

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННУТТ ім. акад. І.С. Гурого
Кафедра механіки та накубової техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту (декан факультету)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

«5» 12 2024р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ім'я та прізвище)

«5» 12 2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 131 Прикладна механіка

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Прикладна механіка

на тему: Визначення параметрів пиллової обробки
дресованої продукції

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ПМ2-2м

Павлюк Володимир Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник Васильківський Костянтин Вікторович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Рецензент Юрій ВЕРЕСОЦЬКИЙ

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач

(підпис)

Київ - 2024р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННУТД ім. акад. І. С. Тютюба
Кафедра мехатроніки та побутової техніки
Освітній ступінь магістр
Спеціальність 131 Прикладне механіке
(код і назва)
Освітньо-професійна програма Прикладне механіке
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МПТ
Людмила КРИВОПЛЯС-ВОЛОДІНА
« 01 » 10 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Павлоков Владислав Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Визначення параметрів та класифікації
обробки деревної продукції

керівник роботи Васильковський Костянтин Вікторович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 01 » 10 2024 року № 958-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 07.12.2024р

3. Вихідні дані до роботи 1. Вид дослідження - аналітичне
та експериментальне; 2. Процес дослідження - теплове
обробка; 3. Продукція - різні хертові продукти
у термі

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

1. Аналіз; 2. Вступ; 3. Метод літературних
джерел; 4. Експериментальні дослідження
5. Висновки; 6. Список використаної літе-
ратури.

5. Перелік графічного матеріалу

Мисливська презентація

Зміст

Анотація	4
Вступ	6
Розділ 1. Особливості процесів теплової стерилізації і пастеризації напоїв і харчової продукції	8
1.2. Матеріали і оболонки упаковок	10
1.3. Геометрія упаковок і інтенсифікація тепломасообміну в герметизованих упаковках	17
1.4. Оцінка впливів співвідношень геометричних параметрів упаковок на показник питомої поверхні	20
1.5. Оцінка термодинамічних параметрів процесів	38
Розділ 2. Експериментальні дослідження динаміки теплообміну в процесах нагрівання і охолодження упаковок	57
Висновки	73
Список використаної літератури	74

Анотація

Домінуючою з числа різних фізичних, хімічних та комплексних методів обробки продукції залишається теплова на рівні пастеризації та стерилізації. Пояснюється це тим, що ці режими обробки дають найбільше наближення до 100 % рівня повного знешкодження мікрофлори продукції. Теплова обробка за одну з переваг має відповідність щодо екологічних вимог. Для випадків теплової обробки фасованої продукції існує необхідність підвищення рівня наукового підґрунтя, що стосується рекуперації теплової енергії і зниження енергетичних витрат.

Метою роботи є дослідження закономірності теплової обробки фасованої продукції.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- Проаналізовані матеріали і оболонки упаковки;
- Розглянуті фізико-хімічні методи підготовки до фасування споживчої тари, матеріалів і продукції;
- Розраховані енергетичні витрати в процесах фасування напоїв;
- Проаналізована динаміка теплообміну в процесах теплової обробки;
- Розглянута оцінка фізичних впливів на тару в процесах підготовки до фасування рідинної продукції.

Ключові слова: рідкий харчовий продукт, фасувально-пакувальна машина-автомат, функціональний модуль, оптимізація, синтез, компонування, споживча упаковка.

Annotation

The dominant among the various physical, chemical and complex methods of product processing is thermal at the level of pasteurization and sterilization. This is explained by the fact that these processing modes give the closest approximation to 100% of the level of complete neutralization of the microflora of the product. One of the advantages of heat treatment is compliance with environmental requirements. For cases of heat treatment of packaged products, there is a need to increase the level of scientific basis regarding the recovery of thermal energy and reduction of energy costs.

The purpose of the work is to study the regularities of heat treatment of packaged products.

To achieve the goal, the following tasks were set:

- Packaging materials and shells were analyzed;
- Physics-chemical methods of preparation for packaging of consumer containers, materials and products were considered;
- Energy costs were calculated in beverage packaging processes;
- The dynamics of heat transfer in heat treatment processes were analyzed;
- The assessment of physical effects on packaging in the processes of preparation for packaging of liquid products was considered.

Keywords: liquid food product, automatic filling and packaging machine, functional module, optimization, synthesis, layout, consumer packaging.

Вступ

Розв'язання задачі забезпечення населення продуктами харчування завжди потребувало виконання комплексу робіт, пов'язаних з синтезом та зберіганням сировини рослинного та тваринного походження, переробкою сировинних потоків, зберіганням готової продукції та організацією її реалізації. При цьому технології зберігання повинні обмежити процеси життєдіяльності, які продовжують свій перебіг в зерні, коренеплодах, овочах, ягодах, фруктах тощо на першій стадії, захистити їх від зовнішніх небажаних фізичних, хімічних, мікробіологічних впливів. У значній кількості випадків сама природа подбала про можливість подовжених термінів зберігання зернових культур, коренеплодів, фруктів, але у арсеналі спеціалістів завжди були і продовжують удосконалюватися заходи по значному підсиленню таких захисних властивостей.

Стосовно свіжоприготовлених харчових продуктів ситуація виглядає суттєво складніше, бо термін їх зберігання обмежується кількома годинами. Найчастіше ці обмеження пов'язані з мікробіологічним псуванням продуктів. До числа способів збереження (консервування) продукції відносяться сушіння, охолодження (заморожування), соління, квашення, маринування, теплова обробка з цукром тощо.

Однак найбільш надійним методом консервування харчових продуктів продовжує залишатися збереження їх у герметичній тарі з залученням теплової обробки.

Але з переходом до нових економічних умов і у зв'язку з послабленням державного контролю щодо нормативних показників харчової продукції та напоїв у теплової стабілізації з'явився і загрозово поширюється конкурент у вигляді технологій хімічного консервування продукції. У торгівлі з'являються все нові зразки продуктів харчування, до складу яких введено бензоат натрію, сірчистий ангідрид, бензойну та сорбінову кислоти тощо. До числа хімічних

консервантів також відносяться антиоксиданти та речовини, які підвищують осмотичний тиск (сіль, цукор), антибіотики, хімічні речовини, що утворюються мікроорганізмами і здатні пригнічувати ріст бактерій та вбивати їх. Очевидно, що хімічні і біохімічні методи консервування повинні ґрунтуватися на мінімізації екологічної загрози для споживачів і всі існуючі технології стабілізації продуктів харчування будуть і надалі перебувати у стані розвитку.

На задоволення потреб харчової промисловості з новими можливостями для останньої відгукнулися галузі по виробництву пакувальних матеріалів і тари. Розширення асортименту останньої потребує певного перегляду у відношенні до вибору її геометричних і технологічних параметрів. Особливо це стосується випадків, що відносяться до технологій теплової пастеризації та стерилізації харчової продукції, оскільки з об'ємом і геометричною формою упаковки пов'язані відповідні термодинамічні процеси. Саме перебіг останніх визначає продуктивність технологічного обладнання, рівень рекуперації теплової енергії, якісні показники продукції, вибір типорозмірів тари тощо. Єдність останнього переліку характеристик і показників процесів визначає перспективу подальшого розвитку технологій теплової обробки.

Розділ 1. Особливості процесів теплової стерилізації і пастеризації напоїв і харчової продукції

Теплова обробка сировинних потоків є невід'ємною складовою більшої частини харчових технологій, і здійснюється в інтервалі температур $t < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оскільки важливою компонентою більшої частини перероблюваної сировини є вода, то вказаний температурний діапазон досягається за рахунок різних тисків, за яких здійснюють процеси варіння, кристалізації, упарювання, перегонки, оцукрювання тощо. Регуляторна функція тиску, створюваного в технологічному апараті або в окремій упаковці, дозволяє витримувати задані температурні інтервали обробки продукції.

Поєднання суто технологічних задач в таких процесах з досягненням асептичного стану продукції дозволяє за умов асептичного фасування продукції у відповідно підготовлену тару забезпечити довготривале її зберігання.

На цьому шляху, як бачимо, реалізується тріада умов: «асептичний продукт в асептичних умовах фасується в асептичну тару». У відповідності до цих умов створено сучасні технологічні лінії, в яких на кожному з етапів можуть використовуватися однакові або різні фізичні, хімічні або фізико-хімічні фактори впливу. Досвід показує, що забезпечення умов тріади в машинно-апаратному оформленні досягається помітно складніше, ніж теплова обробка розфасованої і герметизованої в тарі продукції. Проте обидва ці напрямки знаходяться у постійному розвитку і удосконаленні у спрямуваннях, що стосуються тари, герметизації, теплопередачі в режимах охолодження і нагрівання, інтенсифікації тепломасообміну тощо.

Головним завданням теплової обробки у таких випадках є знешкодження мікрофлори або хоча б переведення її у бактеріостатичний стан.

Стосовно продуктів харчування розрізняють залишкову мікрофлору, яка залишилася життєздатною після термічної обробки, і вторинну, яка потрапила до складу продукції у зв'язку з порушенням асептичних умов фасування або за гарячого фасування в недостатньо підготовлену тару.

До числа найбільш шкідливих для здоров'я людини мікроорганізмів відносяться *S.perfringens*, *V.cereus*, які можуть виживати у консервах. В напівконсервах до них додаються ще і стафілококи.

S.botulinum типу А, В, Е, F. Добре розвиваються у консервах з рН 4,7, а у деяких видах консервів за рН 4,2-4,6. Можлива (як виключення) присутність у консервованих овочах і фруктах при рН > 4,0, в продуктах з абрикосів при рН > 3,8. Розвиток в сприятливих умовах приводить до бомбажу банок, продукт отримує сторонній запах, найчастіше масляної кислоти. За несприятливих умов розвиток затримується на кілька днів або місяців. Ботулінічний токсин може накопичуватися без помітних змін у продукті. Викликає харчові отруєння аж до летальних наслідків.

S.perfringens. Мікроорганізм розповсюджений у ґрунті. Добре розвивається у консервах з рН > 5,3, а в окремих видах при рН 3,5-5,3. За масивної контамінації існує в консервах при рН > 3,5. Викликає бомбаж. Харчові отруєння пов'язують з утворенням і проростанням спор *S.perfringens* у шлунково-кишковому тракті.

V.cereus. Розповсюджені у зовнішньому середовищі, особливо у ґрунті, на різних продуктах, зустрічаються у консервах. За токсикоінфекцій викликає харчові отруєння. Летальні наслідки майже не прослідковуються.

Стафілококи. Існують у повітрі, воді, продуктах тваринного походження. Можуть входити до залишкової мікрофлори м'ясних і молочних напівконсервів, до складу вторинної мікрофлори плодоовочевих повних консервів. Здатність викликати отруєння пов'язують з властивістю стафілококів коагулювати плазму крові.

