МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Харківський державний університет харчування та торгівлі

НОВІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ В ПРОЕКТУВАННІ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

Монографія

У 3 частинах

Частина 2

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРІВАННЯ В ПРОЦЕСАХ ЖАРЕННЯ КУЛІНАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Харків
2012

УДК 641.53.09
ББК 36.813
Н73

Авторський колектив:
О. І. Черевко, В. М. Михайлов, І. В. Бабкіна,
А. О. Шевченко, О. Г. Дьяков

Рецензенти:
д-р техн. наук, проф. О. В. Богомолов,
д-р техн. наук, проф. А. М. Поперечний

Рекомендовано вченою радою ХДУХТ (протокол № 5 від 28.11.2012 р.).

Н73 **Нові** технічні рішення в проектуванні обладнання для теплової обробки харчової сировини: монографія в 3 ч. Ч. 2. Використання електроконтактного нагрівання в процесах жарення кулінарної продукції / О. І. Черевко [та ін.], за заг. ред О. І. Черевка, В. М. Михайлова. – Х. : ХДУХТ, 2012. – 151 с.

ISBN

У монографії досліджено інтенсифікацію процесів жарення кулінарної продукції шляхом використання електроконтактного нагрівання. В основу роботи покладено ідею комбінування поверхневих методів нагрівання з ЕКН. Теоретичними та експериментальними дослідженнями визначено раціональні параметри процесу, які узагальнено у вигляді практичних рекомендацій, та розроблено нові апарати для його реалізації.

Монографія буде корисною для наукових та інженерно-технічних працівників, які вивчають і розробляють процеси та обладнання для виробництва жареної кулінарної продукції, а також студентів старших курсів ВНЗ харчової промисловості для підготовки курсових і дипломних проектів.

УДК 641.53.09

ББК 36.813

© Харківський державний університет ISBN
харчування та торгівлі, 2012

ЗМІСТ

ПРЕДМОВА 5
ВСТУП 8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ ЖАРЕННЯ ТА ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРІВАННЯ КУЛІНАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ 11
1.1. Технологічна суть процесів жарення 11
1.2. Теоретичні основи процесів жарення 13
1.3. Електрофізичні методи обробки харчових продуктів 16
1.3.1. Безконтактні електрофізичні методи 18
1.3.2. Контактні електрофізичні методи 19
1.4. Теоретичні основи електроконтактного нагрівання 26
1.5. Апаратурне оформлення електроконтактного нагрівання кулінарної продукції 32
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО ЖАРЕННЯ КУЛІНАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРІВАННЯ 37
2.1. Передумови для вдосконалення процесів жарення кулінарної продукції 37
2.2. Розрахунково-аналітичне визначення розподілу температур у модельному зразку напівфабрикату в умовах двобічного поверхневого нагрівання з електроконтактним нагріванням 39
2.3. Модельний розрахунок параметрів процесу комбінованого жарення з електроконтактним нагріванням 43
2.4. Моделювання електроконтактного нагрівання 48
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРІВАННЯ 53
3.1. Експериментальна установка та методика дослідження електроконтактного нагрівання 53
3.2. Експериментальна установка та методика дослідження комбінованого жарення з електроконтактним нагріванням 57
3.3. Дослідження температурного поля під час електроконтактного нагрівання 59
3.4. Дослідження впливу типу й форми електричного струму на кінетику електроконтактного нагрівання 61
3.5. Визначення впливу частоти електричного струму на питому електропровідність та тривалість електроконтактного нагрівання 65

3.6. Дослідження впливу типу, форми та частоти електричного струму на вихід продукції та кінетику маси під час електроконтактного нагрівання 68
3.7. Дослідження кінетики сили струму, напруги, потужності та температури під час електроконтактного нагрівання 70
3.8. Визначення впливу компонентного складу та температури зразків на питому електропровідність 73
3.9. Дослідження середньої питомої електропровідності залежно від чинників механічного впливу 77
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ТА АПАРАТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРІВАННЯ..... 80
4.1. Призначення та суть комбінованого способу жарення з електроконтактним нагріванням 80
4.2. Дослідження комбінованих процесів жарення..... 82
4.2.1. Кінетика температури та вихід продукції..... 82
4.2.2. Мікробіологічні та органолептичні показники 84
4.3. Розробка апаратів для реалізації комбінованого способу жарення з електроконтактним нагріванням 89
4.3.1. Технічні вимоги на проектування апаратів 89
4.3.2. Технічне завдання на проектування багато-функціонального пристрою теплової обробки ПТО-0,1 90
4.3.3. Технічне завдання на проектування пристрою комбінованого смаження ПКС-0,18 91
4.3.4. Визначення електропровідності натуральної січеної м’ясної маси залежно від лінійних розмірів зразка 92
4.3.5. Призначення та принцип дії пристрою ПТО-0,1 93
4.3.6. Призначення та принцип дії пристрою ПКС-0,18 97
4.3.7. Визначення основних параметрів комбінованого жарення з електроконтактним нагріванням в апаратах ПТО-0,1 та ПКС-0,18 101
4.4. Соціально-економічна ефективність науково-технічних розробок 103
ВИСНОВКИ 106
ДОДАТКИ 109
Додаток А 110
Додаток Б 127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 142

ПЕРЕДМОВА

Одним з основних чинників, що позитивно впливають на оздоровлення державної економіки, є проведення ефективної енерго- та ресурсозберігаючої політики. Це пов’язано з тим, що Україна лише частково самостійно задовольняє свої потреби в енергетичних і матеріальних, зокрема продовольчих, ресурсах. Загальна тенденція енергоспоживання, що склалася останнім часом майже в всьому світі, свідчить про істотне підвищення витрат енергії та безперервне зростання вартості її генерування. В умовах енергетичного дефіциту енергозбереження найближчими роками є істотною альтернативою зростаючій потребі в енергії. З огляду на це, набувають актуальності проблеми створення й упровадження сучасних малоенергоємних процесів, які забезпечують скорочення витрат енергії разом зі збереженням сировинних ресурсів.

Даний цикл робіт розглядає низку взаємопов’язаних завдань з енергоефективності та ресурсозбереження під час реалізації процесів теплової обробки харчової сировини тваринного та рослинного походження, підвищення якості готової продукції, екологічної безпеки та економічної ефективності на підприємствах малих харчових, переробних виробництв та ресторанного господарства.

У першій частині циклу **«Підвищення ефективності жарильного обладнання з використанням кремнійорганічних речовин»** проаналізовано сучасний рівень жарильного обладнання підприємств харчової індустрії та шляхи підвищення його ефективності. Наведено результати дослідження процесу теплоперенесення в жарильному апараті з проміжним кремнійорганічним теплоносієм, зокрема встановлено вплив геометричних параметрів нагрівальної оболонки апарата на рівномірність температурного поля, інерційність та технологічні показники процесу жарення, вплив поверхневих властивостей кремнійорганічних речовин на міцність нанесених захисних антиадгезійних кремнійорганічних покрить. Отримано ряд математичних моделей, що описують процеси теплоперенесення в мастильній оболонці жарильного апарата та процес жарення кулінарних виробів, які можуть бути корисними для проведення інженерних розрахунків.

У другій частині **«Використання електроконтактного нагрівання в процесах жарення кулінарної продукції»** наведено результати наукових досліджень щодо інтенсифікації процесів жарення кулінарної продукції шляхом використання електроконтактного нагрівання (ЕКН). В основу досліджень покладено цілеспрямоване регулювання режимних параметрів нагрівання напівфабрикату шляхом застосування ЕКН із безпечними параметрами електричного струму, що дає можливість забезпечити прогрівання внутрішнього шару до температури кулінарної готовності протягом часу, який не перевищує тривалості формування скоринки на поверхні, та безпечність обслуговування апаратів під час ручного завантаження-розвантаження. Подано теоретичні дослідження комбінованого жарення із використанням поверхневих методів нагрівання з ЕКН при прямокутній формі змінного електричного струму. Наведено результати експериментальних досліджень впливу параметрів електричного струму (типу, форми, частоти, напруги та сили струму) на характер перебігу ЕКН, впливу компонентного складу напівфабрикатів та чинників механічного впливу (кратності подрібнення та прикладеного тиску) на електропровідність, впливу комбінованого способу жарення з ЕКН на тривалість термообробки та вихід готової продукції. Запропоновано два варіанти комбінованого жарення та апарати для їх реалізації, визначено раціональні режими їх здійснення.

У третій частині **«Підвищення ефективності теплового обладнання з інфрачервоним нагріванням»** проаналізовано ефективність роботи теплового обладнання з інфрачервоним (ІЧ) нагріванням та запропоновано шляхи його вдосконалення для забезпечення рівномірного розподілу теплоти на поверхні продукту. Вони ґрунтуються на розв’язанні протилежної задачі з визначення форми рефлектора на основі двовимірного підходу, що забезпечує задану рівномірну густину теплового потоку на продукті.

Подано нові схеми роботи теплового обладнання з інфрачервоним обігріванням та їх математичні моделі. Розроблено методику та програмний продукт для визначення профілів рефлекторів для рівномірного опромінювання, а також апарат з рефлектором для ІЧ-жарення.

Таким чином, запропоновані високоефективні процеси та нові апарати для їх реалізації можуть успішно використовуватися

на підприємствах малих харчових, переробних виробництв і ресторанного господарства України та бути конкурентноспроможними на світовому ринку.

Цикл монографій може бути корисним для наукових та інженерно-технічних працівників, які вивчають і розробляють процеси та обладнання для виробництва жареної кулінарної продукції, а також для студентів старших курсів вищих навчальних закладів харчової промисловості під час підготовки курсових і дипломних проектів.

ВСТУП

Серед великої кількості актуальних проблемних питань у галузі харчової промисловості та ресторанного господарства одне з провідних місць посідає зниження витрат енергетичних і матеріальних ресурсів під час виробництва кулінарної продукції. Подальший розвиток галузі потребує підвищення технічного рівня підприємств шляхом упровадження результатів наукових досліджень, проведених за напрямом енерго- та ресурсозбереження в рамках Державної програми розвитку промисловості [1] та Енергетичної стратегії України [2].

Із широкого асортименту кулінарної продукції близько 75…85% на окремих етапах виробництва проходять стадію теплової обробки, серед яких значну частку складають різноманітні жарені, зокрема смажені та запечені кулінарні вироби, що мають популярність у населення. За умов підтримування високотемпературного режиму тривалість термообробки, що визначається часом досягнення температури в центрі виробу 80…90° С та на поверхні – 120…130° С, становить від 7…10 до 90…120 хв залежно від виду виробу, його властивостей, розмірів тощо, при цьому втрати маси кулінарної продукції досягають 11…35%, а питомі витрати теплоти складають 1000…1300 кДж/кг. Традиційне обладнання, що використовується на підприємствах ресторанного господарства, має низку недоліків, унаслідок цього процеси та апарати виробництва жареної кулінарної продукції є малоефективними й потребують удосконалення. Вирішення такого завдання можливе шляхом розширення застосування комбінованих процесів, розроблених із урахуванням особливостей як традиційних, так і нетрадиційних методів обробки, зокрема електрофізичних.

З електрофізичних методів обробки харчових продуктів ефективним та простим у реалізації є електроконтактне нагрівання (ЕКН) [3], яке впроваджується переважно на харчових підприємствах великої потужності. ЕКН обмежується досягненням температури зразка 100° С, тому отримані вироби мають властивості вареної продукції. Виробництво кулінарних виробів із властивостями жареної продукції потребує подальшої обробки із застосуванням додаткових високотемпературних методів нагрівання.

Існуючі апарати з ЕКН у більшості мають досить великі габарити, що не дозволяє їх застосовувати на підприємствах

ресторанного господарства та харчових підприємствах малої потужності. Здебільшого, такі пристрої використовують високу напругу, що за певних умов може бути небезпечним для обслуговуючого персоналу, а також змінний струм від генераторів високої частоти, застосування яких знижує ККД процесу, збільшує вартість апаратурного оформлення та ускладнює виробництво [4].

Значний внесок у розвиток наукових досліджень із напрямів удосконалення процесів жарення й ЕКН зробили провідні вчені: М.І. Беляєв, П.Л. Пахомов, І.А. Рогов, О.І. Черевко, А.М. Поперечний, В.М. Михайлов, Г.К. Бабанов, В.І. Волчков, І.С. Павлов, О.Ю. Вайктите, В.М. Зайцев, Н.В. Ткач, Б.М. Матов, Е.К. Бунке та ін. На підставі аналізу літературних джерел було висунуто припущення, що перспективним є застосування ЕКН як допоміжного процесу під час жарення, що дозволить інтенсифікувати прогрівання внутрішніх шарів напівфабрикату та забезпечити регульовану рівномірність температурного поля за об’ємом під час виробництва кулінарної продукції. При цьому слід зважати на те, що у виробничих умовах підприємств ресторанного господарства та харчових підприємств малої потужності значна частина операцій виконується ручним способом, зокрема завантаження-розвантаження. Тому в процесі ЕКН для обслуговуючого персоналу існує ризик ураження електричним струмом.

У зв’язку з вищесказаним набуває актуальності науково-прикладне завдання, пов’язане з інтенсифікацією процесів жарення, зниженням енерговитрат та забезпеченням безпечності використання ЕКН під час виробництва кулінарної продукції на підприємствах ресторанного господарства та харчових підприємствах малої потужності.

В основу наукових досліджень покладено ідею комбінування поверхневих методів нагрівання з ЕКН, що дозволить інтенсифікувати процеси жарення (смаження й запікання) та забезпечити рівномірне нагрівання окремих шарів за об’ємом виробу. Сформульовано передумови для інтенсифікації процесів жарення, які полягають у цілеспрямованому регулюванні режимних параметрів нагрівання напівфабрикату шляхом застосування ЕКН із безпечними параметрами електричного струму, що дасть можливість забезпечити прогрівання внутрішнього шару до температури кулінарної готовності протягом часу, який не перевищує тривалості формування

скоринки на поверхні, та безпечність обслуговування апаратів під час ручного завантаження-розвантаження.

На основі наукових розробок отримано патенти на корисну модель № 33181 «Комбінований спосіб смаження січених кулінарних виробів на основі електроконтактного нагріву», № 58275 «Комбінований спосіб теплової обробки харчових продуктів», № 58276 «Пристрій комбінованого смаження січених кулінарних виробів», № 37175 «Багатофункціональний пристрій теплової обробки харчових продуктів».

Монографія може бути корисною для наукових й інженерно-технічних працівників, що вивчають і розробляють процеси і обладнання для виробництва жареної кулінарної продукції, а також студентів старших курсів вищих навчальних закладів харчової промисловості під час підготовки курсових і дипломних проектів.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ ЖАРЕННЯ ТА ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРІВАННЯ КУЛІНАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Основною ланкою в технологічних процесах виробництва кулінарної продукції є теплова обробка, під час якої відбувається перетворення, пов'язані зі зміною структурно-механічних, фізико-хімічних та органолептичних властивостей, що в сукупності визначають кулінарну готовність виробу, його консистенцію, колір, запах, смак. Загалом теплові процеси поділяють на основні (нагрівання, випаровування, плавлення та ін.) і специфічні (варення, жарення, пастеризація, стерилізація). Останнім часом у харчові технології широко впроваджуються електрофізичні методи обробки харчових продуктів – інфрачервоне (ІЧ) нагрівання, ЕКН, обробка в електромагнітному полі надвисоких частот (НВЧ) та ін.

1.1 Технологічна суть процесів жарення

Жаренням називають процес нагрівання продукту до температури вище 100° С, під час якого забезпечується доведення напівфабрикатів до стану кулінарної готовності з утворенням на поверхні специфічної підсмаженої скоринки. Жарення відбувається з використанням різноманітних середовищ, що передають теплоту. При цьому змінюються структурно-механічні, теплофізичні й органолептичні властивості продукту, які в сукупності визначають консистенцію, колір, запах, смак. Основні процеси жарення здійснюють шляхом смаження (із використанням жиру та без), випікання і запікання.

У багатьох випадках жарення не дозволяє отримати необхідного технологічного ефекту, тобто довести продукти до стану кулінарної готовності, на що впливають особливості їх структури, геометричні розміри тощо. Під час жарення в м'ясі під дією різних технологічних чинників відбуваються хімічні, фізико-хімічні та біохімічні зміни, які є наслідком змін білків, вітамінів, жирів, вуглеводіві, що впливають на якісні показники готового продукту, а також можуть призводити до появи в продукті шкідливих речовин [5].

Усунення окремих недоліків процесів жарення можливе шляхом скорочення тривалості за рахунок комбінування поверхневих методів з ІЧ-нагріванням, застосування газових середовищ, осьового тиску, а також переведення жарильного обладнання на непряме обігрівання проміжним високотемпературним теплоносієм. До перспективних методів теплової обробки м'ясних виробів віднесено смаження, що поєднує інфрачервоний і кондуктивний способи нагрівання [6].

На певному етапі процесу або паралельно використовують додаткові прийоми теплової обробки. Такі процеси відносять до комбінованих способів теплової обробки, в яких можливі варіанти комбінування як традиційних, так і електрофізичних методів теплового впливу. Так, комбінують ІЧ- та поверхневе нагрівання; НВЧ- та ІЧ-нагрівання; НВЧ- та конвективне нагрівання. Наприклад, за способом [7] в одному технологічному процесі поєднують етапи мікрохвильової теплової обробки й теплової обробки парою. Перспективними є також комбіновані процеси із застосуванням нагрівання електричним струмом. Загалом у своїй більшості комбіновані способи сприяють інтенсифікації процесу, забезпечують підвищення техніко-економічних показників та зниження трудомісткості, дозволяють значно підвищити смакові якості й біологічну цінність готової кулінарної продукції.

Таким чином, процеси жарення знаходять широке застосування на підприємствах ресторанного господарства під час теплової обробки різноманітної за структурою і сировиною кулінарної продукції (м'ясна, рибна, овочева, круп'яна та ін.), що зумовлено властивостями готової продукції, у першу чергу, органолептичними. Недоліками жарення є значна тривалість процесів (від 7…10 до 90…120 хв) та час виходу на стаціонарний режим, що складає для сковорід 30…35 хв, жарильних шаф – 35…60 хв; втрати маси кулінарної продукції, що досягають 11…35%; питомі витрати теплоти – 1000…1300 кДж/кг; трудомісткість, зумовлена необхідністю перевертання виробів та використання для окремих видів продукції двох апаратів – сковороди та жарильної шафи; низький коефіцієнт корисної дії (ККД = 0,6…0,7); значна теплова напруга нагрівальних поверхонь (12…30 кВт/м^2); нерівномірність температурного поля (40…50° С) та металоємність (250…900 кг/м^2). Також існує ймовірність отримання на поверхні продукту нерівномірної скоринки, у результаті чого погіршується зовнішній вигляд виробів та відбуваються місцеві перегріви.

Зумовлюється це тим, що більшість харчових продуктів має складну форму з нерівномірною поверхнею.

Проблема усунення вказаних недоліків вирішується шляхом розширення застосування комбінованих процесів на основі пошуку нових, більш раціональних та економічно обґрунтованих варіантів теплопідведення та має розвиватися на підставі відомих традиційних принципів із використанням сучасних досягнень науки і техніки.

1.2 Теоретичні основи процесів жарення

Процеси теплообміну під час жарення здійснюються трьома основними способами – теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням. Для визначення теплоти Q, що передається продукту під час теплообміну, використовують основне рівняння теплопередачі

$$Q = K \cdot \Delta t_{сер.} \cdot S \cdot \tau \text{, Дж,} \qquad (1.1)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м^2·К);

$\Delta t_{сер.}$ – середня різниця температур, ºС;

S – поверхня теплообміну, м^2;

τ – тривалість процесу, с.

Перенесення теплоти залежить від розподілу температур та підпорядковується закону Фур'є

$$dQ = -\lambda(\frac{\partial T}{\partial n})dF \cdot d\tau, \qquad (1.2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності продукту, Вт/(м·К);

$(\frac{\partial T}{\partial n})$ – градієнт температур, К/м;

F – площа ізотермічної поверхні продукту, м^2.

Рішення задач нестаціонарної теплопровідності ґрунтується на розв'язанні диференціального рівняння Фур'є у певних межових умовах. Крім того, аналітичні методи розв'язання завдань нестаціонарної теплопровідності передбачають постійність теплофізичних властивостей (коефіцієнта теплопровідності λ, питомої теплоємності c і коефіцієнта теплопровідності a) та коефіцієнта тепловіддачі до поверхні продукту α. Однак ці величини можуть суттєво змінюватися в часі,

що призводить до значних відхилень результатів розрахунків від експериментальних даних.

Рівняння (1.2) в умовах нерухомого середовища дозволяє будувати температурні поля і визначати кількість теплоти, що при цьому передається.

Для експериментального розв'язування задач із теплопровідності під час дослідження процесів жарення використовують методи фізичного та математичного моделювання. Результати розв'язання цих задач подають у вигляді співвідношень, які визначають або безрозмірну температуру в будь-який момент часу, або густину теплового потоку $q_{пов}(\tau)$. Як визначальні безрозмірні параметри в цих співвідношеннях використовуються критерії подібності: Фур'є (*Fo*) та Біо (*Bi*), що дорівнюють

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2}; \tag{1.3}$$

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda_m}, \tag{1.4}$$

де l – визначальний лінійний розмір, м;

λ_m – коефіцієнт теплопровідності твердого тіла, Вт/(м·К).

Процес теплообміну конвекцією між поверхнею твердого тіла та рідиною характеризується законом Ньютона–Ріхмана, який описується рівнянням

$$dQ = \alpha \cdot (t_1 - t_2) \cdot dF \cdot d\tau, \tag{1.5}$$

де dQ – кількість теплоти, яка передана від рідини (газу) до поверхні продукту конвекцією, Дж;

t_1, t_2 – відповідно, температура рідини (газу) і продукту, °С.

Коефіцієнт тепловіддачі визначається таким чином [8]:

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu} \cdot \lambda}{l}, \tag{1.6}$$

де Nu – критерій Нусельта, що характеризує теплообмін між поверхнею стінки і потоком рідини, або газу.

Під час визначення критерію Нусельта слід ураховувати, що теплопередача може здійснюватись за рахунок як вільної, так і вимушеної конвекції. Загалом

$$Nu = f(Re, Pr, Gr), \tag{1.7}$$

де Re – критерій Рейнольдса ($\mathrm{Re} = \frac{\upsilon l}{\nu}$);

υ – швидкість руху, м/с;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м^2/с;

Pr – критерій Прандтля ($\mathrm{Pr} = \frac{\nu c \rho}{\lambda}$);

ρ – густина, кг/м^3;

Gr – критерій Грасгофа ($Gr = \frac{g l^3}{\nu^2}\beta \cdot \Delta T$);

g – прискорення вільного падіння, м/с^2;

β – коефіцієнт об'ємного розширення, К$^{-1}$;

ΔT – різниця між температурами твердої стінки і нагрітим повітрям, К.

Одним із різновидів перенесення енергії під час жарення є теплове випромінювання. Носієм енергії при цьому є електромагнітні хвилі. Довжина електромагнітних хвиль знаходиться в інфрачервоній частині спектра в межах 0,8...800 мкм. В умовах теплового випромінювання відбувається перетворення теплової енергії на променисту і променистої – на теплову [9].

Теплове випромінювання підпорядковане законам Планка, Кірхгофа, Ламберта, Віна, Стефана-Больцмана [8, 10-15]. Останньою визначається інтенсивність променистого теплообміну між тілами:

$$Q_{пром.} = \varepsilon_{зв.} \cdot C_0 \cdot \varphi \cdot \left[\left(\frac{\mathrm{T}_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F \cdot \tau, \tag{1.8}$$

де $Q_{пром.}$ – кількість теплоти, яку передано випромінюванням від першого тіла до другого, Дж;

$\varepsilon_{зв.}$ – зведений ступінь чорноти системи тіл;

C_0 – стала Стефана-Больцмана (C_0 = 5,67 Вт/(м^2·К^4));

φ – середній кутовий коефіцієнт;

T_1, T_2 – абсолютні температури, відповідно першого і другого тіл, К;

F – розрахункова поверхня теплообміну випромінюванням, м^2.

Відповідно до закону Віна під час нагрівання випромінюванням взаємозв'язок між температурою випромінювача та довжиною хвилі $\lambda_в$ описується рівнянням

$$\lambda_в \cdot T = 2{,}9 \cdot 10^3. \qquad (1.9)$$

Із виразу (1.9) випливає, що з підвищенням температури максимум випромінювання збільшується в бік коротших хвиль.

Таким чином, для визначення теплоти, що передається продукту під час жарення, використовують основне рівняння теплопередачі, що враховує всі три основні способи теплообміну: теплопровідність, конвекцію і випромінювання. Аналітичні методи розв'язання завдань призводять до значних відхилень результатів розрахунків від експериментальних даних, оскільки передбачають постійність теплофізичних властивостей продукту та коефіцієнта тепловіддачі. Для експериментального розв'язування задач із теплопровідності використовують методи фізичного та математичного моделювання.

1.3 Електрофізичні методи обробки харчових продуктів

У харчовій промисловості застосовують різноманітні технологічні процеси обробки продуктів, засновані на використанні електричного струму. Такі методи називають електрофізичними (ЕФМ). Вони реалізуються за рахунок електричних полів різноманітної структури: постійної, що, у свою чергу, поділяється на однорідну й неоднорідну; змінної; перехресної (електричні та магнітні поля [16]).

ЕФМ базуються на досягненнях електрофізики. Електрична енергія в них без проміжних перетворень використовується як самостійний робочий інструмент. Фізичною основою таких процесів є силовий вплив електромагнітних полів на електрозаряджені частинки харчових продуктів. Цей напрям називають електронно-іонними технологіями (ЕІТ) [17].

ЕІТ – галузь науки та техніки, що вивчає явища, пов'язані з утворенням електричних зарядів та їх рухом в електричних полях. Її переваги полягають у тому, що більшість харчових продуктів і сировини піддається впливу сил електричних полів; електрична

енергія безпосередньо впливає на продукт, що виключає проміжне перетворення на інші види енергії; процеси ЕІТ – безперервні та ін. [17; 18].

ЕІТ поділяють на ті, що здійснюються за рахунок електричних полів (електродіаліз, електроосмос) та на процеси, які інтенсифікуються електричним полем (сушіння, екстракція та ін.). ЕФМ характеризуються напругою, силою струму, тривалістю впливу та різняться частотою коливання електромагнітних полів і методом впливу на об’єкт – безконтактні та контактні (рис. 1.1).

Низькі частоти зазвичай використовують для впливу на речовину безпосередньо електричним струмом [19] (ЕКН, електроплазмоліз, індукційне нагрівання). У діапазонах високих частот ВЧ та НВЧ впливають на речовину найчастіше шляхом поляризаційних механізмів, а більш високих частот – за рахунок резонансних явищ на молекулярному рівні [20].

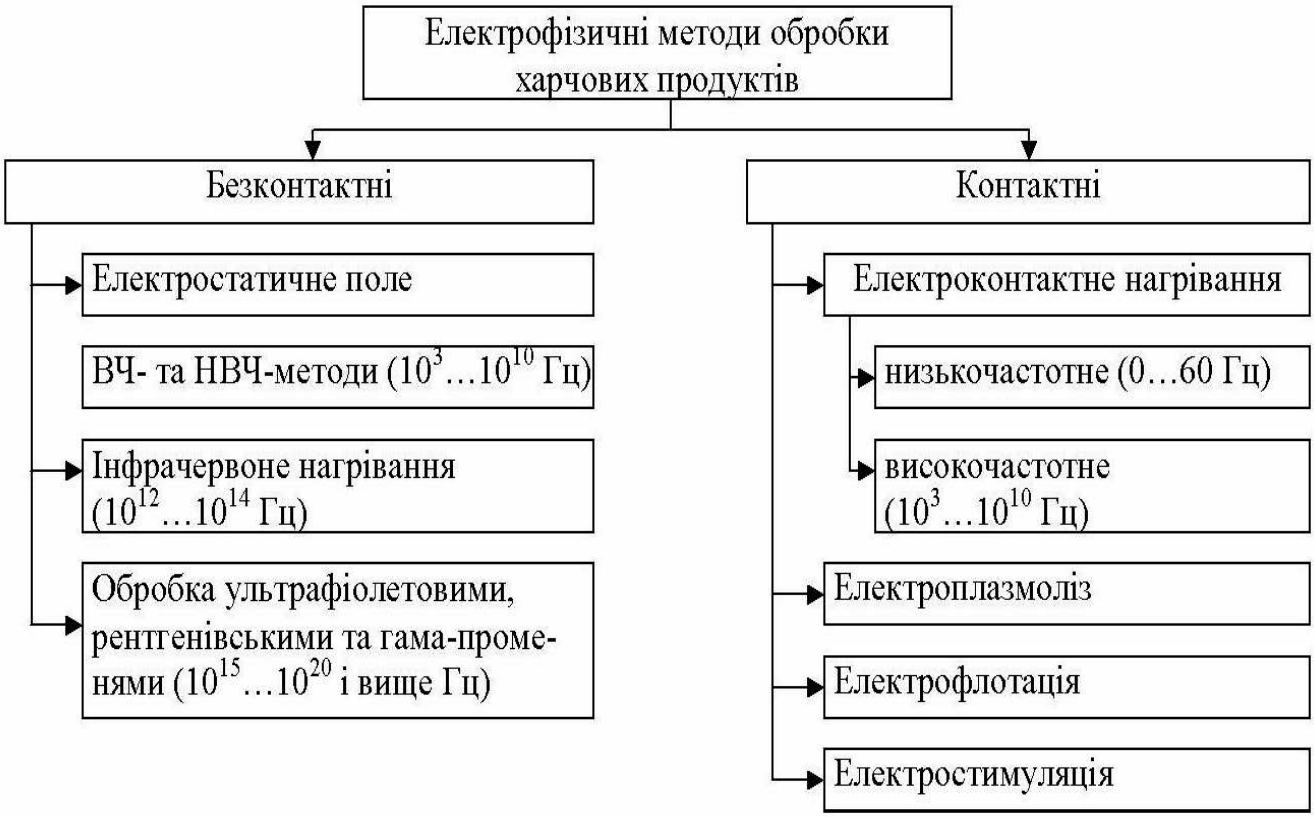


Рисунок 1.1 – Класифікація електрофізичних методів обробки харчових продуктів

Безконтактні методи характеризуються впливом електричного струму на продукти, за якого відсутні електроди, тобто об'ємним методом. Серед них: обробка в електростатичному полі, ВЧ-, НВЧ- та ІЧ-методи нагрівання, обробка ультрафіолетовими, рентгенівськими та гама-променями [13; 21].

До контактних методів відносять способи електрохімічного (електроплазмоліз та електрофлотація) та теплового впливу струму на продукт (стерилізація та пастеризація, електростимуляція, ЕКН).

1.3.1 Безконтактні електрофізичні методи:

– копчення продуктів у електростатичному полі. Цей метод за своєю природою подібний до традиційного способу копчення. Передбачається, що за рахунок іонізації компоненти димоповітряної суміші з великою швидкістю бомбардують поверхню продукту і осідають на ньому товстим шаром. Це дозволяє скоротити тривалість копчення з декількох діб (традиційний спосіб) до 1…2 год.

Сучасні електрофізичні методи обробки харчових продуктів із застосуванням високовольтної іонізації використовуються в рибній промисловості, наприклад, під час виробництва в'яленої та копченої риби. В основу процесу виробництва риби холодного копчення з використанням електростатичного поля високої напруги покладено метод, суть якого полягає в тому, що іонізований газ (повітря), переміщуючись в електричному полі, дає заряд тонкодисперсним частинкам речовини (коптильний дим);

– метод НВЧ. Технологічні рішення, засновані на застосуванні електромагнітних коливань надвисоких частот, широко використовуються в побуті та харчових виробництвах. У промисловості на початку розвитку НВЧ-технологій застосовували частоти електромагнітних коливань 2450 МГц. Надалі у зв'язку з потребою обробляти продукти більших розмірів з'явилась необхідність у використанні генераторів, що працюють на нижчих частотах – 915 і 433 МГц, бо глибина проникнення електромагнітної енергії в матеріал змінюється оберненопропорційно до частоти.

Найбільш поширений метод НВЧ для інтенсифікації сушіння харчових продуктів [22]. Завдяки тому, що в полі НВЧ теплота генерується за всім об'ємом продукту, а його зовнішні поверхні віддають теплоту навколишньому середовищу, температура в середині продукту стає вищою, ніж на поверхні, та процес сушіння прискорюється. У зв'язку з цим швидкість НВЧ-сушіння в багатьох

випадках значно вища, ніж за інших способів. Окрім різкого прискорення процесу сушіння, НВЧ-енергія автоматично вирівнює вологість продукту за об’ємом, оскільки у високочастотному полі швидше нагріваються ділянки продукту, що мають більшу вологість [23]. При цьому слід зауважити, що метод НВЧ, як і інші методи обробки, має свої переваги та недоліки [13]. До переваг відносять відносне скорочення виробничого циклу, підвищення виходу готової продукції, високу біологічну цінність продукції з максимальним збереженням поживних речовин, підвищену бактерицидну дію, можливість отримання харчових продуктів із новими властивостями, зниження тепловитрат та ін. У той же час метод має низку недоліків, що обмежують його застосування, а саме: складність отримання скоринки на поверхні виробу; низький ступінь проникнення НВЧ-енергії в продукт; необхідність застосування діелектричної тари; відносна складність апаратурного забезпечення; потреба у проведенні заходів контролю за рівнем електромагнітного випромінювання; виникнення теплової неоднорідності за об’ємом продукту, що зумовлює необхідність у перемішуванні та інших технічних засобів для уникнення цього ефекту;

– метод ІЧ-нагрівання. У багатьох випадках теплова обробка продуктів здійснюється енергією ІЧ-випромінювання. Комплексні дослідження з вивчення теоретичних характеристик і кінетики процесів цього методу обробки, а також визначення впливу ІЧ-випромінювання різного спектрального діапазону на фізико-хімічні, мікробіологічні та структурно-механічні властивості готових виробів дозволяють використовувати ІЧ-обробку для отримання широкого асортименту кулінарної продукції на основі різноманітної сировини. При цьому досягається не тільки скорочення загальної тривалості термообробки, але й високий вихід та якість виробів, а витрати на їх виготовлення знижуються [24].

1.3.2 Контактні електрофізичні методи. Їх поділяють на електроплазмоліз, електрофлотацію, електростимуляцію та ЕКН [3]. Електроплазмоліз – це процес збільшення проникності цитоплазми оболонок клітин під дією електричного струму, що дозволяє підвищити вихід соку із клітин під час подальшого механічного впливу. До його переваг відносять простоту конструкцій апаратів та високу швидкість проведення [13].

Процес електрофлотації призначається для розділення неоднорідних рідких систем під дією постійного електричного струму. Суть полягає в розкладанні води на водень та кисень у вигляді дрібних бульбашок, що осаджуються на поверхні твердої фази та піднімають її вгору. Цей процес здійснюють із різною метою: як для очищення виноградного соку, так і для стічних вод.

Електроконтактну обробку також застосовують у процесі екстрагування. Автор [25] стверджує, що такий спосіб забезпечує розкривання клітинної структури рослинного матеріалу та отримання частинок із гарною проникністю. Дана технологія може застосовуватись для екстрагування компонентів із різноманітних видів рослинної сировини.

Електроконтактна обробка застосовується для проведення процесів стерилізації та пастеризації рідких харчових продуктів (молока, соків, оцту та ін.). У цьому випадку електричний струм використовується для знищення бактерій.

До процесів електроконтактного впливу відносять електростимуляцію, що дозволяє підвищити якість свіжого м’яса та пришвидшити його засіл [26; 27].

Контактний вплив електричним струмом застосовується в першу чергу для проведення теплових процесів. При цьому електрична енергія перетворюється на теплову безпосередньо в провідному середовищі [28]. Такий процес називають електроконтактним нагріванням. Отримання при цьому внутрішньої енергії за всім об’ємом продукту є важливою перевагою методу [29-32]. Теплота виділяється безпосередньо в оброблюваному матеріалі, а навколишні деталі залишаються холодними. Серед інших переваг можна відзначити простоту апаратурного оформлення, швидкоплинність та можливість контролю й регулювання енергетичних параметрів.

За іншими джерелами [28; 33; 34], ЕКН називають прямим електронагріванням опором, або омічним нагріванням, що поділяється на електроконтактне (нагрівання металевих тіл) та електродне (нагрівання струмопровідних матеріалів з іонною провідністю). Згідно з [33-35] омічне нагрівання може використовуватись для рідких харчових продуктів із великими частинками (супів; тушкованих продуктів, зокрема м’яса; термочутливих рідин та ін.). Також можна здійснювати процеси бланшування, розтоплювання, ферментації, екстракції тощо за допомогою цього способу.

Основні розробки електроконтактного методу проводились до середини 80-х рр. минулого сторіччя. У 1962 р. опубліковано анотований збірник із працями, що досліджували електричні методи обробки харчових продуктів, де відповідно наведеній класифікації розділяють низькочастотні процеси [36, с. 4-9] та процеси високочастотного нагрівання [36, с. 9-19].

Зарубіжний досвід застосування нагрівання харчових продуктів електричним струмом свідчить про перспективність цього методу. У більшості праць пропонується застосування омічного нагрівання для знищення бактеріальних спор та створення асептичних умов у харчових системах. Проводились дослідження стосовно нагрівання електричним струмом різноманітних овочів та фруктів. Викликає інтерес дослідження [37] із застосування ЕКН для обробки м'ясних продуктів, зокрема Болонської шинки, де автори акцентують увагу на швидкості такого нагрівання.

Проведений аналіз стану питання відносно процесів ЕКН дозволив визначити сфери їх застосування. Так, ЕКН використовують під час виробництва хлібобулочних виробів. При цьому процес випікання відбувається досить швидко. Його тривалість залежить від напруги в електромережі, із чим безпосередньо пов'язана кількість теплоти, яку отримує тісто. Нагрівання можна проводити, підтримуючи постійну напругу на контактуючих клемах (сила струму змінюється) або змінюючи напругу, тоді сила струму залишається постійною. Із практичної точки зору простішим є перший спосіб.

Під час використання ЕКН для випікання хліба сила струму збільшується на початку процесу. Це пояснюється зниженням опору системи в результаті зменшення в'язкості під час підвищення температури та підвищенням ступеня дисоціації електролітів. Далі сила струму досягає максимуму та в інтервалі температур 80…95° С зменшується внаслідок підвищення внутрішнього опору системи. Відбувається різке зниження кількості вільної вологи (дисперсійного середовища) через поглинання вологи крохмалем, що зумовлює підвищення в'язкості та опору для іонного руху [38].

У праці [39] зазначається, що пришвидшення випікання шляхом ЕКН за рахунок підвищення напруги є нераціональним, бо зумовлює утворення значної та нерівномірної пористості й зменшення виробів в об'ємі; оптимальна якість хліба досягається в разі обробки електричним струмом упродовж 8…12 хв; використання напруги

120 В призводить до тривалого випікання та погіршення якості, а 220 В – до утворення на електродах шару пригорілого хліба.

