изд., перераб. и доп. — М: Колос, 1999. — 176 с.

38. Я. Постольски, З. Груда. Замораживание пищевых продуктов. М. Пищевая промышленность, 1978.- 608 с.

39. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. X. / Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. — 2-е изд., испр. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 536 с.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Запропоновано метод розв'язання прямої задачі променевої теплопередачі, тобто метод визначення поверхневої щільності потоку інтегрального теплового випромінювання, який надходить від теплового електричного нагрівача до заданої фігури на площині. Геометрична модель процесу теплоперенесення одержана на базі основних фізичних закономірностей і може бути застосованою за умови, що середовище в об'ємі робочої камери є діатермічним.

2. Формули, які виведено для визначення інтенсивності та щільності теплового потоку випромінюванням, є інваріантними щодо складу та параметрів поглинаючого газового середовища та дозволяють удосконалити розрахунки технологічних процесів при проектуванні реальних ПЧ-установок харчової промисловості.

3. Проведено фізичне та аналітичне моделювання з метою доведення рівномірності інфрачервоного опромінення під час жарення м'ясних напівфабрикатів за використання апарату АРЖМ-0.07-1. Конструкція апарата уможливила фізичний експеримент для оцінки рівномірності опромінення м'ясного напівфабрикату. Аналітичне моделювання виконувалося за допомогою системи комп'ютерної алгебри MathCAD. Порівняння густини опромінення довело ефективність створеної методики профілювання відбивача променевого потоку в жарильному обладнанні.

4. Розглянуто кінетику температури м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення. Результатом дослідження є рівняння кінетики середньої температури внутрішніх шарів продукту у часі, що враховує теплофізичні та геометричні характеристики продукту, а також потужність випромінювача. Час реального жарення визначався температурою готовності внутрішніх шарів продукту в апараті АРЖМ-0.07-1. Порівняння часу готовності доводить ефективність розробленої моделі для визначення

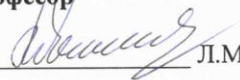
температури внутрішніх шарів м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення.

5. Шляхом системно-динамічного моделювання виконано комплексну оцінку апарата АРЖМ-0.07-1. Використання системно-динамічного моделювання уможлиблює повну та якісну оцінку впливу головних факторів на характер та значення вихідної функції. Використання в апараті АРЖМ-0.07-1 відбивача променевого потоку призводить до збільшення продуктивності на 60 %, скорочення енергоємності на 60 %, металомісткості на 40 %, питомої витратності на 124 %.

6. Запропонована модель кристалізації харчових систем яка дозволяє проводити адекватний аналіз термограм заморожування-розморожування з метою встановлення оптимальних рецептур і технологічних операцій при виробництві заморожених напівфабрикатів.

ДОДАТКИ

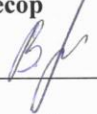
УЗГОДЖЕНО
Перший проректор
Харківського державного університету
харчування і торгівлі
к.е.н., професор


Л.М. Янчева
" 27 " листопада 20 17 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор
Харківського державного університету
харчування і торгівлі
д.т.н., професор


О.І. Червко
" 27 " листопада 20 17 р.

УЗГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи
Харківського державного університету
харчування і торгівлі
д.т.н., професор


В.М. Михайлов
" 27 " листопада 20 17 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і
технологічних робіт у навчальний процес вищих навчальних закладів

Замовник Харківський державний університет харчування і торгівлі
найменування організації
ректор ХДУХТ д.т.н. проф. Червко О.І.
П.І.Б. керівника підприємства

Дійсним актом підтверджується, що результати науково-дослідної роботи
«Прикладні інженерні рішення та комп'ютерне моделювання технологічних
процесів харчової індустрії» (0115U006803)
найменування теми, № держ. реєстрації
виконаної на кафедрі холодильної та торговельної техніки і прикладної механіки.
найменування кафедри
виконуваної 01.01.2016 по 30.12.2017
терміни виконання
впроваджені на кафедрі холодильної та торговельної техніки і прикладної механіки
найменування структурного підрозділу, де здійснювалося впровадження

1. Вид впроваджених результатів методика
технологія, обладнання, методики, тощо
2. Форма впровадження моделювання процесу теплообміну в теплообмінних апаратах
харчової промисловості методом кінцевих елементів

3. Новизна результатів науково-дослідних робіт модернізація старих розробок.
піонерське, принципово нове, якісно нове, модифікації, модернізація старих розробок

4. Перелік курсів і дисциплін, у рамках яких викладені результати НДР _____
«Основи САПР» _____

5. Соціально-економічний ефект підвищення рівня володіння методами моделювання теплових процесів у апаратах харчових виробництв.

Керівник НДР

_____ В.О. Потапов
(підпис) (ініціали, прізвище)

" 27 " листопада 20 14 р.

Голова експертної ради по напрямку НДР
«Процеси, апарати, обладнання харчових
виробництв, холодильна техніка»
_____ (назва наукового напрямку)

к.т.н., доц. М.К. Карпенко
(науковий ступінь (підпис) (ініціали, прізвище)
вчене звання)
" 27 " листопада 20 14 р.

Відповідальний за впровадження

_____ С.Ю. Сасенко
(підпис) (ініціали, прізвище)

" 27 " листопада 20 14 р