Термічна обробка продуктів, наслідком якої є летальна і сублетальна дія на мікроорганізми певним чином дозується у зв'язку з термостійкістю штамів і видів бактерій, дріжджів або плісневих. Летальна дія нагрівання виявляється у тому, що мікроорганізми втрачають здатність до метаболізму і розмноження. При цьому важливими є такі два фактори, як температура і час обробки. При цьому

по температурі існує нижній для різних культур поріг, до якого летальні ефекти місця не мають за скільки завгодно подовженого часу обробки.

Багаторганність вимог, які стосуються упаковок, визначає відповідний вибір матеріалів для їх створення. Очевидно, що за випадків теплової обробки фасованої і герметизованої продукції бажано мати матеріали високої теплопровідності, міцності, нейтральності по відношенню до продукції, підвищених бар'єрних властивостей. Разом з тим упаковка за своєю формою також висуває ряд загальних або специфічних вимог. З одного боку слід враховувати вимогу мінімізації витрат матеріалу на її створення, а з іншого мінімізована поверхня може обмежувати показники режимів теплової обробки і у тому числі продуктивність обладнання. Ергономічні вимоги враховують скорочення часу для вибору продукції та наступного приготування їжі. Стандартизм та інформативність упаковки роблять її більш практичною. Комплексний погляд на упаковку, як на частину продукції, приводить до зменшення негативних впливів на навколишнє середовище. Саме завдяки захисній функції упаковки зменшуються втрати харчової продукції, а також остання вимога стосується необхідності врахування технологій утилізації використаних матеріалів. Стосовно використаної упаковки, на думку спеціалістів, важливою є тенденція трьох R – «Reduce, reuse, recycle - зменшити, повторно використати, переробити». В цілому можливо стверджувати, що життєвий цикл всякої упаковки ґрунтується на потрібному компромісі між виробником пакувальних матеріалів або оболонки упаковок, виробником продукції та споживачем.

1.2. Матеріали і оболонки упаковок

Важливою, а у чомусь і стратегічною перевагою упаковки зі скла є можливість вигідно представити високоякісну продукцію. Загалом, скляна упаковка об'єктивно має досить значні переваги у порівнянні з іншими матеріалами:

- скло прозоре, нейтральне, стійке;
- упаковка витримує значні тиски;
- скло виробляється з доступної сировини;
- скляна упаковка відносно легко підлягає переробці повторно.

До недоліків скляної упаковки слід віднести обмежену стійкість до ударних навантажень і значну питому масу. Проте застосування сучасних технологій привело до зростання міцності пляшок та банок, зменшення товщини їх стінок тощо.

Подальші перспективи розвитку галузі по випуску скляної тари пов'язують з впровадженням таких проектів, як високий рівень контролю за якістю всіх технологічних процесів, виробництво надпрозорих та полегшених скляних виробів, виробництво високоточного та високопотужного обладнання для виготовлення скляної упаковки майже без обмежень за кольором та формою.

За стерилізації консервів з плодів, овочів, м'яса, риби використовується у значній кількості циліндрична скляна тара типів I, II та III або ж металева. Горловина скляної або відбортовка корпусу металевої банки разом з кришкою утворюють закупорювальне з'єднання, яке має попередити появу незворотної (залишкової) деформації і розгерметизацію упаковки. Значення зміни внутрішнього об'єму ΔV герметизованої банки у зв'язку з деформаційним прогином кришки за зростання тиску визначимо як

$$\Delta V = k\pi R^2 \omega_0 \quad (1)$$

де k - коефіцієнт, значення якого залежить від конструкції профілю кришки (для плоскої кришки при обмежених прогинах $k=1/3$);

R - радіус горловини банки;

ω_0 - прогин кришки у її геометричному центрі.

Зміну відносного об'єму, а рівно і тиску у підкришковому просторі пропонується визначати залежністю

$$\eta = \frac{\Delta V}{V} = nk \frac{\omega_0}{H} \quad (2)$$

де n - кількість силових кінців кришки;

H - висота банки.

Звідси можна зробити висновок про доцільність зменшення прогину кришки ω_0 і за заданого об'єму оброблюваного продукту рекомендується використовувати тару зі співвідношенням $H/D > 1,1$. Пропонується приймати $H/D > 1,1-1,5$, а також зменшувати величину прогину кришки, збільшувати жорсткість корпусу металевої тари в місцях приклатки кришки, розробляти такий профіль рельєфу кришок, який виключав би можливість появи колових навантажень стискання на корпус тари і утворення дефектів на кришках.

Попередження надмірного зниження тиску при охолодженні стерилізованого продукту може досягатися за рахунок рекомендованого профілю кришки.

Для досягнення герметичного закупорювання скляної тари необхідно певною мірою деформувати закупорювальний засіб, який, як правило, складається з корпусу з закріпленою ущільнювальною прокладкою або ущільнювальним елементом. При цьому твердість матеріалу ущільнювальних прокладок повинна бути завжди нижчою, ніж твердість матеріалу корпусу. Закупорювальні засоби з природних матеріалів (кори коркового дуба), синтетичних полімерів можуть складатися лише з корпусу, без ущільнювальних прокладок чи елементів. Завдяки деформуванню корпусу закупорювального засобу в процесі закупорювання на горловину скляної тари діє контактне напруження. У випадку застосування ущільнювальних прокладок (елементів) вони стискаються або деформуються, герметизуючи тару.

За видом деформування корпусу всі засоби закупорювання для скляної тари пропонується поділити на дві групи: пружно деформовані та пластично деформовані. Пружне деформування означає, що корпус закупорювального

засобу деформується в межах закону Гука, а пластичне деформування, - що корпус деформується за межами цього закону.

Під час пружного деформування корпусу закупорювання здійснюється гвинтовим або натискувальним засобами. За випадку пластичного деформування - обтискувальним або обкатним.

Пружне деформування корпусу характерне для закупорювальних засобів як з металевим, так і з полімерним корпусом, а пластичне - для закупорювальних засобів тільки з металевим корпусом, тобто виготовлених з консервної жерсті чи алюмінію.

Способи закупорювання з пластичним деформуванням закупорювального засобу відрізняються суттєвими недоліками. Останні, в основному, пов'язані з крихкістю скла та з відносно високою жорсткістю жерсті. У зв'язку зі значними контактними напруженнями, що виникають в горловині скляної тари, процес закупорювання жерстяного закупорювального засобу супроводжується значним відсотком руйнувань тари і відповідними втратами продукції. Інший недолік пов'язаний з відкриванням скляної тари, що здійснюється за допомогою спеціальних ключів. При цьому також можливі сколи скла і потрапляння його в продукцію. У зв'язку з вказаними недоліками скляну тару, що відкривається з пружним деформуванням закупорювального засобу пропонується вважати безпечною, а таку, що відкривається з пластичним деформуванням - небезпечною. Вирішення задачі створення сучасних затворів вирішувалося на основі використання теорій подібності та розмірності. До числа визначальних параметрів, якими характеризується подібність, відносять тиск P (Па), товщину кришки δ (м), найбільш небезпечне навантаження G (Н/м) на нарізні упори, критерій геометричної подібності K_r , який містить співвідношення характерних розмірів кришки і є безрозмірним, модуль пружності матеріалу першого роду E (Па). З вказаного переліку витікає, що до числа основних одиниць виміру, з яких складаються розмірності вказаних величин відносяться три, а саме м, кг, с.

Оскільки кількість основних параметрів визначена, як $n = 5$ і $k = 3$, то за π -теоремою кількість умов подібності

$$n-k=5-3=2 \quad (3)$$

Звідси базою механічно подібних напружених станів затворів пропонуються два безрозмірні критерії:

$$\frac{P}{E}, \frac{P\delta}{GK_T} \quad (4)$$

В узагальненому виді умова (4) трансформується до виду

$$\varphi\left(\frac{P}{E}; \frac{P\delta}{GK_T}\right) = const. \quad (5)$$

Використання теорії подібності і розмірностей у цьому випадку виправдано тим, що за випадку конструкцій нарізних упорів кришок традиційні методи опору матеріалів та теорії пружності стають малоприматними.

Теплова обробка герметизованих упаковок, закупорювання яких здійснюється за температур, вищих за ті, якими характеризується навколишнє середовище, означає наявність вакууму в них в результаті температурної стабілізації. Закупорювання скляної тари з багатозахідними нарізками гвинтовим способом повинно базуватися на сукупності вхідних даних. До числа важливих чинників при цьому відноситься коефіцієнти тертя між робочими органами механізму закупорювання і зовнішньою поверхнею кришки та контактуючими поверхнями в середині нарізного затвору. Коефіцієнт тертя в нарізці входить до формули визначення герметизуючого зусилля в затворі у вигляді

$$tg(\alpha + \varphi), \quad (6)$$

де α - кут підйому нарізки;

φ - зведений кут тертя у витках нарізки.

Скляна тара має трапецеїдальну нарізку, кут нахилу нижньої грані профілю змінюється залежно від діаметра горловини і це означає, що змінюється і коефіцієнт тертя. Наявність такої залежності спонукала до експериментальних визначень сили тертя з урахуванням змінного фактору швидкості V руху в парі:

$$F = 36,97 + 6,098V. \quad (7)$$

На підставі даних щодо сили тертя F визначено величини коефіцієнтів тертя в залежності від швидкості руху у парі «закупорювальні паси – кришка». Друга частина досліджень присвячена визначенню коефіцієнтів тертя на витках нарізки і пошуку співвідношень, що оптимізують роботу обладнання паровакуумного закупорювання.

Поруч із скляною металева тара продовжує залишатися головною складовою консервної промисловості. Банки складаються в основному з двох або трьох конструктивних частин, виготовлених з одного листа. Трискладова банка має у собі зігнуту у металевий циліндр картку, кінці якої зварюють і дві торцеві кришки, які приєднують до корпусу. Виготовляються банки за будь-яких співвідношень висоти і діаметру. Цей технологічний процес особливо підходить до створення банок різних конфігурацій.

Цілісно витягнуті банки конструктивно складаються з двох частин: циліндричної чашки, що виготовляється шляхом витяжки диску з металевого листа і приєднуваної зверху кришки. Витяжкою можливо одержувати циліндричні чашки без зміни товщини початкового листа або глибокої чашки витяжкою зі стоншуванням стінки, послідовно обробляючи заготовку через ряд

круглих штампів. Відповідно до стандартів банки можуть мати в основі різні геометричні фігури: коло, прямокутник, овал та еліпс.

Для виготовлення банок використовується лист товщиною від 0,14 до 0,30 мм, оброблений зверху покривним, а з середини одним із захисних лаків, тип якого визначається хімічним складом продукції, яка фасується.

Однією з недавно визначених проблем, що стосується використання білої жерсті, є міграція олова у продукти харчування. Наявність такого важкого металу, як свинець у складі припою для з'єднання швів, створює проблеми у використанні трьохкомпонентних банок. Недоліком двохкомпонентної банки є її обмежена висота.