Можливим є також використання ЕКН для отримання різноманітної кулінарної продукції, у тому числі жареної, що паралельно потребує застосування поверхневого нагрівання від інших джерел для отримання підсмаженої скоринки.

ЕКН застосовують для розморожування харчових продуктів, зокрема рибних блоків. Для цього процесу використовують струми промислової частоти. Бічні грані блоків риби, що занурені у воду, контактують з електродами, у результаті чого відбувається їх нагрівання та розморожування [40].

ЕКН використовують для термообробки фаршів у ковбасному виробництві. До фаршевої гетерогенної системи, якою є ковбасні напівфабрикати, входять подрібнені на м'ясорубці продукти (діелектрики) та розчин солей (електроліт), що утворюється з водяного розчину NaCl і рідини зі зруйнованих під час подрібнення клітин продуктів. У дослідженнях І.А. Рогова, А.В. Горбатова, Є.П. Нанія та ін. фаршеві напівфабрикати розглядають як напівпровідники іонного типу, в яких носіями електричних зарядів є іони солей.

Під час ЕКН різних м'ясних фаршів у діапазоні температур 20…80º С характер зміни електропровідності взагалі є однаковим. Під час нагрівання від 20 до 60º С має місце збільшення електропровідності, а в інтервалі 60…80º С – її зменшення. Електропровідність м'ясних фаршів зумовлена в основному концентрацією NaCl у вільній волозі. У разі збільшення температури рухливість іонів у сольовому розчині збільшується, що й викликає збільшення провідності. У процесі денатурації білкових речовин між діелектриками та розсолом у фарші відбувається обмінна дифузія, що приводить до перерозподілу солі та вологи. До діелектриків переходить деяка частина солі з розчину, а в розсіл виділяється частина слабозв'язаної вологи. Ця частина вологи, змішуючись із розсолом, зменшує його концентрацію та, відповідно, електропровідність. Другою причиною, що викликає зменшення електропровідності після нагрівання до 50…60º С, дослідники вважають зміну фізичного стану фаршу із завершенням денатураційних процесів основної кількості білка.

Значну увагу вчені приділяють електрохімічним процесам, що відбуваються під час електроконтактного впливу на продукти. Так, проходження постійного електричного струму через харчові

продукти супроводжується електролізом (по-перше, перехід атомів металу анода в продукт та виділення з розчину позитивних іонів на катоді; по-друге, розкладання води з виділенням водню на катоді та кисню на аноді). У колоїдних системах та капілярно-пористих тілах спостерігаються також процеси електрофорезу, електроосмосу, електродіалізу та ін.

За умови використання під час електроконтактної обробки низькочастотного електричного струму спостерігається знакозмінний електроосмос. У результаті простежується збільшення вологоутримання та, відповідно, виходу готової продукції, питомої електропровідності, що загалом інтенсифікує процес нагрівання.

Процес електролізу описується у праці [41]: в умовах пропускання електричного струму через електроліт атоми натрію вступають у реакцію з водою, а атоми хлору перетворюються на молекули хлору, що виділяються у вигляді газу. Електроліз є небажаним, бо він призводить до зміни хімічного складу продукту [42]. У зв’язку з цим виникає необхідність у використанні змінного струму, а вибір частоти струму при цьому є досить серйозною проблемою [43]. У різних працях пропонується використовувати струм від низьких частот до декількох кГц.

Для уникнення помітних явищ електролізу часто використовують змінний струм промислової частоти [44]. ЕКН струмом 50 Гц є зручним та економічно доцільним, оскільки при цьому значно спрощується схема пристрою, який без перетворювача частоти можна підключати безпосередньо в мережу й уникнути втрат електроенергії на перетворення частот. Під час дослідження ЕКН сосисок і м’ясних хлібців струмами промислової частоти не виявлено помітних змін хімічного складу готового продукту порівняно з контрольними зразками. Порівняння отриманих даних під час ЕКН м’ясного фаршу струмом промислової частоти дозволило зробити висновок, що цей спосіб значно інтенсифікує процес теплової обробки порівняно з іншими. Результати санітарно-гігієнічної оцінки, бактеріологічні та фізико-хімічні показники продуктів, оброблених струмами промислової частоти, свідчать про якість, відповідну традиційній технології [45; 46].

Однак в інших дослідженнях [4; 13; 47-53] застосовувались струми більш високої частоти, бо, як стверджують автори, зміна напрямку струму з частотою 50 Гц є недостатньою. Навіть за цих умов можливі прояви електролізу: за перший напівперіод коливань

струму в продукті відбуваються малопомітні зміни електролітичного характеру, які цілком не відновлюються за другий напівперіод. Для запобігання цьому рекомендується збільшувати частоту електричного струму [13].

У процесі впливу змінним електричним струмом на харчові продукти їх складові електрони та іони розділяють на дві групи: вільні та зв'язані заряди. Заряди першої групи характеризуються здатністю до необмеженого переміщення в електричному полі. Друга група зарядів не має цієї можливості, їх переміщення обмежується структурою атома, молекули, кристала або неоднорідністю будови речовини [54]. Явище перерозподілу електричних зарядів під дією зовнішнього поля має назву електростатичної індукції, або електричної поляризації. Зазвичай перша назва відноситься до вільних зарядів у провідниках, а друга – до зв'язаних зарядів у діелектриках.

Під час ЕКН у продукті спостерігається безінерційна (електронна та атомна), релаксаційна (орієнтаційна), макроструктурна та електролітична поляризації. В умовах застосування контактних методів частота зміни електричного поля не перебільшує декількох десятків кГц, тому нагрівання відбувається в основному за рахунок структурної та електролітичної поляризації.

За умови внесення до електричного поля напівфабрикатів із фаршевою структурою електрони та іони починають переміщуватися в межах кожного включення, що отримує момент та поводить себе подібно до гігантської поляризованої молекули. Неоднорідність структури приводить до обмеженого переміщення зарядів. Такий вид поляризації називають макроструктурним.

Електролітична поляризація виникає в середовищах, що містять електроліти, а отже, у всіх вологих матеріалах. Під час впливу постійним струмом спостерігається явище електролізу, пов'язане з переміщенням дисоційованих іонів – позитивних до негативного електрода, а негативних – до позитивного електрода. У фаршевих структурах це явище супроводжується електроосмосом, тобто переміщенням рідини, що має заряд одного знака, до електрода протилежної полярності зі зсувом твердих частинок, що мають зворотний знак заряду. При цьому матеріал стає менш однорідним. Зазвичай прилегла до негативного електрода (катода) частина матеріалу зволожується, а частина матеріалу, прилегла до позитивного електрода (анода), висушується.

Окрім частоти електричного струму, для ЕКН важливим є вибір матеріалу електродів. У більшості випадків матеріал підбирають за даними електрохімічної стійкості та міцності в електропровідних середовищах.

Для електроконтактної обробки м'ясних продуктів часто застосовують електроди з графіту, що мають хімічну й електрохімічну стійкість, проте їх виготовлення, монтаж і очищення ускладнені через малу механічну міцність та значну масу. Крім того, до недоліків графіту можна віднести його великий коефіцієнт теплопровідності, що призводить до нерівномірності температурного поля продукту в місцях контакту з електродами. У працях [48; 64] стверджується, що графіт, який має пористу структуру, поглинає сіль із розчину. Це зумовлює утворення всередині електродів гіпохлориду вуглецю, що призводить до їх руйнації.

Іншим матеріалом, що також широко застосовують для наведених вище цілей, є титан. Відомо, що титан та його сплави придатні для виготовлення обладнання, яке працює з агресивними харчовими середовищами та характеризується як один із найбільш корозієстійких матеріалів [56].

У наукових розробках [57; 58] наведено результати досліджень із застосування різних електродів за умови використання частоти 50 Гц. Дослідження свідчать про достатній ступінь якості фаршевих виробів, оброблених із використанням електродів з нікелю та срібла. Платинові та іридієві електроди за умов концентрації NaCl 2…3% та густини струму 10…20 А/м^2 майже не руйнуються. Однак, зважаючи на економічну недоцільність використання електродів із благородних металів, викликає інтерес застосування нікелевих електродів.

У підсумку аналізу застосування частот електричного струму та матеріалів електродів можна зазначити, що єдиних вимог, які схвалюються всіма дослідниками, не існує. Тому визначальним чинником під час вибору цих параметрів можуть бути результати дослідження якості отриманих виробів.

Таким чином, електрофізичні методи обробки, засновані на використанні електричного струму, застосовують як окремі самостійні процеси і для інтенсифікації процесів. Під час контактного впливу струмом електрична енергія перетворюється на теплову безпосередньо в провідному середовищі, що дозволяє ефективно її використовувати насамперед для проведення теплових процесів. ЕКН переважно знайшло своє застосування на харчових підприємствах

великої потужності, під час розморожування та сушіння харчових продуктів, виробництва хлібобулочних та ковбасних виробів.

В умовах ЕКН постійним струмом спостерігається явище електролізу, пов'язане з переміщенням позитивних іонів до негативного електрода, а негативних – до позитивного. У фаршевих структурах це явище супроводжується електроосмосом, унаслідок чого рідина, яка має заряд одного знака, переміщується до електрода протилежної полярності зі зсувом твердих частинок, що мають зворотний знак заряду, до іншого електрода.

Для уникнення негативних явищ електролізу, що призводить до небажаної зміни хімічного складу продукту, в електроконтактній обробці часто використовують змінний низькочастотний електричний струм, за якого спостерігається знакозмінний електроосмос, що приводить до збільшення питомої електропровідності, вологоутримання та виходу готової продукції.

1.4 Теоретичні основи електроконтактного нагрівання

Із фізичної точки зору ЕКН, або нагрівання електричним опором, описується законом Джоуля–Ленца. Тобто електроконтактне нагрівання – це процес проходження протягом певного часу електричного струму через продукт (провідник із певним електричним опором), що викликає виділення теплової енергії [59]:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau, \tag{1.10}$$

де Q – кількість теплоти, Дж;
I – сила струму, А;
R – електричний опір, Ом.

Оскільки

$$I = \frac{U}{R} = U \cdot \sigma, \text{ А}, \tag{1.11}$$

де U – напруга електричного струму, В;
σ – електропровідність, Ом$^{-1}$,

то формулу (1.10) можна записати, як

$$Q = U^2 \cdot \sigma \cdot \tau, \text{ Дж.} \qquad (1.12)$$

Електричний опір харчових продуктів є визначальним для процесу нагрівання електричним струмом. Так, у праці [60] розділяють такі види опору: об'ємний (опір зразка), поверхневий (опір на поверхні зразка) та контактний (опір між зразком та електродом). Автори наводять дані щодо цих електричних опорів для деяких харчових продуктів. Однак цих відомостей замало для використання в розрахунках електроконтактних процесів. Крім того, такий підхід із розділення величини опору значно ускладнює розрахунки.

Окрім електричного опору, в розрахунках процесу ЕКН застосовують протилежну величину – електропровідність, або питому електропровідність. Із цієї точки зору основною характеристикою ЕКН є електропровідні властивості. Слід зазначити, що електричну провідність мають майже всі харчові продукти. У науковій праці [39] електропровідними називають речовини, в яких під дією електричного поля проходить струм такої величини, що впливом інших чинників електричного походження, порівняно з дією на об'єкт обробки електричного струму, можна знехтувати. Для проведення ЕКН електропровідність має бути більшою за 10^{-4} $Ом^{-1}$.

Якщо припустити, що загальна структура виробу з площею поперечного перерізу (S, $м^2$) і довжиною (l, м) однорідна, то рівняння між електричним опором та електропровідністю можна записати, як

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma_{пит.} \cdot S}, \qquad (1.13)$$

де ρ – узагальнений питомий опір зразка, Ом·м;

$\sigma_{пит.}$ – питома електропровідність, $(Ом \cdot м)^{-1}$.

Виразивши через електричний опір рівняння (1.13), отримаємо

$$dQ = \frac{U^2 \cdot \sigma_{пит.} \cdot S}{l} d\tau. \qquad (1.14)$$

Величина питомої потужності тепловиділення Q_v в об'ємі продукту розраховується за формулою

$$Q_v = \frac{dQ}{V \cdot d\tau}, \tag{1.15}$$

де V – об'єм продукту, м^3.

Підставивши формулу (1.14) до рівняння (1.15), отримаємо:

$$Q_v = \frac{dQ}{Vd\tau} = \frac{U^2 \cdot \sigma_{пит.}}{l^2}. \tag{1.16}$$

Кількість теплоти для нагрівання можна знайти з формули

$$dQ = cmdt, \tag{1.17}$$

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

m – маса зразка, кг;

t – температура, °С.

У формулах (1.16) та (1.17) використовуються усереднені значення параметрів, тому що як питома електропровідність, так і питома теплоємність суттєво залежать від температури та структури виробу [10]. Порівнявши ці вирази, можна знайти залежність зміни температури від часу у вигляді

$$d\tau = \frac{l \cdot m \cdot c(t)}{U^2 \cdot S \cdot \sigma_{пит.}(t)} dt. \tag{1.18}$$

Якщо відомі залежності $c(t)$ та $\sigma(t)$, а також початкова t_n і кінцева $t_к$, температури, то можна знайти час нагрівання

$$\tau = \frac{m \cdot l}{U^2 \cdot S} \int_{t_n}^{t_к} \frac{c(t)}{\sigma_{пит.}(t)} dt, \text{ с.} \tag{1.19}$$

Отримане рівняння є досить складним для розв'язання. Тому для розрахунку тривалості процесу ЕКН або кінцевих температур використовують балансове рівняння [61]:

$$cG(t_к - t_п) = \frac{U^2}{R}\tau = U^2 \cdot \sigma \cdot \tau, \qquad (1.20)$$

де G – маса продукту, кг.

В обох випадках визначальною є електропровідність. Вона залежить від вологовмісту, ступеня подрібнення, виду сировини, вмісту жиру, умов зберігання компонентів (насамперед м'яса), кількості добавок до фаршу та інших чинників. Це також стосується й залежності питомої теплоємності від температури [62; 63]. Така складність обумовлює доцільність використання усереднених значень, що можуть бути знайдені дослідним шляхом.

Крім того, кінцеву температуру можна знайти, виходячи з теплофізичних характеристик продукту та умов теплообміну з навколишнім середовищем [39]:

$$t_к = \frac{Q + c \cdot G \cdot t_п + n \cdot t_{н.с.} \cdot F}{c \cdot G + n \cdot F}, \text{ °C}, \qquad (1.21)$$

де n – питома тепловіддача з поверхні продукту, Дж/(°С·м^2);

$t_{н.с.}$ – температура навколишнього середовища, °С;

F – площа поверхні продукту, що контактує з навколишнім середовищем, м^2.

Однак, якщо для питомої теплоємності харчових продуктів існують дослідні дані, то щодо електропровідності та електричного опору їх недостатньо. Так, у працях [64; 65] розглядаються дослідження цих показників для плодів та ягід. Установлено вплив ступеня подрібнення на електропровідність. При цьому для великоподрібненої тканини в межах температур 60…65° С електропровідність починає швидко збільшуватися, а для дрібноподрібненої – електропровідність змінюється більш плавно. У дослідженні [66] наведено значення електричного опору для подрібненої м'язової тканини. У діапазоні температур 14…100° С опір змінювався від 22,2 до 9 Ом, а потім збільшувався до 15 Ом. Загалом цих відомостей недостатньо для встановлення раціональних режимів ЕКН. Потрібні дослідження більш широкого асортименту кулінарної продукції.

Також ЕКН характеризується зміною сили струму. Установлено, що кінетика сили струму під час електроконтактної теплової обробки зразків, однакових за об'ємом та різних за складом, неоднакова.

Найбільшого значення струм досягає за умов обробки фаршу, виготовленого за рецептурою, що містить сіль, за рахунок якої з'являються вільні іони.

Під час ЕКН джерело електричного струму має забезпечувати задану потужність *P*, що визначається таким чином [39]:

$$P = \frac{Q}{K_e \cdot K_t \cdot \tau}, \text{ Вт}, \tag{1.22}$$

де K_e – коефіцієнт тепловіддачі;

K_t – коефіцієнт, що враховує електричні втрати в проводах, на контактах електродів із продуктом та втрати теплоти, обумовлені розсіюванням під час нагрівання.

Коефіцієнти K_e та K_t залежать від конструкції установки. Для зменшення електричних втрат використовують мідні та алюмінієві проводи малої довжини з великою площею перетину та максимальною площею контактів; теплову ізоляцію – із фторопласту, кераміки, гетинаксу, оргскла та ін. Зазвичай K_e та K_t беремо за 0,98.

Густина струму провідності $j_{пр}$ у виробі визначається як

$$j_{пр} = \sigma E = nqv, \text{ А/м}^2, \tag{1.23}$$

де σ – електропровідність, Ом^{-1};

E – напруженість електричного поля;

n – кількість зарядів (іонів) в одиниці об'єму;

q – величина одного заряду;

v – швидкість направленого руху іонів.

Для електролітів [67]:

$$j_{пр} = nq\alpha(b_+ + b_-)E, \tag{1.24}$$

де α – ступінь дисоціації;

b_+, b_- – рухомість іонів.

Порівнюючи $j_{пр}$ в (1.23) та (1.24), знаходимо

$$\sigma = nq\alpha(b_+ + b_-). \tag{1.25}$$

В умовах кімнатної температури для Na^+ $b_+ = 0{,}480 \cdot 10^{-7}$ м/с; для Cl^- $b_- = 0{,}677 \cdot 10^{-7}$ м/с.

Іони рухаються в капілярі під дією електричного поля. Швидкість руху заряджених частинок складає

$$v = \frac{f\varepsilon\zeta E}{\pi f\eta}, \tag{1.26}$$

де ε – діелектрична проникність рідини, в якій рухаються заряджені частинки;

ζ – електрокінетичний потенціал,

η – коефіцієнт внутрішнього тертя;

f – коефіцієнт, що залежить від розмірів, форми та концентрації іонів ($0 < f < 0{,}25$).

Якщо підставити вираз (1.26) до формули (1.23), то щільність струму провідності приблизно дорівнює

$$j_{np} = nq\frac{f\varepsilon\zeta E}{\pi\eta}, \tag{1.27}$$

а електропровідність

$$\sigma = \frac{nqf\varepsilon\zeta}{\pi\eta}. \tag{1.28}$$

Коефіцієнт внутрішнього тертя залежить від температури системи, тому в разі збільшення температури електропровідність зростає, що пояснює відповідний характер її залежності в інтервалі від 20 до 65° С.

Визначальною характеристикою для ЕКН є електропровідність [68], що залежить від багатьох чинників, серед яких: величина одного заряду та їхня кількість в одиниці об’єму, значення коефіцієнта геометричності іонів, діелектричної проникності рідини, електрокінетичного потенціалу та ін. Для уникнення складних розрахунків під час установлення раціональних параметрів процесу відповідно до виду виробів доцільно використовувати дослідний шлях визначення електропровідності, наприклад за методом [69].

Таким чином, із фізичної точки зору ЕКН є процесом проходження електричного струму протягом певного часу через

провідник із певним електричним опором, що викликає виділення в ньому теплової енергії, який описується законом Джоуля–Ленца. Основною характеристикою харчових продуктів відносно їх ЕКН є питома електропровідність, яка залежить від вологовмісту, температури, ступеня подрібнення, виду і співвідношення компонентів сировини, вмісту жиру, солі, умов зберігання тощо.

1.5 Апаратурне оформлення електроконтактного нагрівання кулінарної продукції

ЕКН є самостійним процесом, ефективним для розв'язання певних технологічних задач, який має свою технологічно-апаратурну базу. Загалом ЕКН здійснюється двома основними способами: в умовах переміщення напівфабрикатів уздовж електродів (в апаратах безперервної дії) та в умовах нерухомого їх положення в процесі обробки (в апаратах періодичної дії).

До апаратів періодичної дії належить пристрій електроконтактної термообробки рибного фаршу, принцип дії якого описано в [70]. На початку процесу обробки підготовлений фарш завантажують у лійку. Насосом фарш через фаршопровід подають у дозатор, в якому він поділяється на порції та подається в канали. Переміщення фаршу здійснюється поперемінно. У момент зупинки електричний струм пропускається через кожну порцію, одночасно відбувається її стиснення на безконтактній ділянці за рахунок теплового розширення.

Такий же принцип покладено в основу роботи пристрою для безперервного електроконтактного нагрівання [71]. Вузлом подачі продукти направляються через вхідний патрубок у корпус. До електродів, між якими розміщено продукт, подається електричний струм. Одночасно відбувається переміщення продукту через пристрій та виведення з корпусу через вихідний патрубок. У корпусі продукт нагрівається до необхідної температури.

У пристрої для формування ковбасних виробів без оболонки та їх коагуляції [72] м'ясний фарш під тиском подається в камеру та заповнює формуючі гільзи, які безперервно обертаються разом із дисками. На початку заповнення формуючих гільз фаршем внутрішній електрод зі штоком знаходиться в крайньому висунутому положенні. По мірі надходження фаршу цей електрод під тиском фаршу відходить. Після того як формуюча гільза пройде камеру,

зовнішній електрод щільно прилягає до фаршу. У цей момент через струмознімні щітки електроди починають контактувати із струмопідвідними шинами, що забезпечує подавання електричного струму до фаршу.

Пристрій для формування і електрокоагуляції ковбасних виробів [73] складається зі станини, стійки та осі, на якій у підшипниках установлено каркас циліндричної форми для кріплення еластичної оболонки. На одному з кінців осі за допомогою ізолятора закріплено заземлений нерухомий електрод. Рухомий електрод має ізолятор, причому через центральну частину обох елементів проходить канал для подавання фаршу. Довжина батона залежить від ходу рухомого електрода. У початковому стані рухомий електрод з ізолятором знаходяться в крайньому лівому положенні, і їх поверхня є продовженням каркаса для кріплення еластичної оболонки. Електроди зроблені з матеріалу, що виключає можливість ерозії та проникнення іонів електрода до фаршу.

Пристрій для електроконтактного варення харчових продуктів [74] працює таким чином. Діелектричну ємність заповнюють розчином електроліту до верхнього рівня електродів. Вмикають привід, який надає руху несучому органу транспортера. У лотоку розміщують продукт, потім привід зміщує транспортер на один крок і підводить до місця завантаження наступний вільний тримач, а тримач з продуктом опускається вниз. Із наступним ходом транспортера продукт повністю занурюється в розчин електроліту. Електроліт та продукт (наприклад, ковбасні вироби) нагріваються за допомогою електричного струму, унаслідок чого й відбувається варення. У міру просування блока з продуктом між електродами температура виробів досягає заданого значення. Готові вироби після розкриття тримачів під тиском власної ваги видаляються з пристрою по спуску.

У пристрої для електроконтактної теплової обробки [75] харчові продукти із завантажувальної лійки шнековим живильником подаються в горизонтальний трубчастий корпус. Електрична напруга надходить до корпусу і на вал живильника. Під дією електричного струму, що пропускається через продукти між електродами, здійснюється теплова обробка продуктів одночасно з їх переміщенням через пристрій.

У пристрої для електроконтактного нагрівання фаршевих виробів [76] фарш із вузла подачі надходить до корпусу, вихідний отвір якого перекритий диском, що виконує в пристрої функцію

електрода та дозатора. Після заповнення корпусу на електроди подають електричний струм та проводять теплову обробку.

Пристрій, що реалізує спосіб безперервної теплової обробки фаршу електричним струмом [77], містить фаршопровід, який застосовується як електрод. Усередині фаршопроводу закріплено інший електрод у вигляді патрубка. Фарш завантажують у лійку та вмикають електронасос. Одночасно подають напругу до електродів. Оскільки струм подається перпендикулярно напрямку руху фаршу, якість обробки підвищується, а сам процес обробки скорочується.

За способом варення [78] впливають на м'ясопродукти імпульсами з напругою 4…12 кВ та тривалістю 5…20 мс. Кількість імпульсів установлюють залежно від маси сировини.

До цієї групи також слід віднести спосіб та пристрій для виготовлення варених ковбас [79]; нагрівач для термообробки м'ясного фаршу в потоці, роторний нагрівач зі скляними трубками та інші пристрої, описані в праці [80].

Нижче наведено низку апаратів для ЕКН періодичної дії. У пристроях для реалізації способів [81; 82] передбачається нагрівання харчової маси в камері за рахунок проходження електричного струму. Під час нагрівання маси й випарювання води величина спожитого струму постійно зростає, а після досягнення кулінарної готовності продукту – починає зменшуватися. У момент досягнення струмом значень 0,7…0,85 від максимального, електронагрівання припиняється.

У пристрої для електроконтактної обробки [83] харчовий продукт (наприклад, м'ясний хлібець) розміщують у форму між двома електродами. Під час проходження електричного струму відбувається нагрівання продукту до необхідної температури. Параметри струму обираються залежно від виду продукту, часу нагрівання, температури та інших чинників. Одночасно з підведенням до електродів, електричний струм подається до поверхневої електропровідної плівки, яка нагріває корпус форми до необхідної температури з утворенням підсмаженої скоринки.

За способом, що реалізується в пристрої обробки харчових продуктів електричним струмом [84], початковий харчовий матеріал просочують розчином солі та завантажують у контейнер з ізоляційного матеріалу, обгорнутий кільцевою котушкою в проміжку між електродами. Електричний струм пропускають одночасно через котушку та між електродами. При цьому початковий матеріал під дією

силових магнітних ліній і тепла рівномірно нагрівається та стерилізується.

Інший спосіб використовують під час виробництва сосисок і ковбас без оболонки [85]. ЕКН здійснюють залежно від величини одного з електричних параметрів процесу, наприклад електричного струму. При цьому нагрівання здійснюють до моменту відхилення контрольованого параметра від заданої величини.

Спосіб приготування сосисок і тому подібних виробів без оболонки [86] полягає в тому, що підготовлений фарш накладають у формувальні гільзи і варять (коагулюють) струмом промислової частоти за постійної напруги 127 В протягом 35…55 с до температури в усьому об'ємі фаршу 68…72° С. Загальна тривалість теплової обробки складає 25…26 хв.

За способом термічної обробки м'ясних формованих виробів [87] передбачається нарізання м'ясного продукту шматочками розміром 8…15 мм, обробка розсолом, що містить 18% кухонної солі, 0,5% цукру, та 0,05% $NaNO_2$. Підготовлені шматочки м'ясної тканини закладають у форму так, щоб напрям м'язових волокон збігався. Форма зроблена у вигляді діелектричної камери, що має пару електродів. Продукт підпресовують тиском не менше $3{,}2 \cdot 10^6$ Па. Пресування та витримування м'ясної тканини для дозрівання триває протягом 12 годин за температури 8…12° С. На електроди з генератора імпульсів струму подають електроенергію у вигляді короткочасних імпульсів згасальної амплітуди (частота імпульсів не менше 10 кГц у кількості 20 на хвилину та напруга 10 кВ) протягом 20…30 хв.

Спосіб варення фаршевих продуктів [88] передбачає розміщення фаршу між двома електродами та вплив на нього електричним струмом до кулінарної готовності. Вплив струму на фарш відбувається в герметичній ємності з об'ємом, що пружно збільшується в разі підвищення тиску в ємності. Використовують електричний струм переважно напругою 140…340 В і силою 6…30 А.

Процес теплової обробки м'ясних хлібців в агрегаті, описаному в праці [80], передбачає застосування ЕКН до температури 68…70° С, після чого продукцію направляють у ротаційну піч безперервної дії для остаточної обробки поверхні виробу.

Каструля [89] має перфоровану вставку з елементами фіксації, яку опускають на дно, чим запобігають прямому електричному контакту зі стінками корпусу. Потім підключають негативний полюс джерела живлення з напругою 6…12 В до корпусу, а позитивний

полюс – до перфорованої вставки. У каструлю поміщають продукт, заливають його водою і ставлять на плиту. Після того, як частково відбудеться випарювання й поглинання води продуктом, вмикають джерело постійного струму, під впливом якого відбувається утворення мікрошарів води, що запобігає пригорянню продукту, з одночасним прискоренням процесу приготування.

Комбінований пристрій для смаження харчових продуктів [90] забезпечує теплову обробку електроконтактним методом та нагріванням від теплоти, яка випромінюється вугіллям мангалу.

Таким чином, ЕКН реалізується в постійному або імпульсному режимах: під час переміщення напівфабрикатів уздовж електродів та при нерухомому їх положенні в процесі обробки, коли продукти нагріваються до заданої температури. Параметри струму обираються залежно від виду продукту, часу нагрівання, температури та інших чинників. Застосування ЕКН є перспективним у поєднанні з поверхневими методами нагрівання з метою інтенсифікації процесу отримання смаженої кулінарної продукції та забезпечення регульованої рівномірності температурного поля за об’ємом виробу.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО ЖАРЕННЯ КУЛІНАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРІВАННЯ

2.1 Передумови для вдосконалення процесів жарення кулінарної продукції

Одним із важливих напрямів підвищення ефективності роботи теплових апаратів та зниження ними витрат енергії є розробка технічних рішень, спрямованих на скорочення тривалості теплової обробки харчової продукції. Як відомо, інтенсифікувати нагрівання можна за рахунок збільшення теплового потоку та, відповідно, кількості корисно використаної теплоти. Але при цьому досягти високої якості виробів можна, лише створивши такі умови, за яких відбувається відносно рівномірне нагрівання за всім об'ємом без перегрівання окремих, зокрема поверхневих, шарів.

За модельними схемами, наведеними на рис. 2.1, можна уявити зміну теплового стану напівфабрикату під час жарення. Так, за традиційним способом (етапи I-III) температура від поверхневого до внутрішніх шарів поступово змінюється лише з одного боку виробу, при цьому на його поверхні формується скоринка (рис. 2.1а). Після перевертання виробу (етапи IV-VI) спостерігаються такі ж зміни з протилежного боку. На останній стадії (етап VII) відбувається поступове вирівнювання температурного поля за рахунок прогрівання внутрішніх шарів під час конвективного енергопідведення в жарильній шафі.

В умовах двобічного нагрівання (рис. 2.1б) температура поступово змінюється одночасно з двох протилежних боків протягом I-IV етапів процесу, що, на відміну від попереднього способу, зумовлює однаковий характер змін температури у верхній та нижній частинах продукту, сприяє підвищенню рівномірності температурного поля та скороченню тривалості процесу. Проте невисока теплопровідність продукту потребує регулювання теплового потоку, особливо на III та IV етапах, коли можливе перегрівання поверхневих шарів, оскільки швидкість їх нагрівання набагато перевищує швидкість нагрівання внутрішніх шарів.

Ґрунтуючись на вищевикладених фактах, в основу роботи з удосконалення процесів жарення було покладено передумови щодо

необхідності регулювання режимних параметрів нагрівання окремих шарів напівфабрикату. Так, цілеспрямованим регулюванням швидкості зміни температури внутрішнього шару виробу можна забезпечити його прогрівання до температури кулінарної готовності протягом часу, що не перевищує тривалості формування скоринки на поверхні, і тим самим інтенсифікувати теплову обробку.

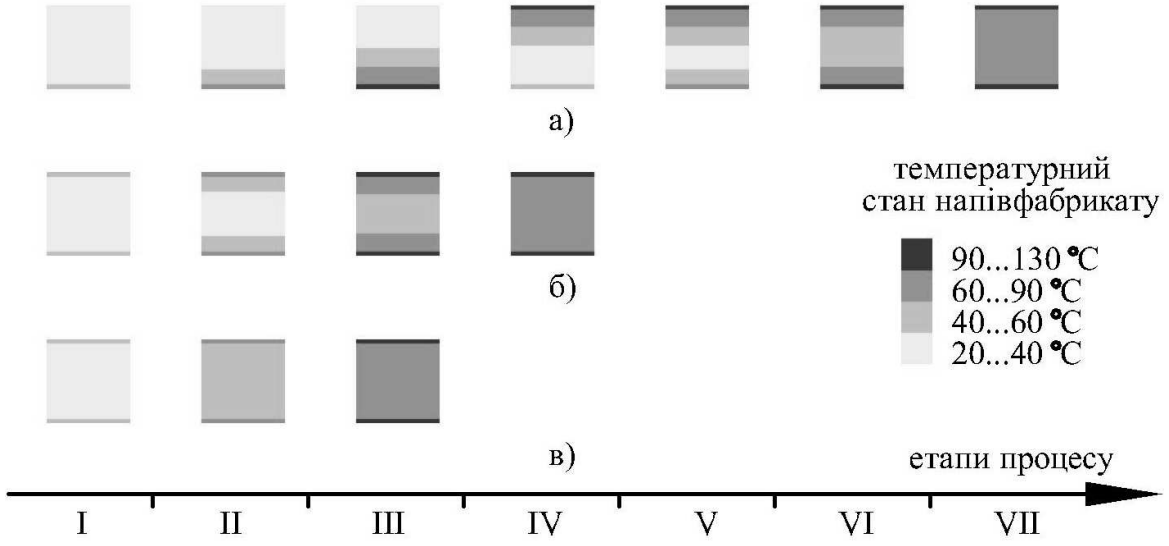


Рисунок 2.1 – Модельні схеми зміни теплового стану харчового напівфабрикату під час жарення: а – традиційним способом; б – в умовах двобічного нагрівання; в – комбінованим способом з ЕКН

Одним із можливих шляхів розвитку досліджень за вказаним напрямом є комбінування різноманітних поверхневих способів нагрівання виробу (контактного, променевого та ін.) з об'ємними, зокрема електроконтактним, роль якого зводиться до прискорення нагрівання внутрішнього шару виробу. При цьому теплові потоки від джерел поверхневого нагрівання, спрямовані до протилежних боків виробу, мають забезпечити рівномірні зміни температури поверхневих шарів, їх фізико-хімічних властивостей і утворення скоринки. Цим часом за рахунок ЕКН внутрішній шар виробу має прогрітися до заданої температури, що відповідає кулінарній готовності (рис. 2.1в).

Таким чином, комбінуванням вказаних способів передачі теплової енергії можна досягти високого ступеня рівномірності температурного поля майже протягом усього часу теплового впливу (етапи I-III) та суттєвої інтенсифікації теплової обробки під час приготування смаженої та запеченої кулінарної продукції.

2.2 Розрахунково-аналітичне визначення розподілу температур у модельному зразку напівфабрикату в умовах двобічного поверхневого нагрівання з електроконтактним нагріванням

Згідно з розрахунком теплова обробка суто двостороннім нагріванням не дає можливості отримати необхідний розподіл температури за об'ємом напівфабрикату. Теоретичні дослідження комбінованого способу жарення з ЕКН проведені за модельною схемою в умовах двобічного поверхневого нагрівання з ЕКН (рис. 2.2) шляхом розрахунково-аналітичного визначення розподілу температур у напівфабрикаті, який має форму симетричної (відносно горизонтальної осі *t*) тришарової пластини (два поверхневих і внутрішній шари), товщина якої 2*l* відносно інших розмірів є малою.

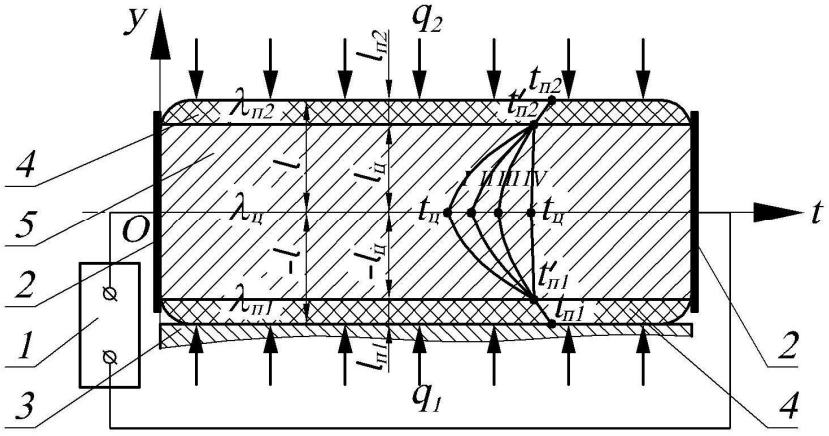


Рисунок 2.2 – Модельна схема двобічного поверхневого нагрівання з ЕКН: 1 – джерело живлення для ЕКН; 2 – електроди; 3 – нагрівальна поверхня; 4, 5 – відповідно поверхневі та внутрішній шари напівфабрикату; I–IV – криві зміни температурного поля

Вихідними даними передбачено, що на два протилежних поверхневих шари, із товщиною l_{n1} та l_{n2} відповідно, впливають теплові потоки q_1 та q_2, які можуть випромінюватись одночасно від двох нагрівальних поверхонь шляхом теплопровідності, або іншими способами передавання теплової енергії, зокрема випромінюванням, конвекцією. При цьому $q_1 = q_2$, чим забезпечується рівність значень температури протилежних поверхневих шарів ($t_{n1} = t_{n2}$). Нагрівання

внутрішніх шарів забезпечується за рахунок теплопровідності, а також ЕКН через бічні поверхні шляхом підведення електричного струму від електродів.

Для спрощення розв'язання задачі нестаціонарного теплообміну розглянемо розподіл температури за об'ємом зразка на межі певної фіксованої миті часу перебігу процесу. За цих умов визначимо температуру в центрі за певної температури на поверхні.

У зв'язку з тим, що тепловий потік з обох боків напівфабрикату однаковий, то температурне поле за його об'ємом має бути симетричним відносно горизонтальної площини. Це дозволяє для розрахунків і під час аналізу характеру розподілу температур розглядати одну половину напівфабрикату, наприклад нижню. При цьому тепловий потік q_1 за умов відсутності ЕКН (1-й варіант – контрольний) визначається за формулою

$$q_1 = (t_{n1} - t'_{n1}) \cdot \frac{\lambda_{n1}}{l_{n1}} = (t'_{n1} - t_ц) \cdot \frac{\lambda_ц}{l_ц}, \text{ Вт/м}^2, \qquad (2.1)$$

де t_{n1}, t'_{n1}, $t_ц$ – граничні температури шарів напівфабрикату, °С;

λ_{n1}, $\lambda_ц$ – коефіцієнти теплопровідності поверхневого та внутрішнього шарів напівфабрикату відповідно, Вт/(м·К);

l_{n1} – товщина поверхневого шару напівфабрикату, м;

$l_ц$ – половина товщини внутрішнього шару напівфабрикату, м,

а за умови додаткового впливу ЕКН (2-й варіант – дослідний):

$$q_1 = (t_{n1} - t'_{n1}) \cdot \frac{\lambda_{n1}}{l_{n1}} = (t'_{n1} - t_ц) \cdot \frac{\lambda_ц}{l_ц} + q_{ел}, \text{ Вт/м}^2, \qquad (2.2)$$

де $q_{ел.}$ – тепловий потік від ЕКН, Вт/м^2, що дорівнює

$$q_{ел} = \frac{U^2 \cdot \sigma_{пит.} \cdot l}{S}, \text{ Вт/м}^2, \qquad (2.3)$$

де U – напруга електричного струму, що подається до напівфабрикату, В;

$\sigma_{пит.}$ – питома електропровідність, (Ом·м)$^{-1}$;

l – характерний лінійний розмір, м ($l = S/h$, м);

S – площа контакту електрода з нижньою половиною зразка, м^2 ($S = l_ц \cdot b$, м^2);

b – довжина зразка, м;

h – міжелектродна відстань, м.