Нововведення щодо металевих банок практично стосуються можливості їх відкриття. Тип кришки, що відкривається без ключа має назву easy-open.

Аналіз даних виробників жерстяної тари показує наступні співвідношення: вартість сировини - 94 %; витрати на електроенергію - 1,5 %; експлуатація устаткування - 1 %; оплата праці - 3 %. Наведені дані підкреслюють важливість пошуків можливостей зниження питомих витрат за рахунок питомої маси матеріалу банок. Це можливо за умови їх виготовлення на межі міцності. Такому напрямку має відповідати поглиблений аналіз і визначення навантажень, які сприймаються банками у формі зовнішніх або внутрішніх тисків чи безпосередньо у вигляді механічних навантажень, наприклад, при складуванні.

В умовах стерилізації на корпус герметизованої банки діє збільшений внутрішній тиск, а після охолодження банки з продуктом - збільшений зовнішній тиск, оскільки в ній утворюється вакуум. Дія останнього підсилюється осьовим навантаженням при складуванні.

Зниження матеріалоемкості найбільш ефективно за формування на корпусі хвильової структури: колової (зігів) або осьової (гофрів). При цьому відомо, що зіги підвищують опір банок «вакуумній деформації» і ударам, але зменшують поздовжню жорсткість. Меридіональні гофри цю жорсткість збільшують, але дещо знижують величину критичного навантаження від вакууму. Вирішується

задача одержання аналітичних залежностей для визначення раціональних співвідношень параметрів зігування. Оскільки корпус зігової банки має різні жорсткісні характеристики в осьовому і коловому напрямках, то вона розглядається, як ортотропна оболонка. В консервній промисловості використовують тороїдальні, параболічні або синусоїдальні форми зігів. Оскільки форма таких плавно окреслених зігів мало впливає на їх геометричні характеристики, то пропонуються загальні для вказаних форм розрахункові залежності. В результаті визначено вплив коефіцієнта зігування і кроку зігів на товщину жерсті корпусу банки, значення осьової і колової жорсткостей, зону стійкого стану зігованих банок і вплив геометричних характеристик на величину критичних тисків.

Інтереси технологічної обробки формулюють один бік вимог до тари, у тому числі і до її геометрії. Але одночасно повинні враховуватися можливості і особливості технологій її виготовлення. Продовжуються роботи, пов'язані з удосконаленням теоретичного апарата, присвяченого теплофізичним основам процесів стерилізації продукції.

1.3. Геометрія упаковок і інтенсифікація тепломасообміну в герметизованих упаковках

Форма упаковки і співвідношення її геометричних параметрів визначаються фізико-хімічними характеристиками продукції, рівнем вимог щодо бар'єрних властивостей, жорсткості та міцності, наявністю або відсутністю теплової обробки, мінімізації витрат матеріалу на її створення, мінімізацію вартості тощо. Комплексне вирішення проблем, окрім того, потребує інформації про створення групових упаковок і збільшених вантажних одиниць, які забезпечують економічно обґрунтовані способи перевезень готової продукції.

Кожна з названих вимог у своїй значимості заслуговує на оптимізаційне розв'язання, що в дійсності має місце. Так, наприклад, вирішувалася задача по

визначенню геометричних параметрів тари-обладнання, які б задовольняли умовам розташування в ньому різних типорозмірам пляшок та банок.

Задача, пов'язана з мінімізацією поверхонь апаратів, реакторів, місткостей по зберіганню газів, рідин тощо завжди була на вістрі проблем, вирішуваних спеціалістами.

Широке використання методів теплової обробки фасованої продукції з метою пастеризації та стерилізації поставило на порядок денний задачу використання упаковок зі збільшеною питомою поверхнею, тобто поверхнею, віднесеною до об'єму упаковки. Очевидно, що в інтересах прискорення стадій нагрівання і охолодження упаковок бажано мати збільшену питому поверхню теплопередачі. З цієї точки зору значення мають не тільки форма, а і об'єм упаковки, оскільки площа поверхні останньої пропорційна квадрату лінійного розміру, а її об'єм - кубу.

У технологіях теплової пастеризаційної та стерилізаційної обробок витрати часу на процес в цілому пов'язані з часом нагрівання до заданої температури, витримки при заданій температурі та з часом охолодження.

Числові значення часу нагрівання і охолодження продукції у цих схемах наведені у відповідних формулах пастеризації та стерилізації. Очевидно, що зі зростанням об'ємів упаковок зростає час нагрівання і охолодження продукції. Особливо подовженими ці процеси є для консистентної продукції, для якої обмеженим або навіть відсутнім є конвективний теплообмін. У таких умовах нагрівання продукції в упаковці здійснюється в основному за рахунок теплопровідності. Це ж саме відноситься і до охолодження упаковок після завершення пастеризації та стерилізації.

Підвищення швидкості цих перехідних процесів має вирішальне значення, тим більше, що воно важливе не тільки з точки зору продуктивності технологічного обладнання, а і з точки зору якісних показників продукції. Якщо самою технологією ведення процесів можливо обмежити час нагрівання герметизованої упаковки за рахунок фасування гарячої продукції, нагрівання

якої може бути суттєво прискореним, то в процесах охолодження для консистентної продукції єдиним і лімітуючим є процес передавання теплоти теплопровідністю.

У зв'язку з цим ставиться задача пошуку шляхів, пов'язаних з можливістю інтенсифікації теплообміну щодо перехідних процесів нагрівання і охолодження герметизованих упаковок.

1.4. Оцінка впливів співвідношень геометричних параметрів упаковок на показник питомої поверхні

На початку розділу запропоновано в якості важливого критерію теплообміну вважати питому поверхню упаковки. У загальній оцінці це співвідношення має вид

$$K_{п.у} = \frac{S}{V} = \frac{k_{пр}}{l} \quad (8)$$

де $K_{п.у}$ - критерій поверхні упаковки; S - площа поверхні упаковки; V - об'єм упаковки; $k_{пр}$ - приведений коефіцієнт форми упаковки; l - характерний розмір упаковки.

У формулі (8) через приведений коефіцієнт форми упаковки наведено лише односторонню форму впливу на критерій поверхні упаковки. У відповідності до «законів» симетрії існує інший фактор впливу, пов'язаний з абсолютними розмірами упаковки (рис. 1).

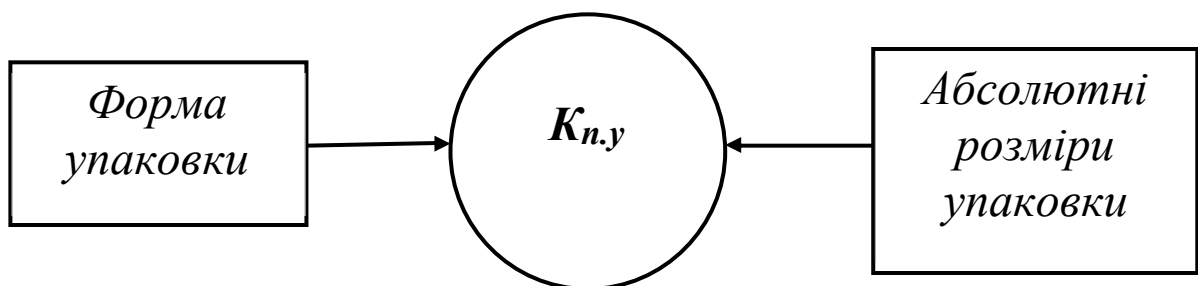


Рис. 1. Схема до оцінки факторів впливу на критерій поверхні упаковки

Визначення критерію поверхні упаковки в якості порівняльної характеристики досліджуваних об'єктів ґрунтується на відомому рівнянні Ньютона, яким характеризується теплообмін

$$Q = kS\Delta t, \quad (9)$$

де Q – потужність теплового потоку; k – коефіцієнт теплопередачі; Δt - температурний напір.

Величина потужності теплового потоку оцінюється формулою

$$Q = \frac{E}{\tau}, \quad (10)$$

де E - кількість теплової енергії, яка передається упаковці; τ – час здійснення процесу.

При цьому

$$E = mc(t_{(к)} - t_{(п)}), \quad (11)$$

де m – маса упаковки; c – теплоємність продукту; $t_{(к)}$ і $t_{(п)}$ – відповідно кінцева і початкова температури продукту.

Оскільки через значення маси визначається об'єм продукту

$$V_{\text{пр}} = \frac{m}{\rho} \quad (12)$$

де ρ – питома маса продукту, то формула (11) трансформується до виду

$$E = V_{\text{пр}}\rho c(t_{(к)} - t_{(п)}). \quad (13)$$

За відповідних підстановок одержуємо

$$E = V_{\text{пр}}\rho c(t_{(к)} - t_{(п)}) = kS\Delta t\tau. \quad (14)$$

Звідси знайдемо

$$\frac{S}{V_{\text{пр}}} = \frac{\rho c(t_{(к)} - t_{(п)})}{k \Delta t \tau}. \quad (15)$$

Надалі будемо вважати, що об'єм продукту $V_{\text{пр}}$ і загальний об'єм упаковки V близькі і тому

$$\begin{aligned} V_{\text{пр}} &\approx V \\ \frac{S}{V} &= \frac{\rho c(t_{(к)} - t_{(п)})}{k \Delta t} \cdot \frac{1}{\tau}. \end{aligned} \quad (16)$$

Оскільки до комплексу

$$\frac{\rho c(t_{(к)} - t_{(п)})}{k \Delta t} = \beta \quad (17)$$

входять тільки стабілізовані параметри для досліджуваної системи, то звідси знайдемо

$$\begin{aligned} \frac{S}{V} &= \beta \frac{1}{\tau} \\ \tau &= \beta \frac{V}{S} = \frac{\rho c(t_{(к)} - t_{(п)})}{k \Delta t} \cdot \frac{V}{S} \end{aligned} \quad (18)$$

Звідси витікає, що для ізооб'ємних упаковок за інших рівних умов час нагрівання (охолодження) упаковки обернено пропорційний площі її поверхні S (рис. 9).

Умовам (11)-(18) відповідає ліва частина зв'язку по рис. 8 між формою упаковки і критерієм поверхні упаковки, якщо прийнята умова ізооб'ємності упаковок, тобто $V = \text{const}$.

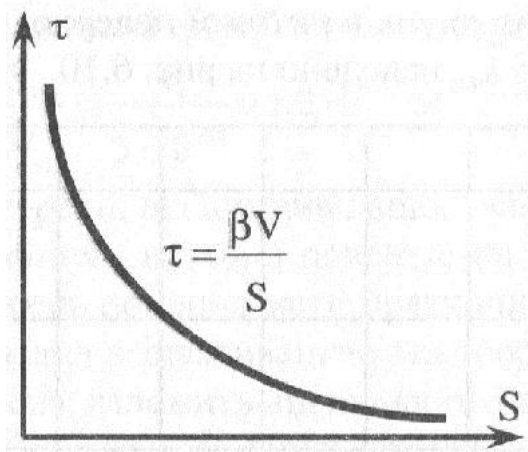


Рис. 2. Графік залежності часу нагрівання (охолодження) упаковки від площі її поверхні

Відхід від цього положення вказує на вплив абсолютних розмірів упаковок на умови теплопередачі. За такого переходу принципова роль починає належати коефіцієнту кратності переходу $k_{\text{пр}}$. Покажемо це.

Найчастіше використовуються такі форми упаковки, як призма, куб, паралелепіпед, піраміда, циліндр, конус, сфера, сферичний сегмент, тор тощо.

Стосовно кожної з них існують співвідношення геометричних параметрів, що мінімізують площу поверхні за стабілізованого об'єму. Відступ від останньої умови є важливим фактором як мінімізації питомої поверхні, так і навпаки зростання останнього показника. Для пояснення повернемося до формули (17). З неї видно, що існує ще один мало помітний шлях до оптимізації, пов'язаний з масштабним переходом тих самих форм. Зупинимось на деяких з них.

Відомо, що сфера характеризується такими співвідношеннями

$$S = \pi d^2; \quad V = \frac{1}{6} \pi d^2. \quad (19)$$

Тоді питома поверхня

$$\frac{S}{V} = \frac{6}{d}. \quad (20)$$

Якщо за початкове значення відліку приймемо умовну одиницю, наприклад, $d_{\text{п}} = 1$ м, то перехід його в зміні в сторону зменшення або збільшення врахуємо коефіцієнтом кратності $k_{\text{кр}}$ геометричного параметра

$$\frac{S}{V} = \frac{6}{k_{\text{кр}} d_{(\text{п})}} \quad (21)$$

Результати розрахунків питомої поверхні упаковки за заданими значеннями кратності $k_{\text{кр}}$, наведено на рис. 3.

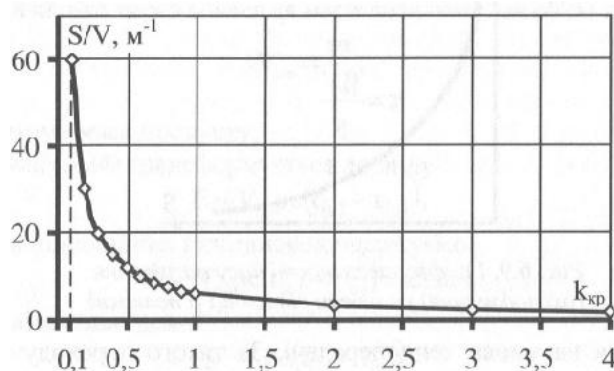


Рис. 3. Вплив коефіцієнта кратності на питому площу поверхні упаковки

Оскільки стосовно наших досліджень одержаний результат (34) має принципове значення, то, щоб показати його важливість, наведемо деякі зі співвідношень з оточуючого світу.

Так для Сонця маємо

$$\frac{S_C}{V_C} = \frac{6}{d_C} = \frac{6}{1,392 \cdot 10^9} = 4,31 \cdot 10^{-9} \text{ м}^{-1}.$$

Для земної кулі:

$$\frac{S_3}{V_3} = \frac{510,2 \cdot 10^{12}}{1,083 \cdot 10^{21}} = 4,711 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$$

Співвідношення

$$\frac{S_3}{V_3} : \frac{S_C}{V_C} = 4,711 \cdot 10^{-7} : 4,31 \cdot 10^{-9} = 109,3$$

дорівнює співвідношенню радіусів Сонця і Землі

$$\frac{R_C}{R_3} = \frac{696 \cdot 10^6}{6371,032 \cdot 10^3} = 109,3.$$

Для газової бульбашки діаметром 1 мм вказане співвідношення становить

$$\frac{S_6}{V_6} = \frac{6}{0,991} = 6 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1},$$

а для дріжджової клітини діаметром 5 мкм одержуємо

$$\frac{S_{\text{кл}}}{V_{\text{кл}}} = \frac{6}{5 \cdot 10^{-6}} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}.$$

Таким чином, перехід від вимірів нашого світу до мікрооб'єктів супроводжується зростанням питомої поверхні на три порядки і розуміння таких співвідношень повинно мати практичні наслідки, оскільки теплова обробка, пов'язана з інактивацією мікроорганізмів або досягненням летальних ефектів, залежить від вказаного показника.

Оскільки на зміну питомої площі поверхні впливає тільки коефіцієнт кратності $k_{\text{кр}}$, то аналогічні залежності будуть мати місце і для інших форм.

Так для упаковки циліндричної форми запишемо:

$$S_{\text{ц}} = \pi dh + \frac{\pi d^2}{2}; \quad V_{\text{ц}} = \frac{\pi d^2}{4} h, \quad (22)$$

де h - висота циліндра.

Якщо прийняти $h = d$ (як для циліндра з мінімізованою поверхнею), то

$$S_{\text{ц}} = \pi d^2 + \frac{\pi d^2}{2} = 1,5\pi d^2; \quad V_{\text{ц}} = \frac{\pi d^3}{4}. \quad (23)$$

Звідси визначаємо

$$\frac{S_{\text{ц}}}{V_{\text{ц}}} = \frac{15 \cdot 4\pi d^2}{\pi d^3} = \frac{6}{d}. \quad (24)$$

Очевидно, що за умови $h \neq d$ умова мінімізованої площі поверхні циліндра порушується і це порушення буде на користь зростання показника $\frac{S_{\text{ц}}}{V_{\text{ц}}}$. Прийmemo $h = \Psi d$, де Ψ - коефіцієнт співвідношення геометричних параметрів. Тоді

$$S_{\text{ц}} = \pi d^2 \Psi + \frac{\pi d^2}{2} = \pi d^2 (\Psi + 0,5); \quad (25)$$

$$V_{\text{ц}} = \frac{\pi d^3}{4} \Psi; \quad (26)$$

$$\frac{S_{\text{ц}}}{V_{\text{ц}}} = \frac{4\pi d^2 (\Psi + 0,5)}{\pi d^3 \Psi} = \frac{4\Psi + 2}{d\Psi}. \quad (27)$$

Якщо прийняти значення $\Psi = 1$, то одержимо результат, що збігається з умовою (27).

Виконаємо чисельну оцінку впливів факторів. До співвідношення (27) введемо коефіцієнт кратності $k_{\text{кр}}$ і отримаємо:

$$\frac{S_{\text{ц}}}{V_{\text{ц}}} = \frac{6}{k_{\text{кр}} d}. \quad (28)$$

Дані розрахунків за формулою наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Дані оцінки впливу коефіцієнта кратності $k_{\text{кр}}$ на співвідношення $S_{\text{ц}}/V_{\text{ц}}$, м^{-1}

$k_{кр}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$S_{ц}/V_{ц}$	60	30	20	15	12	10	8,57	7,5	6,67	6,0
$k_{кр}$	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	20,0
$S_{ц}/V_{ц}$	3,0	2,0	1,5	1,2	1,0	0,875	0,75	0,667	0,6	0,3

Таким чином, дані таблиці переконливо доводять, що зменшення розмірів **циліндричних упаковок (як і сферичних), у яких співвідношення $h = d$ мінімізує** площу поверхні, приводить до швидкого зростання питомої поверхні $S_{ц}/V_{ц}$ і відповідного зменшення часу їх теплової обробки.

Вплив параметра $i/|$ на співвідношення $S_{ц}/V_{ц}$ відображено даними табл. 2.

Таблиця 2

Співвідношення $S_{ц}/V_{ц}$ в залежності від Ψ за умови $d = \text{const} = 1$

Ψ	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
$S_{ц}/V_{ц}$	14,0	9,0	7,3	6,5	6,0	5,6	5,4	5,2	5,1	5,0	4,9

У зв'язку з необхідністю поглибленого аналізу дані табл. 2 представлено графіком на рис. 11.

Аналізуючи даний графік можливо зробити наступні висновки. Відступ від умови $d = h$ як ліворуч так і праворуч пов'язаний з порушенням умови мінімізації площі поверхні упаковки. Це означає, що за значень $\Psi \geq 1$ значення відношення $S_{ц}/V_{ц}$ повинно зростати. Однак межею зростання є ордината $\Psi = 1$ і йому відповідає умова $\Psi < 1$. В той же час за $\Psi > 1$ має місце хоч і сповільнене зниження відношення $S_{ц}/V_{ц}$. Проте, це не означає порушення умови мінімізації площі поверхні за $d = h$, оскільки за введення параметра у умова ізооб'ємності перестає існувати. Спадаюча гілка залежності від $\Psi = 1$ до $\Psi = 2$ вказує на

зменшення співвідношення $S_{ц}/V_{ц}$ у зв'язку зі зростанням об'єму упаковки (гіперболічна залежність).

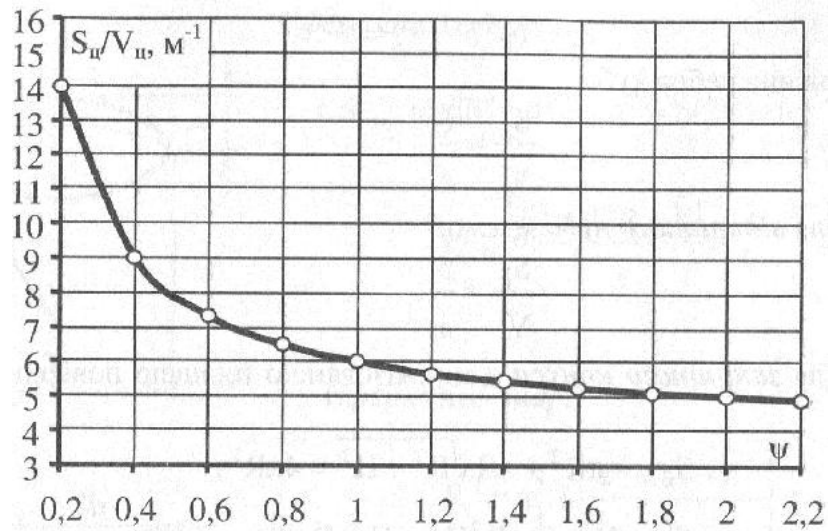


Рис. 4. Графік залежності $S_{ц}/V_{ц} - S_{ц}/V_{ц} (\Psi)$ для умови $d = \text{const} = 1 \text{ м}$

Очевидно, що подібний характер повинен бути притаманним для тіл всякої форми, оскільки площа поверхні тіла пропорційна квадрату його лінійного розміру, а об'єм - кубу.

Знайдемо подібні співвідношення для упаковок інших форм.