Із рівнянь (2.1) та (2.2) отримаємо рівняння для визначення температури в центрі виробу:

– за 1-м варіантом

$$t_ц = t'_{n1} - \left[(t_{n1} - t'_{n1}) \frac{\lambda_{n1}}{l_{n1}} \right] \frac{l_ц}{\lambda_ц}, \text{ °C;} \qquad (2.4)$$

– за 2-м варіантом

$$t_ц = t'_{n1} - \left[(t_{n1} - t'_{n1}) \frac{\lambda_{n1}}{l_{n1}} - q_{ел} \right] \frac{l_ц}{\lambda_ц}, \text{ °C.} \qquad (2.5)$$

Розв’язання рівнянь (2.3)–(2.5) можливе за різних геометричних та електрофізичних параметрів і в широкому інтервалі температур. Далі наведено розрахунок в умовах одного з варіантів нагрівання за таких прийнятих параметрів:

– геометричні параметри зразка: товщина поверхневого шару $l_{n1} = 1 \cdot 10^{-3}$ м; внутрішнього шару $l_ц = 9 \cdot 10^{-3}$ м; міжелектродна відстань $h = 60 \cdot 10^{-3}$ м; довжина зразка $b = 35 \cdot 10^{-3}$ м;

– коефіцієнти теплопровідності: $\lambda_{n1} = 0{,}35$ Вт/(м·К); $\lambda_ц = 0{,}65$ Вт/(м·К);

– питома електропровідність $\sigma_{пит.} = 1{,}3$ (Ом·м)$^{-1}$;

– напруга ЕКН:

I випадок (контроль) $U = 0$ В;

II випадок $U = 6$ В;

III випадок $U = 8$ В;

IV випадок $U = 10$ В;

– температура на межах поверхневого шару для трьох фіксованих моментів часу:

1) $t_{n1} = 60°$ С; $t'_{n1} = 54°$ С;

2) $t_{n1} = 70°$ С; $t'_{n1} = 65°$ С;

3) $t_{n1} = 80°$ С; $t'_{n1} = 76°$ С.

З урахуванням цих даних результати розрахунку температури в центрі зразка за умов комбінованої теплової обробки з ЕКН відповідно до вищевказаних параметрів наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – **Результати розрахунку температури в центрі модельного зразка**

Температура на межах поверхневого шару, °С		**Температура в центрі, $t_ц$, °С**			
		Контроль, U = 0 В	**Дослід (при напрузі U, В)**		
$t_п$	$t'_{п1}$		6	8	10
60	54	25	35	44	55
70	65	41	52	60	71
80	76	56	68	75	86

Загальний характер розподілу температурного поля за об’ємом у процесі нагрівання вказує на те, що в межах обраного діапазону значень температури поверхневих шарів (60…80º С) температура внутрішнього шару зразка за рахунок впливу ЕКН збільшується на 10…30° С.

Установлено, що з підвищенням напруги температура внутрішнього шару досягає більших значень. Слід зазначити, що за певних значень напруги теоретично розрахована температура внутрішнього шару може перевищувати значення температури поверхневих шарів, що є небажаним результатом. Це зумовлено тим, що для отримання високої якості смаженої та запеченої продукції на стадії готовності температура поверхневих шарів повинна перебільшувати температуру внутрішнього шару приблизно на 30…40° С.

Отримані результати вказують на те, що застосування ЕКН в умовах двобічного поверхневого нагрівання сприяє інтенсифікації прогрівання внутрішнього шару, ступінь якої залежить від параметрів електричного струму та електропровідних властивостей зразка.

У зв’язку з цим, із метою реалізації комбінованого жарення з ЕКН важливим практичним завданням стає встановлення раціональних значень параметрів електричного струму для різних видів продукції з урахуванням електропровідних властивостей.

2.3 Модельний розрахунок параметрів процесу комбінованого жарення з електроконтактним нагріванням

Визначення інтенсифікації процесу термообробки під час комбінування поверхневого, ІЧ-нагрівання та ЕКН здійснювалось на прикладі розрахунку тривалості процесу запікання напівфабрикату на основі м'ясного фаршу. Теплові розрахунки зроблено для двох випадків:

1) контрольний – за двобічного підведення теплової енергії – знизу (від нагрівальної поверхні) та зверху (від ІЧ-нагрівачів);

2) дослідний – за умов комбінування двобічного підведення теплової енергії – знизу (від нагрівальної поверхні) та зверху (від ІЧ-нагрівачів) з ЕКН.

Для розрахунків взято такі вихідні дані:

– геометричні параметри напівфабрикату: довжина – 0,1 м, ширина – 0,05 м, висота – 0,025 м;

– маса напівфабрикату – 0,125 кг;

– середня питома електропровідність напівфабрикату – 2,5 $(Ом \cdot м)^{-1}$;

– початкова температура напівфабрикату – 20° С;

– кінцева температура внутрішнього шару виробу – 80° С, скоринки – 115° С.

Припустимо, що під час запікання частка загальної енергії $Q_{заг.}$, що корисно використовується, витрачається на нагрівання внутрішніх шарів продукту $Q_{вн.}$ та поверхневого шару з формуванням на його основі скоринки $Q_{ск.}$, тобто

$$Q_{заг.} = Q_{вн.} + Q_{ск.}, \text{ Дж.} \qquad (2.6)$$

Кожну складову цього рівняння можна подати у вигляді суми енергії на нагрівання продукту $Q_{н.}$ та випаровування вологи $Q_{вип.}$, що визначаються з виразів:

$$Q_{н.} = k \cdot G \cdot c \cdot \Delta t, \text{ Дж}, \qquad (2.7)$$

де k – частка продукту від загальної маси напівфабрикату;

G – маса напівфабрикату, кг;

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

Δt – різниця температур, °С;

$$Q_{вип.} = k \cdot G \cdot x \cdot r \text{, Дж,} \qquad (2.8)$$

де x – кількість випареної вологи від початкової маси напівфабрикату;

r – прихована теплота пароутворення, Дж/кг.

Визначимо потрібну кількість теплоти для нагрівання внутрішніх шарів. Для цього вважатимемо, що їх частка складає 80% від загальної маси, тобто k = 0,8. Різниця початкової (t_0 = 20° С) та кінцевої температур (t_1 = 80° С) складає $\Delta t = t_1 - t_0 = 80 - 20 = 60\,°$ С. За середньої при цьому температури 50° С прихована теплота пароутворення r складає $2382{,}2 \cdot 10^3$ Дж/кг. Середню питому теплоємність (за вологовмісту продукту 59%) беремо с = 3157 Дж/(кг·℃). Кількість випареної вологи від початкової маси – 15%.

Згідно з розрахунками за рівняннями (2.7) та (2.8) $Q_{н.} = 18{,}9 \cdot 10^3$ Дж; $Q_{вип.} = 35{,}7 \cdot 10^3$ Дж. Сума цих складових $Q_{вн.} = 54{,}6 \cdot 10^3$ Дж.

За такою ж послідовністю визначимо витрати енергії на нагрівання поверхневого шару з формуванням скоринки. При цьому частка скоринки складає 20%, тобто k = 0,2. Ураховуючи те, що зміна температури від 20 до 115° С у поверхневому шарі приводить до значних змін його властивостей, пропонується умовно виділити два етапи. На 1-му етапі (так само, як і для внутрішніх шарів під час нагрівання від 20 до 80° С) $\Delta t_1 = 60\,°$ С, а на 2-му етапі (під час нагрівання від 80 до 115° С) $\Delta t_2 = 35\,°$ С. За середньої температури 2-го етапу нагрівання скоринки близько 100° С прихована теплота пароутворення r = $2256{,}3 \cdot 10^3$ Дж/кг. Середня питома теплоємність при цьому складає 1670 Дж/(кг·℃). Слід зауважити, що з урахуванням 15% випареної вологи масу продукту під час 2-го етапу слід узяти G = 0,106 кг. Втрату маси поверхневого шару під час формування скоринки на 2-му етапі приймаємо 45%.

Відповідно до (2.7) та (2.8) для поверхневого шару: $Q_{н.} = 5{,}9 \cdot 10^3$ Дж; $Q_{вип.} = 30{,}4 \cdot 10^3$ Дж. Просумуємо складові та отримаємо кількість енергії для нагрівання поверхневого шару з формуванням скоринки $Q_{ск.} = 36{,}3 \cdot 10^3$ Дж.

Загальні витрати енергії, що є корисною під час запікання, за формулою (3.6) складають $Q_{заг.} = 90{,}9 \cdot 10^3$ Дж.

Розрахуємо параметри нагрівання для 1-го випадку (контроль). Умовою рівномірності теплового поля за об'ємом продукту є отримання однакової кількості енергії від нагрівальної поверхні та ІЧ-випромінювачів. Тому кожна складова цих видів нагрівання дорівнюватиме 50% від $Q_{заг.}$, тобто $Q_{пов.} = Q_{пром.} = 45{,}5 \cdot 10^3$ Дж.

Тривалість нагрівання нижньої частини напівфабрикату до температури в центрі 80° С від нагрівальної поверхні можна визначити, використовуючи рівняння

$$Q_{пов.} = \frac{\Delta t_{сер.} \cdot F \cdot \tau}{\frac{\delta_{ск}}{\lambda_{ск}} + \frac{\delta_{в.ш.}}{\lambda_{в.ш.}}}, \qquad (2.9)$$

де $\Delta t_{сер.}$ – середня різниця температур, °С ($\Delta t_{сер.}$ = 117° С);

F – площа контакту напівфабрикату з поверхнею нагрівання, м^2 (F = 0,005 м^2);

$\delta_{ск}$, $\delta_{в.ш.}$ – відповідно товщина поверхневого шару (скоринки) та 50% від загальної товщини внутрішніх шарів, м ($\delta_{ск}$ = 0,0025 м; $\delta_{в.ш.}$ = 0,01 м);

$\lambda_{ск}$, $\lambda_{в.ш.}$ – відповідно середнє значення коефіцієнта теплопровідності поверхневого шару (скоринки) та внутрішнього шару, Вт/(м·К) (беремо $\lambda_{ск}$ = 0,35 Вт/(м·К); $\lambda_{в.ш.}$ = 0,65 Вт/(м·К));
тобто

$$\tau = \frac{Q_{пов.} \cdot \left(\frac{\delta_{ск.}}{\lambda_{ск}} + \frac{\delta_{в.ш.}}{\lambda_{в.ш.}} \right)}{\Delta t_{сер} \cdot F} = \frac{45{,}5 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{0{,}0025}{0{,}35} + \frac{0{,}01}{0{,}65} \right)}{117 \cdot 0{,}005} = 1752 \text{ с.} \qquad (2.10)$$

Визначимо потужність поверхневого нагрівання

$$P_{пов.} = \frac{Q_{пов.}}{\tau} = \frac{45{,}5 \cdot 10^3}{1752} = 26 \text{ Вт.} \qquad (2.11)$$

Оскільки значення кількості теплоти від нагрівальної поверхні та ІЧ-випромінювачів, а також тривалість процесу є однаковими, то вважатимемо, що потужність інфрачервоного нагрівання: $P_{ІЧ} = P_{пов.} = P$ = 26 Вт.

Питоме теплове напруження обох видів нагрівання складатиме

$$q = \frac{P}{S} = \frac{26{,}0}{0{,}005} = 5200 \text{ Вт/м}^2. \qquad (2.12)$$

Використовуючи закон Стефана-Больцмана, визначимо температуру випромінювача. Для цього з рівняння (1.8) виведемо вираз для T_1:

$$T_1 = 100\sqrt[4]{\frac{Q_{пром.}}{\varepsilon \cdot C_0 \cdot \text{F} \cdot \tau} + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4} =$$

$$= 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{45{,}5 \cdot 10^3}{0{,}5 \cdot 5{,}67 \cdot 0{,}005 \cdot 1752} + \left(\frac{345}{100}\right)^4} = 667 \text{ К}, \qquad (2.13)$$

де ε – ступінь чорноти (беремо ε = 0,5);

C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла (C_0 = 5,67 Вт/м^2·К^4);

T_1, T_2 – відповідно температура випромінювача та середня температура напівфабрикату, К (за даних умов $T_2 = 345$ К).

Згідно з законом Віна, за умови нагрівання випромінюванням взаємозв’язок між температурою випромінювача та довжиною хвилі $\lambda_в$ описується рівнянням (1.9), звідки

$$\lambda_в = \frac{2{,}9 \cdot 10^3}{T}. \qquad (2.14)$$

Із виразу (2.14) довжина хвилі $\lambda_в$ = 4,4 мкм.

Отримані параметри потужності нагрівання та довжини хвилі випромінювання дають змогу вибрати режими роботи електронагрівачів, що забезпечать рівномірне двобічне нагрівання продукту.

На відміну від розглянутого, для другого (дослідного) випадку умови задачі дещо змінюються, оскільки додається складова передачі енергії шляхом ЕКН. За цих умов припустимо, що теплота від нагрівальної поверхні та ІЧ-випромінювачів використовується спрямовано для нагрівання поверхневого шару з формуванням скоринки. Тобто загальна енергія на формування скоринки з обох

боків $Q_{ск.} = Q_{пов.} + Q_{пром.}$, при цьому тепловий потік від нагрівальної поверхні та променистий тепловий потік є однаковими ($Q_{пов.} = Q_{пром.}$). Отже, кількість теплоти на формування скоринки дорівнюватиме $0{,}5\,Q_{ск.}$. Таким чином, $Q_{пов.} = Q_{пром.} = \frac{36{,}3 \cdot 10^3}{2} = 18{,}2 \cdot 10^3$ Дж. Внутрішній шар продукту нагрівається переважно за рахунок ЕКН, тому $Q_{ЕКН} = Q_{вн.} = 54{,}6 \cdot 10^3$ Дж.

Потужність поверхневого та ІЧ-нагрівання залишимо такою ж, як і раніше. Визначимо час, потрібний для нагрівання поверхневого шару і формування скоринки таким чином

$$\tau = \frac{Q_{пов.}}{P} = \frac{Q_{пром.}}{P} = \frac{18{,}2 \cdot 10^3}{26} = 700 \text{ с.} \qquad (2.15)$$

При цьому припускаємо, що отримана теплота концентрується лише в поверхневому шарі й не передається до внутрішніх шарів, а їх нагрівання до 80° С буде відбуватися переважно шляхом ЕКН. У такому випадку загальна тривалість термообробки може скоротитися приблизно в 2,5 рази. Для цього необхідно визначити напругу ЕКН, використовуючи рівняння (1.12), що через питому електропровідність має запис

$$Q_{ЕКН} = U^2 \cdot \sigma_{с.пит.} \cdot l \cdot \tau, \text{ Дж,} \qquad (2.16)$$

де U – напруга електричного струму, що забезпечує прогрівання внутрішніх шарів виробу до температури кулінарної готовності, В;

$\sigma_{с.пит.}$ – середня питома електропровідність, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$;

$l = \frac{S_{ел.}}{h} = \frac{0{,}0025}{0{,}05} = 0{,}05$ – лінійний розмір, м;

$S_{ел.}$ – площа контакту електроду з напівфабрикатом, м^2 (за умов поставленої задачі $S_{ел.} = 0{,}0025$ м^2);

h – міжелектродна відстань, м (за умов поставленої задачі h = 0,05 м).

Із виразу (2.16) отримуємо:

$$U = \sqrt{\frac{Q_{ЕКН}}{\sigma_{с.пит.} \cdot l \cdot \tau}} = \sqrt{\frac{54{,}6 \cdot 10^3}{2{,}5 \cdot 0{,}05 \cdot 700}} = 25 \text{ В.} \qquad (2.17)$$

Проведений розрахунок доводить, що процеси жарення кулінарної продукції можна суттєво інтенсифікувати шляхом комбінування ЕКН із поверхневими методами нагрівання, (зокрема, від нагрівальної поверхні та ІЧ-випромінювачів). Ураховуючи високий ККД ЕКН (близько 0,9), нагрівання більшої частки виробу саме таким методом надасть можливість суттєво зменшити енерговитрати. За наведеною методикою можна проводити розрахунки режимних параметрів комбінованої теплової обробки з ЕКН для широкого асортименту смаженої та запеченої кулінарної продукції.

2.4 Моделювання електроконтактного нагрівання

Для нагрівання харчових продуктів електроконтактним методом може використовуватися постійний або змінний електричний струм. Розглянемо можливі шляхи отримання наведених типів електричного струму для їх використання в апаратах з ЕКН, основні характеристики цих типів струму та визначимо доцільність їх застосування.

Постійний струм, частота зміни якого дорівнює нулю, характеризується незмінністю напрямку і значення напруги з часом. Отримання такого струму можливе від промислової мережі шляхом застосування електричного випрямляча. При цьому задавання напруги здійснюється за допомогою трансформатора. У той же час його застосування під час ЕКН унеможливлюється у зв’язку з негативними наслідками електролізу, що саме відбуваються в процесі нагрівання постійним струмом.

У змінного струму частота зміни напрямку й напруги під час процесу ЕКН є відмінною від нульового значення. Такий струм характеризується формою, що буває синусоїдальною (сигнал, зміна якого в часі відбувається за законом синусоїди) та прямокутною (ступінчатий, прямокутний сигнал).

Отримати змінний струм із потрібною напругою можна такими способами:

1) безпосередньо з промислової мережі;

2) за допомогою потужних генераторів синусоїдальної напруги;

3) шляхом застосування комутуючих елементів [91].

Перший спосіб є найбільш простим за виконанням. Однак при цьому виникає синусоїдальний змінний струм із незмінною частотою 50 Гц, що обмежує можливості дослідження ЕКН у різноманітних діапазонах частот.

Другий спосіб є складнішим, але дає можливість отримувати змінний струм синусоїдальної форми різної частоти. Він реалізується автогенераторами з частотозалежними елементами електричного кола позитивного зворотного зв'язку. При цьому для підсилення до потрібного рівня напруги використовуються підсилювачі, які працюють у лінійному режимі, що приводить до виділення теплової енергії. Така система характеризується незначним ККД (до 0,5), а також високою вартістю електротехнічного обладнання.

За допомогою третього способу отримують змінний струм потрібної частоти прямокутної форми. Генератори з комутуючими елементами мають відносно просту конструкцію та працюють у ключовому режимі (режим «увімкнено-вимкнено»). У даному випадку практично відсутні втрати на нагрівання підсилюючих елементів, а ККД подібних пристроїв досягає 90%. Це свідчить про досить ефективне використання електричної енергії порівняно з іншими методиками. Крім того, зазвичай вартість пристроїв генерування прямокутного змінного струму складає 20…25% вартості генераторів синусоїдальної напруги.

Отже, аналіз наведених способів отримання змінного струму вказує на доцільність використання генераторів на основі комутаторів, зважаючи на можливість отримання струму в широкому інтервалі частот, простоту реалізації, енергоефективність та невисоку вартість пристрою. Однак при цьому виникає змінний струм прямокутної форми, ефективність застосування якого в умовах ЕКН розглянемо нижче.

До основних характеристик змінного струму також відносять:

– амплітудну напругу ($U_{ампл}$, В), що відповідає максимальному за модулем значенню миттєвої напруги за весь період коливань;

– діючу напругу ($U_{д.}$, В), тобто середньоквадратичне значення напруги за весь період коливань.

Слід зазначити, що у виробничих умовах на підприємствах ресторанного господарства та харчових підприємствах малої потужності значна частина операцій виконується ручним способом, зокрема завантаження-розвантаження. Тому, незважаючи на всі заходи безпеки (електроізоляцію, заземлення, автоблокування та ін.),

під час обслуговування періодично працюючих апаратів з ЕКН для обслуговуючого персоналу існує ризик ураження електричним струмом. При цьому убезпечити працівників можна шляхом застосування електричної напруги, яка не перевищує допустимого за технікою безпеки значення, що згідно з ГОСТ 12.1.009-99 складає 42 В. З урахуванням того, що максимальній напрузі за період відповідає амплітудне значення, приймаємо для ЕКН: $U_{ампл} \leq 40 \pm 2$ В.

Для аналізу ЕКН синусоїдальним та прямокутним струмом за допомогою математичного пакета MathCAD промоделюємо змінний струм. Так, за синусоїдального струму зміна напруги характеризується функцією

$$U(t) = U_{ампл.} \sin(\omega t), \qquad (2.18)$$

де ω – кутова частота, $с^{-1}$ ($\omega = 2\pi \cdot \nu$, $с^{-1}$);

t – час, с;

ν – частота зміни електричного струму, Гц.

За умов амплітудної напруги 40 В та частоти 50 Гц осцилограма напруги змінного електричного струму синусоїдальної форми буде виглядати, як крива 1 на рис. 2.3. При цьому діюча напруга пов’язана з амплітудною таким виразом:

$$U_{д.} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [U_{ампл.} \cdot \sin(\omega t)]^2 dt}, \text{ В}, \qquad (2.19)$$

де T – період зміни електричного струму, с.

Осцилограму змінного прямокутного за формою електричного струму, зважаючи на те, що за законом розкладення ряду Фур’є [92; 93] прямокутний сигнал являє собою суму різних за амплітудою та частотою гармонік, у MathCAD можна отримати складанням 1, 3, …, k непарних гармонік. Тому для цього струму характерна така функціональна залежність:

$$U(t) = \frac{4}{\pi}\left[\sum_{i=0}^{n} \frac{U_{ампл.1}}{2i+1} \cdot \sin((2i+1)\omega t)\right], \qquad (2.20)$$

де $U_{ампл.1}$ – амплітудна напруга першої гармоніки, В (за умов отримання прямокутного сигналу з амплітудою 40 В $U_{ампл.1} = U(0{,}005) \approx 51$ В).

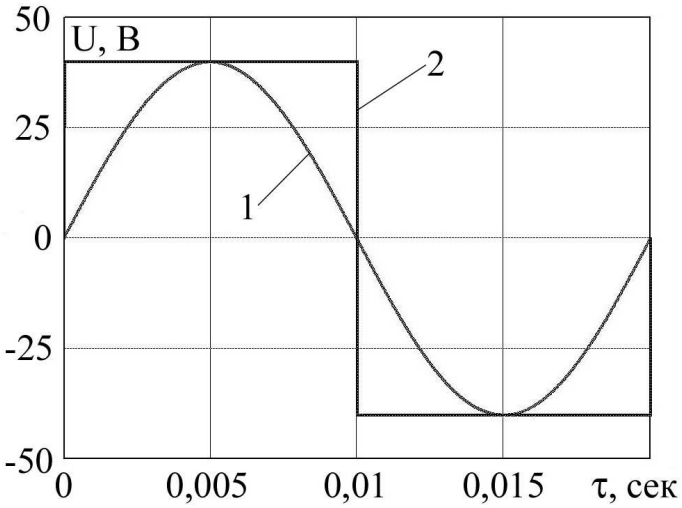


Рисунок 2.3 – Осцилограми напруги змінного електричного струму із частотою 50 Гц і амплітудною напругою 40 В: 1 – електричний струм синусоїдальної форми; 2 – електричний струм прямокутної форми

Слід зауважити, що амплітудна напруга першої гармоніки за прямокутного струму є теоретичною і використовується лише у виразі (2.20) для побудови прямокутного сигналу, тому перевищення нею допустимих 42 В жодним чином не впливає на безпечність процесу. У дійсності амплітудна напруга майже увесь час (окрім моменту зміни напряму струму, коли U = 0, чим можна знехтувати) дорівнює діючій напрузі. Отже, в розглянутих умовах $U_{ампл} = U_{д.}$ = 40 В, що показано залежністю 2 на рис. 2.3.

Для порівняння енергетичних можливостей змінного струму синусоїдальної та прямокутної форм розрахуємо можливу діючу напругу та потужність ЕКН за умови використання змінного струму цих форм з однаковою амплітудною напругою від 10 до 50 В.

Потужність нагрівання (P, Вт) визначається за формулою

$$P = U_{д.}^2 \cdot \sigma, \qquad (2.21)$$

де σ – електропровідність зразка, Ом$^{-1}$ (за експериментальними даними в середньому σ = 0,043 Ом$^{-1}$).

Результати розрахунку наведено в табл. 2.2. Аналіз цих даних свідчить, що за синусоїдального змінного струму діюча напруга в 1,4 разу менша за амплітудну, а за прямокутного – вони мають однакові значення. Потужність за однакових значень амплітудної

напруги при прямокутному змінному струмі в 2,0…2,1 разу більша, ніж при синусоїдальному струмі.

Таблиця 2.2 – **Результати розрахунку діючої напруги та потужності нагрівання**

Амплітудна напруга, $U_{ампл.}$, В	**Змінний струм синусоїдальної форми**		**Змінний струм прямокутної форми**	
	Діюча напруга, $U_{д.}$, В	**Потужність нагрівання, P, Вт**	**Діюча напруга, $U_{д.}$, В**	**Потужність нагрівання, P, Вт**
10	7	2	10	4
20	14	8	20	17
30	21	19	30	39
40	28	34	40	69
50	35	53	50	108

Таким чином, підвищення потужності нагрівання змінним струмом можливе з підвищенням діючої і, відповідно, амплітудної напруги, але за певних значень діючої напруги при синусоїдальному струмі амплітудна напруга стає небезпечною (вище 42 В). Тому для ефективного й безпечного проведення ЕКН слід рекомендувати використання прямокутної форми змінного струму з напругою до 42 В.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРІВАННЯ

3.1 Експериментальна установка та методика дослідження електроконтактного нагрівання

Експериментальні дослідження процесу ЕКН проводились на установці, яку показано на рис. 3.1. Вона складається з випрямляча електричного струму ВСА-5К 1, комутатора 2, низькочастотного генератора сигналів ГЗ-112/1 3, лабораторного автотрансформатора ЛАТР-2М 4, ватметра 5, вимикачів 6, амперметра 7; вольтметра 8, теплоізольованої робочої ємності 9 та ртутних термометрів 10.

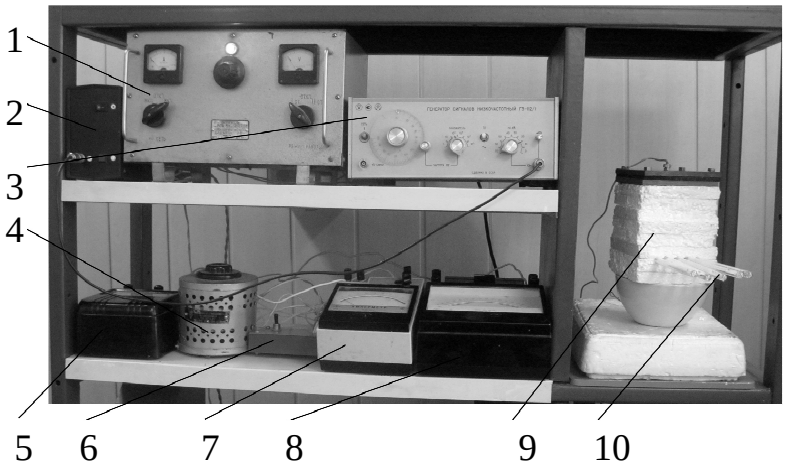


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд експериментальної установки для дослідження ЕКН: 1 – випрямляч електричного струму ВСА-5К; 2 – комутатор; 3 – низькочастотний генератор сигналів ГЗ-112/1; 4 – лабораторний автотрансформатор ЛАТР-2М; 5 – ватметр; 6 – вимикачі; 7 – амперметр; 8 – вольтметр; 9 – теплоізольована робоча ємність; 10 – ртутні термометри

Установка дозволяє здійснювати ЕКН електричним струмом різного типу, форми та частоти за трьома схемами.

І схема – ЕКН постійним струмом. Електричний струм з випрямляча 16 (рис. 3.2) при увімкненому вимикачі S1 та вимкнених вимикачах S2 і S3 подається до електродів 5. Значення напруги та сили струму простежують за показаннями вбудованих у випрямляч 16 вольтметра та амперметра.

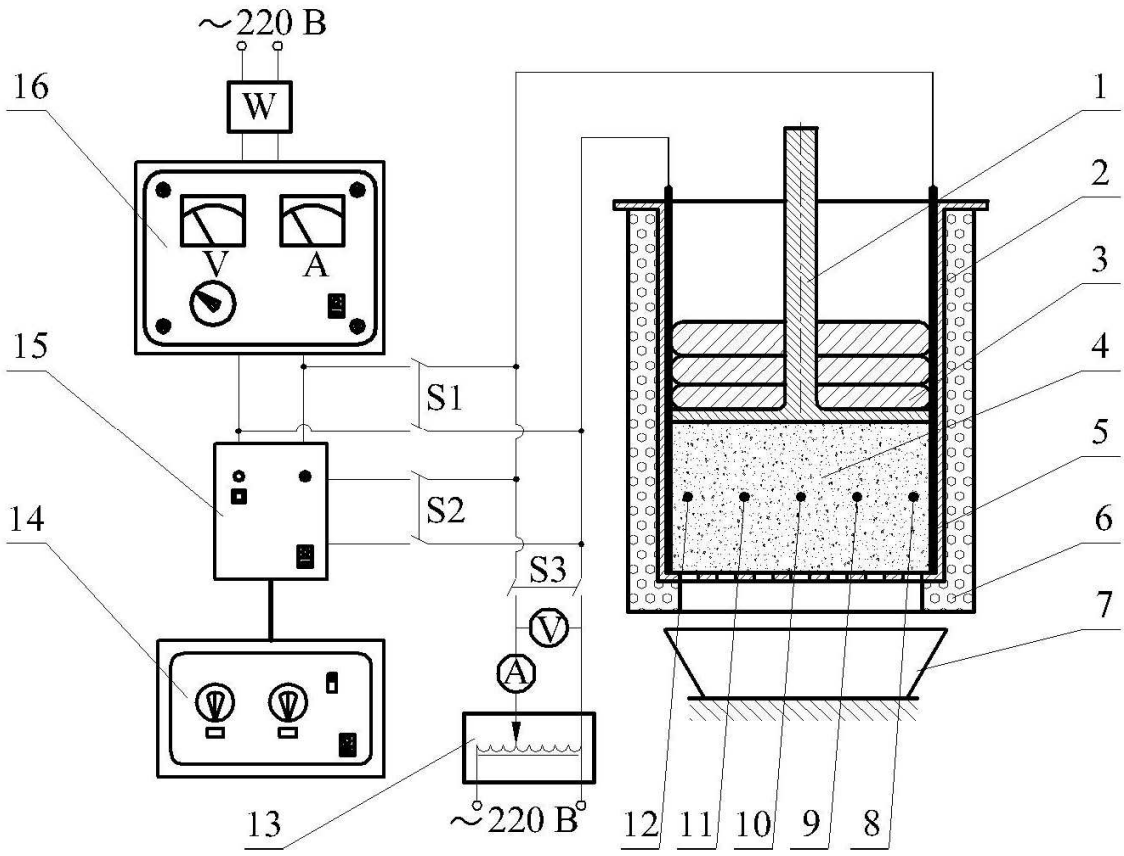


Рисунок 3.2 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження ЕКН: 1 – напрямна; 2 – робоча ємність; 3 – навантаження; 4 – зразок; 5 – електроди; 6 – теплоізолююче кільце; 7 – ємність для збирання рідини; 8–12 – ртутні термометри; 13 – лабораторний автотрансформатор; 14 – низькочастотний генератор сигналів; 15 – комутатор; 16 – випрямляч електричного струму; S1–S3 – вимикачі

II схема – ЕКН змінним струмом прямокутної форми. При цьому вмикають комутатор 15 та вимикач S2, вимикають S1 і S3. Із комутатора 15 електричний струм із частотою, заданою на низькочастотному генераторі сигналів 14, подається до електродів 5. Напругу та силу струму, як і в попередньому випадку, визначають приладами, умонтованими у випрямляч 16.

III схема – ЕКН змінним струмом синусоїдальної форми з частотою 50 Гц. При цьому вмикають вимикач S3, вимикають S1 і S2. Електричний струм із заданою напругою до електродів 5 подається від лабораторного автотрансформатора 13. До електричного кола для простеження за напругою та силою струму включені вольтметр та амперметр.

Для визначення потужності, що витрачається під час ЕКН в установці передбачено використання ватметра, що розташований на вході електричного струму з промислової мережі до силового випрямляча 16.

Методика дослідження є такою. У робочій ємності 2, що має теплоізолююче кільце 6, через розташований між електродами 5 зразок 4 пропускали електричний струм заданого типу, форми, частоти, напруги та сили струму, що викликало його нагрівання. При цьому рідина, яку під час ЕКН втрачав зразок 4, видалялась крізь отвори в робочій ємності 2 та збиралась в ємності 7.

Зміну температури та кулінарну готовність зразка 4 визначали за показаннями ртутного термометра 10, розташованого в центрі зразка 4, а під час досліджень зміни температурного поля в умовах ЕКН всередину зразка 4 додатково розміщували ще чотири термометри 8, 9, 11 та 12.

Напрямну 1 із навантаженням 3 використовували в ході дослідження впливу тиску на зразки під час ЕКН.

Досліджуючи температурне поле, використовували змінний електричний струм прямокутної форми (II схема), частота якого 50 Гц, напруга 40 В. Для фіксації зміни температури всередину зразка 4 вставляли п’ять ртутних термометрів на відстані 4 мм від лівого електрода та 13 мм між ними. Від початку ввімкнення установки температуру фіксували через кожні 90 с процесу.

Після отримання масиву даних значень температури дослід припиняли та обробляли одержані результати.

Під час дослідження впливу типу й форми електричного струму на кінетику ЕКН використовували постійний струм із напругою 40 В (I схема); змінний електричний струм із частотою 50 Гц і амплітудною напругою 40 В: прямокутної (II схема) та синусоїдальної форм (III схема).

ЕКН проводили з одночасним вимірюванням кожні 60 с сили струму (показання амперметра) та температури (показання ртутного термометра 10). Контроль за часом обробки здійснювали секундоміром. Похибка вимірювань не перевищувала 5%. Нагрівання припиняли в момент досягнення температури в центрі зразка 90° С.

За отриманими даними розраховували питому електропровідність та швидкість нагрівання. При цьому питому електропровідність $\sigma_{num.}$, що є величиною, зворотною до питомого електричного опору, визначали з виразу

$$\sigma_{пит.} = \frac{I}{U \cdot l}, \text{ (Ом·м)}^{-1}, \qquad (3.1)$$

де I – значення сили струму, А;

U – задане значення напруги, В;

l – лінійний розмір зразка, м.

Швидкість нагрівання визначали, як різницю між температурами t_2 і t_1, що вимірялись кожні 60 с, поділену на період нагрівання, тобто $\frac{t_2 - t_1}{60}$, °С/с.

Далі здійснювали апроксимацію результатів та будували відповідні кінетичні залежності.

Під час дослідження впливу частоти електричного струму на електропровідність та тривалість ЕКН використовували змінний електричний струм прямокутної форми (II схема), частоту якого задавали в інтервалі 0,1…300 Гц, напругу – 40 В.

ЕКН проводили під час вимірювання сили струму амперметром, секундоміром визначали тривалість процесу нагрівання в межах температур 20…90° С.

За отриманими даними зміни сили струму згідно з (3.1) розраховували питому електропровідність та її середнє значення:

$$\sigma_{с.пит.} = \frac{\sigma_{пит.1} + \sigma_{пит.2} + ...\sigma_{пит.k}}{k}, \text{ (Ом·м)}^{-1}. \qquad (3.2)$$

Для порівняння тривалості процесу за різної частоти визначалась відносна тривалість τ по відношенню до тривалості нагрівання з мінімальною частотою $\tau_{\nu_{мін}}$ за формулою

$$\tau = \frac{\tau_{\nu_{пот.}}}{\tau_{\nu_{мін.}}}, \text{ відн. од.}, \qquad (3.3)$$

де $\tau_{\nu_{пот.}}$ – значення тривалості процесу за поточної частоти, с.

Далі здійснювали апроксимацію результатів та будували залежності середньої електропровідності та відносної тривалості процесу від частоти.

Досліджуючи вплив напруги та сили струму на процес ЕКН, фіксували значення потужності нагрівання на ватметрі, причому в першому випадку підтримували постійне значення напруги, при цьому слідкували за силою струму на амперметрі; у другому – регулювали напругу таким чином, щоб сила струму залишалась постійною.

3.2 Експериментальна установка та методика дослідження комбінованого жарення з електроконтактним нагріванням

Експериментальні дослідження зміни температури напівфабрикатів та сили струму в комбінованих процесах жарення проводили на установці, яку показано на рис. 3.3. Вона складається з випрямляча електричного струму ВСА-5К 1, комутатора 2, блока управління поверхневого та ІЧ-нагрівання 3, низькочастотного генератора сигналів ГЗ-112/1 4, дисплея 5, діелектричного корпусу установки 6 та комп'ютера 7.

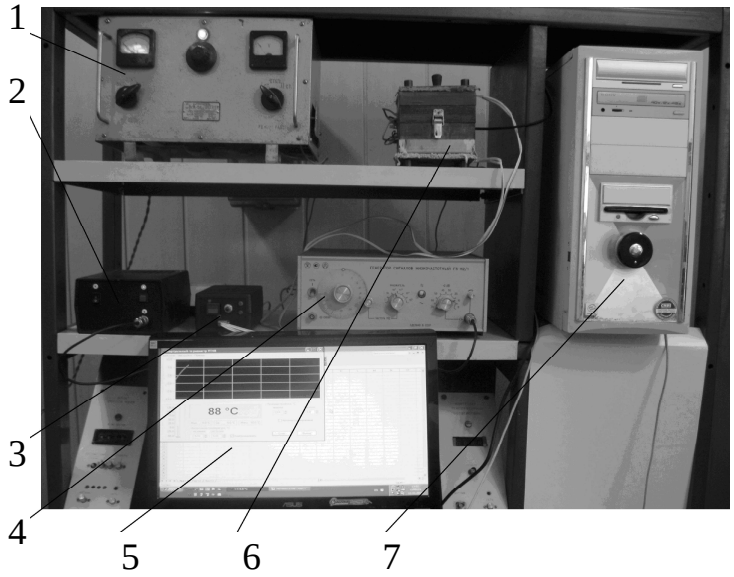


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд експериментальної установки для дослідження комбінованого жарення з ЕКН: 1 – випрямляч електричного струму ВСА-5К; 2 – комутатор; 3 – блок управління поверхневого та ІЧ-нагрівання; 4 – низькочастотний генератор сигналів ГЗ-112/1; 5 – дисплей комп'ютера; 6 – діелектричний корпус установки; 7 – комп'ютер

Відповідно до принципової схеми (рис. 3.4) експериментальна установка для дослідження комбінованого жарення з ЕКН складається з діелектричного корпусу 1, який вставляється в теплоізолюючий кожух 2. Корпус 1 має дві шарнірно закріплених (нижню та верхню) частини, що закриваються механічним затискувачем 3. У верхній частині закріплено відбивач 4 з ІЧ-нагрівачем 5, що контролюється блоком управління 6, та зроблено отвір для розміщення парового клапана 7. Під час закривання корпус утворює середовище для розміщення напівфабрикату 8, бічні стінки якого контактують із розташованими вертикально, паралельно один одному електродами 9 для підведення електричного струму від силового випрямляча 10 через комутатор 11 із частотою, заданою на низькочастотному генераторі сигналів 12. Випрямляч струму 10 має регулятор напруги, вольтметр і амперметр. Поверхневе нагрівання забезпечується за рахунок розташованого в нижній частині корпусу нагрівача 13 у вигляді тена й автоматичної подачі до нього напруги від джерела живлення блоком управління 6. Вмикання та вимикання подачі напруги до тена 13 відбувається залежно від температури на нагрівальній поверхні, що контролюється датчиком 14.