Відкритий циліндр. Для нього маємо

$$S_{ц} = \pi dh + \frac{\pi d^2}{4} = \pi d^2 \Psi + \frac{\pi d^2}{4} = \pi d^2 (+0,25); \quad (29)$$

$$\frac{S_{ц}}{V_{ц}} = \frac{4\pi d^2 (\Psi + 0,25)}{\pi d^3 \Psi} = \frac{4\Psi + 1}{\Psi d}. \quad (30)$$

Якщо $\Psi = 0,5$, що відповідає умові мінімізації площі поверхні, то

$$\frac{S_{ц}}{V_{ц}} = \frac{3}{d\Psi}. \quad (31)$$

Аналогічно для **куба закритого** одержуємо

$$S_K = 6a^3; \quad V_K = a^3, \quad (32)$$

де a - довжина ребра куба.

$$\frac{S_K}{V_K} = \frac{6}{a}. \quad (34)$$

Для *відкритого куба* маємо:

$$\frac{S_K}{V_K} = \frac{5}{a} \quad (35)$$

Для *закритого конуса* з мінімізованою площею поверхні маємо:

$$S_{\text{кон}} = \pi R^2 + \pi R \sqrt{R^2 + H^2} = 4\pi R^2; \quad (36)$$

$$V = \frac{1}{3} \pi R^2 H; \quad H = R\sqrt{8}.$$

Тоді

$$\frac{S_{\text{кон}}}{V_{\text{кон}}} = \frac{3 \cdot 4\pi R^2}{\pi R^3 \sqrt{8}} = \frac{12}{\sqrt{8}R}. \quad (37)$$

Для *паралелепіпеда з квадратною основою* за умови $h = \Psi a$

$$S_{\Pi} = 2a^2 + 4ah = 2a^2 + 4a^2\Psi = 2a^2(1 + 2\Psi);$$

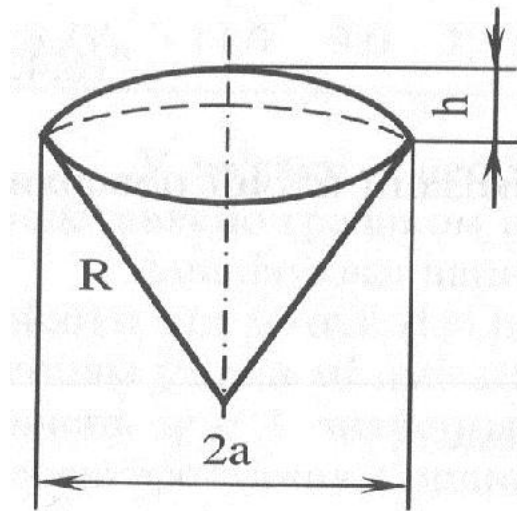
$$V_{\Pi} = a^2\Psi a = a^3\Psi; \quad (38)$$

$$\frac{S_{\Pi}}{V_{\Pi}} = \frac{2a^2(1+2\Psi)}{a^3\Psi} = \frac{2+4\Psi}{a\Psi}. \quad (39)$$

Для *відкритого паралелепіпеда* одержуємо:

$$\frac{S_{\Pi.В}}{V_{\Pi.В}} = \frac{1+4\Psi}{a\Psi}. \quad (40)$$

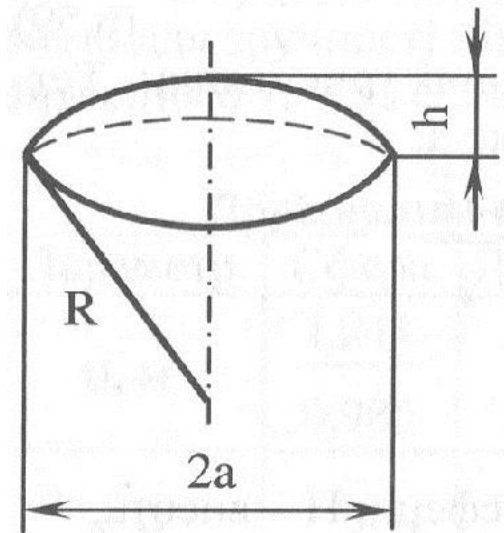
Сферичний сектор:



$$S_{c.c} = \pi R(2h + a); \quad V_{c.c} = \frac{2\pi R^3 h}{3}; \quad (41)$$

$$\frac{S_{c.c}}{V_{c.c}} = \frac{3\pi R(2h+a)}{2\pi R^2 h} = \frac{3(2h+a)}{2Rh}. \quad (42)$$

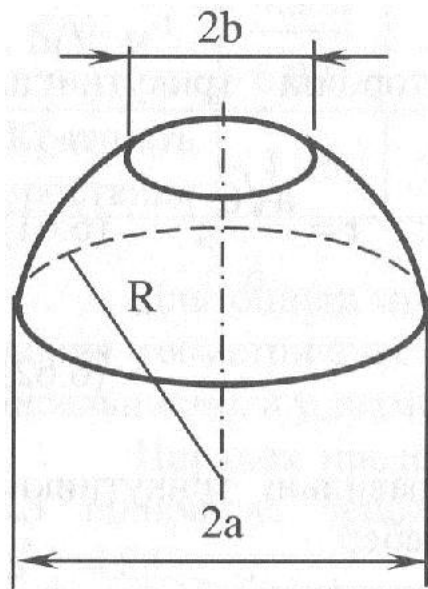
Сферичний сегмент



$$S_{c.cce} = \pi(h^2 + a^2); \quad a^2 = h(2R - h); \quad (44)$$

$$V_{c.cce} = \frac{\pi h^2(3R-h)}{3};$$

Сферичний шар:



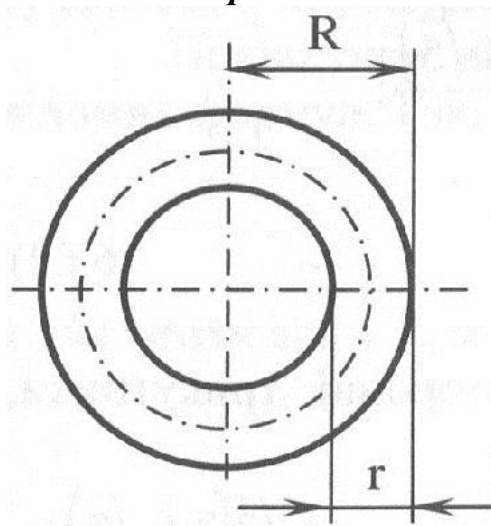
$$R^2 = a^2 + \left[\frac{a^2 - b^2 - h^2}{2h} \right]^2; \quad (45)$$

$$S_{c.ш} = \pi(2Rh + a^2 + b^2);$$

$$V_{c.ш} = \pi h \frac{3a^2 + 3b^2 + h^2}{6};$$

$$\frac{S_{c.ш}}{V_{c.ш}} = \frac{6(2Rh + a^2 + b^2)}{h(3a^2 + 3b^2 + h^2)}. \quad (46)$$

Top:



$$S_T = 4\pi^2 Rr;$$

$$V_T = 2\pi^2 Rr^2;$$

$$\frac{S_T}{V_T} = \frac{2}{r}. \quad (47)$$

Співвідношення S/V представлені, як функції геометричних параметрів. Однак останні по кожній фігурі різні, а тому для отримання числових даних і можливості порівняння результатів необхідно різні випадки привести до однакових об'ємів.

Для можливості більш широкого узагальнення одержаних результатів зробимо порівняння з цієї точки зору багатогранників. Відомо, що у відповідності до формули Ейлера число ребер L , число вершин N і число граней P багатогранника пов'язані рівністю

$$N - L + P = 2. \quad (48)$$

Тетраедр. Всі чотири грані - рівносторонні трикутники. Тетраедр має чотири вершини і шість ребер довжиною a :

$$V_T = \frac{a^3\sqrt{2}}{12}; \quad S_T = a^2\sqrt{3}; \quad R = \frac{a\sqrt{6}}{4};$$

$$r = \frac{a\sqrt{6}}{12}; \quad H = \frac{a\sqrt{6}}{3},$$

де R - радіус описаної сфери; r - радіус вписаної сфери; H - висота.

$$\frac{S_T}{V_T} = \frac{a^2\sqrt{3} \cdot 12}{a^3\sqrt{2}} = \frac{12\sqrt{3}}{a\sqrt{2}} = \frac{14,669}{a}. \quad (49)$$

Октаедр. Всі вісім граней - рівносторонні трикутники. Октаедр має шість вершин і дванадцять ребер

$$V_{ок} = \frac{a^3\sqrt{2}}{3}; \quad S_{ок} = 2a^2\sqrt{3}; \quad R = \frac{a\sqrt{2}}{3}; \quad r = \frac{a\sqrt{6}}{6}; \quad (50)$$

$$\frac{S_{\text{ок}}}{V_{\text{ок}}} = \frac{6\sqrt{3}}{a\sqrt{2}} = \frac{7,35}{a}. \quad (51)$$

Додекаедр. Всі дванадцять граней - правильні трикутники. Додекаедр має дванадцять вершин і тринадцять ребер.

$$V_{\text{д}} = \frac{A^3(15+7\sqrt{5})}{4}; \quad S_{\text{д}} = 3a^2 \sqrt{5(5+2\sqrt{5})};$$

$$R = \frac{a\sqrt{3}(1+\sqrt{5})}{4}; \quad r = \frac{a\sqrt{10(25+11\sqrt{5})}}{20};$$

$$\frac{S_{\text{д}}}{V_{\text{д}}} = \frac{12\sqrt{5(5+2\sqrt{5})}}{a(15+7\sqrt{5})} = \frac{2,694}{a}. \quad (52)$$

Ікосаедр. Всі двадцять граней - рівносторонні трикутники. Ікосаедр має дванадцять вершин і тридцять ребер.

$$V_{\text{і}} = \frac{5a^3(3+\sqrt{5})}{12}; \quad S_{\text{і}} = 5a^2\sqrt{3}; \quad R = \frac{a\sqrt{2(5+\sqrt{5})}}{4}; \quad r = \frac{a\sqrt{3}(3+\sqrt{5})}{12};$$

$$\frac{S_{\text{і}}}{V_{\text{і}}} = \frac{12\sqrt{3}}{a(3+\sqrt{5})} = \frac{3,696}{a}. \quad (53)$$

Вирішуючи задачу співставлення різних форм упаковок, прийmemo для зручності підрахунків $V = 1 \text{ м}^3$ і для такої умови вираховуємо значення (i та a та співвідношення S/V (таблиця 3).

Таблиця 3

Порівняльні співвідношення геометричних параметрів

Параметр	Сфера	Додекаедр	Циліндр	Октаедр	Куб	Тетраедр
d, м	$\frac{1,241}{0,985}$		$\frac{1,084}{0,86}$	-		
a, м	-	$\frac{0,507}{0,4}$	-	$\frac{1,285}{1,06}$	$\frac{1}{0,794}$	$\frac{2,039}{1,618}$

S/V, м ⁻¹	$\frac{4,835}{6,091}$	$\frac{5,3}{6,735}$	$\frac{5,535}{6,977}$	$\frac{5,72}{6,977}$	$\frac{6}{7,557}$	$\frac{7,208}{9,085}$
Кратність зростання	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26

Для оцінки впливу кратності переходу визначаємо співвідношення геометричних параметрів також для випадку $V = 1 \text{ м}^3$ (дані чисельників), а у знаменниках при $V = 0,5 \text{ м}^3$.

Порядок представлення даних упаковок різної форми у табл. 3 відповідає зростанню показника S/V (від сфери, для якої $\frac{S}{V} = \frac{4,835}{6,091}$). Очевидно, що за показником пальми першості S/V перевагу має саме тетраедр.

Підрахунки величин **d** та **a** здійснювалися за використання відомих формул. Так, наприклад, для сфери з заданим $V = 1 \text{ м}^3$ маємо

$$d = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}, \quad (54)$$

а для тетраедра з $V_T = 1 \text{ м}^3$ одержуємо

$$a = \sqrt[3]{\frac{12V}{\sqrt{2}}} = \sqrt[3]{\frac{12}{\sqrt{2}}}. \quad (55)$$

Записана у табл. 3 послідовність показує, як з переходом від однієї фігури до іншої змінюються можливості інтенсифікації теплопередавання. Так перехід від сфери до тетраедра приводить до зростання питомої поверхні у

$$7,208 : 4,835 = 1,49.$$

Величина зростання залишається такою ж і для випадку $V = 0,5 \text{ м}^3$:

$$9,085 : 6,091 = 1,49.$$

Порівняння переваг ізооб'ємних куба і циліндра дає значення

$$\begin{aligned} 6 : 5,535 &= 1,084; \\ 7,557 : 6,977 &= 1,084. \end{aligned} \quad (56)$$

Таким чином, для вказаних фігур найменший час обробки відповідає тетраедру, а найбільший - сфері.

Повернувшись до табл. 3, відмітимо, що кратність зростання для всіх фігур при зменшенні об'єму у два рази становить величину 1,26. Числа 2 і 1,26 логічно пов'язані, оскільки

$$\sqrt[3]{2} = 1,25992 \approx 1,26,$$

що вказує на пропорційність об'єму кубу геометричного параметру.

Найбільший практичний інтерес мають співвідношення, що стосуються циліндра і куба. В табл. 4 представлено дані їх параметрів.

Таблиця 4

Співвідношення геометричних параметрів циліндра і куба

Циліндр									
V, м ³	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0
d, м	0,503	0,634	0,72	0,79	0,860	0,914	1,006	1,046	1,08

S/V, м ⁻¹	11,92	9,464	8,25	7,51	6,977	6,650	5,964	5,736	5,53
Куб									
V, м ³	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0
d, м	0,464	0,585	0,66	0,73	0,794	0,843	0,928	0,965	1,0
S/V, м ⁻¹	12,93	10,25	8,96	8,14	7,565	7,117	6,466	6,218	6,0

На основі одержаних даних покажемо, яким є можливе скорочення часу процесу нагрівання упаковок. Кількість теплової енергії, що передається, складає

$$E_1 = kS_1\Delta t\tau_1; \quad (57)$$

$$E_{0,1} = kS_{0,1}\Delta t\tau_{0,1}, \quad (58)$$

де індекси 1 та 0,1 відповідають об'ємам упаковки 1 та 0,1 м³. Тоді для циліндричних упаковок маємо

$$\frac{S_1}{V_1} = 5,535 \text{ м}^{-1};$$

$$S_1 = 5,535 \cdot 1,0 = 5,535 \text{ м}^2; \quad (59)$$

$$\frac{S_{0,1}}{V_{0,1}} = 11,928 \text{ м}^{-1};$$

$$S_{0,1} = 11,928 \cdot 0,1 = 1,1928 \text{ м}^2; \quad (60)$$

Діленням виразу (59) на (60) одержуємо:

$$\frac{E_1}{E_{0,1}} = \frac{S_1}{S_{0,1}} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_{0,1}}, \quad (61)$$

а підстановка чисельних даних приводить до виду

$$10 = \frac{5,535}{1,1928} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_{0,1}},$$

$$\frac{\tau_1}{\tau_{0,1}} = 2,155. \quad (62)$$

Звернемо увагу на співвідношення кількостей теплової енергії, що супроводжують зміну об'ємів упаковок

$$\frac{E_1}{E_{0,1}} = \frac{\tau_1}{\tau_{0,1}} = 10. \quad (63)$$

При цьому одержуємо співвідношення

$$\frac{\tau_1}{\tau_{0,1}} = \sqrt[3]{\frac{V_1}{V_{0,1}}} = \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_{0,1}}} = 2,155. \quad (64)$$

Одержані результати дають можливість сформулювати наступні положення:

- співвідношення енергетичних витрат пов'язаних з нагріванням упаковок відповідають співвідношенням у зміні їх об'ємів;
- співвідношення часу перехідних процесів нагрівання (охолодження) упаковок дорівнюють кореню кубічному із співвідношення зміні їх об'ємів.

Результати розрахунків, що стосуються вказаних співвідношень, наведені у табл. 5 та на рис. 5, де

$V_{(п)}$ - початковий об'єм упаковки;

V_i - об'єм і-тої упаковки;

$\tau_{(п)}$ - час обробки початкової упаковки;

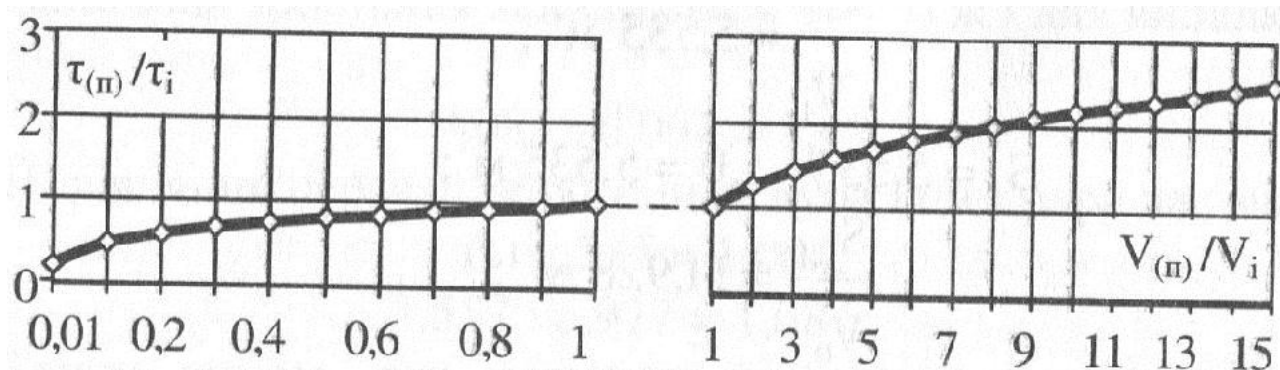


Рис. 5. Графіки, що відображують зміну часу обробки упаковок в залежності від зміни їх об'ємів

τ_i - час обробки і-тої упаковки.

Таблиця 5

Співвідношення параметрів

$V_{(n)}/V_i$	15	14	13	12	11	10	9
$\tau_{(n)}/\tau_i$	2,47	2,41	2,35	2,29	2,22	2,15	2,08
$V_{(n)}/V_i$	6	5	4	3	2	1	0,95
$\tau_{(n)}/\tau_i$	1,847	1,71	1,59	1,44	1,26	1,0	0,983
$V_{(n)}/V_i$	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$\tau_{(n)}/\tau_i$	0,888	0,843	0,794	0,737	0,669	0,585	0,464

Створені на основі феноменологічних міркувань аналітичні моделі відносяться до змін питомої поверхні упаковок і на цій основі досягається прогностична оцінка, що стосується зменшення часу теплової обробки упаковок на рівні пастеризації або стерилізації.

Підґрунтям такого підходу виступає принцип суперпозиції, однак зменшення розмірів упаковок має ще один позитивний вплив, пов'язаний з теплообміном і теплопровідністю оброблюваних середовищ.

1.5. Оцінка термодинамічних параметрів процесів

На час здійснення теплової обробки упаковки впливають наступні фактори: теплофізичні властивості матеріалу упаковки і продукту, товщина стінки упаковки та її геометричні розміри, початкова і кінцева температури продукту, температура теплового агента, орієнтація упаковки в полі сил тяжіння, наявність збурень полем сил тяжіння або інерційними полями.

Продукція, що підлягає обробці суттєво відрізняється за такими фізичними властивостями, як густина, питома маса, в'язкість, які прийнято поєднувати терміном «консистенція».

Консерви рідкої консистенції мають свою особливість конвективне теплоперенесення в режимах теплової обробки.

До продукції густої консистенції відносяться томатні пасти, фруктові пюре та соуси, паштети тощо, в яких конвективні токи суттєво послаблені або взагалі відсутні. Передавання теплоти у таких випадках здійснюється кондуктивним методом або теплопровідністю. Різниця у перебігу таких процесів відображена на рис. 6.

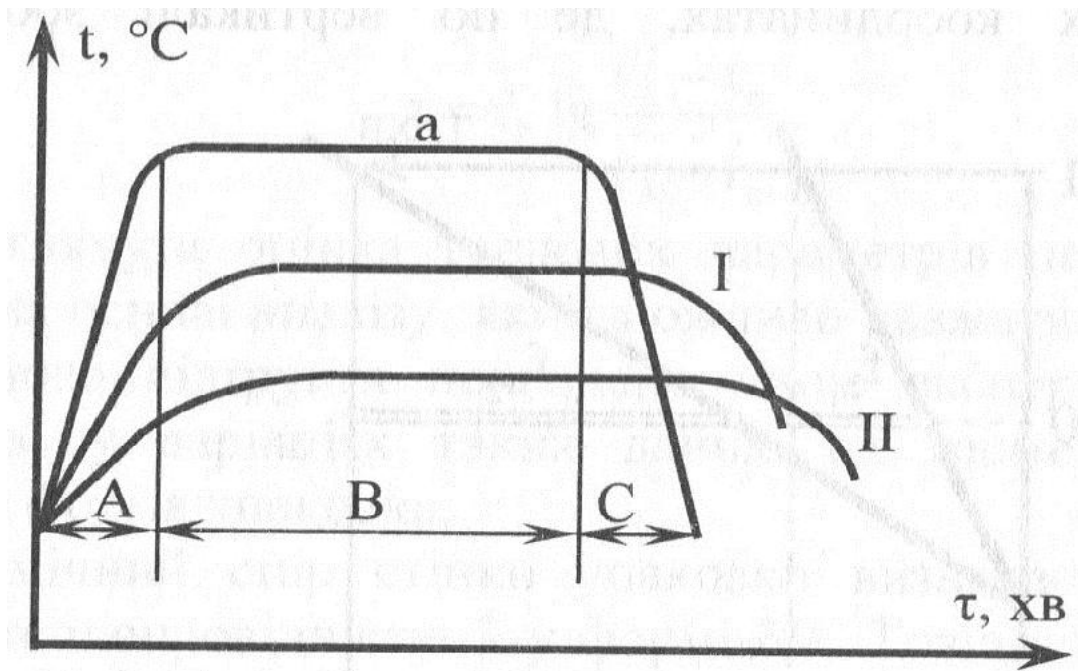


Рис. 6. Графік нагрівання консервів з консистенцією продукції: I - рідкою; II - густою; a - графік зміни температури теплового агента в стерилізаторі

Ділянкам A, B та C відповідають зони нагрівання, витримки і охолодження пастеризатора (стерилізатора). Вказаний на рисунку хід температурної кривої апарата називають режимом або формулою стерилізації, яка приводиться до виду

$$\frac{A - B - C}{t^{\circ}}$$

При цьому запис у чисельнику стосується подовження у часі режимів нагрівання, витримки і охолодження у хвилинах, а у знаменнику - температура стерилізації (пастеризації).