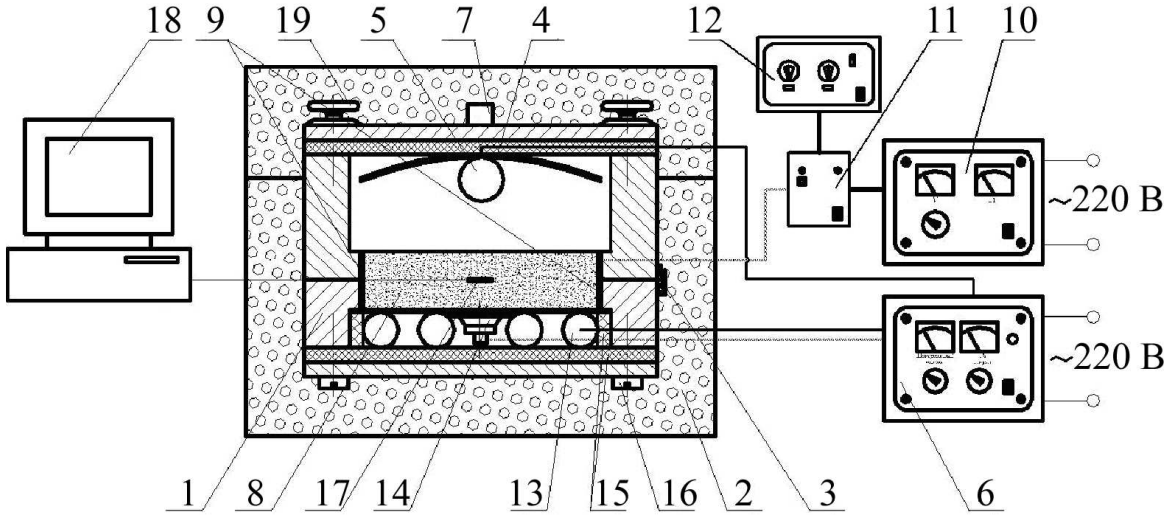


Рисунок 3.4 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження комбінованого жарення з ЕКН: 1 – діелектричний корпус; 2 – теплоізоляційний кожух; 3 – механічний затискач; 4 – відбивач; 5 – ІЧ-нагрівач; 6 – блок управління поверхневого та ІЧ-нагрівання; 7 – паровий клапан; 8 – напівфабрикат; 9 – електроди; 10 – силовий випрямляч; 11 – комутатор; 12 – низькочастотний генератор сигналів; 13 – ТЕН; 14, 17 – датчики температури; 15 – термостійкі прокладки; 16 – болтове з'єднання; 18 – комп'ютер із дисплеєм; 19 – ручка

Ділянки, де розташовані нагрівачі, теплоізольовано термостійкими прокладками 15 та закрито кришками за допомогою болтових з'єднань 16. Для визначення температури всередині продукту під час нагрівання використовується датчик температури 17, підключений через послідовний порт COM1 до комп'ютера 18. Кінетика температури фіксується програмою VT-48.exe на комп'ютері 18 та виводиться на його дисплей. Відкривання установки здійснюється після виймання корпусу 1 з теплоізолюючого кожуха 2 за допомогою ручок 19.

Методика дослідження є такою. За допомогою блока управління 6 установлювали потужність поверхневого та ІЧ-нагрівання. На генераторі 12 задавали частоту зміни електричного струму, а на силовому випрямлячі 10 – напругу ЕКН. Далі за допомогою тена 13 розігрівали робочу поверхню до температури жарення. Після цього напівфабрикат 8 поміщали в корпус 1, попередньо встановивши в середині датчик температури 17. Закритий корпус 1 розміщали в теплоізолюючому кожусі 2. На блоці управління 6 вмикали ІЧ-нагрівання та від силового випрямляча 10 через комутатор 11 подавали струм до електродів 9 для ЕКН. Кінетичні зміни температури всередині напівфабрикату фіксувалися на комп'ютері 18 та показувались на його дисплеї. Зміни сили струму спостерігали за показаннями амперметра. Час теплової обробки фіксували за допомогою секундоміра. У момент досягнення необхідної температури всередині виробу теплову обробку припиняли та, розкривши корпус, виймали готовий продукт.

3.3 Дослідження температурного поля під час електроконтактного нагрівання

Важливим недоліком теплової обробки харчових продуктів традиційними способами є значна нерівномірність температурного поля за об'ємом під час нагрівання, яка на різних стадіях процесу змінюється внаслідок невисокої теплопровідності харчових продуктів і досягає близько 40…50° С.

З метою встановлення розподілу температури за об'ємом було досліджено температурне поле зразків із натуральної січеної м'ясної маси (рецептура № 657 [94]) під час ЕКН змінним електричним струмом прямокутної форми частотою 50 Гц із напругою 40 В. Під час експерименту використовувались електроди з геометричними

розмірами 0,03×0,035 м, міжелектродна відстань складала $60 \cdot 10^{-3}$ м. За таких параметрів маса зразка була $63 \cdot 10^{-3}$ кг. Температуру фіксували через кожні 90 с процесу в п’яти точках (рис. 3.5): у приелектродному шарі (на відстані 4 мм від електрода) та далі, через кожні 13 мм за шириною зразка.

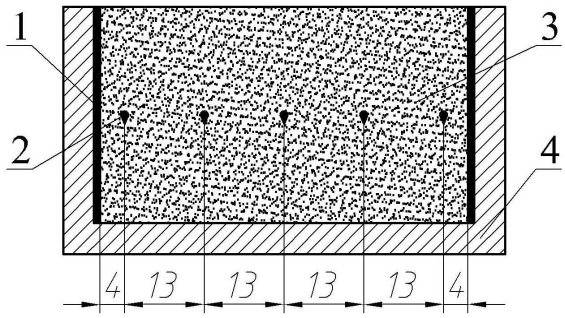


Рисунок 3.5 – Схема розміщення термометрів під час дослідження температурного поля в процесі ЕКН: 1 – електрод; 2 – термометри; 3 – зразок фаршу; 4 – робоча ємність

У результаті отримано криві розподілу температурного поля (рис. 3.6). Аналіз цих кривих свідчить про те, що вже через 90 с після початку нагрівання спостерігається деяка нерівномірність температурного поля в межах 3…6° С. При цьому відзначається більш висока температура в приелектродних шарах відносно всього іншого об’єму зразка. Через 180 с процесу така нерівномірність дещо збільшується і складає 4…7° С, а через 270 с – 7…9° С.

Різниця в температурі протилежних приелектродних шарів складає 2…3° С, тобто знаходиться в межах похибки експерименту. Більш висока температура, що спостерігається в приелектродних шарах, може пояснюватись нагріванням електродів під впливом електричного струму і передаванням теплоти від них до поверхні зразка шляхом теплопровідності.

Таким чином, під час ЕКН зразків із натуральної січеної м’ясної маси відзначається суттєве зменшення нерівномірності температурного поля за їх об’ємом порівняно з традиційними способами нагрівання, що складає не більше 7…9° С. При цьому дещо вища температура виникає в приелектродних шарах унаслідок нагрівання електродів під впливом електричного струму.

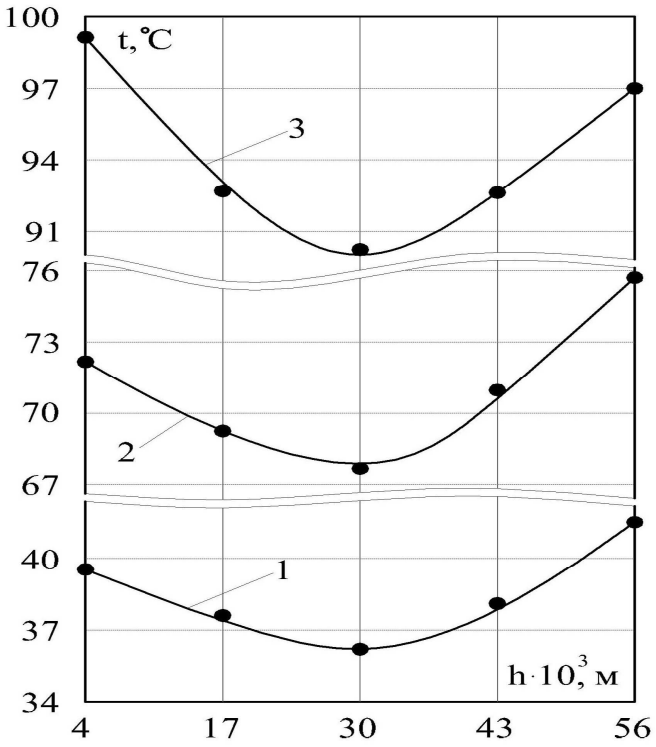


Рисунок 3.6 – Температурне поле під час ЕКН зразків із натуральної січеної м'ясної маси змінним електричним струмом прямокутної форми частотою 50 Гц із напругою 40 В у моменти часу від початку процесу: 1 – 90 с; 2 – 180 с; 3 – 270 с

3.4 Дослідження впливу типу й форми електричного струму на кінетику електроконтактного нагрівання

Для визначення впливу типу електричного струму і форми змінного струму на процес ЕКН було проведено експериментальні дослідження кінетики температури, швидкості нагрівання та зміни питомої електропровідності зразків із натуральної січеної м'ясної маси за вищевказаних геометричних параметрів. При цьому порівнювались процеси з такими електричними параметрами:

1-й варіант (контроль) – струм постійний із напругою 40 В;

2-й варіант (дослід) – струм змінний із частотою 50 Гц:

– синусоїдальної форми з амплітудною напругою 40 В (діюча напруга згідно з виразом (2.19) дорівнює 28 В);

– прямокутної форми з амплітудною напругою 40 В (діюча напруга дорівнює амплітудній).

З отриманих залежностей кінетики температури (рис. 3.7) видно, що характер кривих для всіх випадків є однаковим, але при цьому

нагрівання змінним струмом прямокутної форми відбувається набагато ефективніше порівняно з використанням постійного струму. Тривалість нагрівання від 20 до 90° С скорочується приблизно в 3,3…3,5 рази.

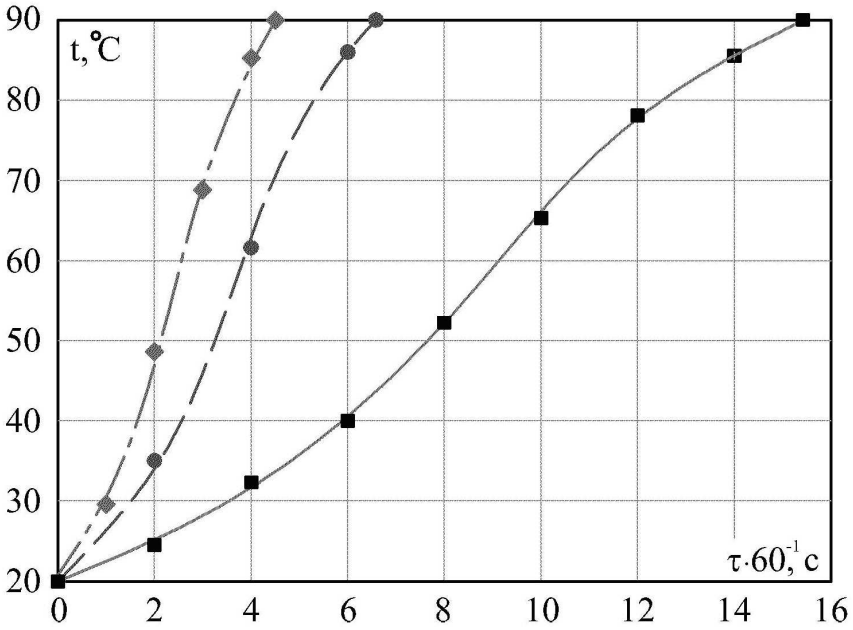


Рисунок 3.7 – Кінетика температури під час ЕКН зразків із натуральної січеної м'ясної маси: – постійний струм з напругою 40 В; змінний струм із частотою 50 Гц і амплітудною напругою 40 В (– синусоїдальної форми; – прямокутної форми)

Порівняльний аналіз нагрівання дослідних зразків свідчить про інтенсивнішу зміну температури в разі використання струму прямокутної форми порівняно зі струмом синусоїдальної форми за однакової амплітудної напруги. Так, тривалість досягнення температури 90° С в першому випадку складає 270 с, у другому – 390 с, тобто відзначається скорочення тривалості процесу на 30…32%.

Швидкість нагрівання (рис. 3.8) у процесі ЕКН із часом змінюється. На початку вона є мінімальною, а надалі з часом зростає до максимального значення та починає знижуватись. При цьому встановлено, що максимум швидкості відповідає температурам, близьким до 65…75° С, що є температурами завершення денатураційних процесів білкової складової напівфабрикату. Слід відзначити, що для контрольного зразка максимальна швидкість зміни температури спостерігається на 9…11 хв процесу і складає

лише 0,10…0,12° С/с. Для дослідних зразків максимальна швидкість зміни температури за синусоїдального струму складає 0,23…0,27° С/с на 3…5 хв процесу, за прямокутного – 0,34…0,37° С/с приблизно на 3-й хв процесу.

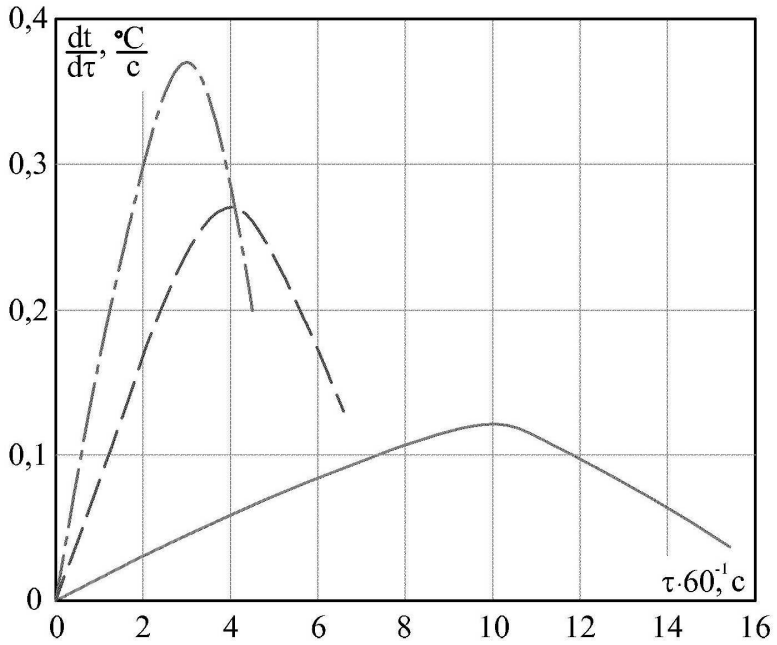


Рисунок 3.8 – Швидкість процесу ЕКН зразків із натуральної січеної м'ясної маси: ——— – постійний струм із напругою 40 В; змінний струм з частотою 50 Гц і амплітудною напругою 40 В: — — — – синусоїдальної форми; – · – · – – прямокутної форми

Відзначені відмінності кінетики нагрівання за умов постійного та змінного струму пояснюються характером зміни питомої електропровідності зразків (рис. 3.9). При змінному струмі синусоїдальної та прямокутної форм волога здійснює коливальні рухи, чим забезпечується рівномірний характер розподілу за об'ємом зразка, що дає можливість проходження струму. Зі зростанням температури питома електропровідність від початкового значення 0,76 $(Ом·м)^{-1}$ збільшується до 3…3,4 $(Ом·м)^{-1}$, після чого внаслідок денатураційних змін знижується й наприкінці процесу складає 2,7…2,8 $(Ом·м)^{-1}$. При цьому найбільшій швидкості процесу відповідає максимальне значення питомої електропровідності. Отже, чим більша електропровідність, тим більша швидкість перебігу ЕКН.

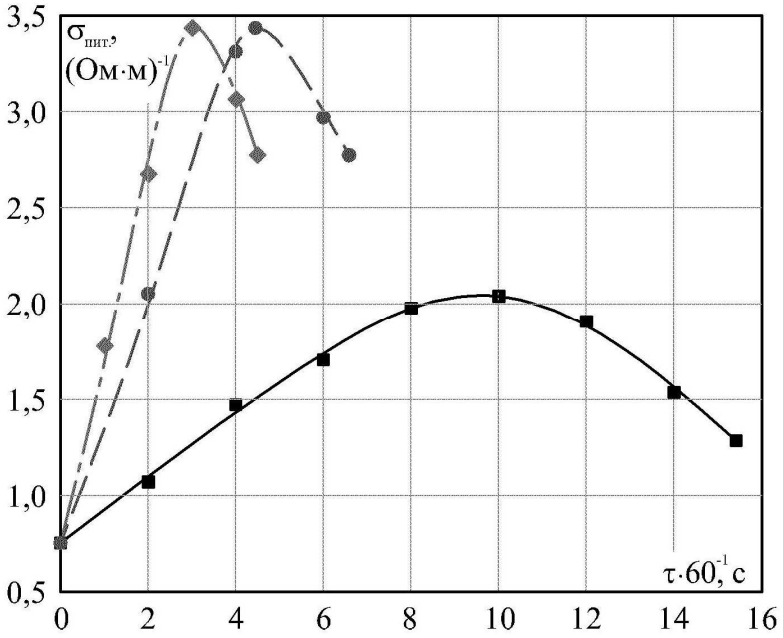


Рисунок 3.9 – Кінетика питомої електропровідності в процесі ЕКН зразків із натуральної січеної м'ясної маси: ▬■▬ – постійний струм із напругою 40 В; змінний струм із частотою 50 Гц і амплітудною напругою 40 В: ─●─ – синусоїдальної форми; ╌·✦·╌ – прямокутної форми

У той же час у контрольного зразка на початку процесу спостерігаються нижчі значення питомої електропровідності. Це можна пояснити тим, що за постійного струму відбувається явище електроосмосу й рідинна складова зразка рухається в одному напрямі. Це призводить до зневоднення однієї частини зразка та зволоження іншої. У результаті з'являється перепона для проходження електричного струму у вигляді зневоднених шарів. Надалі зростання питомої електропровідності відбувається до максимального значення близько 2 $(Ом·м)^{-1}$, що відповідає температурі зразка 66° С, після чого питома електропровідність починає зменшуватись.

Таким чином, проведеними дослідженнями кінетики температури, швидкості нагрівання та питомої електропровідності зразків із натуральної січеної м'ясної маси під час ЕКН установлено, що за умов застосування змінного електричного струму прямокутної форми процес нагрівання відбувається більш інтенсивно. Порівняно з нагріванням постійним струмом, тривалість нагрівання від 20 до 90° С скорочується приблизно в 3,3…3,5 рази, а з нагріванням під впливом змінного струму синусоїдальної форми процес скорочується на 30…32%. Швидкість ЕКН визначається змінами питомої електропровідності зразка, значення якої є більшими за умов використання змінного електричного струму.

3.5 Визначення впливу частоти електричного струму на питому електропровідність та тривалість електроконтактного нагрівання

Із метою визначення раціональної частоти електричного струму прямокутної форми проведено дослідження зміни середньої питомої електропровідності зразків та тривалості ЕКН. При цьому застосовували діапазон низьких (від 0,1 до 60 Гц) та високих частот в інтервалі 100...300 Гц за напруги 40 В.

За результатами дослідження отримано залежність зміни середньої питомої електропровідності зразків із натуральної січеної м'ясної маси від частоти електричного струму (рис. 3.10). Аналіз цієї залежності показав, що в інтервалі частот від 0,1 до 1 Гц із підвищенням частоти спостерігається несуттєве збільшення середньої питомої електропровідності зразка від 1,92 до 1,95·(Ом·м)$^{-1}$. В інтервалі частот 2…10 Гц спостерігається подальше збільшення середньої питомої електропровідності зразка до 2,11 (Ом·м)$^{-1}$, тобто на 8,2%. Надалі збільшення частоти в межах 10…40 Гц приводить до збільшення середньої питомої електропровідності до 2,48 (Ом·м)$^{-1}$, тобто ще на 17,5%. В інтервалі частот 40…50 Гц середня питома електропровідність змінюється несуттєво і досягає значення 2,5 (Ом·м)$^{-1}$. Подальші дослідження впливу частоти електричного струму на середню питому електропровідність зразка показали, що збільшення частоти в інтервалі 100…300 Гц не впливає на її зміну, надалі вона залишається постійною. Таким чином, збільшення частоти електричного струму від 0,1 до 40…60 Гц дає можливість підвищити середню питому електропровідність зразка приблизно на 29…30%.

Посилаючись на формулу (1.18), можна стверджувати, що зміна питомої електропровідності зразка впливає на тривалість теплової обробки. У зв'язку з цим були проведені експериментальні дослідження з визначення зміни тривалості процесу ЕКН зразків із натуральної січеної м'ясної маси залежно від частоти електричного струму.

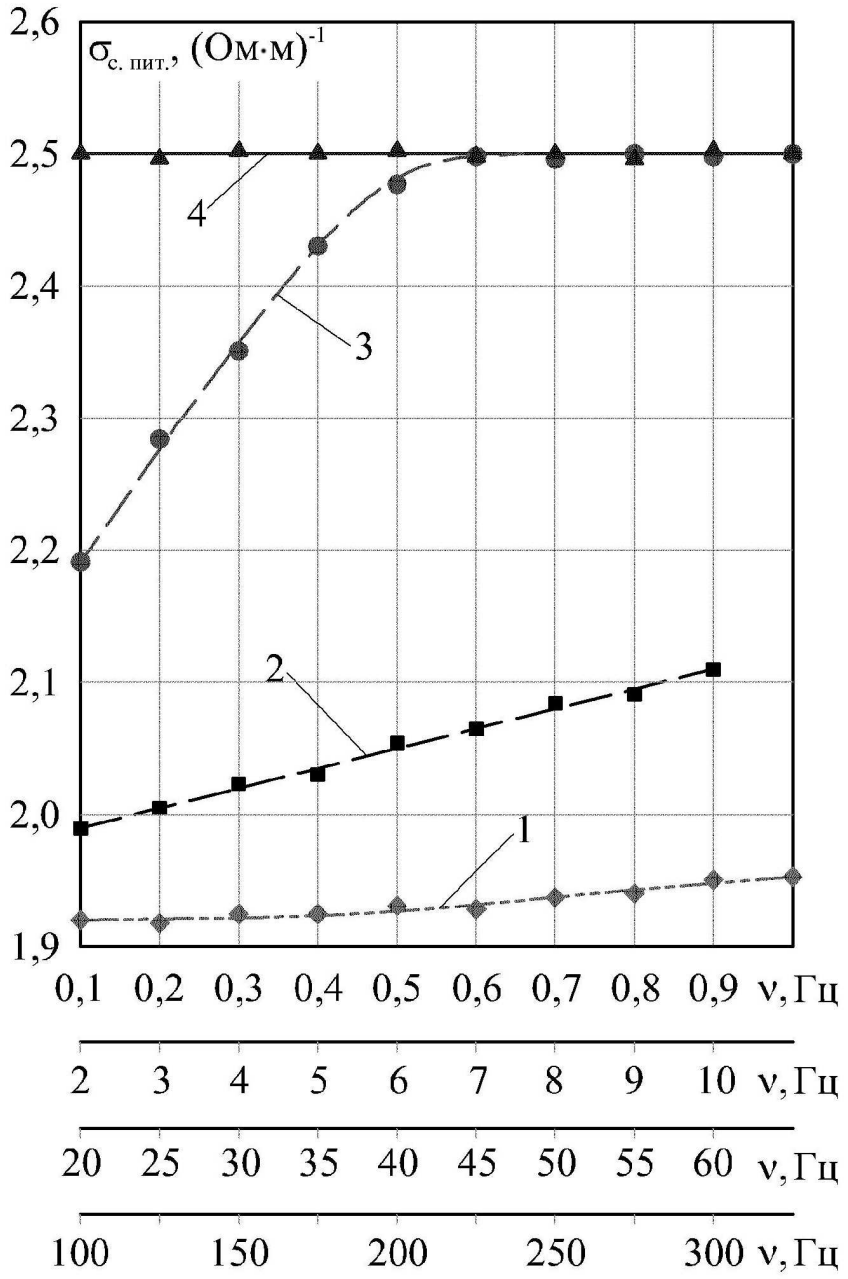


Рисунок 3.10 – Залежності зміни середньої питомої електропровідності зразків із натуральної січеної м'ясної маси від частоти електричного струму в інтервалах: 1 – 0,1…1 Гц; 2 – 2…10 Гц; 3 – 20…60 Гц; 4 – 100…300 Гц

На рис. 3.11 наведено залежності відносної тривалості ЕКН від нагрівання з частотою 0,1 Гц, при якій тривалість нагрівання від 20 до 90° С мала максимальне значення – 9,5·60 с. Аналіз результатів дослідження свідчить про те, що в діапазоні низьких частот із підвищенням частоти відбувається поступове зменшення тривалості нагрівання. Так, в інтервалі від 0,1 до 1 Гц тривалість нагрівання в досліджуваному температурному інтервалі зменшується до 10%, а в

разі подальшого збільшення частоти від 1 до 10 Гц тривалість зменшується ще на 30%. Збільшення частоти від 10 до 40 Гц також приводить до зниження тривалості до 10%. За частоти 40…60 Гц спостерігається зменшення тривалості процесу нагрівання лише на 3…4%, а подальше збільшення частоти до 300 Гц практично не впливає на цей показник.

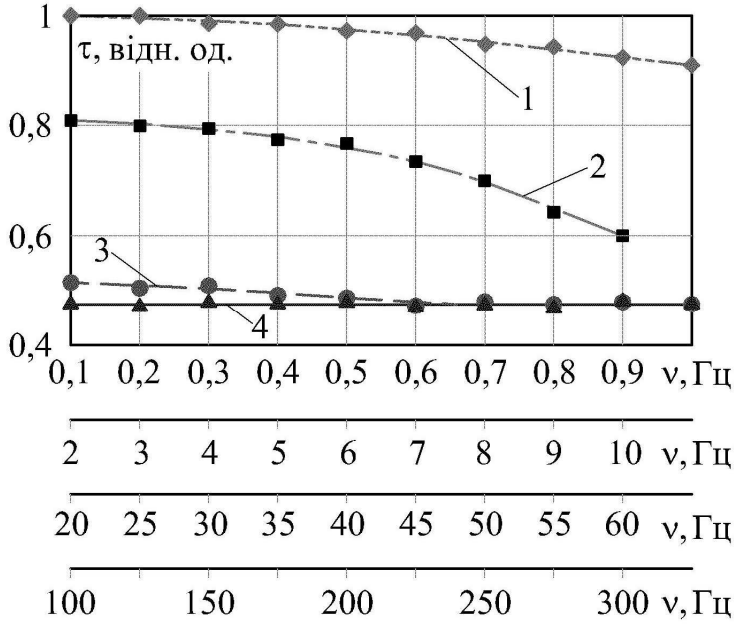


Рисунок 3.11 – Залежності зміни тривалості процесу ЕКН зразків із натуральної січеної м'ясної маси від частоти електричного струму: 1 – 0,1…1 Гц; 2 – 2…10 Гц; 3 – 20…60 Гц; 4 – 100…300 Гц

Таким чином, збільшення частоти електричного струму від 0,1 до 40…60 Гц дає можливість скоротити тривалість ЕКН приблизно на 53…54%. На нашу думку, це зумовлено такими причинами. По-перше, унаслідок особливостей руху рідини в умовах низьких значень частоти спостерігається нерівномірний її розподіл за об'ємом зразка. Але з підвищенням частоти розподіл вологи стає більш рівномірним, що покращує електропровідні властивості. По-друге, за низької частоти струм в основному проходить у позаклітинному середовищі, а мембрани клітин виконують функції ізолюючих шарів. Підвищення частоти зменшує опір мембран, унаслідок чого збільшується сила струму. Як наслідок, середня питома електропровідність збільшується, а отже, процес нагрівання відбувається інтенсивніше.

3.6 Дослідження впливу типу, форми та частоти електричного струму на вихід продукції та кінетику маси під час електроконтактного нагрівання

Одним із важливих показників, який характеризує ефективність технологічних процесів теплової обробки, є вихід продукції, що залежить від втрати вологи та жиру. Разом із вологою продукт втрачає низку цінних компонентів (мінеральні речовини, вітаміни та ін.), що спричиняє погіршення якості готового виробу.

Оскільки при ЕКН змінюється тривалість процесу залежно від типу, форми та частоти електричного струму, важливо було дослідити вплив цих параметрів на кінетику маси й вихід продукції. Із цією метою використовувались зразки з натуральної січеної м'ясної сировини, початкова маса яких складала $63 \cdot 10^{-3}$ кг. Загальна тривалість теплової обробки відповідала часу нагрівання зразків від 20 до 90° С за напруги електричного струму 40 В. При цьому застосовували постійний і змінний струми синусоїдальної та прямокутної форм.

За результатами експериментальних досліджень на рис. 3.12 побудовано діаграму виходу продукції та динаміки зміни маси за умов ЕКН зразків із натуральної січеної м'ясної маси постійним струмом (контроль) та змінним в умовах частот 5, 10, 20, 30…50 Гц (дослід).

Згідно з діаграмою виходу готової продукції, отриманої шляхом ЕКН, випливає, що за умов використання постійного електричного струму вихід складає близько 76%, а в разі використання змінного струму прямокутної і синусоїдальної форм із частотою 50 Гц помітної розбіжності не встановлено та вихід в обох випадках складає 89%.

За кінетикою маси зразків відзначається, що в контрольного зразка маса змінюється досить інтенсивно протягом перших 240…300 с. Це зумовлено односпрямованим рухом рідини під дією електроосмосу до однієї з поверхонь зразка та її виділенням. Із часом швидкість зміни маси зменшується і до закінчення процесу термообробки залишається постійною. Під час ЕКН дослідних зразків електричним струмом відзначається, що на початку процесу (до 60 с) втрати маси є незначними, а надалі вони зростають – в інтервалі частот від 5 до 20 Гц вихід продукції складає 85…87%, а в інтервалі частот 30…50 Гц – до 89%.

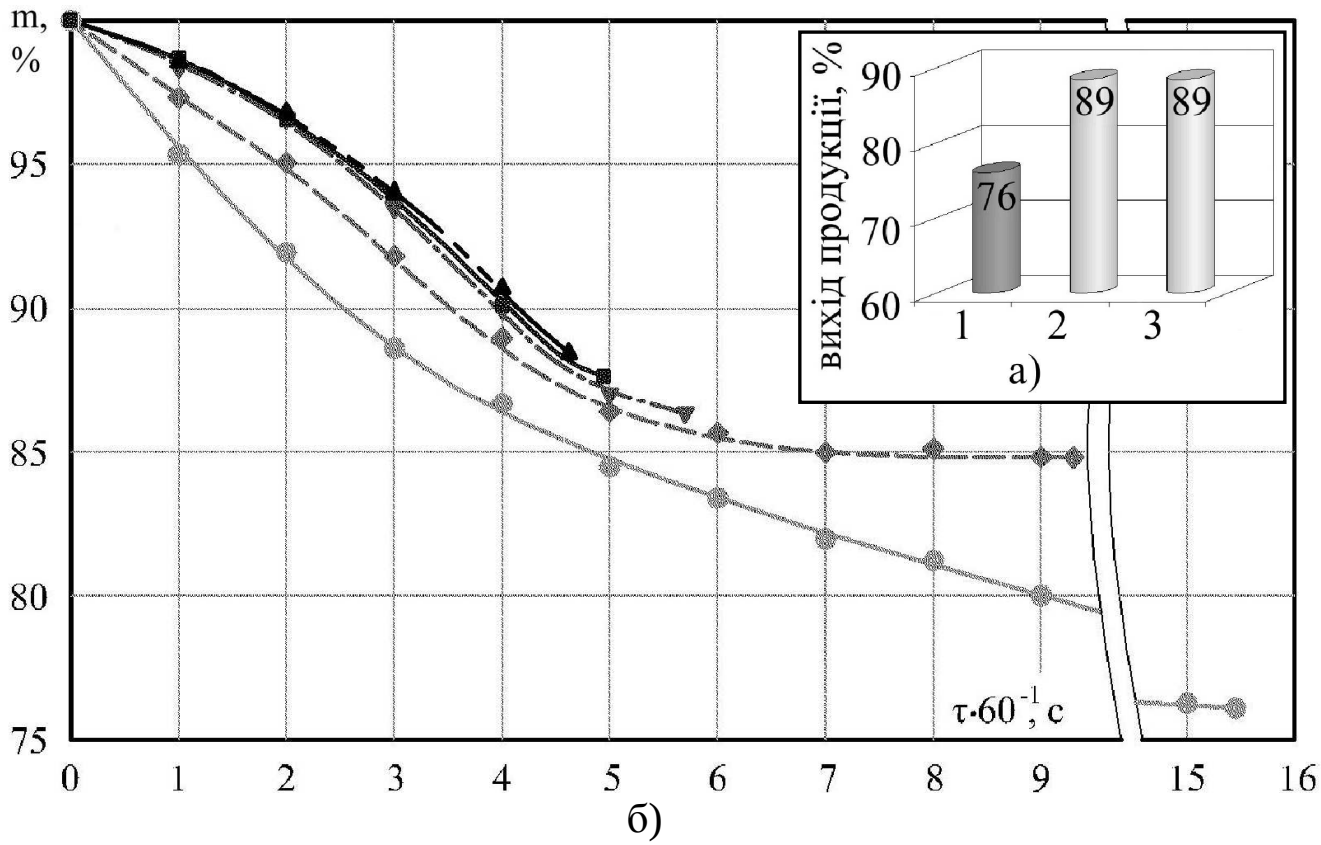


Рисунок 3.12 – Діаграма виходу продукції (а): 1 – постійний струм, 2 і 3 – змінний струм із частотою 50 Гц, відповідно синусоїдальної та прямокутної форм; кінетика маси (б): – постійний струм, змінний струм із частотами: – 5 Гц; – 10 Гц; – 20 Гц; – 30…50 Гц (ЕКН зразків із натуральної січеної м'ясної маси електричним струмом із напругою 40 В)

У цілому ж відзначається підвищення виходу продукції на 9…13% в умовах ЕКН змінним електричним струмом відносно ЕКН постійним струмом. Це можна пояснити тим, що за умов змінного струму волога в продукті здійснює не однонаправлені, а коливальні рухи за рахунок періодичної зміни напряму струму, тому стримується потік вологи до поверхні. Збільшення частоти струму в межах від 5 до 50 Гц приводить до підвищення виходу в межах 4%, що пояснюється зменшенням амплітуди коливань частинок вологи в разі підвищення частоти електричного струму.

Таким чином, можна зробити висновок про доцільність використання змінного електричного струму з частотою в інтервалі 30…50 Гц, за якої втрати маси є мінімальними, а вихід продукції складає близько 89%.

3.7 Дослідження кінетики сили струму, напруги, потужності та температури під час електроконтактного нагрівання

Здійснення процесу ЕКН можливе двома способами: за постійної напруги та за постійного значення сили струму. У першому випадку задається значення напруги та залежно від електропровідності зразка, що є непостійною в процесі нагрівання, сила струму змінюється. У другому випадку, навпаки, задається сила струму, але при цьому виникає необхідність постійного регулювання напруги.

Під час експерименту зразки з натуральної січеної м'ясної маси нагрівали змінним електричним струмом прямокутної форми з частотою 50 Гц. При цьому визначали зміну сили електричного струму за напруги 40 В (1-й спосіб), зміну напруги за незмінної сили струму 1,7 А (2-й спосіб) та зміну потужності нагрівання. При цьому тривалість нагрівання від 20 до 90° С складає 270 с.

За даними рис. 3.13 установлено, що за умови нагрівання зразків 1-м способом протягом перших 120 с від початку процесу спостерігається суттєве лінійне зростання сили струму від 0,6 до 2,0 А, тобто в 3,5 рази, а також потужності нагрівання – від 24 до 80 Вт. Протягом подальших 60 с швидкість зростання сили струму зменшується. Відзначається, що на 180 с процесу сила струму досягає максимального значення 2,4 А, що відповідає потужності 90 Вт, після чого починає зменшуватись і наприкінці досліджуваного процесу сила струму складає 1,7 А, а потужність – 70 Вт.

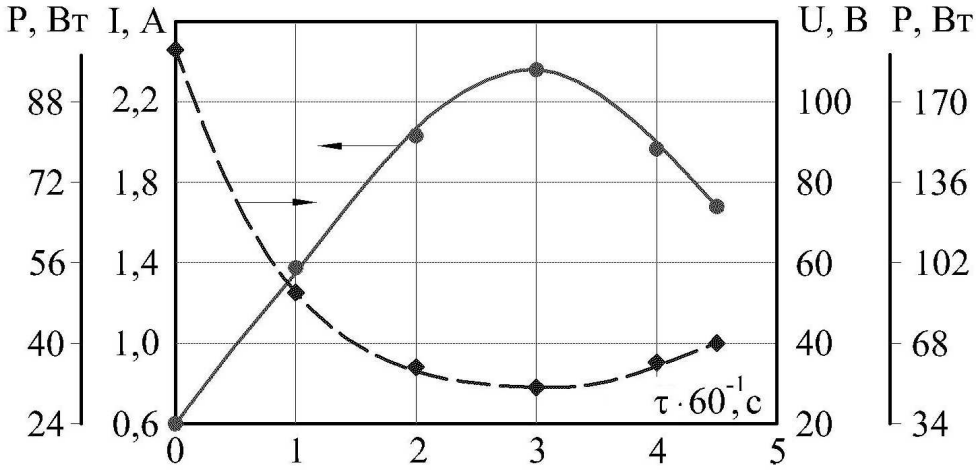


Рисунок 3.13 – Кінетика сили струму, напруги та потужності під час ЕКН: —●— – сила струму та потужність (за постійної напруги 40 В); – ♦ – – – напруга та потужність (за постійної сили струму 1,7 А)

Дослідження кінетики напруги за постійної сили струму (2-й спосіб) проведено при 1,7 А, що відповідає середньому значенню протягом досліджуваного періоду за 1-м способом. При цьому значенні тривалість нагрівання зразка в межах досліджуваного діапазону температур також складає близько 270 с. Проте було відзначено, що для підтримання заданої сили струму напруга на початку процесу складала 110 В, що майже в 2,8 разу вище, ніж за умов реалізації 1-го способу. При цьому потужність нагрівання складала 190 Вт. Далі протягом перших 120 с напруга та потужність поступово зменшувалися, відповідно до 33 В та 55 Вт, після чого протягом подальших 120 с напруга підтримувалась у межах 29…34 В, що відповідало потужності 50…60 Вт, а наприкінці процесу напруга збільшилась до 40 В, а потужність – до 68 Вт.