Очевидно, що в умовах нагрівання температурні криві продукції зображуються нижче температурних кривих апарата, а досягнення максимальних температур продукту в часі відстає від часу максимумів температур апарата.

Характер залежностей по рис. 13 цілком піддається аналітичному моделюванню, що знайшло своє відображення введенням константи або сталої термічної інерції, однак остання є функцією не лише термодинамічних параметрів продукту і матеріалу упаковки, а залежить також від форми і типорозміру упаковки. Не виключаючи певної користі такого рівня моделювання, все ж слід відмітити, що в оцінці перспектив інтенсифікації теплообміну за рахунок масштабних переходів слід зробити додаткові дослідження. У зв'язку з останнім зупинимося більш детально на понятті термічної інерції, яке стосується режимів перехідних процесів. Процес нагрівання представимо у напівлогарифмічних координатах, де по вертикалі зображується

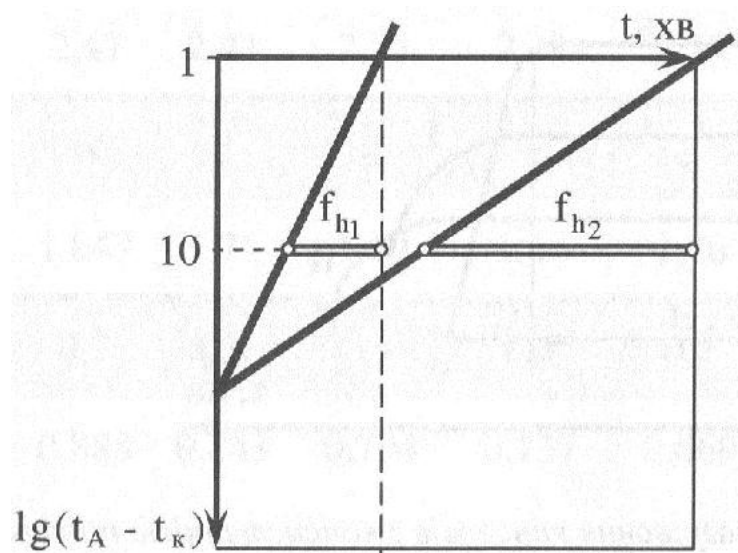


Рис. 7. Теоретичні криві термічної інерції

параметру у вигляді $\lg(t_A - t_K)$, °C, а на горизонтальній осі - час процесу t , хв (рис. 14).

В позначках параметрів t_A - це найвища температура, яка досягається у глибині продукту на даний момент часу.

Початок відліку різниці температур обрано таким чином, щоб її наростання відображувалося у напрямку зверху донизу. У такому випадку залежності відображуються подібними до температурних кривих.

При цьому має місце залежність

$$\lg \frac{t_A - t_{\Pi}}{t_A - t_K} = \frac{\tau}{f_h}, \quad (65)$$

де t_{Π} - найменша температура.

Горизонтальний катет f_h за своєю величиною знаходиться у прямій кореляції з часом нагрівання. При цьому горизонтальний катет відповідає проходженню одного логарифмічного циклу на вертикальній осі, за якого різниця температур змінюється у 10 разів. Тоді вертикальний катет дорівнює $\lg 10$, тобто 1 і тангенс кута нахилу дорівнює $1/f_h$. Це означає, що величина f_h також є константою і її можливо визначити як час, потрібний для повного прогрівання продукту. У відповідності з назвою f_h як сталої термічної інерції рівняння (76) називають рівнянням теплової інерції, яке можливо розв'язати відносно часу τ :

$$\tau = f_h \lg \frac{t_A - t_{\Pi}}{t_A - t_K}. \quad (66)$$

Розглянута оцінка теплових параметрів перехідних процесів здійснена на основі аналізу, який можливо вважати термодинамічним. Однак у його підґрунтя покладено лише експериментальні дані з обмеженням у варіаціях таких даних, як геометричні параметри, матеріал та форма упаковки.

Термічний опір стінки упаковки визначається товщиною її стінки δ і теплопровідністю λ у формі δ/λ . Товщина стінки жерстяної тари складає 0,2-0,3 мм, а теплопровідність становить 47-52 Вт/(м·К). З названих співвідношень

витікає, що термічний опір скляних банок порівняно з жерстяними більший приблизно у 1000 разів. Для наведення порівняльних оцінок наведемо також значення коефіцієнтів теплопровідності окремих напоїв і продуктів у табл. 6.

Як бачимо, коефіцієнти теплопровідності матеріалів, наведені у останній таблиці вказують на те, що вони співрозмірні аналогічному показнику скла. Це означає необхідність комплексної оцінки величин термічного опору. Порівняльна оцінка при цьому має стосуватися двох варіантів:

1) теплова обробка стосується рідинного продукту, у якому теплота розповсюджується головним чином шляхом конвекції. У таких випадках термічний опір продукту відносно обмежений;

2) тепловій обробці підлягає продукт значної консистенції і розповсюдження теплоти здійснюється за рахунок теплопровідності.

Припустимо, що у вказаних двох варіантах можливим є використання жерстяної і скляної тари. У таких випадках можливим є чотири теплофізичних варіанти.

Таблиця 6

Значення коефіцієнтів теплопровідності λ , Вт/(м·К)

Назва продукту	Коефіцієнт теплопровідності
Пиво «Жигулівське» при температурі, °С	
1,0	0,52
6,0	0,53
9,0	0,53
Вина «Кагор» при температурі, °С	
0,0	0,467
10,0	0,476
50,0	0,523
Молоко жирністю 3,2 % при	

температурі, °С	
15,0	0,493
35,0	0,506
80,0	0,542
М'ясо курятини	0,49
М'ясо свинини при температурі,	
°С	
30,0	0,488
0,0	0,477
-20,0	1 43
Фарш ковбасний при температурі	
30,0 °С	0,437

Варіант «жерстяна тар - малокогсисленуний продукут». У цюму випадку теплообмін характеризується коефіцієнтами тепловіддачі α_1 та α_2 і значеннями $\delta_{ж}$ та $\lambda_{ж}$, а термічний опір виражається залежністю

$$\rho_T = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ж}}{\lambda_{ж}} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (67)$$

Як бачимо, за рахунок конвективного теплоперенесення складова термічного опору продукту вилучена з формули (78).

Коефіцієнти тепловіддачі α_1 та α_2 у таких випадках значні, а тому обернені їм величини $1/\alpha_1$, та $1/\alpha_2$ є малими. Ще менші значення має термічний опір жерсті. Тому співвідношення складових правої частини рівняння (78) пропонується оцінювати як 100 : 1 : 100. Це означає, що час теплової обробки визначається фізичними умовами тепловіддачі зовнішньої і внутрішньої.

Для випадку малокогсисленуного продукту і скляної тари термічний опір відображується залежністю

$$\rho_T = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ск}}{\lambda_{ск}} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (68)$$

яка приводить до співвідношення 100 : 1000 : 100. Це означає, що загальний термічний опір визначається, в основному опором $\delta_{ск}/\lambda_{ск}$.

Розглянемо особливості теплоперенесення для сполучення «жерстяна банка - консистентний продукт». Тут термічний опір такої системи

$$\rho_T = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ж}}{\lambda_{ж}} + \frac{\delta_{пр}}{\lambda_{пр}}, \quad (69)$$

відповідно товщина шару продукту і його теплопровідність.

У загальній оцінці цього випадку запишемо: 100 : 1 : 25000.

Наведені співвідношення мають загальний характер, у яких не враховуються геометричні співвідношення упаковок. Однак з посиланням на Ч. Болла наводиться формула, у якій має місце співвідношення геометричних параметрів

$$\frac{f_{h_1}}{f_{h_2}} = \frac{K_1 d_1^2}{K_2 d_2^2} \quad (70)$$

де f_{h_1} - відома стала термічної інерції для конкретного експериментального випадку з тарою, діаметр якої d_1 ; f_{h_2} - розшукувана стала термічної інерції для іншої тари, діаметр якої d_2 ; K_1 та K_2 - коефіцієнти для даних банок, величини яких залежать від співвідношень h/d . Величини цих співвідношень і коефіцієнтів K наведені у табл. 7.

Таблиця 7

Співвідношення геометричних параметрів банок

Співвідношення h/d	K	Співвідношення h/d	K
0,4	0,109	1,1	0,296
0,5	1,148	1,2	0,308
0,6	0,181	1,3	0,320
0,7	1,212	1,4	0,328

0,8	0,239	1,5	0,337
0,9	0,261	1,6	0,343
1,0	0,280	∞	0,397

З відміченого витікає, що з точки зору інтересів зменшення термічних опорів теплопровідності для консистентних продуктів здійснення масштабних переходів в сторону обмеження габаритних розмірів є доцільним, оскільки при цьому зменшується товщина шару, відповідальна за процес.

Таким чином, для випадків теплової обробки малокогнсистентної продукції з конвективним тепломасоперенесенням ефект інтенсифікації пов'язується зі зростанням питомої поверхні, а для випадків обробки консистентної продукції до нього додається ефект зменшення термічного опору продукту. Для його визначення здійснимо порівняльний аналіз стосовно циліндричних банок, у яких діаметри і висоти є рівними. Нехай базовому варіанту відповідають значення геометричних параметрів s_1 , та h_1 і при цьому $d_1 = h_1$. Тоді маємо повний об'єм банки

$$V_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} h_1 = \frac{\pi d_1^3}{4}, \quad (71)$$

а для порівнюваного варіанту

$$V_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} h_2 = \frac{\pi d_2^3}{4}. \quad (72)$$

Якщо маємо кратність співвідношення об'ємів

$$\frac{V_2}{V_1} = k_{кр}, \quad (73)$$

$$V_2 = k_{кр} V_1; \quad (74)$$

Звідси

$$\frac{\pi d_2^3}{4} = k_{кр} \frac{\pi d_1^3}{4}; \quad d_2^3 = k_{кр} d_1^3; \quad (75)$$

$$d_2 = \sqrt[3]{k_{кр}} d_1. \quad (76)$$

У табл. 8 наведено співвідношення геометричних параметрів порівнюваних об'єктів.