Характер отриманих залежностей зумовлений зміною електропровідних властивостей зразків під впливом зростання температури. Ураховуючи збільшення електропровідності зразка з підвищенням температури на початковій стадії, за умов реалізації 1-го способу (за постійної напруги) спостерігається зростання сили струму і потужності нагрівання, а в разі реалізації 2-го способу (за постійної сили струму) відбувається зменшення напруги й потужності нагрівання. Зменшення електропровідності зразка, що відбувається в разі досягнення температури 65…75° С, приводить до зворотних результатів.

На наш погляд, простішим для реалізації є 1-й спосіб, бо при цьому задається конкретне значення напруги, яке може бути в межах, регламентованих вимогами техніки безпеки (до 42 В), та не виникає необхідності постійного регулювання напруги протягом процесу. В умовах 2-го способу початкове значення напруги складало 110 В, що з точки зору безпечності є недоцільним. Окрім того, підтримання постійної сили струму вимагає технічного ускладнення за рахунок використання стабілізатора струму.

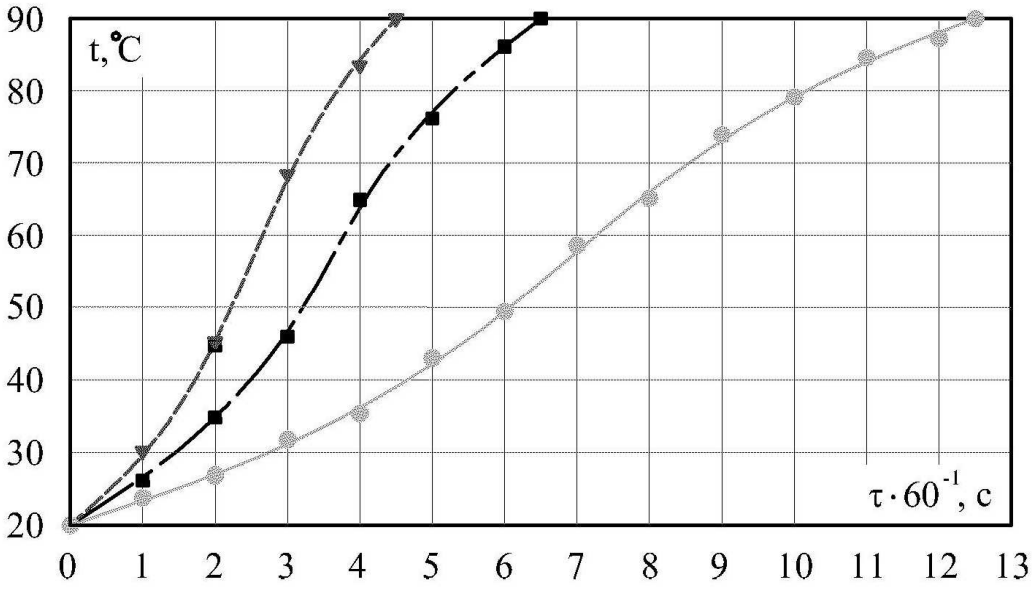
Слід додати, що використання ЕКН за 2-м способом у комбінованих процесах смаження та запікання кулінарної продукції є менш раціональним. Це пояснюється тим, що досить висока потужність ЕКН на початку процесу зумовить інтенсивне нагрівання зразка і, відповідно, перебіг масообмінних процесів – перенесення вологи та жиру до поверхні зразка і вихід їх назовні. У випадку ж використання 1-го способу потужність нагрівання на початковій

стадії невелика, тому складові зразка суттєво не змінюються і масообмінні процеси відбуваються повільно. Подальше поступове збільшення потужності нагрівання зумовить відповідне пришвидшення масообміну. Якщо такий спосіб буде застосовуватися в комбінації з високотемпературним поверхневим нагріванням іншими способами, то властивості поверхневих шарів за короткий час можуть суттєво змінитися та створити опір виходу вологи та жиру на подальшій стадії, коли під впливом зростаючої потужності ЕКН пришвидшується масоперенесення всередині виробу.

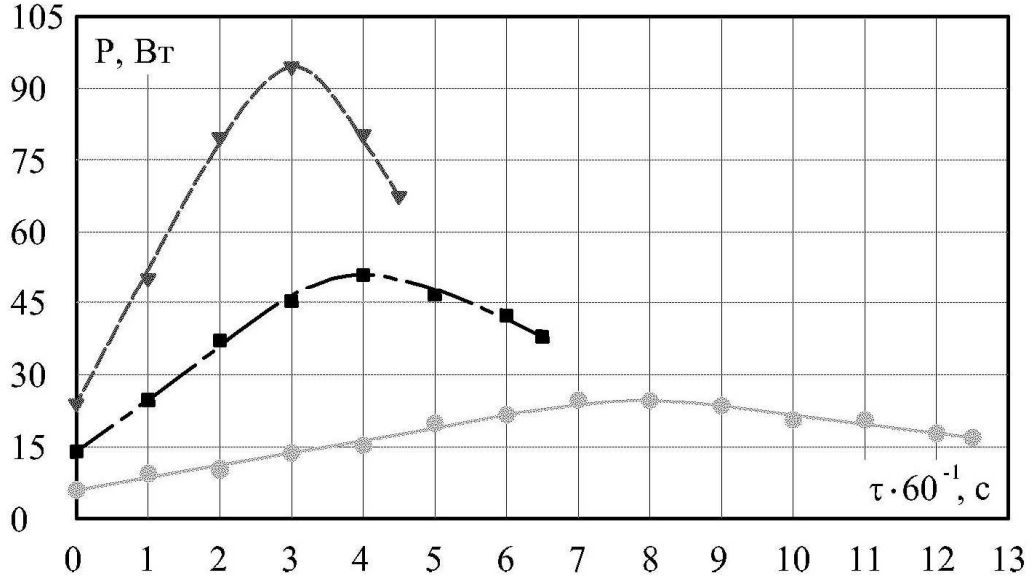
Для обраного способу ЕКН за постійної напруги змінного електричного струму доцільно отримати дані щодо впливу напруги на кінетику температури зразків та потужності нагрівання. Такі дослідження проводились в умовах ЕКН у межах температурного інтервалу від 20 до 90° С зразків із натуральної січеної м'ясної маси змінним електричним струмом прямокутної форми частотою 50 Гц та напругою від 20 до 40 В (рис. 3.14).

На отриманих кінетичних залежностях за критичними точками перегину визначаються характерні етапи початкового періоду прогрівання, зростаючої та убувальної швидкості нагрівання. Так, наприклад, спостерігається завершення періоду зростаючої швидкості нагрівання при 20 В – через 400 с процесу, що відповідає максимальному значенню потужності 25 Вт. При 30 В завершення цього періоду спостерігається через 240 с, що відповідає потужності 50 Вт, а при 40 В – через 180 с за потужності 95 Вт.

Відзначено, що тривалість нагрівання зразків до температури 90º С електричним струмом із напругою 40 В у 1,4 разу менша відносно нагрівання при 30 В та в 2,7 разу – відносно нагрівання при 20 В. Це зумовлено відповідним збільшенням потужності. Такі дані свідчать про інтенсифікацію процесу ЕКН зразків за умов підвищення напруги. Також слід зазначити, що підвищення напруги вище 40…42 В є недоцільним із точки зору безпечності. Для використання ЕКН у комбінованих процесах жарення, коли енергія ЕКН витрачається переважно на нагрівання внутрішніх шарів виробу, необхідним є визначення раціональних значень напруги для конкретних видів продукції з урахуванням прогнозованих змін температурного поля за об'ємом продукту.



а)



б)

Рисунок 3.14 – Кінетика температури (а) та потужності нагрівання (б) у процесі ЕКН зразків із натуральної січеної м'ясної маси струмом прямокутної форми з частотою 50 Гц та напругою: – 40 В; – 30 В; – 20 В

3.8 Визначення впливу компонентного складу та температури зразків на питому електропровідність

Кулінарні вироби виготовляють відповідно до складених рецептур, отже, вони мають різний компонентний склад, а в разі використання однакових компонентів їх співвідношення зазвичай різниться. Це зумовлює відмінність електропровідних властивостей. Для визначення впливу компонентного складу на питому

електропровідність кулінарної продукції було проведено дослідження ЕКН зразків січених виробів (зі співвідношенням компонентів за рецептурою):

– із натуральної січеної м'ясної маси (рецептура 657 [94]): баранина – 77,6%; жир – 11,6%; вода – 9,6%; сіль – 1,2%;

– котлет «Особливих» (рецептура 659 [94]): яловичина – 45,1%; хліб – 12,3%; свинина – 17,6%; вода – 15,9%; сухарі – 7,9%; сіль – 1,2%;

– котлет «Московських» (рецептура 660 [94]): яловичина – 50%; хліб – 14,0%; жир – 8,9%; вода – 20,8%; цибуля – 1,2%; сухарі – 4%; перець – 0,1%; сіль – 1,2%;

– котлет «Домашніх» (рецептура 661 [94]): яловичина – 36%; цибуля – 2%; свинина – 24,3%; хліб – 13%; жир – 2%; вода – 20%; перець – 0,1%; сухарі – 4%; яйця – 1%; сіль – 1,2%.

Дослідження проводили під час ЕКН змінним електричним струмом прямокутної форми з амплітудною напругою 40 В та частотою 50 Гц. Визначали зміну електропровідності залежно від температури в інтервалі 20…90º С (рис. 3.15).

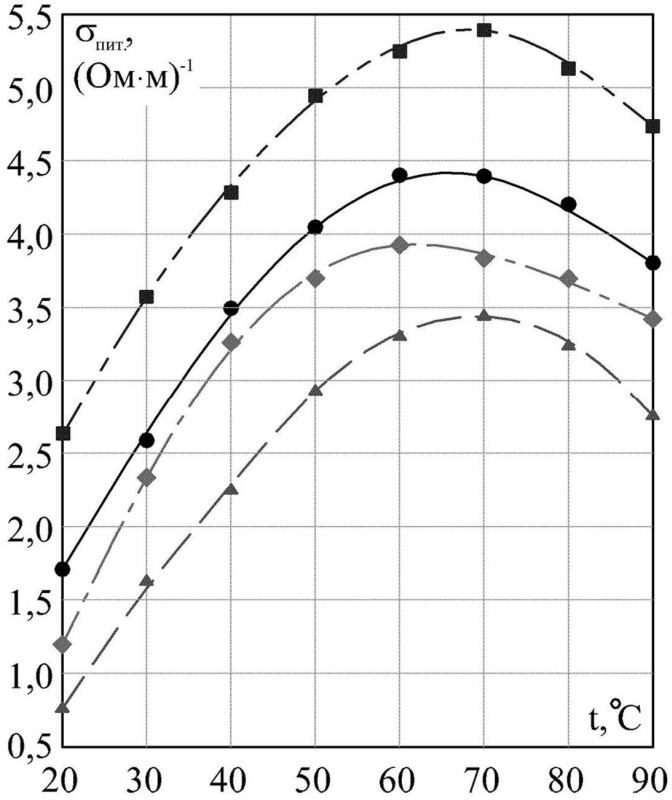


Рисунок 3.15 – Зміна питомої електропровідності зразків січених виробів в інтервалі температур 20…90° С: —▲·– – із натуральної січеної м'ясної маси; – – ■ – котлет «Особливих»; _ ♦ _ – котлет «Московських»; ●– котлет «Домашніх»

Аналіз побудованих кривих свідчить про однакову тенденцію зростання питомої електропровідності в межах температури від 20 до 60…70º С, після чого спостерігається її зменшення. Такий характер зміни електропровідності можна пояснити пожвавленням руху іонів під час зростання температури. Із подальшим зростанням температури відбувається денатурація білкової складової, між діелектриками та розсолом у фарші виникає обмінна дифузія. Це приводить до перерозподілу солі та вологи і, ймовірно, до зменшення електропровідності в температурному діапазоні 60…90º С.

У табл. 3.1 наведено середні значення питомої електропровідності досліджуваних зразків. Серед них найменше значення електропровідності мають зразки з натуральної січеної м'ясної маси – 2,5 $(Ом·м)^{-1}$, для інших зразків середня питома електропровідність має дещо більші значення й змінюється в межах 3,2…4,5 $(Ом·м)^{-1}$.

Таблиця 3.1 – **Середня питома електропровідність зразків січених виробів (ЕКН від 20 до 90º С)**

Січений виріб	**Середня питома електропровідність, $\sigma_{с.пит.}$, $(Ом·м)^{-1}$**
Котлети «Особливі»	4,5
Котлети «Домашні»	3,6
Котлети «Московські»	3,2
Із натуральної січеної м'ясної маси	2,5

Таким чином, електропровідність різних за складом зразків кулінарної продукції може значно відрізнятися, що, імовірно, залежить від складових компонентів та їх кількості. На підтвердження цього було проведено дослідження впливу додавання до зразків, виготовлених на основі січеної яловичини, різної кількості таких компонентів, як жир, вода та водяний розчин NaCl. Отримані залежності зміни середньої питомої електропровідності наведено на рис. 3.16.

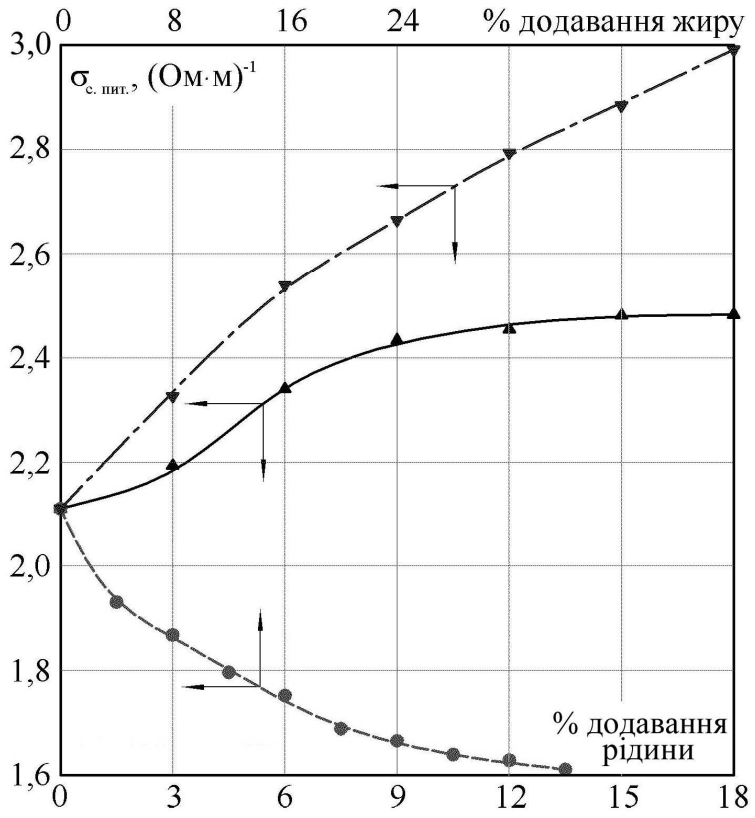


Рисунок 3.16 – Залежності середньої питомої електропровідності зразків січеної яловичини під час ЕКН змінним струмом прямокутної форми з частотою 50 Гц та напругою 40 В: —●— – із додаванням жиру; —▲— – із додаванням води; —▼— – із додаванням 15 %-го водяного розчину NaCl

Установлено зменшення електропровідності під час додавання жиру. Із графіка видно, що навіть додавання 4% жиру зменшує електропровідність на 9%. Подальше збільшення кількості жиру до 10…15% знижує електропровідність приблизно на 17…19%, а додавання 25…35% жиру – на 23…25%.

Додавання води в подрібнений фарш дещо підвищує його середню питому електропровідність, що спостерігається в разі збільшення кількості води в межах 3…12%. При цьому середня питома електропровідність збільшується на 0,07…0,35 $(Ом·м)^{-1}$, тобто максимум на 17%. Таке несуттєве підвищення електропровідності, імовірно, пояснюється тим, що кількість іонів у воді, порівняно з солоною водою, незначна. За цих умов зростання електропровідності відбувається лише за рахунок зміцнення електропровідних шляхів, що забезпечує рідина. Надалі в разі збільшення кількості води в фарші до 18% зростання електропровідності несуттєве, бо зразок

перенасичується вологою, в якій вільно рухається майже однакова кількість іонів солей.

Подібна тенденція до зростання середньої питомої електропровідності спостерігається за умов додавання до фаршу водяного розчину кухонної солі. Однак у цьому випадку зростання електропровідності є більш інтенсивним та рівномірним. Відзначається, що додавання 15%-го водяного розчину NaCl у кількості 3% відносно маси фаршу збільшує його середню питому електропровідність з 2,11 до 2,33 $(Ом·м)^{-1}$, тобто на 10%, а додавання 18% – майже до 3 $(Ом·м)^{-1}$, тобто на 42%, що пояснюється збільшенням кількості іонів.

Таким чином, експериментальними дослідженнями доведено, що електропровідність фаршів залежить від температури та компонентного складу напівфабрикатів. Відзначено, що під час підвищення температури до 60…70º С середня питома електропровідність збільшується, а під час подальшого нагрівання до 90º С – зменшується. Додавання жиру приводить до зменшення середньої питомої електропровідності, а води та водяного розчину NaCl – до її збільшення, причому більш суттєвого для останнього випадку.

3.9 Дослідження середньої питомої електропровідності залежно від чинників механічного впливу

Технологічною практикою кулінарного виробництва на різних стадіях передбачається обробка сировини різноманітними методами механічного впливу. Завдяки механічному впливу змінюються структурно-механічні, теплопровідні та інші властивості сировини.

Одним із таких методів є подрібнення сировини на м’ясорубці для отримання фаршу, причому для ніжнішої консистенції виробу приготування окремих видів продукції передбачає дворазове пропускання сировини через м’ясорубку. Другим поширеним методом механічного впливу на продукт є обробка за умов надлишкового тиску, що створюється з метою інтенсифікації теплообміну.

Основним завданням даного дослідження було визначення залежності середньої питомої електропровідності сировини від кратності пропускання через м’ясорубку (за незмінного значення

діаметра отворів решітки), а також від зміни тиску, за якого здійснюється теплова обробка (рис. 3.17).

У ході експериментальних досліджень як контроль використовували фарш, отриманий за одноразового пропускання через м'ясорубку, при цьому його середня питома електропровідність складала 2,5 $(Ом·м)^{-1}$. За дворазового пропускання через м'ясорубку середня питома електропровідність зразків збільшилась на 10% і склала 2,76 $(Ом·м)^{-1}$, а за триразового – збільшилась на 11% і склала близько 2,8 $(Ом·м)^{-1}$. Подальші чотири- та п'ятиразове пропускання практично не вплинули на зміну середньої питомої електропровідності та сприяли її збільшенню лише на 1…2%.

Імовірно, такі результати пояснюються тим, що додаткове пропускання через м'ясорубку дозволяє більшою мірою зруйнувати структуру сировини й отримати фарш із рівномірнішим розподілом частинок за розміром, що й приводить до підвищення електропровідних властивостей. Подальше додаткове пропускання фаршу через м'ясорубку із тим самим діаметром отворів решітки вже несуттєво впливає на зміну структури фаршу і, відповідно, його електропровідних властивостей.

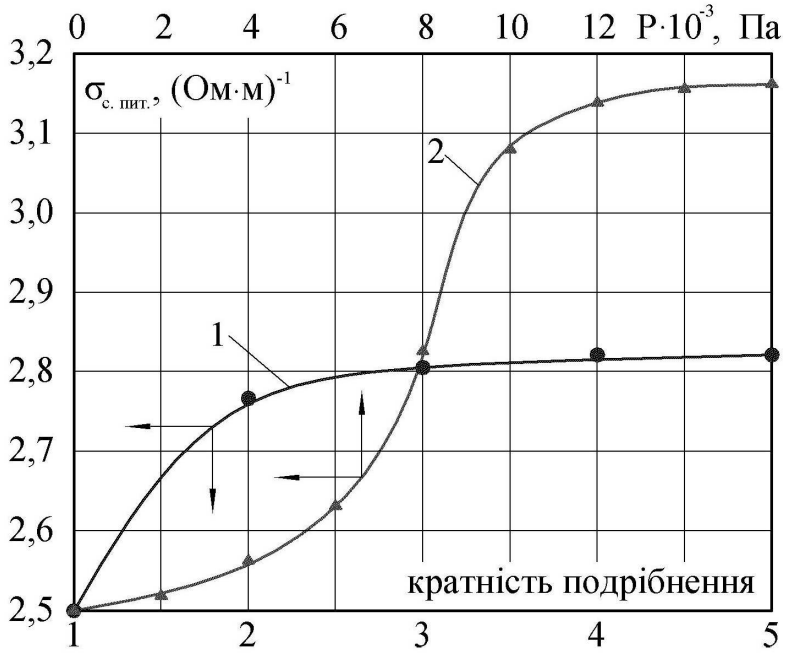


Рисунок 3.17 – Залежності середньої питомої електропровідності зразків із натуральної січеної м'ясної маси від чинників механічного впливу: 1 – від кратності подрібнення; 2 – від прикладеного тиску

За невеликих значень надлишкового тиску значних змін середньої питомої електропровідності не відбувається. Помітне зростання починає спостерігатися лише за надлишкового тиску $(6…10)\cdot10^3$ Па. Збільшення тиску до 10^4 Па призводить до підвищення електропровідності на 23%, що складає 3,08 $(Ом\cdot м)^{-1}$. Це можна пояснити спресовуванням фаршевої маси і зменшенням унаслідок цього кількості порожнин усередині напівфабрикату. У разі подальшого збільшення тиску від 10^4 до $1,4\cdot10^4$ Па зміна електропровідності відбувається лише до 3,16 $(Ом\cdot м)^{-1}$, тобто на 2…3%.

Таким чином, на підставі отриманих результатів можна зробити висновок про те, що дво- і триразове пропускання фаршу через м’ясорубку приводить до збільшення середньої питомої електропровідності, що пояснюється більшим ступенем руйнування структури сировини й отриманням фаршу з рівномірнішим розподілом частинок за розміром. Найбільш помітне зростання середньої питомої електропровідності спостерігається за надлишкового тиску в межах 6…10 кПа, що пояснюється спресовуванням фаршевої маси та зменшенням унаслідок цього кількості порожнин усередині зразка.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ТА АПАРАТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРІВАННЯ

4.1 Призначення та суть комбінованого способу жарення з електроконтактним нагріванням

З метою усунення недоліків технологічного та апаратурного оформлення процесів жарення та ЕКН, наведених у розділі 1, отримання кулінарних виробів високої якості з властивостями смаженої та запеченої продукції, зменшення тривалості теплової обробки та енерговитрат розроблено комбінований спосіб жарення з ЕКН. При цьому дотримувались таких вихідних даних:

– процеси жарення здійснювати в умовах комбінування поверхневих методів нагрівання з ЕКН;

– як параметри ЕКН використовувати змінний електричний струм прямокутної форми частотою 50 Гц;

– напругу електричного струму для ЕКН установлювати до 42 В залежно від електропровідності, що визначається лінійним розміром та видом напівфабрикатів за рецептурним складом.

Комбінований спосіб жарення з ЕКН може використовуватись на підприємствах ресторанного господарства та харчової промисловості для смаження, запікання та випікання широкого асортименту кулінарної продукції, напівфабрикати якої виготовлені на основі фаршоподібних мас або дрібнодисперсних структур. Запропоновано два варіанти такого способу. Першим варіантом передбачається, що нагрівання внутрішніх шарів виробу забезпечується переважно ЕКН, а нагрівання поверхневих шарів із формуванням скоринки – за рахунок теплоти від нагрівальної поверхні та ІЧ-променів. Для реалізації цього способу електродні секції розміщують перпендикулярно до нагрівальної поверхні, а відстань між електродами регулюється залежно від виду та лінійного розміру напівфабрикатів, які обробляються. Нагрівальну поверхню розігрівають до робочої температури, яка автоматично підтримується на встановленому рівні, а між електродними секціями розміщують напівфабрикати. Одночасно вмикають ІЧ-нагрівачі, попередньо встановивши потрібну потужність, а до електродів подають електричний струм із визначеними параметрами. За рахунок теплоти

від нагрівальної поверхні та ІЧ-променів нагріваються переважно поверхневі шари виробу та формується скоринка, а електроконтактним методом здійснюється рівномірне нагрівання внутрішніх шарів виробу за всім об'ємом. Тривалість термообробки зумовлюється видом продукту та його лінійним розміром.

Другим варіантом передбачаються два шляхи реалізації. У першому випадку, коли електроди використовуються одночасно для ЕКН і як нагрівальні поверхні, а в другому – принципово тільки для ЕКН. У результаті експериментальних досліджень було визначено, що в першому випадку на поверхні виробу з часом формується скоринка, унаслідок чого погіршується електропровідність. Більш раціональним визнано другий випадок, коли здійснюється поверхневе нагрівання напівфабрикатів від окремих нагрівальних поверхонь знизу та зверху, а електроди розміщені з боків. При цьому з'являється можливість регулювання режимних параметрів нагрівання окремих шарів напівфабрикату, що згідно з розрахунками (розділ 2) є досить ефективним. У зв'язку з цим далі будемо розглядати спосіб саме з таким розташуванням електродів.

Перед початком смаження нагрівальну поверхню розігрівають до робочої температури, після чого на ній між двома електродами кладуть сформовані напівфабрикати. До електродів подають електричний струм із визначеними параметрами, що проходить через продукт та здійснює його ЕКН. Напругу електричного струму попередньо встановлюють залежно від електропровідності виробу, що залежить від рецептурного складу компонентів. Процес смаження складається з поверхневого нагрівання знизу та зверху напівфабрикатів з ЕКН. За рахунок поверхневого нагрівання забезпечується прогрівання переважно зовнішніх шарів і формування скоринки, а за рахунок ЕКН від електродів з боків напівфабрикатів – прогрівання внутрішніх шарів виробу за всім об'ємом.

До основних переваг запропонованого комбінованого способу жарення з ЕКН слід віднести скорочення тривалості технологічних процесів та зниження витрат енергії за рахунок комбінування різних способів нагрівання, зокрема поверхневого, електроконтактного, інфрачервоного; забезпечення рівномірного прогрівання всіх шарів виробу за об'ємом.

У разі задавання напруги змінного електричного струму прямокутної форми (із точки зору безпечності – до 42 В) залежно від електропровідності напівфабрикатів з'являється можливість

регульованого підведення необхідної кількості теплової енергії від ЕКН, що забезпечує прогрівання внутрішніх шарів до температури кулінарної готовності протягом часу, необхідного для формування скоринки на поверхні виробу. Прямокутна форма змінного електричного струму за заданих параметрів амплітудної напруги дозволяє підвищити потужність ЕКН, на відміну від нагрівання синусоїдальним струмом.

4.2 Дослідження комбінованих процесів жарення

4.2.1 Кінетика температури та вихід продукції. Наступним етапом досліджень було підтвердження теоретично отриманого результату під час модельного розрахунку комбінованого жарення щодо його інтенсифікації за рахунок ЕКН.

Предметом досліджень обрано зразки з натуральної січеної м'ясної маси (рецептура № 657 [94]) з вагою та геометричними параметрами, зазначеними в підрозділі 3.3. Контрольними стали зразки продукції, що підлягали двобічному обсмаженню від нагрівальних поверхонь із потужністю нагрівання 0,2 кВт. Як дослідні використовували зразки продукції, що обсмажувались комбінованим способом за таких параметрів процесу: потужність поверхневого нагрівання – 0,07 кВт; ЕКН змінним електричним струмом прямокутної форми з частотою 50 Гц і напругою 40 В.

Аналіз отриманих у ході дослідження кінетичних залежностей температури в центрі зразків (рис. 4.1) свідчить про інтенсивніше нагрівання комбінованим способом жарення з ЕКН. Так, у контрольного зразка на 1-й хвилині процесу відбувається незначне підвищення температури, що пов'язано з нерівномірним розподілом теплової енергії за об'ємом зразка (температура більша в поверхневих шарах, ніж у центральних). Далі крива набуває лінійного характеру практично до завершення процесу.

Під час дослідженя комбінованого способу жарення з ЕКН (дослідний зразок) спостерігається рівномірне прогрівання всіх шарів виробу, процес термообробки скорочується майже в 2 рази. Характер отриманої кривої подібний до тих, що отримували під час вивчення ЕКН як самостійного процесу. Висока швидкість нагрівання спостерігається протягом наступних 1–2 хв процесу, а далі дещо зменшується внаслідок зміни електропровідних властивостей досліджуваного зразка. У результаті зразок досягає 90° С в центрі

приблизно через 180 с. При цьому на поверхні виробу формується скоринка, притаманна жареним виробам, що підтверджує ефективність запропонованого комбінованого способу.

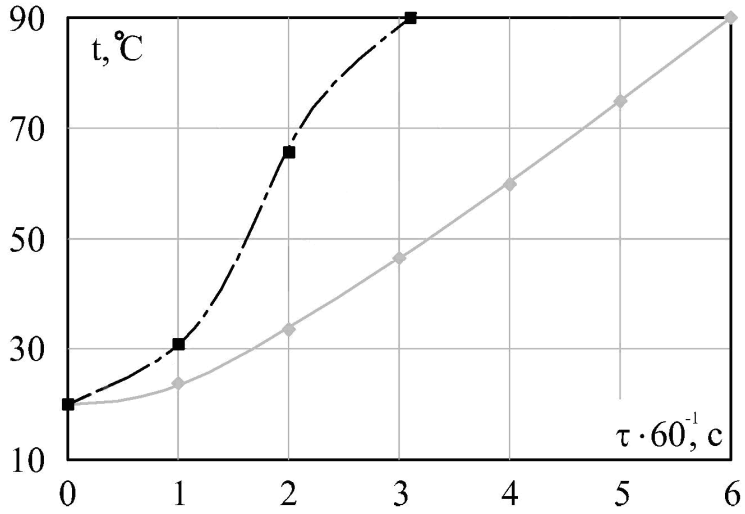


Рисунок 4.1 – Кінетика температури в центральних шарах під час жарення зразків із натуральної січеної м'ясної маси: ◆ – контрольні; ■ – дослідні

Скорочення тривалості в умовах реалізації комбінованого способу жарення з ЕКН має вплинути на втрати маси й вихід готової продукції. На рис. 4.2 наведено діаграму виходу продукції за двобічного й комбінованого смаження з ЕКН.

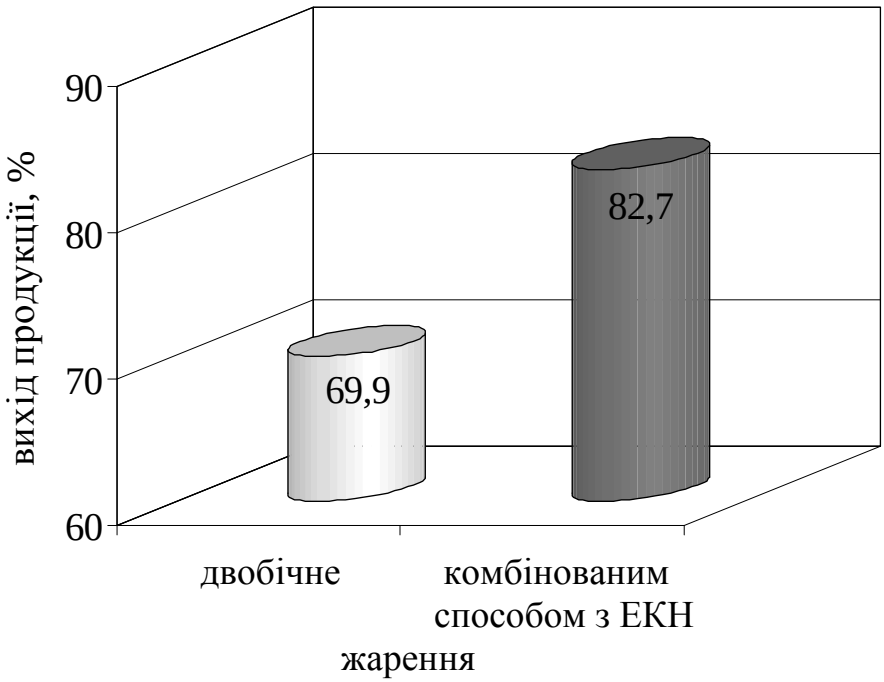


Рисунок 4.2 – Вихід продукції за умов жарення зразків із натуральної січеної м'ясної маси двобічним і комбінованим способами

Із наведених даних випливає, що вихід продукції за двобічного жарення складає 69,9%, а за умов комбінованого жарення з ЕКН збільшується на 12…14%. Це можна пояснити як скороченням тривалості нагрівання і, як наслідок, зменшенням кількості втраченої вологи, так і коливальним рухом вологи всередині напівфабрикату під впливом електричного струму, чим забезпечується її утримування від виходу назовні.

4.2.2 Мікробіологічні та органолептичні показники. Для досягнення санітарної безпечності велике значення мають режими жарення, якими передбачається витримування виробів за визначеної температури протягом певного часу. Тому в разі використання комбінованого способу жарення з ЕКН потрібно було оцінити його санітарну безпечність. Для визначення антибактеріальної ефективності було проведено дослідження мікробіологічної характеристики асортименту кулінарної продукції, яка відрізнялась за своїм рецептурним складом, а також видовим і кількісним складом мікроорганізмів до початку теплової обробки. Результати дослідження подано в табл. 4.1, де для порівняння наведено нормативні значення.

Групи мікроорганізмів, які визначали в кулінарній продукції після проведення процесу жарення, відповідали переліку мікроорганізмів, вміст яких підлягає нормуванню відповідно до ДСП 4.4.5.078-2001. Контроль здійснювали за групами санітарно-показових, умовно-патогенних і патогенних мікроорганізмів.

Як видно з наведених даних, у досліджених стравах із січеного м’яса, в яких допустимий рівень мікробного обсіменіння (показник КМАФАМ) складає не більше $1 \cdot 10^2$ КУО/г, фактичний рівень вмісту аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів після теплової обробки перебував у межах $(4…7) \cdot 10^1$ КУО/г і не перевищував допустимого рівня вмісту мікроорганізмів даної групи. Відповідність нормативам за показником КМАФАМ установлено також у запіканках із сиру, запіканках круп’яних та запечених стравах із овочів і грибів. Так, у запіканках із сиру, круп’яних та овочевих за допустимого значення показника $1 \cdot 10^3$ КУО/г фактичний вміст мікроорганізмів становив відповідно $3 \cdot 10^2$, $6 \cdot 10^2$ та $5 \cdot 10^2$ КУО/г.

У всіх зразках продукції не виявлено кишкової палички (БГКП) в 1 г, умовно-патогенних мікроорганізмів S.aureus та бактерій родини Proteus – в 1 г, патогенних мікроорганізмів, у тому числі бактерій родини Salmonella і L.mono-cytogenes – у 25 г.

Таблиця 4.1 – **Мікробіологічні показники якості кулінарної продукції**

Продукція		Мікробіологічний показник						
		Мезофільні аеробні й факультативно-анаеробні мікроорганізми, КУО/г	Маса продукту, в якій не допускається (г)					
			БГКП (колі-форми)	E.coli	Staphylococcus aureus	Proteus	патогенні мікроорганізми, в т.ч.	
							бактерії родини Salmonella	L. monocytogenes
Вироби з січеного м'яса (рец. 657, 660, 661 за [94])	норматив	$1 \cdot 10^2$	1,0	-	1,0	0,1	25	25
	фактичне значення	$7 \cdot 10^1$	не виявлено в 1 г	-	не виявлено в 1 г	не виявлено в 0,1 г	не виявлено в 25 г	не виявлено в 25 г
Запіканки із сиру та манної крупи (рец. 499 за [94])	норматив	$1 \cdot 10^3$	1,0	-	1,0	0,1	25	25
	фактичне значення	$3 \cdot 10^2$	не виявлено в 1 г	-	не виявлено в 1 г	не виявлено в 0,1 г	не виявлено в 25 г	не виявлено в 25 г
Запіканки круп'яні (рец. 420, 421 за [94])	норматив	$1 \cdot 10^3$	1,0	1,0	1,0	0,1	25	25
	фактичне значення	$6 \cdot 10^2$	не виявлено в 1 г	не виявлено в 1 г	не виявлено в 1 г	не виявлено в 0,1 г	не виявлено в 25 г	не виявлено в 25 г
Картопля, овочі та гриби запечені (рец.376, 381, 382 за [94])	норматив	$1 \cdot 10^3$	1,0	1,0	1,0	0,1	25	25
	фактичне значення	$5 \cdot 10^2$	не виявлено в 1 г	не виявлено в 1 г	не виявлено в 1 г	не виявлено в 0,1 г	не виявлено в 25 г	не виявлено в 25 г

Таким чином, результати проведеного дослідження підтверджують, що розроблений комбінований спосіб жарення з ЕКН дозволяє не лише скоротити тривалість нагрівання, але й забезпечити мікробіологічну безпечність різноманітного за рецептурним складом асортименту кулінарної продукції.

Проведено органолептичну оцінку різних видів кулінарної продукції, теплову обробку якої здійснювали з використанням розробленого комбінованого способу жарення. Під час визначення органолептичних показників перевагу було віддано показникам, які формуються в процесі теплової обробки смажених та запечених кулінарних виробів, а саме: зовнішньому вигляду, вигляду на розрізі, кольору скоринки, консистенції. При цьому органолептичну оцінку виробів проводили в балах з урахуванням коефіцієнта важливості за 5-бальною шкалою. У разі невідповідності показників вимогам нормативної документації оцінку виробів знижували на 2–3 бали.

Результати органолептичної оцінки січених кулінарних виробів (рец. 657 [94]), запіканки з сиру (рец. 499 [94]), запіканки рисової з гарбузом (рец. 421 [94]), запеченого картопляного пюре (рец. 376 [94]) наведено в таблицях 4.2–4.5.

Таблиця 4.2 – **Органолептичні показники якості січених кулінарних виробів (рец. 657 [94])**

Органолептичний показник	**Коефіцієнт важливості**	**Контрольний зразок (традиційний спосіб жарення)**	**Дослідний зразок (комбінований спосіб жарення)**	**Органолептична оцінка**
Зовнішній вигляд	1,5	Не пригорілий, овально-плескатої форми, однорідна скоринка рівномірної товщини близько 2 мм	Не пригорілий, овально-плескатої форми, однорідна скоринка рівномірної товщини близько 2 мм	5
Запах, смак	1	Властиві котлетам, без сторонніх присмаку та запаху	Властиві котлетам, без сторонніх присмаку та запаху	5
Колір	1,5	Поверхні – золотисто-коричневий, на розрізі – світло-коричневий	Поверхні – золотисто-коричневий, на розрізі – світло-коричневий	5
Консистенція	1	Однорідна, соковита	Однорідна, соковита	5

Таблиця 4.3 – **Органолептичні показники якості запіканки з сиру (рец. 499 [94])**

Органолептичний показник	**Коефіцієнт важливості**	**Контрольний зразок (традиційний спосіб жарення)**	**Дослідний зразок (комбінований спосіб жарення)**	**Органолептична оцінка**
Зовнішній вигляд	1,5	Порційні шматки квадратної або прямокутної форми, поверхня зарум'янена, без тріщин	Порційні шматки прямокутної форми, поверхня зарум'янена, без тріщин	5
Запах, смак	1	Властиві запеченій сирній масі; смак – солодкий із кислинкою; без сторонніх присмаку та запаху	Властиві запеченій сирній масі; смак – солодкий із кислинкою; без сторонніх присмаку та запаху	5
Колір	1,5	Поверхні – золотисто-жовтий, або світло-коричневий; на розрізі – ледь жовтуватий	Поверхні – золотисто-жовтий; на розрізі – ледь жовтуватий	5
Консистенція	1,5	Ніжна, однорідна, без часточок непротертого сиру	Ніжна, однорідна, без часточок непротертого сиру	5

Таблиця 4.4 – **Органолептичні показники якості запіканки рисової з гарбузом (рец. 421 [94])**

Органолептичний показник	**Коефіцієнт важливості**	**Контрольний зразок (традиційний спосіб жарення)**	**Дослідний зразок (комбінований спосіб жарення)**	**Органолептична оцінка**
Зовнішній вигляд	1,5	Порційні шматки квадратної чи прямокутної форми, поверхня зарум'янена, без тріщин	Порційні шматки прямокутної форми, поверхня зарум'янена, без тріщин	5
Запах	0,5	Запечених круп та гарбуза	Запечених круп та гарбуза	5
Смак	0,5	Солодкий, із приємним ніжним присмаком гарбуза, без сторонніх присмаку та запаху	Солодкий, із приємним ніжним присмаком гарбуза, без сторонніх присмаку та запаху	5
Колір	1,5	Поверхні – золотистий, на розрізі – жовтий	Поверхні – золотистий, на розрізі – жовтий	5
Консистенція	1	Розсипчаста, однорідна, без часточок каші та гарбуза	Розсипчаста, однорідна, без часточок каші та гарбуза	5

Таблиця 4.5 – **Органолептичні показники якості запеченого картопляного пюре (рец. 376 [94])**

Органолептичний показник	**Коефіцієнт важливості**	**Контрольний зразок (традиційний спосіб жарення)**	**Дослідний зразок (комбінований спосіб жарення)**	**Органолептична оцінка**
Зовнішній вигляд	1,5	На поверхні рум'яна скоринка, без тріщин	На поверхні рум'яна скоринка, без тріщин	5
Запах, смак	1	Помірно солоний, аромат вареної картоплі	Помірно солоний, аромат вареної картоплі	5
Колір	1,5	Кремовий або білий; скоринки на поверхні – золотистий	Кремовий, скоринки на поверхні – золотистий	5
Консистенція	1,5	Однорідна, нетягуча	Однорідна, нетягуча	5

Як показав аналіз наведених даних, органолептичні характеристики кулінарної продукції, виготовленої із застосуванням нового комбінованого способу жарення з ЕКН, відповідали показникам продукції, виготовленої традиційним способом. За даними технологічних проробок вироби отримали найвищі оцінки, що свідчить про їх високу якість.

4.3 Розробка апаратів для реалізації комбінованого способу жарення з електроконтактним нагріванням

4.3.1 Технічні вимоги на проектування апаратів. Апарати для реалізації комбінованого способу жарення з ЕКН повинні відповідати низці вимог, серед яких: технологічні, експлуатаційні, енергетичні, конструктивні, економічні, екологічні, з охорони праці та техніки безпеки, а також технічної естетики.

Технологічні вимоги забезпечують можливість здійснювати раціональні режими процесів жарення комбінованим способом з ЕКН та досягати встановленого ступеня інтенсифікації, забезпечуючи мінімальні втрати сировини та високу якість готової продукції.

Експлуатаційні вимоги передбачають: простоту обслуговування з мінімальними витратами праці; доступність для огляду, санітарної

обробки, ремонту; безперебійність у роботі; стійкість до корозії, яка може виникнути через вплив навколишнього середовища, оброблюваних харчових продуктів, мийних і дезінфікуючих засобів; автоматизацію регулювання та контролю технологічного процесу.

Енергетичні вимоги передбачають можливість зниження питомої витрати теплоти на проведення технологічного процесу та підвищення ККД.

Конструктивними вимогами є такі:

– технологічність, що передбачає відповідність використовуваних матеріалів та конструкції обладнання основним правилам та методам проектування виробничого процесу в машинобудівному виробництві;

– уніфікація та нормалізація деталей і вузлів, що сприяє підвищенню серійності виробництва, технологічності та ремонтопридатності;

– технічна досконаліть, працездатність та надійність обладнання, які визначаються тривалим періодом відповідності сучасному рівню розвитку техніки та довговічністю в роботі;

– простота будови, невелика маса та розміри, виготовлення з недорогих матеріалів.

Економічні вимоги включають мінімальні витрати на виготовлення, монтаж та експлуатацію апаратів, що мають низьку металоємність та високий ККД.

Екологічні вимоги передбачають проведення процесу без забруднення довкілля.

За вимогами охорони праці та техніки безпеки апарати повинні відповідати вимогам електробезпеки, мати надійне заземлення. Температура зовнішніх поверхонь не повинна в разі контакту з ними викликати опіки обслуговуючого персоналу.

Відповідно до вимог технічної естетики необхідно передбачити фарбування зовнішніх частин апаратів у білий колір. Розміщення пульта керування та його форма мають відповідати вимогам ергономіки та антропологічним особливостям людини.

4.3.2 Технічне завдання на проектування багатофункціонального пристрою теплової обробки ПТО-0,1:

– під час виготовлення, випробування та постачання апарата повинні виконуватись вимоги ГОСТ 12.2.003-74 «Обладнання виробниче. Загальні вимоги безпеки», ОСТ 26-291-79 «Посудини та апарати. Технічні вимоги»;

– передбачити теплову ізоляцію зовнішньої поверхні апарата;

– матеріал корпусу та кришки апарата – листова сталь 12Х18Н9Т, основи чаші – чавун СЧ-15 з протипригарним покриттям із фторопласту-4; борта чаші та електродних секцій – електроізолюючий фторопласт-4; електродів – титан ВТ1-0;

– ззовні основи завантажувальної чаші передбачити спеціальні пази для установлення електричних нагрівальних елементів;

– на поверхнях бортів завантажувальної чаші зробити пази для установлення електродних секцій із електродами, при цьому забезпечити з’єднання електродів із джерелом електричного струму через регулятор напруги;

– на внутрішньому боці відкидної кришки передбачити можливість установлення ІЧ-нагрівачів із відбивачами та запобіжного парового клапана;

– між стінкою робочої камери та кришкою установити прокладки з термостійкої гуми.

4.3.3 Технічне завдання на проектування пристрою комбінованого смаження ПКС-0,18:

– під час виготовлення, випробування та постачання апарата повинні виконуватись вимоги ГОСТ 12.2.003-74 «Обладнання виробниче. Загальні вимоги безпеки», ОСТ 26-291-79 «Посудини та апарати. Технічні вимоги»;

– передбачити теплову ізоляцію зовнішньої поверхні апарата;

– матеріал корпусу апарата – листова сталь 12Х18Н9Т; нагрівальних плиток – сталь-3 із протипригарним покриттям із фторопласту-4; електродів – титан ВТ1-0 з електроізоляцією;

– передбачити шарнірне з’єднання верхнього й нижнього каркасів;

– сконструювати на нижньому каркасі суцільну штамповану основу із западинами;

– передбачити закріплення до верхнього каркаса плити з уставленими в прямокутні отвори рухомими тримачами;

– на бічних поверхнях западин та рухомих тримачів передбачити установлення електродів;

– на поверхнях западин на нижніх нагрівальних плитках та в рухомих тримачах на верхніх нагрівальних плитках установити електричні нагрівальні елементи;

– між нижньою плитою та кришкою з передньої частини пристрою установити прокладки з термостійкої гуми.

4.3.4 Визначення електропровідності натуральної січеної м'ясної маси залежно від лінійних розмірів зразка. У разі застосування ЕКН у технологічних апаратах важливим завданням є встановлення раціональних співвідношень лінійних розмірів напівфабрикату при заданій вазі й, відповідно, лінійних розмірів робочих елементів апаратів. Вага зразка є лише побічним чинником впливу на електропровідність, оскільки за конкретного значення маси можуть змінюватися геометричні параметри зразка і, відповідно, площа контакту з електродом і міжелектродна відстань.

Розрахункові результати зміни середньої електропровідності натуральної січеної м'ясної маси в межах температур 20…90º С залежно від міжелектродної відстані та площі контакту продукт–електрод при середній питомій електропровідності 2,5 $(Ом·м)^{-1}$ подано у вигляді діаграми на рис. 4.3.

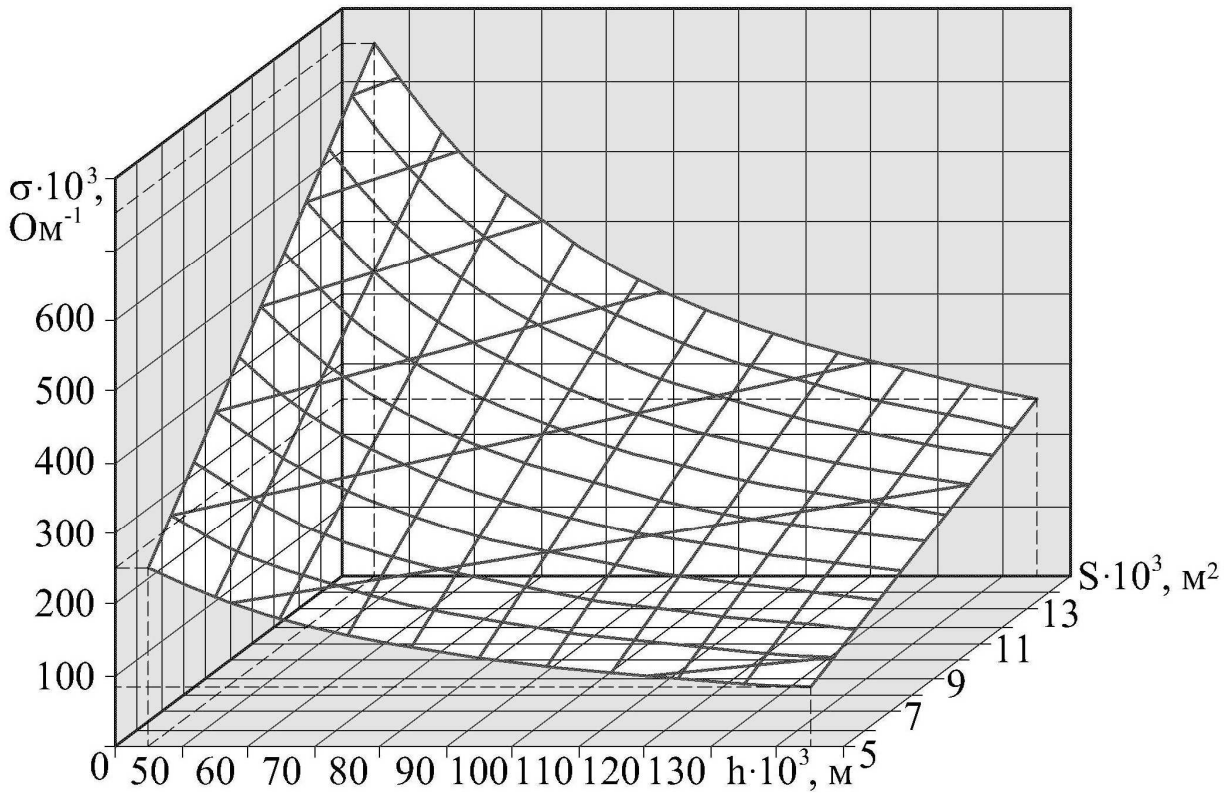


Рисунок 4.3 – Діаграма для визначення середньої електропровідності натуральної січеної м'ясної маси залежно від міжелектродної відстані h та площі контакту продукт-електрод S

Під час розрахунків змінювали міжелектродну відстань у межах 0,05…0,15 м та площу контакту продукт–електрод – (5…15)·10^{-3} $м^2$. На діаграмі видно, що середня електропровідність підвищується в разі збільшення площі контакту продукт–електрод та зменшення міжелектродної відстані.

Практичне використання діаграми полягало у визначенні середньої електропровідності напівфабрикатів із натуральної січеної м'ясної маси під час проектування пристроїв ПТО-0,1 та ПКС-0,18. Наприклад, для напівфабрикату масою 0,450 кг за міжелектродної відстані 0,06 м та площі контакту 7,5·10^{-3} $м^2$ середня електропровідність складає 313·10^{-3} $Ом^{-1}$.

Отже, отримані дані можуть бути використані для вибору раціональних значень міжелектродної відстані та площі контакту продукт–електрод із метою регулювання швидкості нагрівання й, відповідно, тривалості ЕКН кулінарної продукції на основі натуральної січеної сировини. Побудова подібних діаграм для інших продуктів значною мірою спростить задачу з розрахунку комбінованих процесів з ЕКН.

4.3.5 Призначення та принцип дії пристрою ПТО-0,1. Багатофункціональний пристрій теплової обробки харчових продуктів ПТО-0,1 призначається для теплової обробки харчових продуктів із використанням поверхневого, ІЧ-нагрівання та ЕКН або їх комбінування й може використовуватися на підприємствах ресторанного господарства та харчових підприємствах малої потужності для смаження та запікання кулінарної продукції (рис. 4.4).

Принципову схему ПТО-0,1 наведено на рис. 4.5. Пристрій являє собою металевий корпус 1 із теплоізоляцією 9, установлений на опорні ніжки 12. На передній панелі пристрою змонтовано пульт керування 3. Усередині корпусу розміщена завантажувальна чаша, що складається з чавунної основи 11 та діелектричних бортів 15. Основа чаші з внутрішнього боку (робоча зона) покрита протипригарним фторопластовим покриттям, а ззовні в спеціальних пазах установлено електричні нагрівальні елементи 10.

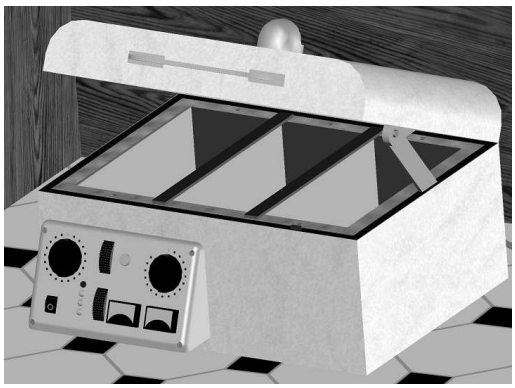


Рисунок 4.4 – Багатофункціональний пристрій теплової обробки харчових продуктів ПТО-0,1 (зовнішній вигляд)

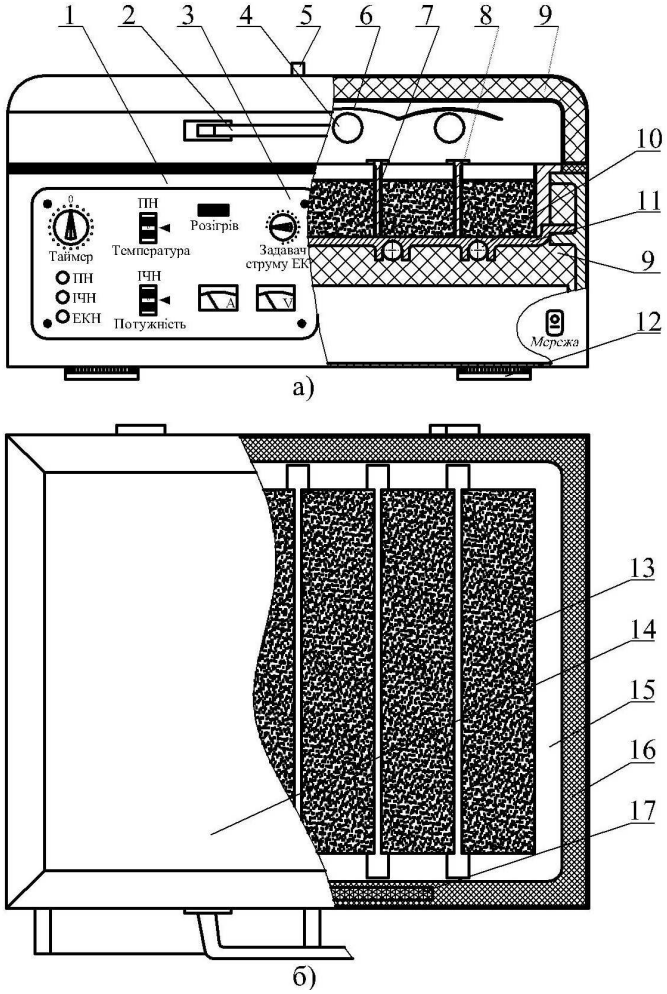


Рисунок 4.5 – Принципова схема багатофункціонального пристрою теплової обробки харчових продуктів ПТО-0,1: а) вигляд спереду; б) вигляд зверху; 1 – корпус; 2 – ручка; 3 – пульт керування; 4 – ІЧ-нагрівачі; 5 – паровий клапан; 6 – відбивач; 7 – електроди; 8 – електродні секції; 9 – теплоізоляція; 10 – електричні нагрівальні елементи; 11 – основа чаші; 12 – опорні ніжки; 13 – напівфабрикат; 14 – відкидна кришка; 15 – борт чаші; 16 – гумова прокладка; 17 – магніт

На двох протилежних бічних поверхнях бортів 15 із певним кроком зроблено пази, в які для забезпечення ЕКН вставляються електродні секції 8 з електродами 7. При цьому електричний струм для ЕКН надходить із промислової мережі, за допомогою випрямляча перетворюється на постійний струм, авто-трансформатором змінюється його напруга до заданого значення та подається до комутатора. У комутуючому пристрої постійний електричний струм перетворюється на змінний прямокутної форми з частотою 50 Гц та подається до електродів.

Верхня частина пристрою має відкидну кришку 14 із ручкою 2, на внутрішньому боці якої змонтовано ІЧ-нагрівачі 4 з відбивачами 6, а в середині є отвір для розміщення парового клапана 5. Кришка 14 щільно закриває корпус 1 за допомогою прокладки з термостійкої гуми 16 і магніту 17.

У пристрої передбачено можливість зміни вихідних параметрів процесу теплової обробки – вимикання окремих видів нагрівання, регулювання температури поверхні нагрівання та потужність ІЧ-нагрівання, зміна напруги для ЕКН.

Принцип дії ПТО-0,1 полягає в наступному. Перед початком роботи відкривають відкидну кришку 14, після чого в пази бортів 15 вставляють електродні секції 8 з електродами 7. Натисненням на пульті керування 3 відповідного вмикача забезпечують розігрівання основи 11 завантажувальної чаші до робочої температури, а також задають вихідні параметри процесу. Після цього в завантажувальній чаші на основі 11 між електродними секціями 8 розміщують напівфабрикати 13 та закривають кришку 14. За допомогою таймера на пульті керування 3 встановлюють час, необхідний для теплової обробки.

Після закінчення часу теплової обробки нагрівання припиняється, про що сповіщає звуковий сигнал. Далі вимикають пристрій, відкривають відкидну кришку 14 і вироби виймають за допомогою дерев’яної лопатки. Електродні секції 8 витягують, робочу поверхню завантажувальної чаші 11 та електродів 7 очищують, промивають теплою водою і насухо витирають.

Техніко-експлуатаційні показники ПТО-0,1, отримані в результаті розрахунку (додаток А), наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – **Техніко-експлуатаційні показники ПТО-0,1**

№ з/п	Показник	Одиниця вимірю-вання	Значення
1	Площа завантажувальної поверхні	$м^2$	0,1
2	Напруга живлення пристрою	В	220
3	Потужність тенів нагрівальної поверхні: - у період розігрівання; - за стаціонарного режиму	Вт	 $3,0 \cdot 10^3$ $1,2 \cdot 10^3$
4	Довжина хвилі ІЧ-нагрівача	мкм	3,6
5	Густина теплового потоку ІЧ-випромінювання	$Вт/м^2$	$1,1 \cdot 10^4$
6	Напруга ЕКН	В	5…42
7	Струм ЕКН: - тип; - форма; - частота	 - - Гц	 змінний прямокутна 50
8	Час розігрівання нагрівальної поверхні до робочої температури	хв	5
9	Продуктивність за основним часом	кг/год	21,6
10	Питома витрата теплоти	Дж/кг	$0,7 \cdot 10^6$
11	Питома напруга нагрівальної поверхні	$Вт/м^2$	$12,0 \cdot 10^3$
12	ККД	-	0,94
13	Питома металомісткість	$кг/м^2$	246
14	Габаритні розміри: - довжина; - ширина; - висота	м	 0,44 0,48 0,25
15	Маса металоконструкції	кг	24,6

До основних переваг розробленого багатофункціонального пристрою теплової обробки харчових продуктів ПТО-0,1 слід віднести відносно високу продуктивність, скорочення тривалості технологічного процесу, зниження витрат енергії та металомісткості, високий ККД.

4.3.6 Призначення та принцип дії пристрою ПКС-0,18. Реалізація комбінованого способу жарення з ЕКН за другим варіантом, описаним у розділі 3.3, можлива в разі застосування електродів як джерела електричної енергії для ЕКН та одночасно як нагрівальних поверхонь або коли електроди є окремими елементами. Зважаючи на те, що останній випадок є більш раціональним (підрозділ 3.3), до розгляду пропонується пристрій із відповідним технічним рішенням.

Пристрій комбінованого смаження січених виробів ПКС-0,18 (принципова схема наведена на рис. 4.6) призначається для жарення з використанням комбінування поверхневого нагрівання та ЕКН і може використовуватись на підприємствах ресторанного господарства та харчових підприємствах малої потужності для смаження кулінарної продукції на основі січеної сировини. Він складається з двох шарнірно з'єднаних нижнього 14 та верхнього 19 каркасів із теплоізоляцією 15. До нижнього каркаса 14 прикріплено суцільну штамповану основу 16, а до верхнього каркаса 19 – плиту 13 із отворами, в які входять рухомі тримачі 9, закріплені у фіксаторах 10 на пружинах 7. У штампованій основі 16 зроблено канавку для розміщення прокладки з термостійкої гуми 12, що запобігає виходу пари з передньої частини пристрою і тим самим захищає обслуговуючий персонал від опіків. Із внутрішнього боку рухомих тримачів 9 і западин штампованої основи 16 у пазах розміщено нагрівальні плитки 18, які фіксуються закріпленими різнополярними електродами 8.

Електричний струм для ЕКН надходить із промислової мережі, за допомогою випрямляча перетворюється на постійний струм, автотрансформатором змінюється його напруга до заданого значення та подається до комутатора. У комутуючому пристрої постійний електричний струм перетворюється на змінний прямокутної форми з частотою 50 Гц та подається до різнополярних електродів 8.

В об'ємах, що утворюються нагрівальними плитками 18 та різнополярними електродами 8, розміщуються напівфабрикати 6. Нагрівання плиток 18 здійснюється електронагрівачами 11, розміщеними з їх внутрішнього боку. Для визначення температури та її регулювання на поверхні плиток установлено термодатчики 17. Ззовні пристрій облицьовано сталевими листами 5, на передній

панелі змонтовано пульт керування 1. Пристрій установлюється на чотири опорні ніжки 4 і закривається ручкою 2 за допомогою механічного затискача 3.

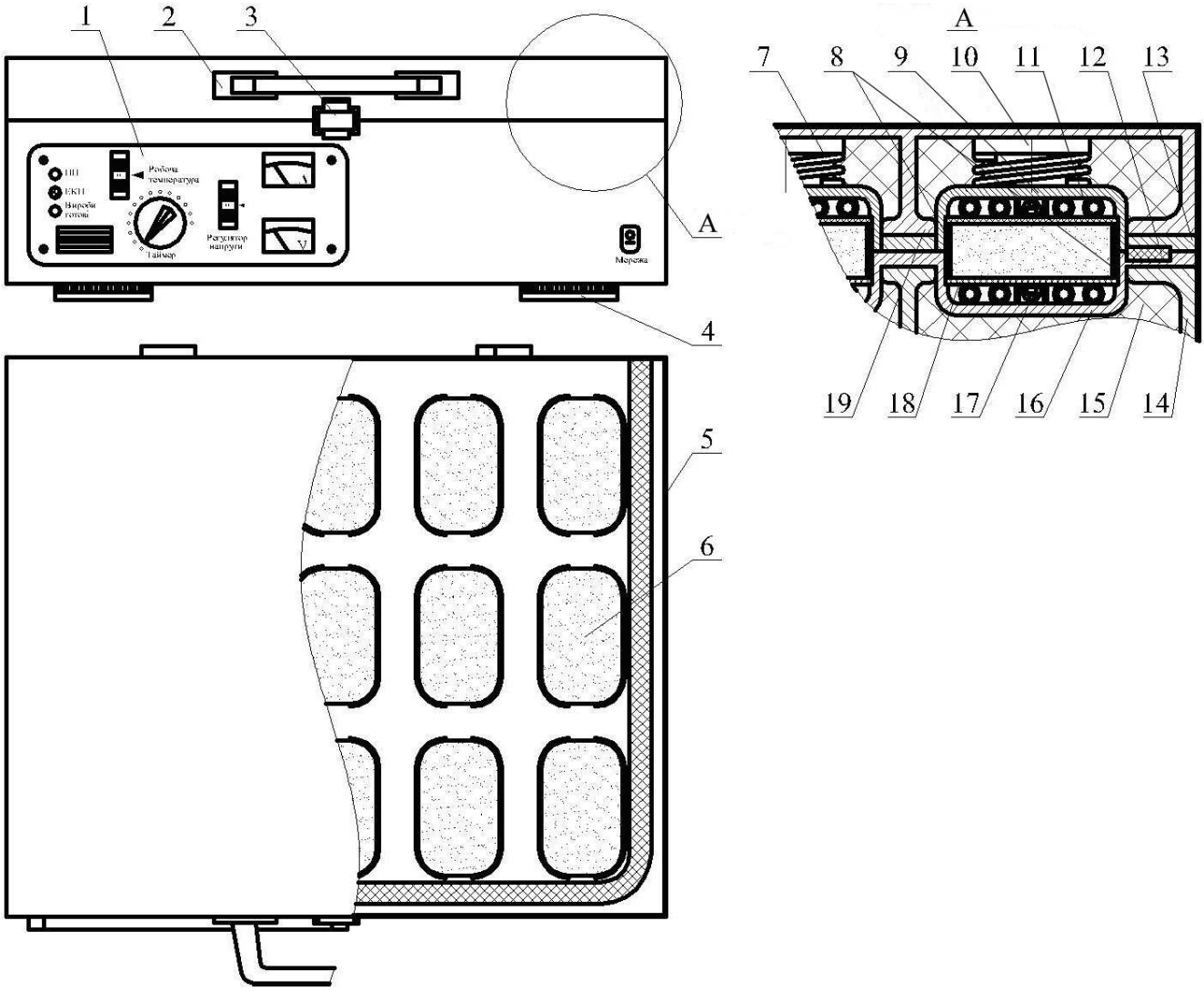


Рисунок 4.6 – Пристрій комбінованого смаження січених виробів ПКС-0,18: 1 – пульт керування; 2 – ручка; 3 – механічний затискач; 4 – опорні ніжки; 5 – облицювальні сталеві листи; 6 – напівфабрикати; 7 – пружини; 8 – різнополярні електроди; 9 – рухомі тримачі; 10 – фіксатори; 11 – електронагрівачі; 12 – прокладка з термостійкої гуми; 13 – плита з отворами; 14, 19 – нижній та верхній каркас відповідно; 15 – теплоізоляція; 16 – штампована основа; 17 – термодатчики; 18 – нагрівальні плитки

Пристрій працює таким чином. Після вмикання за допомогою вимикача «Мережа» у пристрій подається електричний струм. Для розігрівання робочих плиток 18 на пульті керування 1 регулятором задають значення температури, в момент досягнення якої спрацьовують термодатчики 17, що дозволяє автоматичним вмиканням та вимиканням електронагрівачів 11 підтримувати заданий температурний режим. На регуляторі напруги електричного струму ЕКН установлюють потрібне значення залежно від виду напівфабрикатів.

За допомогою ручки 2 піднімають верхній каркас 19, на нагрівальні плитки 18 між парами різнополярних електродів 8 кладуть сформовані січені напівфабрикати 6 і закривають пристрій за допомогою ручки 2 на механічний затискач 3. Щільний контакт напівфабрикату 6 із нагрівальними плитками 18 і електродами 8 забезпечується рухомими тримачами 9, що притискаються пружинами 7, якими створюється тиск 10^4 кПа на напівфабрикат 6. На пульті керування 1 задають тривалість процесу смаження за допомогою таймера, а також контролюють величину напруги і сили електричного струму за показаннями вмонтованих амперметра та вольтметра.

Після закінчення заданого часу процес нагрівання припиняється, про що повідомляється спеціальною індикацією та звуковим сигналом. Для вивантаження виробів механічний затискач 3 розмикають, за ручку 2 піднімають верхній каркас 19 і фіксують його у вертикальній позиції. Вироби виймають за допомогою дерев’яної лопатки, після чого робочі поверхні очищують спеціальними скребками, промивають і насухо витирають.

Техніко-експлуатаційні показники ПКС-0,18, отримані в результаті розрахунку (додаток Б), наведено в табл. 4.7.

До основних переваг розробленого пристрою комбінованого смаження січених кулінарних виробів ПКС-0,18 слід віднести скорочення тривалості технологічного процесу, зниження витрат енергії та металомісткості, високий ККД.

Таблиця 4.7 – **Техніко-експлуатаційні показники ПКС-0,18**

№ з/п	Показник	Одиниця вимірю-вання	Значення
1	Загальна площа робочих поверхонь	$м^2$	0,18
2	Напруга живлення пристрою	В	220
3	Потужність електронагрівачів: - у період розігрівання; - за стаціонарного режиму	Вт	 $3,3 \cdot 10^3$ $2,2 \cdot 10^3$
4	Напруга ЕКН	В	5…40
5	Струм ЕКН: - тип; - форма; - частота	 - - Гц	 змінний прямокутна 50
6	Час розігрівання до робочої температури	хв	5
7	Продуктивність за основним часом	кг/год	16,9
8	Питома витрата теплоти	Дж/кг	$1,3 \cdot 10^6$
9	Теплова напруга поверхонь нагрівання	$Вт/м^2$	$12,0 \cdot 10^3$
10	ККД	-	0,96
11	Питома металомісткість	$кг/м^2$	161
12	Габаритні розміри: - довжина - ширина - висота	м	 0,47 0,49 0,18
13	Маса металоконструкції	кг	28,9

4.3.7 Визначення основних параметрів комбінованого жарення з електроконтактним нагріванням в апаратах ПТО-0,1 та ПКС-0,18. Із метою встановлення функціональних можливостей розроблених апаратів та надання конкретних рекомендацій щодо їх використання у виробничих умовах проведено серію експериментальних досліджень, спрямованих на визначення раціональних параметрів теплової обробки (напруга електричного струму та тривалість нагрівання) для деяких видів кулінарної продукції на основі різноманітної сировини, зокрема м'ясної, рибної, овочевої, круп'яної та сиру.

Дослідне відпрацювання параметрів теплової обробки проводили з використанням дослідно-експериментальних зразків апаратів ПТО-0,1 та ПКС-0,18. Орієнтовне значення напруги ЕКН та тривалості нагрівання визначали за методикою, наведеною в розділі 2.3 для комбінованого двобічного підведення теплової енергії з ЕКН. При цьому температуру центральних шарів напівфабрикату фіксували на ЕОМ і після досягнення температури кулінарної готовності виріб виймали, вимірювали температуру скоринки та оцінювали органолептичні показники. Якщо за заданий час температура в центрі не відповідала заданому значенню або за час прогрівання внутрішнього шару скоринка пригорала чи була недосмаженою, то в наступному досліді напругу ЕКН змінювали та методом підбирання визначали її раціональне значення.

Отримані результати досліджень у вигляді практичних рекомендацій для пристроїв ПТО-0,1 та ПКС-0,18 наведено в табл. 4.8.

Таким чином, доведено скорочення тривалості процесів у разі застосування комбінованого способу жарення з ЕКН та універсальність розроблених апаратів шляхом апробації під час приготування широкого асортименту смаженої та запеченої кулінарної продукції.

Таблиця 4.8 – **Практичні рекомендації щодо параметрів теплової обробки в апаратах ПТО-0,1 та ПКС-0,18**

Кулінарний виріб [94]	**Напруга електрич-ного струму ЕКН, В**	**Тривалість нагрівання, с**
Комбіноване запікання в ПТО-0,1 (завантаження – 4 кг)		
картопляне пюре запечене (рец. 376)	26	900±45
запіканка капустяна (рец. 381)	24	930±47
запіканка морквяна (рец. 382)	26	930±47
гарбуз, запечений з яйцем (рец. 404)	26	960±48
запіканка манна (рец. 419)	28	940±47
запіканка рисова з сиром (рец. 420)	28	940±47
запіканка пшенична з гарбузом (рец. 421)	26	940±47
запіканка із сиру та манної крупи (рец. 499)	30	900±45
рулет із риби (рец. 543)	26	840±42
рулет із цибулею та яйцем (рец. 667)	28	1020±51
запіканка картопляна з м’ясом (рец. 680)	30	920±46
макаронник із м’ясом (рец. 681)	28	980±49
Теплова обробка ЕКН у ПТО-0,1 (завантаження – 4 кг)		
пудинг із яловичини (рец. 674)	40	540±27
суфле з курятини з рисом (рец. 741)	40	600±30
Комбіноване смаження в ПКС-0,18		
шніцель картопляний (рец. № 357)	40	390±20
зрази картопляні (рец. 359)	42	390±20
шніцель морквяний (рец. 361)	40	450±23
шніцель капустяний (рец. 363)	38	450±23
шніцель рибний (рец. 541)	38	420±21
шніцель натуральний рублений (рец. 657)	40	390±20

4.4 Соціально-економічна ефективність науково-технічних розробок

Світовий досвід розвитку економіки свідчить про те, що на комерційний успіх господарюючих суб'єктів значною мірою впливає постійне цілеспрямоване використання прогресивних науково-технічних розробок. При цьому важливою залишається проблема забезпечення якості продукції, оскільки саме від неї в першу чергу залежить збереження та зміцнення здоров'я населення. Завдяки покращенню якості продукції зростання прибутку від господарчої діяльності підприємств значно вище, ніж за рахунок зростання обсягу випуску.

Економічне значення науково-технічних розробок, поданих у даній роботі, визначається їх прикладним характером. Вони доведені до стадії інженерно-технологічних рішень у сфері виробництва та є джерелом економічного ефекту на підприємствах, що їх використовують. Споживча вартість науково-технічних розробок полягає в спроможності знижувати собівартість виробництва продукції та створювати конкурентні переваги підприємств. Зниження витрат у даному випадку відповідне отриманню надприбутку, тривалість отримання й величина якого лежать в основі кількісної оцінки ефективності їх використання.

Оцінюючи ефективність, прагнули виявити не лише фінансову та комерційну ефективність, але й соціально-економічну. Забезпечення енергозбереження, безпечність умов праці є більш значущими, ніж фінансовий зиск господарюючих суб'єктів. Кількісна оцінка ефективності передбачає попереднє формулювання джерел ефекту від використання науково-технічних розробок на якісному рівні й подальше проведення конкретних економічних розрахунків.

Джерелами ефекту від використання науково-технічних розробок є такі:

– зменшення витрат електроенергії за рахунок скорочення терміну роботи нагрівачів відносно того ж самого об'єму кулінарної продукції, що виготовляється;

– зниження собівартості виробництва кулінарної продукції за рахунок скорочення циклу виробництва;

– зниження енергоємності та трудомісткості технологічного процесу виробництва кулінарних виробів за рахунок зниження

тривалості теплової обробки та виключення необхідності у виконанні частини ручних операцій;

– поліпшення якості кулінарних виробів за рахунок використання технічних рішень, що дозволяють зменшити втрати вологи та жиру і сприяють підвищенню виходу продукції;

– зниження собівартості виготовлення нових апаратів за рахунок зменшення металомісткості.

Для визначення соціально-економічної ефективності від застосування науково-технічних розробок було проведено розрахунки нових дослідних пристроїв ПТО-0,1 і ПКС-0,18 на прикладі виробництва шніцелів натуральних рублених (рецептура 657 [94]), а результати порівнювали з жаренням у базовій електричній сковороді СЕСМ-0,2 та доведенням до кулінарної готовності в жарильній шафі ШЖЕСМ-2К. Зокрема, визначено продуктивність базових та нових дослідних пристроїв, а також собівартість продукції та приріст прибутку, що може додатково отримати підприємство за умов упровадження дослідних пристроїв у виробництво.

Продуктивність базових та нових пристроїв визначено з урахуванням їх продуктивності за основним часом, а також різного часу роботи.

Тривалість смаження в сковороді СЕСМ-0,2 складає 15 хв, із яких допоміжні операції – 6 хв, доведення до готовності в жарильній шафі ШЖЕСМ-2К – 12 хв, із яких допоміжні операції – 6 хв. Загалом один цикл виробництва складає 27 хв. Для визначення річної продуктивності та енергоспоживання вважатимемо, що підприємство використовує базові апарати 240 днів на рік за умов 7-годинного робочого дня. Тоді апарати працюють: СЕСМ-0,2 – 900 год/рік; ШЖЕСМ-2К – 720 год/рік; загалом – 1620 год/рік.

Тривалість смаження в пристроях ПТО-0,1 та ПКС-0,18 складає 7…8 хв, допоміжні операції – 10 хв. Загалом один цикл виробництва – близько 18 хв. Тобто співвідношення загального часу на виробництво шніцелів у базових апаратах до часу смаження в дослідних складає 3:2. Таким чином, заміна базових апаратів на ПТО-0,1 або ПКС-0,18 дозволить зменшити річний час роботи ($\tau = \frac{2}{3} \cdot 1620 = 1080$ год).

Річна продуктивність визначається таким чином:

$$ПР = П \cdot \tau, \quad (4.1)$$

де $П$ – продуктивність за основним часом, кг/с;

τ – річний час роботи апарата, с.

Продуктивність за основним часом базових апаратів беремо $3 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Згідно з розрахунками (додатки А, Б) продуктивність ПТО-0,1 дорівнює $6 \cdot 10^{-3}$ кг/с; ПКС-0,18 – $4{,}7 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Згідно з виразом (4.1) річна продуктивність:

– базових апаратів

$$ПР_б = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1620 \cdot 3600 = 17{,}5 \cdot 10^3 \text{ кг/рік};$$

– ПТО-0,1

$$ПР_{ПТО-0,1} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1080 \cdot 3600 = 23{,}3 \cdot 10^3 \text{ кг/рік};$$

– ПКС-0,18

$$ПР_{ПКС-0,18} = 4{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 1080 \cdot 3600 = 18{,}3 \cdot 10^3 \text{ кг/рік}.$$

Таким чином, використання ПТО-0,1 дозволить збільшити продуктивність на 33,1%; ПКС-0,18 – на 4,4%.

За розрахунками продуктивність дослідних апаратів перевищує продуктивність базових. Як відомо, зростання продуктивності веде до зменшення трудомісткості виробництва продукції та за інших рівних умов – до зниження витрат праці робітників виробництва. Унаслідок більшого значення показника продуктивності нових пристроїв з'являється можливість зниження загального обсягу трудовитрат на підприємстві.

ВИСНОВКИ

Огляд літературних даних показав, що основними недоліками процесів та апаратів жарення є значні тривалість та втрати маси, нерівномірність температурного поля за об'ємом виробу, суттєві матеріало-, енерговитрати та трудомісткість, низький ККД. Усунення вказаних недоліків можливе шляхом розширення застосування комбінованих процесів.

В основу наукових досліджень покладено ідею комбінування поверхневих методів нагрівання з електроконтактним, що дозволить інтенсифікувати процеси жарення та забезпечити рівномірне нагрівання окремих шарів за об'ємом виробу. Основними передумовами для цього є цілеспрямоване регулювання режимних параметрів нагрівання напівфабрикату шляхом застосування ЕКН із безпечними параметрами електричного струму, що забезпечить прогрівання внутрішнього шару до температури кулінарної готовності протягом часу, який не перевищує тривалості формування скоринки на поверхні, та безпечність обслуговування апаратів під час ручного завантаження-розвантаження.

Розрахунково-аналітичним шляхом визначено, що застосування ЕКН у комбінуванні із двобічним поверхневим нагріванням сприяє інтенсифікації прогрівання внутрішнього шару, ступінь якої залежить від параметрів електричного струму й електропровідних властивостей зразка. Запропоновано методику визначення параметрів комбінованого жарення з ЕКН для широкого асортименту смаженої та запеченої кулінарної продукції. Під час моделювання для ефективного й безпечного проведення ЕКН рекомендовано використання змінного струму прямокутної форми з напругою до 42 В.

Установлено, що під час ЕКН зразків із натуральної січеної м'ясної маси нерівномірність температурного поля не перевищує 7…9° С, за умови застосування змінного електричного струму прямокутної форми тривалість термообробки, порівняно з нагріванням постійним струмом, скорочується приблизно у 3,3…3,5 рази, а порівняно з нагріванням під впливом змінного струму синусоїдальної форми – на 30…32%.

Швидкість ЕКН визначається змінами питомої електропровідності зразка, значення якої є більшими в разі використання змінного електричного струму. Помітне зростання

середньої питомої електропровідності (на 29…30%) та скорочення тривалості (на 53…54%) спостерігається в разі збільшення частоти від 0,1 до 40…60 Гц, при цьому відзначається збільшення виходу готової продукції.

Доведено, що для забезпечення раціонального енергопідведення до напівфабрикату необхідно підтримувати постійну напругу. Це також дає можливість проводити процес при регламентованій за технікою безпеки напрузі (до 42 В).

Установлено, що електропровідність фаршів залежить від компонентного складу та чинників механічного впливу. Додавання жиру приводить до зменшення середньої питомої електропровідності, а води та водяного розчину NaCl – до її збільшення. У разі підвищення температури до 60…70° С питома електропровідність має характер зростання, а у випадку подальшого нагрівання до 90° С – характер зниження. Дво- і триразове пропускання фаршу через м’ясорубку приводить до збільшення середньої питомої електропровідності. Найбільш помітне зростання середньої питомої електропровідності спостерігається за надлишкового тиску 6…10 кПа.

Запропоновано два варіанти комбінованого способу жарення з ЕКН, який передбачає нагрівання внутрішніх шарів виробу переважно ЕКН, а нагрівання поверхневих шарів з формуванням скоринки – за рахунок теплоти від нагрівальної поверхні та ІЧ-променів (перший варіант) та за рахунок одночасного двобічного нагрівання від нагрівальних поверхонь (другий варіант). На прикладі зразків на основі натуральної січеної м’ясної маси експериментальними дослідженнями встановлено, що в разі реалізації комбінованого способу жарення з ЕКН тривалість термообробки, порівняно з двобічним жаренням, скорочується майже у 2 рази, при цьому вихід готової продукції збільшується на 12…14%. Отримані вироби відповідають вимогам санітарної безпеки та мають високі органолептичні показники.

Розроблено технічні вимоги та технічні завдання на проектування апаратів для реалізації комбінованого способу жарення з ЕКН. Багатофункціональний пристрій теплової обробки ПТО-0,1 являє собою теплоізольований металевий корпус, усередині якого розміщено нагрівальну завантажувальну чашу з протипригарним фторопластовим покриттям, у бічні пази якої вставляються діелектричні секції з електродами, а у відкидній кришці змонтовано

ІЧ-нагрівачі з відбивачами. Пристрій комбінованого смаження січених виробів ПКС-0,18 складається з двох шарнірно з'єднаних (нижнього та верхнього) каркасів, при цьому на нижньому каркасі закріплено штамповану основу із западинами, в яких розміщено нагрівальні плитки та різнополярні електроди; конструкція верхньої робочої частини через пружини та рухомі тримачі забезпечує щільний контакт виробу з нагрівальними плитками й електродами. Універсальність розроблених апаратів доведено шляхом їх апробації під час приготування широкого асортименту смаженої та запеченої кулінарної продукції на основі різноманітної сировини, зокрема м'ясної, овочевої, круп'яної та сиру. Визначено раціональні параметри процесу (напруга електричного струму та тривалість процесу нагрівання), які узагальнено у вигляді практичних рекомендацій.

Соціально-економічна ефективність науково-технічних розробок полягає у можливості, використовуючи ПТО-0,1 та ПКС-0,18, підвищити продуктивність відповідно на 33,1 та 4,6%, знизити витрату електроенергії до 60 та 47%, знизити собівартість 1 кг продукції до 5,0 та 3,6%.

ДОДАТКИ

Додаток А

РОЗРАХУНОК ПРИСТРОЮ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ПТО-0,1

Вихідні дані для розрахунку:

- пристрій призначений для теплової обробки кулінарних виробів комбінованим способом на основі електроконтактного нагрівання;
- площа робочої поверхні F = 0,1 м^2;
- кількість секцій, заповнених напівфабрикатом, – 6;
- вид напівфабрикатів – січені котлети;
- міжелектродна відстань – $60 \cdot 10^{-3}$м;
- висота напівфабрикату – $25 \cdot 10^{-3}$ м;
- довжина напівфабрикату – 0,30 м;
- маса одного напівфабрикату – $450 \cdot 10^{-3}$ кг;
- матеріали конструкції апарата:
    - електроди – титан ВТ1-0;
    - електродні секції та борта чаші – фторопласт-4;
    - основа чаші – чавун СЧ-15;
    - облицювання – сталь-3;
- початкова температура напівфабрикатів t_0 = 20° С;
- кінцева температура всередині напівфабрикатів t_1 = 80° С;
- кінцева температура скоринки t_2 = 115° С;
- робоча температура нагрівальної поверхні t = 160° С;
- тривалість розігрівання до робочої температури τ_p = 300 с.

Розрахунок потужності пристрою.

Пристрій теплової обробки ПТО-0,1 працює у двох режимах: розігрівання до робочої температури нагрівальної поверхні (нестаціонарний режим) та робочий режим – жарення з комбінуванням поверхневого, променистого та електроконтактного нагрівання (стаціонарний режим). При цьому потрібна потужність визначається з рівнянь теплового балансу:

$$Q' = Q'_5 + Q'_6, \qquad (А.1)$$

$$Q'' = Q''_1 + Q''_5, \qquad (А.2)$$

де Q', Q'' – потужність нагрівання, відповідно в нестаціонарному та стаціонарному режимах, Вт;

Q'_5, Q''_5 – втрата енергії зовнішніми стінками, відповідно в нестаціонарному та стаціонарному режимах, Вт;

Q'_6 – витрата потужності на розігрівання конструкції, Вт;

Q''_1 – корисно використана енергія, Вт.

Потужність, що втрачається зовнішніми стінками пристрою, визначається, як

$$Q_5 = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i F_i (t_{ni} - t_c), \text{ Вт}, \qquad \text{(А.3)}$$

де F_i – площа зовнішньої поверхні i-го елемента, м^2;

α_i – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище i-тим елементом зовнішньої поверхні, (Вт/м^2·К);

t_{ni} – середня температура і-го елемента зовнішньої поверхні, °С;

t_c – температура навколишнього середовища, °С.

При цьому коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище визначаємо з емпіричної залежності

$$\alpha = 9{,}74 + 0{,}07(t_{ni} - t_c). \qquad \text{(А.4)}$$

Результати розрахунку втрат енергії зовнішніми стінками пристрою зведено в табл. А.1.

Витрати потужності на розігрівання конструкції пристрою складають:

$$Q'_6 = Q_6^{p.n.} + Q_6^{із}, \qquad \text{(А.5)}$$

де $Q_6^{p.n.}$ – витрата енергії на розігрівання робочої поверхні пристрою, Вт;

$Q_6^{із}$ – витрата енергії на нагрівання ізоляції, Вт.

Таблиця А.1 – **До розрахунку витрат енергії стінками в навколишнє середовище**

Поверхні, що втрачають теплоту	**Розмір, м**	**Площа F, м^2**	**Середня температура і-го елемента поверхні, ˚С**		**Температура навколишнього середовища, t_c, °С**	**Коефіцієнт тепловіддачі, α, Вт/м^2·К**		**Витрата енергії, Вт**	
			за нестаціонарного режиму, t'_{ni}	**за стаціонарного режиму, t''_{ni}**		**за нестаціонарного режиму, α'**	**за стаціонарного режиму, α"**	**за нестаціонарного режиму, Q_5'**	**за стаціонарного режиму, Q_5''**
Горизонтальні	0,36×0,48 2 од.	0,35	30	50	20	9,8	11,8	34	124
Вертикальні	0,24×0,36 2 од. 0,48×0,24 2 од.	0,40						39	142
Разом								73	266

Загалом витрата потужності на розігрівання конструкції визначається з виразу

$$Q_6 = \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot c_i (t_i - t_c) \cdot \frac{1}{\tau}, \text{ Вт}, \qquad \text{(А.6)}$$

де c_i – теплоємність матеріалу i-го елемента конструкції, Дж/(кг·°С);

t_i – середня температура нагрітого i-го елемента конструкції, °С;

t_c – температура навколишнього середовища, °С;

τ – тривалість розігрівання, с;

G_i – маса i-го елемента конструкції (кг), що визначається за формулою

$$G_i = V_i \cdot \rho, \qquad \text{(А.7)}$$

де V_i – об’єм i-го елемента конструкції, м^3;

ρ_i – густина конструкційного матеріалу, кг/м^3.

Для визначення витрати енергії на нагрівання теплоізоляційного матеріалу розрахуємо товщину ізоляційного шару стінок (δ, м) для нагрівальної плити

$$\delta = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{q}, \qquad \text{(А.8)}$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності ізоляційного матеріалу, Вт/(м·К);

t_1, t_2 – температури внутрішньої та зовнішньої поверхні шару ізоляції відповідно,°С;

q – питомий тепловий потік через шар ізоляції, Вт/м^2.

Обираємо ізоляційний матеріал − полістирол, коефіцієнт теплопровідності якого λ = 0,046 Вт/(м·К).

Теплові втрати поверхні ізольованої частини складають:

$$q = 0{,}46t_1 + 40, \qquad \text{(А.9)}$$

$$q = 0{,}46 \cdot 160 + 40 = 113{,}6 \text{ Вт/м}^2.$$

Підставляючи відомі значення у формулу (А.8), визначаємо товщину теплоізоляційного шару

$$\delta = \frac{0{,}046 \cdot (160 - 50)}{113{,}6} = 0{,}05 \text{ м}.$$

Розрахунок витрати потужності на розігрівання конструкції пристрою наведено у табл. А.2.

Таблиця А.2 – **До розрахунку витрат потужності на розігрівання конструкції апарата**

Елемент конструкції	**Об'єм елемента конструкції, V_i, м^3**	**Матеріал**	**Густина, ρ_i, кг/м^3**	**Маса, G_i, кг**	**Температура**		**Питома теплоєм ність, c_i, Дж/(кг·°С)**	**Тривалість розігрівання, τ, с**	**Кількість теплоти, $Q_б$, Вт**
					середня нагрітого елемента t_i,°С	**навколишнього середовища, t_c, °С**			
Основа чаші	$1{,}3\times10^{-3}$	чавун СЧ-15	7220	9,4	160	20	460	300	2018
Борт чаші	$2{,}0\times10^{-3}$	фторопласт-4	2200	4,4	45		1040		376
Електродні секції	$0{,}5\times10^{-3}$			1,1					95
Електроди	$0{,}2\times10^{-3}$	титан ВТ1-0	4505	0,9	35		548		25
Теплоізоляція	$8{,}1\times10^{-3}$	полістирол	30	0,2	120		340		23
Облицювання	$1{,}1\times10^{-3}$	сталь-3	7850	8,6	30		460		132
Разом									2669

Корисна теплота $Q_{кор.}$ (Дж), що використовується в стаціонарному режимі теплової обробки, складається з теплоти на нагрівання внутрішніх шарів продукту $Q_{вн.}$ та на утворення скоринки $Q_{ск.}$. При цьому слід зазначити, що теплова обробка в апараті здійснюється комбінованим способом, тобто енергія надходить за рахунок електроконтактного ($Р_{ЕКН}$), поверхневого ($Р_{пов.}$) та променистого ($Р_{пром.}$) нагрівання. Припустимо, що теплота від ЕКН використовується на нагрівання внутрішнього шару, а від поверхневого та ІЧ-нагрівання спрямовується на формування скоринки. Тоді

$$Q_1'' = \frac{Q_{кор.}}{\tau} = Р_{ЕКН} + Р_{пов} + Р_{пром}, \text{ Вт.} \qquad (А.10)$$

Теплову енергію на нагрівання внутрішніх шарів та скоринки можна подати окремо у вигляді суми енергії на нагрівання напівфабрикату $Q_{н.}$ та випаровування з нього вологи $Q_{вип.}$, що визначаються:

$$Q_{н.} = n \cdot k \cdot G \cdot c \cdot \Delta t, \text{ Дж}, \qquad (А.11)$$

де n – кількість напівфабрикатів;

k – частка від маси напівфабрикату;

G – маса одного напівфабрикату, кг;

c – середня питома теплоємність напівфабрикату, Дж/(кг·°С);

Δt – різниця температур, °С;

$$Q_{вип.} = n \cdot k \cdot G \cdot x \cdot r, \text{ Дж}, \qquad (А.12)$$

де x – кількість випареної вологи від початкової маси;

r – прихована теплота пароутворення, Дж/кг.

Визначимо потрібну кількість теплоти для нагрівання внутрішніх шарів. Для цього беремо, що кількість внутрішнього шару дорівнює 75%, тобто k = 0,75. Різниця температур початкової (t_0 = 20° С) та кінцевої (t_1 = 80 °С) складе $\Delta t = t_1 - t_0 = 80 - 20 = 60$ ° С. За середньої при цьому температури 50° С прихована теплота пароутворення r складає $2382{,}2 \cdot 10^3$ Дж/кг. Середню питому теплоємність візьмемо за

вологовмісту продукту 60%, тобто с = 3157 Дж/кг·℃. Кількість випареної вологи від початкової маси – 15%.

Розрахунки за рівняннями (А.11) та (А.12) дадуть наступні результати:

$$Q_{н.} = 6 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}450 \cdot 3157 \cdot 60 = 384 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

$$Q_{вип.} = 6 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}450 \cdot 0{,}15 \cdot 2382{,}2 \cdot 10^3 = 724 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Сума цих складових, як було зазначено раніше, визначить $Q_{вн.}$:

$$Q_{вн.} = (384 + 724) \cdot 10^3 = 1108 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

За такою ж послідовністю визначимо енергію на утворення скоринки. При цьому частка скоринки k складе 0,25. Зміну температури скоринки подамо як таку, що змінюється поетапно: на 1-му етапі, як і для внутрішнього шару $\Delta t_1 = t_1 - t_0 = 60\,°$ С та на 2-му – від t_1 до t_2 (t_2 = 115° С – кінцева температура скоринки), а отже $\Delta t_2 = t_2 - t_1 = 115 - 80 = 35\,°$ С. За середньої температури 2-го етапу нагрівання скоринки, що дорівнює приблизно 100° С, прихована теплота пароутворення r = 2256,3·10^3 Дж/кг. При цьому середня питома теплоємність – 1670 Дж/кг·℃. Слід зауважити, що на 2-му етапі маса продукту буде меншою за рахунок випареної вологи на 1-му, тобто за умови, що x дорівнює 0,15, маса складатиме G = 0,450–0,450·0,15 = 0,383 кг. Візьмемо на 2-му етапі втрату маси скоринки 45%.

Відповідно до (А.11) та (А.12) для скоринки:

$$Q_{н.1} = 6 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}450 \cdot 3157 \cdot 60 = 128 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

$$Q_{н.2} = 6 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}383 \cdot 1670 \cdot 35 = 34 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

$$Q_{вип.1} = 6 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}460 \cdot 0{,}15 \cdot 2382{,}2 \cdot 10^3 = 241 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

$$Q_{вип.2} = 6 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}383 \cdot 0{,}45 \cdot 2256{,}3 \cdot 10^3 = 583 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Просумуємо складові та отримаємо енергію на утворення скоринки:

$$Q_{ск.} = (128 + 34 + 241 + 583) \cdot 10^3 = 986 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Розв'язання рівняння (А.10) можливе при відомій тривалості процесу τ, яка визначається з рівняння для теплової енергії поверхневим нагріванням

$$Q_{пов.} = \frac{\Delta t_{сер.} \cdot S \cdot \tau}{\delta_{ск} / \lambda_{ск}}, \text{ Дж;} \qquad \text{(А.13)}$$

$$\tau = \frac{Q_{пов.} \cdot \delta_{ск.} / \lambda_{ск}}{\Delta t_{сер} \cdot S}, \text{ с,} \qquad \text{(А.14)}$$

де $\Delta t_{сер.}$ – середня різниця температур, °С;

S – площа контакту напівфабрикатів з поверхнею нагрівання, м^2;

$\delta_{ск}$ – товщини скоринки, м;

$\lambda_{ск}$ – середнє значення коефіцієнта теплопровідності скоринки.

Середня різниця температур скоринки за умов, що $\Delta t_б / \Delta t_м > 2$, де $\Delta t_б$ і $\Delta t_м$ – відповідно більша різниця між температурою нагрівальної поверхні t і початковою температурою напівфабрикату t_0 ($\Delta t_б = t - t_0$) й менша різниця між t і середньою кінцевою температурою скоринки $t_{сер}$ ($\Delta t_м = t - t_{сер}$), дорівнюватиме:

$$\Delta t_{сер.} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{2{,}3 \lg\left(\Delta t_б / \Delta t_м\right)}, \text{ °С;} \qquad \text{(А.15)}$$

$$\Delta t_б = 160 - 20 = 140 \text{ °С.}$$

Середня кінцева температура скоринки під час її формування визначається таким чином:

$$t_{сер} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{80 + 115}{2} = 97{,}5 \text{ °С,} \qquad \text{(А.16)}$$

де t_1 – кінцева температура скоринки на 1-му етапі теплової обробки, °С;

t_2 – кінцева температура скоринки, °С.

$$\Delta t_{м} = 180 - 97{,}5 = 82{,}5\,^{\circ}\text{ C}.$$

З виразу (А.15) отримуємо:

$$\Delta t_{сер.} = \frac{140 - 82{,}5}{2{,}3\lg\left(\frac{140}{82{,}5}\right)} = 109\,^{\circ}\text{ C}.$$

За умов поставленої задачі S = 0,1 м^2; $\delta_{ск}$ = 0,003 м; також беремо $\lambda_{ск}$ = 0,25 Вт/м·К.

Необхідна кількість теплоти на формування скоринки з одного боку буде однаковою як від поверхневого нагрівання, так і від променистого ($Q_{пов.}$ = $Q_{пром}$), тобто дорівнюватиме половині $Q_{ск.}$ = 493·10^3 Дж.

Із виразу (А.14) тривалість нагрівання дорівнюватиме:

$$\tau = \frac{493 \cdot 10^3 \cdot \frac{0{,}003}{0{,}25}}{109 \cdot 0{,}1} = 543 \text{ с},$$

беремо за час обробки 9 хв, тобто 540 с.

Теплова обробка електричним струмом характеризується виділенням теплової енергії безпосередньо в продукті з мінімальним нагріванням конструктивних елементів апарата, тому припустимо, що вся енергія $Q_{ЕКН}$ має корисну дію і $Q_{ЕКН}$ = $Q_{вн.}$ = 1108·10^3 Дж.

Визначимо потужності нагрівання:

- для ЕКН

$$P_{ЕКН} = \frac{Q_{ЕКН}}{\tau} = \frac{1108 \cdot 10^3}{540} = 2052 \text{ Вт}, \qquad (А.17)$$

вважатимемо, що $P_{ЕКН}$ = 2100 Вт;

- для поверхневого та ІЧ:

$$P_{пов.} = P_{ІЧ} = \frac{Q_{ск.}}{\tau} = \frac{493 \cdot 10^3}{540} = 913 \text{ Вт}, \qquad (А.18)$$

візьмемо $P_{пов.}$ = $P_{ІЧ}$ = 900 Вт.

За виразом (А.10) загальна корисна потужність дорівнюватиме:

$$Q_1'' = 2100 + 900 + 900 = 3900 \text{ Вт}.$$

У табл. А.3 наведено підсумкові результати розрахунку потужності.

Таблиця А.3 – **Підсумкові результати розрахунку потужності ПТО-0,1**

Потужність	**Режим роботи**	
	нестаціонарний, Q′, Вт	**стаціонарний, Q″, Вт**
Корисно використана Q_1: - від ЕКН; - від поверхневого нагрівання; - від ІЧ-нагрівання; - разом	-	 2100 900 900 3900
Втрати у навколишнє середовище Q_5	73	266
Втрати на розігрівання конструкції Q_6	2669	-
Разом Q	2742	4166

Розрахунок електроконтактного нагрівання. Вхідним параметром, що визначатиме весь перебіг процесу електроконтактного нагрівання є напруга електричного струму, що з точки зору безпеки не повинна перевищувати 42 В та може бути визначена з закону Джоуля–Ленца у вигляді:

$$Q_{ЕКН} = U^2 \cdot \sigma_{c.} \cdot \tau \text{, Дж,} \qquad \text{(А.19)}$$

$$U = \sqrt{\frac{Q_{EKH}}{\sigma_{c.} \cdot \tau}}, \text{ В}, \qquad \text{(А.20)}$$

де U – напруга електричного струму, В;

$\sigma_{c.}$ – середня електропровідність, Ом$^{-1}$ (згідно з діаграмою, наведеною в підрозділі 4.3.4 при міжелектродній відстані 0,06 м та площі контакту продукт–електрод $7{,}5 \cdot 10^{-3}$ м^2 середня електропровідність $\sigma_{c.} = 313 \cdot 10^{-3}$ Ом$^{-1}$).

Електричний струм підводиться до кожного напівфабрикату окремо, тому для визначення потрібної напруги необхідно Q_{EKH} поділити на кількість напівфабрикатів n. Тоді вираз (А.20) набуває вигляду:

$$U = \sqrt{\frac{Q_{EKH}}{n \cdot \sigma_{c.} \cdot \tau}}, \text{ В}, \qquad \text{(А.21)}$$

$$U = \sqrt{\frac{1108 \cdot 10^3}{6 \cdot 313 \cdot 10^{-3} \cdot 450}} = 32 \text{ В}.$$

Беремо за напругу ЕКН 30 В, що не перевищує можливі з точки зору безпеки 42 В.

Розрахунок герметично закритих електронагрівачів (тенів).

Потужність одного тена

$$P_1 = \frac{Q'}{n}, \qquad \text{(А.22)}$$

де n – кількість тенів (беремо 2 одиниці).

$$P_1 = \frac{2742}{2} = 1371 \text{ Вт}.$$

Візьмемо для монтажу два тени, потужність кожного з яких складає 1,5 кВт. При цьому нагрівачі працюють на повну потужність у нестаціонарному режимі – 3 кВт; у стаціонарному працює один тен – із потужністю 1,2 кВт, що повністю задовольняє потрібну потужність в 1166 Вт (90 Вт – для формування скоринки на нижній поверхні виробу та 266 Вт – втрати в навколишнє середовище).

Довжина активної (нагрівальної) частини тена (м)

$$L_a = \frac{P_1}{\pi DW}, \qquad \text{(А.23)}$$

де D – зовнішній діаметр трубки тена, см (візьмемо $D = 16 \cdot 10^{-3}$м);

W – поверхнева потужність тена, Вт/см ^{2} (візьмемо $W = 4$ Вт/см^2).

$$L_a = \frac{1500}{3{,}14 \cdot 1{,}6 \cdot 4} = 75 \text{ см} = 0{,}75 \text{ м}.$$

Повна довжина трубки з урахуванням пасивних кінців (м) дорівнює

$$L = L_a + 2L_n, \qquad \text{(А.24)}$$

де L_n – довжина пасивних кінців трубки, м ($L_n \approx 0{,}05$ м),

$$L = 0{,}75 + 2 \cdot 0{,}05 = 0{,}85 \text{ м}.$$

Струм, споживаний одним теном (А):

$$J = \frac{P_1}{U}, \qquad \text{(А.25)}$$

де U – напруга електромережі, В.

$$J = \frac{1500}{220} = 6{,}8 \text{ А}.$$

Електричний опір дроту ТЕНа (Ом) складає

$$R_1 = \frac{U}{J} = 32{,}4. \qquad \text{(А.26)}$$

Довжина дроту спіралі (м) дорівнює

$$l = \frac{\pi d^2 R_1}{4\rho}, \qquad \text{(А.27)}$$

де d – діаметр дроту спіралі, мм (візьмемо d = 1,2 мм);

ρ – питомий опір матеріалу спіралі, Ом·мм^2/м (беремо ρ = 1,16 Ом·мм^2/м).

$$l = \frac{3{,}14 \cdot 1{,}2^2 \cdot 32{,}4}{4 \cdot 1{,}16} = 31{,}5 \text{ м}.$$

Довжина витка спіралі (мм) складає

$$l_в = 1{,}07\pi(d_{ст} + 2d), \qquad \text{(А.28)}$$

де 1,07 – коефіцієнт, що враховує збільшення діаметра спіралі при зніманні її зі стрижня;

$d_{ст}$ – діаметр стрижня, візьмемо 5,6 мм.

$$l_в = 1{,}07 \cdot 3{,}14(5{,}6 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-3}) = 26{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Число витків спіралі обчислюємо за формулою

$$n = \frac{l}{l_в}, \qquad \text{(А.29)}$$

$$n = \frac{31{,}5}{26{,}8 \cdot 10^{-3}} = 1175.$$

Крок намотування витків спіралі (мм)

$$K = \frac{L_a}{n}, \qquad \text{(А.30)}$$

$$K = \frac{750}{1175} = 0{,}64 \text{ мм}.$$

Потрібна кількість дроту (з урахуванням необхідного нагвинчування на кінці контактного стрижня 20 витків спіралі) для одного тена (м)

$$l_n = l + \frac{(2 \cdot 20 \cdot l_в)}{1000}, \qquad \text{(А.31)}$$

$$l_n = 31{,}5 + \frac{2 \cdot 20 \cdot 26{,}8}{1000} = 32{,}6 \text{ м.}$$

Внутрішній діаметр трубки тена (мм)

$$D_{вн} = D - 2\delta_{тр}, \qquad \text{(А.32)}$$

де $\delta_{тр}$ – товщина стінки трубки, мм (візьмемо $\delta_{тр}$ = 2 мм).

$$D_{вн} = 16 - 2 \cdot 2 = 12 \text{ мм.}$$

Діаметр витка спіралі (мм)

$$d_в = 2\,d + d_{ст}, \qquad \text{(А.33)}$$

$$d_в = 2 \cdot 1{,}2 + 5{,}6 = 8 \text{ мм.}$$

Геометричні характеристики спіралі:

$$x = \frac{d}{D_{вн}}; \qquad y = \frac{d}{d_в}; \qquad z = \frac{D_{вн}}{d_в}; \qquad K_1 = \frac{K}{d}, \qquad \text{(А.34)}$$

$$x = \frac{1{,}2}{12} = 0{,}1; \quad y = \frac{1{,}2}{8} = 0{,}15; \quad z = \frac{12}{8} = 1{,}5; \quad K_1 = \frac{0{,}99}{1{,}2} = 0{,}8.$$

Ураховуючи, що коефіцієнт теплопровідності ізоляційної маси (переклазу) дорівнює 0,022 Вт/(м·℃), за номограмою [95, с. 213] визначаємо перепад температур в ізоляційному шарі тена на одиницю теплового потоку $\frac{\Delta t}{q_l} = 1{,}5$ (см·К)/Вт.

Питомий тепловий потік на одиницю довжини тена складає

$$q_{_l} = \frac{P_1}{L_a}, \qquad \text{(А.35)}$$

$$q_{_l} = \frac{P_1}{L_a} = \frac{1500}{75} = 20 \text{ Вт/см.}$$

Перепад температури в ізоляційному шарі обчислюємо таким чином:

$$\Delta t_{_{із}} = \frac{\Delta t}{q_{_l}} q_{_l}, \qquad \text{(А.36)}$$

$$\Delta t_{_{із}} = \frac{\Delta t}{q_{_l}} q_{_l} = 1{,}5 \cdot 20 = 30\,^\circ \text{ С.}$$

Робоча температура спіралі (°С)

$$t_{сп} = 1{,}3\Delta t_{із} + t_n, \qquad \text{(А.37)}$$

де 1,3 – коефіцієнт, що враховує перепад температури у контактному шарі (поверхня дроту – ізоляційна маса);

t_n – температура поверхні тена, °С.

$$t_{сп} = 1{,}3 \cdot 30 + 480 = 519 \text{ °С.}$$

Отже, обираємо тип нагрівача ТЕН-75А16/1,5L220.

Розрахунок ІЧ-випромінювачів.

Температура випромінювача:

$$T_1 = 100\sqrt[4]{\frac{Q_{пром.}}{\varepsilon \cdot C_0 \cdot \mathrm{S} \cdot \tau} + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}, \text{ К.} \qquad \text{(А.38)}$$

За даних умов $T_2 = 345$ К. Візьмемо ε = 0,5. За виразом (А.38) обчислюємо:

$$T_1 = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{493 \cdot 10^3}{0{,}5 \cdot 5{,}67 \cdot 0{,}1 \cdot 450} + \left(\frac{345}{100}\right)^4} = 796 \text{ К}.$$

Згідно із законом Віна в разі нагрівання випромінюванням взаємозв'язок між температурою випромінювача та довжиною хвилі $\lambda_в$ описується рівнянням (1.9), з якого визначимо довжину хвилі:

$$\lambda_в = \frac{2{,}9 \cdot 10^3}{\text{T}} = \frac{2{,}9 \cdot 10^3}{796} = 3{,}6 \text{ мкм}. \qquad \text{(А.39)}$$

Визначимо густину теплового потоку ІЧ-нагрівача:

$$q_{ІЧ} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{\text{T}_1}{100}\right)^4 = 0{,}5 \cdot 5{,}67 \cdot \left(\frac{796}{100}\right)^4 = 1{,}1 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2. \qquad \text{(А.40)}$$

Отже, обираємо «темний» ІЧ-випромінювач із довжиною хвилі 3,6 мкм та густиною теплового потоку $1{,}1 \cdot 10^4$ Вт/м^2.

Розрахунок продуктивності пристрою

Продуктивність пристрою (кг/с) складає:

$$G = \frac{M}{\tau_з + \tau_{обр} + \tau_р}, \qquad \text{(А.41)}$$

де M – маса одноразово завантажених продуктів, кг;

$\tau_з$ – тривалість завантаження, с;

$\tau_{обр}$ – тривалість теплової обробки, с;

$\tau_р$ – тривалість розвантаження, с.

$$G = \frac{6 \cdot 450 \cdot 10^{-3}}{60 + 450 + 70} = 4{,}7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}.$$

Продуктивність за основним часом обчислюється за формулою

$$G_0 = \frac{M}{\tau_{обр}} = \frac{2,7}{450} = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с.} \qquad \text{(А.42)}$$

Розрахунок техніко-економічних і експлуатаційних показників.
Коефіцієнт корисної дії η складає:

$$\eta = \frac{Q''_1}{Q''_{общ}} = \frac{3900}{4166} = 0,94. \qquad \text{(А.43)}$$

Питома металомісткість (кг/м^2)

$$m = \frac{M}{F}, \qquad \text{(А.44)}$$

де M – маса металоконструкції, кг;
F – площа робочої поверхні, м^2.

$$m = \frac{24,6}{0,1} = 246 \text{ кг/м}^2.$$

Питома витрата теплоти

$$q = \frac{Q''_{заг.}}{G_0} = \frac{4166}{6,0 \cdot 10^{-3}} = 0,7 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг.} \qquad \text{(А.45)}$$

Теплова напруга нагрівальної поверхні

$$T = \frac{P'_1}{F} = \frac{1200}{0,1} = 12000 \text{ Вт/м}^2, \qquad \text{(А.46)}$$

де P'_1 – потужність тена в стаціонарному режимі роботи, Вт.

Додаток Б

РОЗРАХУНОК ПРИСТРОЮ КОМБІНОВАНОГО СМАЖЕННЯ ПКС-0,18

Вихідні дані для розрахунку:

- пристрій призначений для смаження січених кулінарних виробів комбінованим способом із використанням ЕКН;
- площа однієї нагрівальної плитки $F = 6{,}0 \cdot 10^{-3}$ м^2;
- кількість пар нагрівальних плиток $n = 15$ од.;
- маса одного напівфабрикату $m = 122 \cdot 10^{-3}$ кг;
- площа контакту електрода з напівфабрикатом $S = 2 \cdot 10^{-3}$ м;
- міжелектродна відстань $h = 60 \cdot 10^{-3}$ м;
- матеріали конструкції апарата:
  - електроди – титан ВТ1-0;
  - діелектричні плити, фіксатори та тримачі – фторопласт-4;
  - облицювання – сталь-3;
- початкова температура напівфабрикатів $t_0 = 20°$ С;
- кінцева температура всередині напівфабрикатів $t_1 = 80°$ С;
- кінцева температура скоринки $t_2 = 115°$ С;
- робоча температура нагрівальної поверхні $t = 160°$ С;
- тривалість розігрівання до робочої температури $\tau_p = 300$ с.

Розрахунок потужності пристрою. Пристрій комбінованого смаження ПКС-0,18 працює у двох режимах: розігрівання до робочої температури нагрівальних плиток (нестаціонарний режим) та робочий режим – смаження поверхневим та електроконтактним нагріванням (стаціонарний режим). При цьому потрібна потужність визначається з рівнянь теплового балансу:

$$Q' = Q'_5 + Q'_6, \qquad (Б.1)$$

$$Q'' = Q''_1 + Q''_5, \qquad (Б.2)$$

де Q', Q'' – потужність нагрівання, відповідно в нестаціонарному та стаціонарному режимах, Вт;

Q'_5, Q''_5 – втрата енергії зовнішніми стінками у навколишнє середовище, відповідно в нестаціонарному та стаціонарному режимах, Вт;

Q'_6 – витрата потужності на розігрівання конструкції, Вт;

Q''_1 – корисно використана енергія, Вт.

Потужність, що втрачається зовнішніми стінками пристрою, визначається, як

$$Q_5 = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i F_i (t_{ni} - t_c), \text{ Вт}, \qquad (Б.3)$$

де F_i – площа зовнішньої поверхні i-го елемента, $м^2$;

α_i – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище i-тим елементом зовнішньої поверхні, (Вт/м^2·К);

t_{ni} – середня температура і-го елемента зовнішньої поверхні, °С;

t_c – температура навколишнього середовища, °С.

При цьому коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище визначаємо з емпіричної залежності

$$\alpha = 9{,}74 + 0{,}07(t_{ni} - t_c). \qquad (Б.4)$$

Результати розрахунку втрат енергії зовнішніми стінками пристрою в навколишнє середовище зведено в табл. Б.1.

Витрата потужності на розігрівання конструкції визначається з виразу

$$Q_6 = \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot c_i (t_i - t_c) \cdot \frac{1}{\tau}, \text{ Вт}, \qquad (Б.5)$$

де c_i – теплоємність матеріалу i-го елемента конструкції, Дж/(кг·°С);

t_i – середня температура нагрітого i-го елемента конструкції, °С;

t_c – температура навколишнього середовища, °С;

τ – тривалість розігрівання, с;

G_i – маса i-го елемента конструкції, що визначається за формулою

$$G_i = V_i \cdot \rho, \text{ кг}, \qquad (Б.6)$$

де V_i – об’єм i-го елемента конструкції, м^3 ;

ρ_i – густина конструкційного матеріалу, кг/м^3.

Таблиця Б.1 – **До розрахунку витрат енергії стінками в навколишнє середовище**

Поверхні, що втрачають теплоту	**Розміри, м**	**Площа F, м^2**	**Середня температура і-го елемента поверхні, °С**		**Температура навколишнього середовища, t_c, °С**	**Коефіцієнт тепловіддачі, α, Вт/(м^2·К)**		**Витрата енергії, Вт**	
			за нестаціонарного режиму, t'_{ni}	**за стаціонарного режиму, t''_{ni}**		**за нестаціонарного режиму,α'**	**за стаціонарного режиму, α''**	**за нестаціонарного режиму,Q_5'**	**за стаціонарного режиму, Q_5''**
Горизонтальні	0,49×0,42 2 од.	0,41	30	50	20	9,8	11,8	40	145
Вертикальні	0,17×0,49 2 од. 0,17×0,42 2 од.	0,31						30	110
Разом								70	255

Для визначення витрати енергії на нагрівання теплоізоляційного матеріалу розрахуємо товщину ізоляційного шару

$$\delta = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{q}, \text{ м.} \qquad (Б.7)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності ізоляційного матеріалу, Вт/(м·К);

t_1, t_2 – температура внутрішньої та зовнішньої поверхні шару ізоляції відповідно,°С;

q – питомий тепловий потік через шар ізоляції, Вт/м^2.

Обираємо ізоляційний матеріал − полістирол, коефіцієнт теплопровідності якого λ = 0,046 Вт/(м·К).

Теплові втрати поверхні ізольованої частини складають

$$q = 0{,}46t_1 + 40, \qquad \text{(Б.8)}$$

$$q = 0{,}46 \cdot 115 + 40 = 92{,}9 \text{ Вт/м}^2.$$

Підставляючи відомі значення у формулу (А.8), визначаємо товщину теплоізоляційного шару

$$\delta = \frac{0{,}046 \cdot (115 - 30)}{92{,}9} = 0{,}04 \text{ м}.$$

Розрахунок витрати потужності на розігрівання конструкції пристрою зведено у табл. Б.2.

Таблиця Б.5 – **До розрахунку витрат потужності на розігрівання конструкції апарата**

Елемент конструкції	**Об'єм елементів конструкції, V_i, м^3**	**Матеріал**	**Густина, ρ_i, кг/м^3**	**Маса, G_i, кг**	**Температура**		**Питома теплоємність, c_i, Дж/(кг·°С)**	**Тривалість розігрівання, τ, с**	**Кількість теплоти, $Q_б$, Вт**
					середня нагрітого елемента t_i,°С	**навколишнього середовища, t_c, °С**			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Каркаси	$3{,}5\times10^{-3}$	фторопласт-4	2200	7,7	30	20	1040	300	267
Нижня діелектрична плита	$2{,}0\times10^{-3}$			4,4	110				1373
Верхня діелектрична плита	$0{,}6\times10^{-3}$			1,3	60				180

Продовження таблиці Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фіксатори	$0,3\times10^{-3}$			0,7	35				36
Тримачі	$0,5\times10^{-3}$			1,1	120				381
Нагрівальні плитки	$0,5\times10^{-3}$	чавун СЧ-15	7220	3,6	160		460		773
Пружини	$0,1\times10^{-3}$	сталь у8	7839	0,8	40		477		25
Електроди	$0,1\times10^{-3}$	титан ВТ1-0	4505	0,5	50		548		27
Теплоізоляція	$6,5\times10^{-3}$	полістирол	30	0,2	100		340		18
Облицювання	$0,7\times10^{-3}$	сталь-3	7850	8,6	30		460		132
Разом									3212

Корисна теплота $Q_{кор.}$ (Дж), що використовується в стаціонарному режимі теплової обробки, складається з теплоти на нагрівання внутрішніх шарів продукту $Q_{вн.}$ та на утворення скоринки $Q_{ск.}$. При цьому слід зазначити, що теплова обробка в апараті здійснюється комбінованим способом, тобто енергія надходить за рахунок електроконтактного ($P_{ЕКН}$) та двобічного поверхневого ($P_{пов.}$) нагрівання. Припустимо, що теплота від ЕКН використовується на нагрівання внутрішнього шару, а від поверхневого спрямовується на формування скоринки. Тоді

$$Q_1'' = \frac{Q_{кор.}}{\tau} = P_{ЕКН} + 2P_{пов}, \text{ Вт.} \qquad (Б.9)$$

Теплову енергію на нагрівання внутрішніх шарів та скоринки можна подати окремо у вигляді суми енергії на нагрівання

напівфабрикату $Q_{н.}$ та випаровування з нього вологи $Q_{вип.}$, що визначаються:

$$Q_{н.} = n \cdot k \cdot G \cdot c \cdot \Delta t \text{, Дж,} \qquad \text{(Б.10)}$$

де n – кількість напівфабрикатів;
k – частка від маси напівфабрикату;
G – маса одного напівфабрикату, кг;
c – середня питома теплоємність напівфабрикату, Дж/кг·°С;
Δt – різниця температур, °С;

$$Q_{вип.} = n \cdot k \cdot G \cdot x \cdot r \text{, Дж,} \qquad \text{(Б.11)}$$

де x – кількість випареної вологи від початкової маси;
r – прихована теплота пароутворення, Дж/кг.

Визначимо потрібну кількість теплоти для нагрівання внутрішніх шарів. Для цього приймаємо, що кількість внутрішнього шару дорівнює 75%, тобто k = 0,75. Різниця початкової (t_0 = 20° С) та кінцевої температур (t_1 = 80° С) складе $\Delta t = t_1 - t_0 = 80 - 20 = 60\,°$ С. За середньої при цьому температури 50° С прихована теплота пароутворення r складає $2382{,}2 \cdot 10^3$ Дж/кг. Середню питому теплоємність візьмемо при вологовмісті продукту 60%, тобто с = 3157 Дж/(кг·°С). Кількість випареної вологи від початкової маси – 15%.

Розрахунки за рівняннями (Б.10) та (Б.11) дадуть такі результати:

$$Q_{н.} = 15 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}122 \cdot 3157 \cdot 60 = 260 \cdot 10^3 \text{ Дж;}$$

$$Q_{вип.} = 15 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}122 \cdot 0{,}15 \cdot 2382{,}2 \cdot 10^3 = 490 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Сума цих складових, як було зазначено раніше, визначить $Q_{вн.}$:

$$Q_{вн.} = (260 + 490) \cdot 10^3 = 750 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

За такою ж послідовністю визначимо енергію на утворення скоринки. При цьому частка скоринки, тобто k складе 0,25. Зміну температури скоринки подамо як таку, що змінюється поетапно: на 1-му етапі, як і для внутрішнього шару, $\Delta t_1 = t_1 - t_0 = 60\,°$ С та

на 2-му – від t_1 до t_2 (t_2 = 115° С – кінцева температура скоринки), а отже $\Delta t_2 = t_2 - t_1 = 115 - 80 = 35°$ С. За середньої температури 2-го етапу нагрівання скоринки, що дорівнює приблизно 100° С прихована теплота пароутворення r = 2256,3·10^3 Дж/кг. Середня питома теплоємність при цьому складі 1670 Дж/кг·℃. Слід зауважити, що на 2-му етапі маса продукту буде меншою за рахунок випареної вологи на 1-му, тобто за умови, що x дорівнює 0,15, маса складатиме G = 0,450–0,450·0,15 = 0,383 кг. Візьмемо на 2-му етапі втрату маси скоринки 45%.

Відповідно до (Б.10) та (Б.11) для скоринки:

$$Q_{н.1} = 15 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}122 \cdot 3157 \cdot 60 = 87 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

$$Q_{н.2} = 15 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}122 \cdot 1670 \cdot 35 = 27 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

$$Q_{вип.1} = 15 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}122 \cdot 0{,}15 \cdot 2382{,}2 \cdot 10^3 = 164 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

$$Q_{вип.2} = 15 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}122 \cdot 0{,}45 \cdot 2256{,}3 \cdot 10^3 = 465 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Просумуємо складові та отримаємо енергію на утворення скоринки:

$$Q_{ск.} = (87 + 27 + 164 + 465) \cdot 10^3 = 743 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Рішення рівняння (Б.9) можливе при відомій тривалості процесу τ, яка визначається з рівняння для теплової енергії поверхневим нагріванням

$$Q_{пов.} = \frac{\Delta t_{сер.} \cdot S \cdot \tau}{\delta_{ск} / \lambda_{ск}}, \text{ Дж}; \qquad \text{(Б.12)}$$

$$\tau = \frac{Q_{пов.} \cdot \delta_{ск.} / \lambda_{ск}}{\Delta t_{сер} \cdot S}, \text{ с}, \qquad \text{(Б.13)}$$

де $\Delta t_{сер.}$ – середня різниця температур, °С;

S – площа контакту напівфабрикатів із поверхнею нагрівання, м^2;

$\delta_{ск}$ – товщини скоринки, м;

$\lambda_{ск}$ – середнє значення коефіцієнта теплопровідності скоринки.

Середня різниця температур скоринки за умов, що $\Delta t_б / \Delta t_м > 2$, де $\Delta t_б$ і $\Delta t_м$ – відповідно, більша різниця між температурою нагрівальної поверхні t і початковою температурою напівфабрикату t_0 ($\Delta t_б = t - t_0$), і менша різниця між t і середньою кінцевою температурою скоринки $t_{сер}$ ($\Delta t_м = t - t_{сер}$), дорівнюватиме:

$$\Delta t_{сер.} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{2{,}3 \lg\left(\Delta t_б / \Delta t_м\right)}, \text{ °C;} \qquad \text{(Б.14)}$$

$$\Delta t_б = 160 - 20 = 140 \text{ ° C.}$$

Середня кінцева температура скоринки під час її формування визначається

$$t_{сер} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{80 + 115}{2} = 97{,}5 \text{ ° C,} \qquad \text{(Б.15)}$$

де t_1 – кінцева температура скоринки на 1-му етапі теплової обробки, °С;

t_2 – кінцева температура скоринки, °С.

$$\Delta t_м = 180 - 97{,}5 = 82{,}5 \text{ ° C;}$$

За виразом (Б.15) отримуємо:

$$\Delta t_{сер.} = \frac{140 - 82{,}5}{2{,}3 \lg\left(\frac{140}{82{,}5}\right)} = 109 \text{ ° C.}$$

За умов поставленої задачі S = 0,09 м^2; $\delta_{ск}$ = 0,0025 м; також беремо $\lambda_{ск}$ = 0,25 Вт/(м·К).

Необхідна кількість теплоти на формування скоринки з одного боку буде однаковою як від поверхневого нагрівання, так і від променистого ($Q_{пов.} = Q_{пром}$), тобто дорівнюватиме ½ $Q_{ск.}$ = 371,5 · 10^3 Дж.

Із виразу (Б.13) тривалість нагрівання дорівнюватиме:

$$\tau = \frac{371{,}5 \cdot 10^3 \cdot \dfrac{0{,}0025}{0{,}25}}{109 \cdot 0{,}09} = 379 \text{ с.}$$

Беремо за час обробки 6,5 хв, тобто 390 с.

Теплова обробка електричним струмом характеризується виділенням енергії безпосередньо в продукті з мінімальним нагріванням конструктивних елементів апарата, тому припустимо, що вся енергія $Q_{ЕКН}$ має корисну дію і $Q_{ЕКН} = Q_{вн.} = 750 \cdot 10^3$ Дж.

Визначимо потужності нагрівання:

- для ЕКН

$$P_{ЕКН} = \frac{Q_{ЕКН}}{\tau} = \frac{750 \cdot 10^3}{390} = 1923 \text{ Вт,} \qquad \text{(Б.16)}$$

візьмемо $P_{ЕКН}$ = 1900 Вт;

- для поверхневого нагрівання

$$P_{пов.} = \frac{Q_{ск.}}{\tau} = \frac{743 \cdot 10^3}{390} = 1905 \text{ Вт,} \qquad \text{(Б.17)}$$

візьмемо $P_{пов.}$ = 1900 Вт.

За виразом (А.10) загальна корисна потужність дорівнюватиме:

$$Q_1'' = 1900 + 2 \cdot 1900 = 5700 \text{ Вт.}$$

У табл. Б.3 наведено підсумкові результати розрахунку потужності.

Таблиця Б.3 – **Підсумкові результати розрахунку потужності ПТО-0,1**

Потужність	**Режим роботи**	
	нестаціонарний, Q′, Вт	**стаціонарний, Q″, Вт**
Корисно використана Q_1 - від ЕКН; - від поверхневого нагрівання; - разом	-	 1900 1900 5700
Втрати в навколишнє середовище Q_5	70	255
Втрати на розігрівання конструкції Q_6	3212	-
Разом Q	3282	5955

Розрахунок електроконтактного нагрівання.

Вхідним параметром, що визначатиме весь перебіг процесу електроконтактного нагрівання є напруга електричного струму, що з точки зору безпеки не повинна перевищувати 42 В та може бути визначена з закону Джоуля–Ленца, а саме:

$$Q_{EKH} = U^2 \cdot \sigma_{c.} \cdot \tau \text{, Дж,} \qquad \text{(Б.18)}$$

$$U = \sqrt{\frac{Q_{EKH}}{\sigma_{c.} \cdot \tau}} \text{, В,} \qquad \text{(Б.19)}$$

де U – напруга електричного струму, В;

$\sigma_{c.}$ – середня електропровідність, $Ом^{-1}$ (згідно з діаграмою, наведеною в розділі 4.3.4, при міжелектродній відстані 0,06 м та площі контакту продукт–електрод 0,002 $м^2$ середня електропровідність $\sigma_{c.} = 75 \cdot 10^{-3}$ $Ом^{-1}$).

Електричний струм підводиться до кожного напівфабрикату окремо, тому для визначення потрібної напруги необхідно $Q_{ЕКН}$ поділити на кількість напівфабрикатів n. Тоді вираз (А.20) матиме вигляд:

$$U = \sqrt{\frac{Q_{ЕКН}}{n \cdot \sigma_{с.} \cdot \tau}}, \text{ В.} \qquad \text{(Б.20)}$$

$$U = \sqrt{\frac{750 \cdot 10^3}{15 \cdot 75 \cdot 10^{-3} \cdot 390}} = 41 \text{ В.}$$

Оберемо напругу ЕКН 40 В, що не перевищує допустимих з точки зору безпеки 42 В.

Розрахунок закритих електронагрівачів.

Потужність одного нагрівача в нестаціонарному режимі складає

$$P' = \frac{Q'}{n} = \frac{3282}{30} = 109 \text{ Вт,} \qquad \text{(Б.21)}$$

де n – кількість нагрівачів (беремо 30 одиниць);
у стаціонарному:

$$P'' = \frac{Q''}{n} = \frac{2155}{30} = 71{,}8 \text{ Вт.}$$

Візьмемо потужність нагрівача в нестаціонарному режимі 110 Вт; в стаціонарному – 72 Вт. Ураховуючи, що в стаціонарному режимі потужність є більшою, подальший розрахунок проводитемо таким чином, щоб забезпечити максимум в 110 Вт. Потужність однієї спіралі визначимо кількістю їх в електронагрівачі (1 од.): $P_1 = P = 110$ Вт.

Визначимо довжину дроту спіралі за формулою

$$l = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot R}{4 \cdot \rho}, \qquad \text{(Б.22)}$$

де d – діаметр дроту спіралі, мм (візьмемо d = 0,5 мм);

ρ – питомий опір матеріалу спіралі, Ом·мм^2/м (візьмемо $\rho = 1{,}05$ (Ом·мм^2)/м).

R − опір спіралі, що визначається з формули

$$R = \frac{U^2}{P_1} = \frac{30^2}{110} = 8{,}2 \text{ Ом}, \qquad \text{(Б.23)}$$

де U – напруга, що подається до електронагрівача, В (беремо за 30 В).

Довжина дроту спіралі з формули (Б.22):

$$l = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}25 \cdot 8{,}2}{4 \cdot 1{,}05} = 1{,}5 \text{ м}.$$

Довжину витка спіралі знайдемо за формулою

$$l_в = 1{,}07 \cdot \pi (d_{ст} + d), \qquad \text{(Б.24)}$$

де $d_{ст}$ – діаметр стрижня намотки спіралі (м), який для діаметра дроту спіралі (d = 0,5 мм), $d_{ст} = 8d = 8 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-3}$ м;

$$l_в = 1{,}07 \cdot 3{,}14 \cdot (4 \cdot 10^{-3} + 0{,}5 \cdot 10^{-3}) = 0{,}015 \text{ м}.$$

Кількість витків спіралі визначмо з виразу

$$m = \frac{l}{l_в} = \frac{1{,}5}{0{,}015} = 100. \qquad \text{(Б.25)}$$

Довжина спіралі обчислюється таким чином:

$$l_{сп} = (d + a) \cdot (m - 1), \qquad \text{(Б.26)}$$

де a – відстань між сусідніми витками (візьмемо $a = 1 \cdot 10^{-3}$ м).

$$l_{сп} = (0{,}5 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3}) \cdot (100 - 1) = 0{,}149 \text{ м}.$$

Для оцінювання температури спіралі визначимо її геометричні характеристики:

$$x = \frac{d}{D_k}; \qquad y = \frac{d}{d_в}; \qquad z = \frac{D_k}{d_в}; \qquad K_1 = \frac{h}{d}, \tag{Б.27}$$

де D_k − діаметр канавки для розміщення спіралі ($D_k = 5 \cdot 10^{-3}$ м);

h − крок намотки спіралі ($h = 3{,}5 \cdot 10^{-3}$ м).

$$x = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 0{,}1;$$

$$y = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 0{,}1; \; z = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 1{,}2; \; K_1 = \frac{3{,}5 \cdot 10^{-3}}{0{,}5 \cdot 10^{-3}} = 0{,}7.$$

Ураховуючи, що коефіцієнт теплопровідності ізоляційної маси (переклазу) дорівнює 0,022 Вт/(м·°С), за номограмою [95, с. 213] визначаємо перепад температур в ізоляційному шарі нагрівача на одиницю теплового потоку $\frac{\Delta t}{q_l}$ = 3 (см·°С)/Вт).

Питомий тепловий потік на одиницю довжини спіралі складає

$$q_l = \frac{P_1}{l_{сп} \cdot 10^2} = \frac{110}{0{,}149 \cdot 10^2} = 7{,}38 \text{ Вт/см}. \tag{Б.28}$$

Перепад температури в ізоляційному шарі обчислюється таким чином:

$$\Delta t_{із} = \frac{\Delta t}{q_l} q_l, \tag{Б.29}$$

$$\Delta t_{із} = \frac{\Delta t}{q_l} q_l = 3 \cdot 7{,}38 = 22{,}1^\circ \text{ С}.$$

Робоча температура спіралі ($t_{сп}$,°С)

$$t_{сп} = 1{,}3\Delta t_{із} + t_{р.п.}, \qquad \text{(Б.30)}$$

де 1,3 – коефіцієнт, що враховує перепад температури у контактному шарі (поверхня дроту – ізоляційна маса);

$t_{р.п.}$ – температура робочої поверхні ($t_{р.п.}$= 160° С).

$$t_{сп} = 1{,}3 \cdot 22{,}1 + 160 = 189° \text{ С}.$$

Розрахунок продуктивності пристрою.

Продуктивність пристрою *(G*, кг/с) обчислюється за формулою

$$G = \frac{M}{\tau_з + \tau_{обр} + \tau_р}, \qquad \text{(Б.31)}$$

де M – маса одноразово завантажених продуктів, кг;

$\tau_з$ – тривалість завантаження, с;

$\tau_{обр}$ – тривалість теплової обробки, с;

$\tau_р$ – тривалість розвантаження, с.

$$G = \frac{15 \cdot 122 \cdot 10^{-3}}{60 + 390 + 70} = 3{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}.$$

Продуктивність за основним часом (G_0, кг/с)

$$G_0 = \frac{M}{\tau_{обр}} = \frac{1{,}83}{390} = 4{,}7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}. \qquad \text{(Б.32)}$$

Розрахунок техніко-економічних і експлуатаційних показників.

Коефіцієнт корисної дії η складає:

$$\eta = \frac{Q''_1}{Q''_{общ}} = \frac{5700}{5955} = 0{,}96. \qquad \text{(Б.33)}$$

Питома металомісткість (m, кг/м^2) має вираження

$$m = \frac{M}{F}, \qquad \text{(Б.34)}$$

де M – маса металоконструкції, кг;
F – площа робочої поверхні, м^2.

$$m = \frac{28{,}9}{0{,}18} = 161 \text{ кг/м}^2.$$

Питома витрата теплоти складає

$$q = \frac{Q''_{общ}}{G_0} = \frac{5955}{4{,}7 \cdot 10^{-3}} = 1{,}3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}. \qquad \text{(Б.35)}$$

Теплова напруга нагрівальних поверхонь складає

$$T = \frac{P''_1 \cdot n}{F} = \frac{72 \cdot 30}{0{,}18} = 12000 \text{ Вт/м}^2. \qquad \text{(Б.36)}$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення Державної програми розвитку промисловості на 2003-2011 роки [Електронний ресурс]. – Режим доступу : «http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/1174-2003-п».

2. Енергетична стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу : «http://zakon.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc».

3. Волчков В. И. Исследование электрофизических свойств мясопродуктов применительно к процессам электроконтактной обработки : дис. … канд. техн. наук : 05.02.14 / Волчков В. И. – М., 1973. – 128 с.

4. Ткач Н. В. Исследование кинетики электроконтактного нагрева мясных фаршей : дис. … канд. техн. наук / Ткач Н. В. – К., 1970. – 163 с.

5. Дорохін В. О. Вплив технологічних факторів на ефективність процесів жаріння м’ясних порційних натуральних виробів / В. О. Дорохін, В. О. Скрипник, Н. Ю. Молчанова // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць. – Х. : ХДУХТ, 2008. – Вип. 1 (7). – С. 192–207.

6. Юліна А. І. Підвищення якості м’ясних виробів шляхом інтенсифікації процесу теплової обробки / А. І. Юліна, А. О. Юлін // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг : Міжнар. наук.-практ. конф., 19 травня 2011 р. : [тези доп.]. – Х. : ХДУХТ, 2011. – С. 80.

7. Пат. 71937 Україна, МПК A23L 1/01, 1/325, A47J 37/04. Спосіб безперервної комбінованої теплової обробки з використанням пари та мікрохвиль / Ведрен Лоран ; заявник та патентовласник Нептюн С. А. – № 2001064162 ; заявл. 15.06.2001 ; опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1.

8. Черевко О. І. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник / О. І. Черевко, А. М. Поперечний. – Х. : ХДАТОХ, 2002. – 420 с.

9. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.

10. Беляев М. И. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов : монография / М. И. Беляев, П. Л. Пахомов. – Х. : ХИОП, 1991. – 160 с.

11. Стабников В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В. Н. Стабников, В. М. Лысянский, В. Д. Попов. – М. : Агропромиздат, 1985. – 503 с.

12. Лабай В. Й. Тепломасообмін / В. Й. Лабай. – Львів : Тріада Плюс, 1998. – 260 с.

13. Рогов И. А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И. А. Рогов. – М. : Агропромиздат, 1988. – 272 с.

14. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1973. – 320 с.

15. Алабовский А. И. Техническая термодинамика и теплопередача / А. И. Алабовский, И. Н. Недужий. – К. : Вища школа, 1990. – 255 с.

16. Бутков В. В. Процессы и аппараты химической технологии с использованием электрических полей / В. В. Бутков, В. В. Вишняков. – М. : НИИТЭХИМ, 1982. – 48 с.

17. Иванов Е. Л. Новые физические методы обработки пищевых продуктов. Лекция для студентов технологического факультета / Е. Л. Иванов. – Л., 1982. – С. 20–48.

18. Бут А. И. Применение электронно-ионной технологии в пищевой промышленности / А. И. Бут. – М. : Пищевая пром-сть, 1977. – С. 5.

19. Ohmic heating [Electronic resource] : «Britannica Online Encyclopedia. – Access mode : http://www.britannica.com/EBchecked/topic/426067/ohmic-heating».

20. Остапенков А. М. Электрооборудование пищевых предприятий / А. М. Остапенков, А. Т. Птушкин. – М. : Агропромиздат, 1989. – 215 с.

21. Коронець Ю. М. Особливості процесу теплової обробки харчових продуктів ІЧ-випромінюванням у відкритому робочому просторі / Ю. М. Коронець // Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі : Міжнар. наук.-практ. конф., 19 листопада 2008 р. : [тези у 2 ч.]. – Х. : ХДУХТ, 2008. – Ч. 1. – С. 345–346.

22. Погожих М. І. Визначення раціонального навантаження дослідної НВЧ-камери / М. І. Погожих, М. М. Цуркан // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного

господарства і торгівлі : зб. наук. праць. – Х. : ХДУХТ, 2011. – Вип. 1 (13). – С. 112–115.

23. Копылов Ю. А. Основное направление в создании оборудования с использованием электрофизических методов обработки пищевых продуктов / Ю. А. Копылов. – М., 1976. – 39 с.

24. Современные технологии в пищевой промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа : «http://gv.org.ua/index.php/plain/interesnye_tochki_zreniya/sovremennye_tehnologii_v_pischevoj_promyshlennosti».

25. Гусева М. В. Совершенствование процесса экстрагирования при электроконтактной обработке растительного сырья : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.18.12 / М. В. Гусева. – М., 2008. – 26 с.

26. Воробьева Н. Н. Влияние электростимуляции на качество подмороженного мяса : автореф. дис. … канд. техн. нуак / Н. Н. Воробьева. – Л., 1982. – 16 с.

27. Will P. A. Ultrastructural postmortem changes in electrically stimulated bovine muscle / P. A. Will, C. L. Ownby, R. L. Henrickson // Journal of food science. – 1980. – Vd. 45. – № 1. – P. 21–25.

28. Электротехнология / А. М. Басов [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1985. – 256 с.

29. Удельные электропроводности и структурно-механические свойства мяса и субпродуктов / И. Рогов [и др.] // Мясная индустрия СССР. – 1973. – № 12. – С. 25–31.

30. Павлов І. С. Електричні способи обробки харчових продуктів / І. С. Павлов. – К. : Держтехвидав УРСР, 1957. – 108 с.

31. Духин С. С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем / С. С. Духин. – К. : Наукова думка, 1975. – 246 с.

32. Тышкевич С. Исследование физичесуих свойств мяса / С. Тышкевич. – М. : Пищевая пром-сть, 1972. – 96 с.

33. Журавков О. В. Аналітичний огляд застосування прямого омічного нагрівання для обробки харчових продуктів в апаратах харчових технологій / О. В. Журавков // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – К., 2009. – № 28. – С. 85–87.

34. Ramaswamy R. Ohmic Heating of Foods [Electronic resource] / R. Ramaswamy, V. M. (Bala) Balasubramaniam, S. K. Sastry / Access mode : «http://ohioline.osu.edu/fse-fact/0004.html».

35. Advanced Heating [Electronic resource] : NovelQ. – Access mode : «http://www.novelq.org/download/Short_Description_Advanced%20Heating.pdf».

36. Электрические методы обработки пищевых продуктов : аннотированный библиографический указатель отечественной и зарубежной литературы за 1950-1961 гг. – М. : ЦИНТИПП, 1962. – С. 4–19.

37. Ohmic cooking of processed meats: energy evaluation and food safety considerations / D. de Halleux [et al.] // Canadian bio-systems engineering. – 2005. – Vol. 47. – P. 3.41–3.47.

38. Кульман А. Г. Исследование коллоидно-химических свойств хлеба, выпекаемого электрическим током / А. Г. Кульман, Р. А. Бранопольская // Украинский химический журнал. – К. : Изд-во Академии наук Украинской ССР, 1950. – С. 459–469.

39. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов : учеб. пособие / А. М. Остапенков, Н. В. Рассохин ; под ред. А. М. Остапенкова. – М., 1983. – 91 с.

40. Процессы и аппараты рыбообрабатывающих производств / Н. В. Стефановская [и др.]. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1984. – 237 с.

41. Генин Л. С. Электролиз растворов поваренной соли / Л. С. Генин. – М. : Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит-ры, 1960. – С. 44–46.

42. Матов Б. М. Электрофизические методы в пищевой промышленности / Б. М. Матов, Э. В. Решетько. – Кишинев : Картя молдовеняскэ, 1968. – 128 с.

43. Зайцев В. М. Разработка технологии ливерных колбас с применением электроконтактной бланшировки сырья : дис. … канд. техн. наук / Зайцев В. М. – М., 1982. – 138 с.

44. Бабанов Г. К. Расчет процесса электролиза хлористого натрия при электроконтактной обработке мясного фарша / Г. К. Бабанов, Э. К. Бунке, Н. В. Ткач // Совершенствование техники и технологии. – 1970. – С. 28.

45. Использование тока промышленной частоты для термической обработки мясных паршей / Г. Бабанов [и др.] // Мясная индустрия СССР. – 1972. – № 12. – С. 31–33.

46. Бабанов Г. К. Интенсификация тепловой обработки колбасных изделий / Г. К. Бабанов // Всесоюз. межвуз. науч. конф. по

новым физическим методам обработки пищевых продуктов : [тез. докл.]. – Воронеж, 1968. – С. 24–25.

47. Гасюк Г. Н. Обработка винограда электрическим током повышенной частоты перед прессованием / Г. Н. Гасюк, Б. М. Матов // Консервная и овощесушильная промышленность. – 1960. – № 1. – С. 9–11.

48. Электроконтактная обработка мясных хлебов / Г. Бабанов [и др.] // Мясная индустрия СССР. – 1968. – № 1 – С. 33–36.

49. Горбатов В. Исследования процесса электроконтактного нагрева колбасного фарша / В. Горбатов // Мясная индустрия СССР. – 1969. – № 10. – С. 29–32.

50. Обоснование режима электроконтактного нагрева сосисок / В. Горбатов [и др.] // Мясная индустрия СССР. – 1969. – № 7. – С. 35–37.

51. Бунке Э. К. Электроконтактная термообработка мясного фарша на частотах 9-14 КГц / Э. К. Бунке, В. Н. Данилов, А. М. Шевченко // Новые физические методы в пищевой промышленности : межвуз. конф. : [тезисы]. – М., 1967. – С. 25–26.

52. Электроконтактная термообработка колбасного фарша и его биологическая оценка / Н. Е. Федоров [и др.] // Всесоюз. межвуз. науч. конф. по новым физическим методам обработки пищевых продуктов : [тез. докл]. – Воронеж, 1968. – С. 48.

53. Лерина И. В. Научное обоснование технологии мясных продуктов на базе электрофизических методов : автореф. дис. … д-ра техн. наук / И. В. Лерина. – Х., 1992. – 68 с.

54. Нетушил А. В. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А. В. Нетушил, Б. Я. Жуковицкий. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 480 с.

55. Бунке Э. К. Исследования процессов, происходящих при электроконтактной обработке мясных продуктов : дис. … канд. техн. нуак : 05.18.12 / Бунке Э. К. – К., 1972. – 122 с.

56. Важенин С. Ф. Титановое оборудование / С. Ф. Важенин // Титан для оборудования пищевой промышленности. – К. : Техника, 1973. – С. 31.

57. Прилипко Л. Т. Исследование процессов перехода ионов серебра и никеля в мясной фарш при его электроконтактной обработке / Л. Т. Прилипко, В. И. Баркалов, Э. К. Бунке // Пищевая промышленность. – 1975. – № 20. – С. 80–82.

58. Загорулько А. Я. Получение диффузного сока с помощью электроплазмолиза : автореф. дис. … канд. техн. наук / А. Я. Загорулько. – К., 1958. – 19 с.

59. Рогов И. А. Электроконтактный нагрев мясопродуктов / И. А. Рогов, Э. Э. Афанасов, В. И. Волчков. – М. : ЦНИИТЭИмясомолпром, 1970. – 30 с.

60. Кучеренко Г. С. Электрическое сопротивление пищевых продуктов / Г. С. Кучеренко, И. С. Павлов // Сообщения по новым физическим методам обработки пищевых продуктов. – К., 1964. – С. 88–90.

61. Рогов И. Определение продолжительности электро-контактного нагрева мясных продуктов / И. Рогов, Э. Афанасов, В. Волчков // Мясная индустрия СССР. – 1976. – № 10. – С. 32–33.

62. Рогов И. А. Физические методы обработки пищевых продуктов / И. А. Рогов, А. В. Горбатов. – М. : Пищевая пром-сть, 1974. – 584 с.

63. Гинзбург А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов : справочник / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – М. : Пищевая пром-сть, 1980. – 288 с.

64. Флауменбаум Б. Л. Исцилографическое исследование параметров процесса электроплазмолиза плодов и ягод / Б. Л. Флауменбаум, М. Ю. Казанджий, Ф. И. Коган // Известия вузов СССР. Пищевая технология. – 1961. – № 6 (25). – С. 79–84.

65. Флауменбаум Б. Л. Проблемы интенсификации технологических процессов консервирования пищевых продуктов : автореф. дис. … д-ра техн. наук / Б. Л. Флауменбаум. – М., 1969. – 54 с.

66. Вайкутите А. Ю. Опыт нагрева электротоком некоторых мясопродуктов / А. Ю. Вайкутите // Известия высших учебных заведений Министерства высшего образования СССР. Пищевая технология. – 1958. – № 6. – С. 51–55.

67. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 3 т. Т. 3. Электричество / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1977. – 688 с.

68. Ohmic Heating [Electronic resource] : The LSU AgCenter. – Access mode : «http://text.lsuagcenter.com/en/communications/publications/agmag/Archive/2002/Fall/Ohmic+Heating+A+Valueadded+Food+Processing+Tool.htm».

69. Журавков О. В. Інформаційно-обчислювальний комплекс для дослідження електротехнічних процесів / О. В. Журавков,

О. О. Мазуренко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – К., 2010. – № 32. – С. 77–78.

70. А.с. 1736391 СССР, МКИ А 23 L 1/025. Способ электроконтактной термообработки рыбного фарша / Л. Я. Дембо, В. И. Варцаба (СССР). – № 4824680/13 ; заявл. 14.05.90 ; опубл. 30.05.92, Бюл. № 20.

71. А.с. 1685377 СССР, МКИ А 23 L 1/025. Устройство для непрерывного электроконтактного нагрева пищевых продуктов / В. И. Варцаба, Г. В. Маслова (СССР). – № 4709674/13 ; заявл. 22.06.89 ; опубл. 23.10.91, Бюл. № 39.

72. А.с. 242699 СССР, МКИ А 22 С. Устройство для формования колбасных изделий без оболочки и их коагуляции / Г. К. Бабанов, Н. В. Ткач, В. А. Глущенко, В. Д. Николаева, А. Г. Плиско, А. А. Охотов, В. В. Кулик, В. В. Рубаник, А. М. Березенко, Г. П. Яковенко, Н. Н. Сивец (СССР). – № 1195500/28-13 ; заявл. 10.11.67 ; опубл. 25.04.69, Бюл. № 15.

73. Пироговский Н. А. Устройство для формования и электрокоагуляции колбасных изделий / Н. А. Пироговский, Ю. Р. Мамаджанов, В. М. Горбатов // Мясная промышленность : [реферативная информация]. – 1985. – № 1–6. – С. 19–20.

74. А.с. 591176 СССР, МКИ А 23 L 1/00, А 22 С 11/00. Устройство для электроконтактной варки пищевых продуктов / В. В. Рубаник, Д. Н. Ильинский, Э. К. Бунке (СССР). – № 2364828/28-13 ; заявл. 24.05.76 ; опубл. 05.02.78, Бюл. № 5.

75. А.с. 1669420 СССР, МКИ А 23 L 1/025. Устройство для электроконтактной тепловой обработки пищевых продуктов / В. И. Варцаба (СССР). – № 4709675/13 ; заявл. 22.06.89 ; опубл. 15.08.91, Бюл. № 30.

76. А.с. 1669419 СССР, МКИ А 23 L 1/025. Устройство для электроконтактного нагрева фаршевых изделий / В. И. Варцаба (СССР). – № 4709673/13 ; заявл. 22.06.89 ; опубл. 15.08.91, Бюл. № 30.

77. А.с. 1692378 СССР, МКИ А 23 L 1/025. Способ непрерывной тепловой обработки фарша электрическим током / В. И. Варцаба, З. А. Леденева (СССР). – № 4694148/13 ; заявл. 24.05.89 ; опубл. 23.11.91, Бюл. № 43.

78. А.с. 906486 СССР, МКИ А 22 С 11/00, А 23 L 1/00, 1/31. Способ варки мясопродуктов / Э. Н. Мушинский, В. М. Горбатов, Н. Д. Мамонов, А. А. Белоусов, П. Т. Решетников, И. И. Горшкова,

П. И. Гончаров (СССР). – № 2935030/28-13 ; заявл. 02.06.80 ; опубл. 23.02.82, Бюл. № 7.

79. Пат. 228444 ГДР, МКИ А 23 L 1/317, А 22 С 11/00. Способ и устройство для изготовления вареных колбас / Опубл. 16.10.85, Бюл. № 42.

80. Рогов И. А. Новые физические методы обработки мясопродуктов / И. А. Рогов, А. В. Горбатов. – М. : Пищевая пром-сть, 1966. – 303 с.

81. Пат. 2058084 РФ, МКИ А 23 L 1/025. Электроконтактный способ приготовления пищевых продуктов / Долотовский Л. В. (РФ) ; заявитель и патентообладатель ТОО «Легран». – № 94007050/13 ; заявл. 22.02.94 ; опубл. 20.04.96, Бюл. № 11.

82. Заявка 94037461 РФ, МКИ А 23 L 1/025. Электроконтактный способ приготовления пищевых продуктов / Б. М. Гринберг, А. В. Абрамов (РФ). – № 94037461/13 ; заявл. 29.09.94 ; опубл. 10.03.97.

83. А.с. 215746 СССР, МКИ А 22 С. Устройство для электроконтактной обработки пищевых продуктов / Г. К. Бабанов, Н. В. Ткач, Г. С. Кучеренко (СССР). – № 1058307/28-13 ; заявл. 28.02.66 ; опубл. 03.04.68, Бюл. № 13.

84. Заявка 03 3 512 058 ФРГ, МКИ А 23 L 1/025. Способ и устройство для обработки пищевых продуктов электрическим током / Опубл. 10.10.85, Бюл. № 41.

85. А.с. 544406 СССР, МКИ А 22 С 11/00. Способ приготовления колбасных изделий без оболочки / В. В. Рубаник, Д. Н. Ильинский, В. Д. Городиская (СССР). – № 2154102/13 ; заявл. 07.07.75 ; опубл. 30.01.77, Бюл. № 4.

86. А.с. 249963 СССР, МКИ А 22 С. Способ приготовления сосисок и тому подобных изделий без оболочки / Г. К. Бабанов, Н. В. Ткач (СССР). – № 1230876/28-13 ; заявл. 05.04.68 ; опубл. 05.08.86, Бюл. № 25.

87. А.с. 760930 СССР, МКИ А 23 L 1/31. Способ термической обработки мясных формованных изделий / И. А. Рогов, А. С. Большаков, В. И. Волчков, В. Г. Боресков, С. П. Архаров, В. А. Шепелев, Э. Э. Афанасов (СССР). – № 2705251/28-13 ; заявл. 27.12.78 ; опубл. 05.09.80, Бюл. № 33.

88. А.с. 1634236 СССР, МКИ А 23 L 1/025. Способ варки фаршевых продуктов / Л. Я. Дембо, С. В. Никитин, П. Н. Складнев (СССР). – № 4420473/13 ; заявл. 04.05.88 ; опубл. 15.03.91, Бюл. № 10.

89. А.с. 1642989 СССР, МКИ А 47 J 27/00. Кастрюля / А. К. Северин, А. А. Северин (СССР). – № 4386765/13 ; заявл. 01.03.88 ; опубл. 23.04.91, Бюл. № 15.

90. А.с. 1597168 СССР, МКИ А 47 J 37/04, 37/06. Устройство для жарки пищевых продуктов / В. Х. Бердический, П. П. Пивоваров, Ф. В. Перцевой, Л. Ю. Устименко (СССР). – № 4372574/30-13 ; заявл. 02.02.88 ; опубл. 07.10.90, Бюл. № 37.

91. Джонс М. Х. Электроника – практический курс / М. Х. Джонс. – М. : Постмаркет, 1999. – 528 с.

92. Малинівський С. М. Загальна електротехніка : навч. посібник / С. М. Малинівський. – Львів : «Львівська політехніка», 2001. – 596 с.

93. Ангро А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Ангро. – М. : Наука, 1965. – С. 85–93.

94. Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий для предприятий общественного питания. – К. : А.С.К., 1998. – 656 с.

95. Беляев М.И. Оборудование предприятий общественного питания. В 3 т. Т. 3. Тепловое оборудование / М. И. Беляев. – М. : Экономика, 1990. – 559 с.

Наукове видання

ЧЕРЕВКО Олександр Іванович
МИХАЙЛОВ Валерій Михайлович
БАБКІНА Ірина Володимирівна та ін.

НОВІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ В ПРОЕКТУВАННІ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

Монографія

У 3 частинах

Частина 2

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРІВАННЯ В ПРОЦЕСАХ ЖАРЕННЯ КУЛІНАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Редактор Л. Ю. Кротченко

Підп. до друку *19.12.2012* р. Формат 60х84 /16. Папір офсет. Друк офс. Умов. друк. арк. 9,4. Тираж 200 прим. Зам № *405*

Видавець та виготовлювач
Харківський державний університет харчування та торгівлі
вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 4417 від 10.10.2012 р.