Таким чином, прискорення нагрівання продукту пов'язане зі зменшенням термічного опору як у радіальному, так і осьовому напрямках банки. Одержані дані можливо використати як вихідні у точних аналітичних моделях теплообміну за рахунок теплопровідності. Однак одержання останніх супроводжується складностями, пов'язаними в основному з формою упаковок. Відомо, що зв'язок між величинами, що

Таблиця 8

Співвідношення геометричних параметрів банок

Коефіцієнт кратності $k_{кр}$	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0
d_2/d_1	0,464	0,585	0,737	0,793	0,888	0,928	1,0
h_2/h_1	0,464	0,585	0,737	0,793	0,888	0,928	1,0

приймають участь у передаванні теплоти теплопровідністю встановлюється диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (77)$$

де комплекс $\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$ називається оператором Лапласа і позначається скорочено ∇^2 ; $\lambda/c\rho$ - температуропровідність, позначається як a .

Тоді рівняння теплопровідності приймає форму

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t. \quad (78)$$

Диференціальне рівняння Фур'є (87) відповідає явищу передавання теплоти теплопровідністю у самому загальному вигляді. Його використання у кожному окремому випадку потребує інформації про розподіл температур у початковий момент часу або початкових умов. Окрім того повинні бути відомими геометрична форма і розміри тіла, фізичні параметри середовища і тіла і граничні умови, що характеризують розподіл температур на поверхні тіла тощо. Точні розв'язання досягаються для плоскої або циліндричної поверхонь, кількшарових плоских та циліндричних стінок, через шарову стінку тощо. Проте перенесення цих рівнянь на тіло складної або неправильної форми неможливе. Визначення теплопровідності складних об'єктів виконується окремо по елементах, але і такий спосіб має лише наближений характер.

У зв'язку з викладеним переваги, пов'язані зі зменшенням коефіцієнта кратності, приводять до зменшення опору теплопередавання за рахунок зменшення товщини шару продукту.

Особливістю теплопередавання через криволінійну стінку з радіусом $d/2$ є те, що по радіусу до центра упаковки має відбуватися ущільнення теплового потоку в умовах стаціонарного теплообміну. Стосовно ж перехідних процесів маємо можливість скласти тепловий баланс, за яким кількість теплової енергії, одержана упаковкою, дорівнює сумі енергій, сприйнятих через бічну і торцеві поверхні, що відобразимо рівнянням

$$E_{\text{сум}} = E_{\text{біч}} + E_{\text{тор}}. \quad (79)$$

Якщо знехтуємо термічним опором оболонки, який суттєво менший за термічний опір консистентного продукту, то в опосередкованому випадку і з врахуванням принципу суперпозиції запишемо

$$E_{\text{сум}} = S_{\text{суу}} \frac{\lambda}{\delta_{\text{ек}}} \Delta t_c \tau, \quad (80)$$

де $S_{\text{сум}}$ - сумарна поверхня теплопередавання; $\delta_{\text{ек}}$ - еквівалентна товщина шару продукту; Δt_c - середній для об'єкта температурний напір; τ - час перебігу процесу.

Визначення величини $\delta_{\text{ек}}$ здійснимо, виходячи з наступних міркувань. Вважатимемо, що сумарна площа поверхні теплопередавання дорівнює сумі бічної і торцевих поверхонь, тобто

$$S_{\text{сум}} = S_{\text{біч}} + 2S_{\text{тор}} = \pi dh + 2 \frac{\pi d^2}{4} = \pi dh + \frac{\pi d^2}{2}. \quad (81)$$

В якості припущення також вважаємо, що весь продукт рівномірно розміщений на поверхні теплопередавання. Тоді маємо співвідношення

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h = S_{\text{сум}} \delta_{\text{ек}} = \left(\pi dh + \frac{\pi d^2}{2} \right) \delta_{\text{ек}}. \quad (82)$$

Звідси знайдемо

$$\delta_{\text{ек}} = \frac{\pi d^2 h}{4 \left(\pi dh + \frac{\pi d^2}{2} \right)}. \quad (83)$$

Припустимо, що маємо рівність $d = h$. Тоді

$$\delta_{\text{ек}} = \frac{\pi d^3}{4 \left(\pi d^2 + \frac{\pi d^2}{2} \right)} = \frac{d}{6}. \quad (84)$$

Позначимо співвідношення $h/d = i$

$$\delta_{\text{ек}} = \frac{\pi d^2 di}{4\left(\pi d^2 i + \frac{\pi d^2}{2}\right) 4(i+0,5)}. \quad (85)$$

Знайдена величина еквівалентної товщини шару продукту на сумарній поверхні дає можливість визначити вплив геометричних параметрів упаковки на величину термічного опору, бо

$$\rho_{\text{екв}} = \frac{\delta_{\text{екв}}}{4\lambda} = \frac{di}{4(i+0,5)\lambda}. \quad (86)$$

З останнього запису видно, що величина термічного опору однозначно залежить від діаметра d , зі збільшенням якого зростає, а висота упаковки має подвійний вплив. Для визначення останнього виділимо в рівнянні (86) комплекс $\frac{i}{(i+0,5)}$ і надамо йому числові значення в певному діапазоні (табл. 9). Тоді рівняння (86) приводиться до форми

$$\rho_{\text{екв}} = \frac{d}{4\lambda} = \frac{i}{(i+0,5)} \quad (87)$$

Таблиця 9

Залежність комплексу $i/(i + 0,5)$ від параметра i

i	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	2,0	4,0
$\frac{i}{i + 0,5}$	0,286	0,375	0,5	0,545	0,583	0,643	0,667	0,8	0,888

Для наглядного уявлення про характер цієї залежності вона представлена на рис. 8.

Одержана залежність (87), що стосується термічного опору, хоча і ґрунтується на еквівалентних співвідношеннях, все ж має в собі оцінку

подвійних впливів, оскільки враховує і абсолютний показник діаметра d банки і співвідношення її діаметра і висоти.

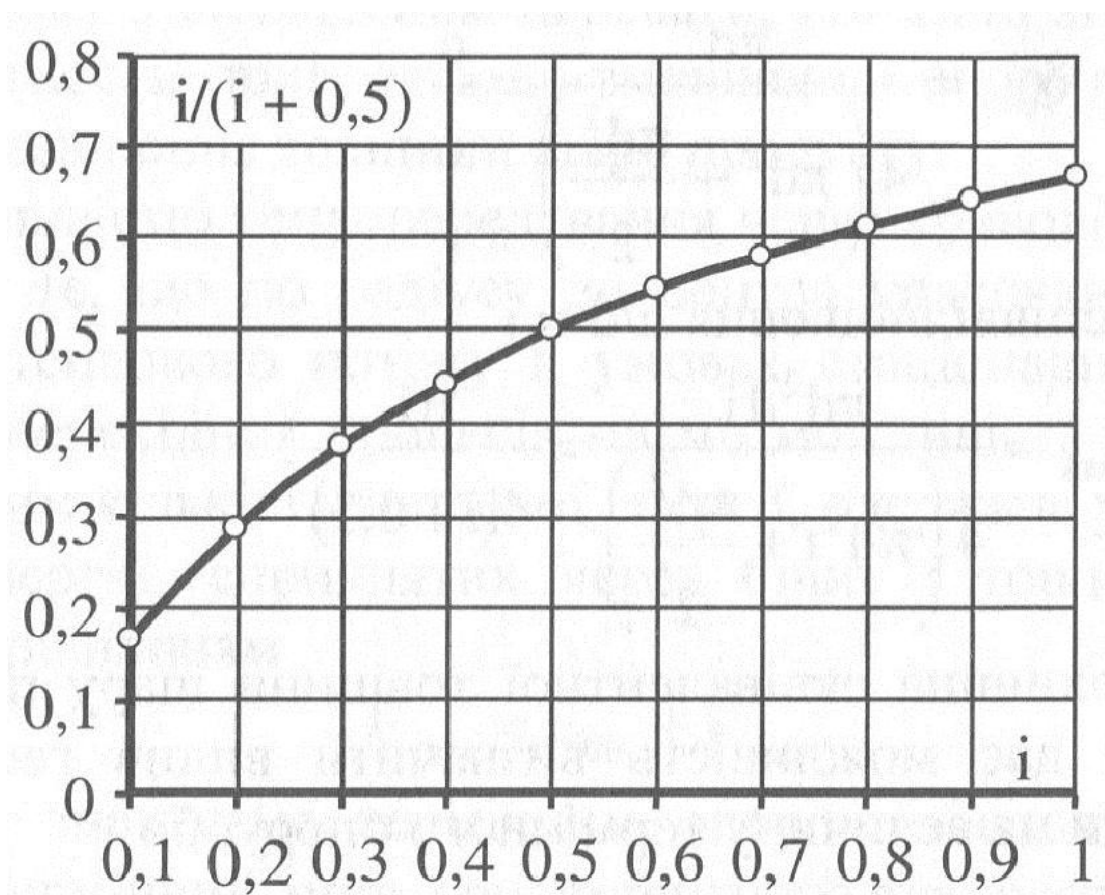


Рис. 8. Графік залежності $\frac{i}{(i+0,5)} = \frac{i}{(i+0,5)}(i)$

Теплова обробка продукції на рівні пастеризації або стерилізації пов'язана з її об'ємним тепловим розширенням. Для того, щоб обмежити внутрішній тиск в герметичних упаковках, заповнення останніх не є повним і обов'язковим є наявність газового прошарку. Доцільним за рахунок умов паровакуумного пакування є створення в упаковці вакууму певного рівня. Газовий прошарок або частково вакуумований газовий простір у загальному об'ємі упаковки створює додатковий термічний опір. За таких умов теплопередавання з боку однієї торцевої поверхні обмежується або майже припиняється і тоді для банки сумарна теплопередавальна поверхня визначається формулою

$$S_{\text{СУМ}} = S_{\text{БІЧ}} + S_{\text{ТОР}} = \pi dh + \frac{\pi d^2}{4}. \quad (88)$$

Тоді еквівалентна товщина шару продукту

$$\delta_{\text{ЕКВ}} = \frac{\pi d^2 h}{4\left(\pi d h + \frac{\pi d^2}{4}\right)} \quad (89)$$

З врахуванням, що $h = di$, одержуємо

$$\delta_{\text{ЕКВ}} = \frac{\pi d^3 i}{4\left(\pi d^2 i + \frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{di}{4(i+0,25)} \quad (90)$$

Тоді еквівалентний термічний опір

$$\rho_{\text{ЕКВ}} = \frac{di}{4\lambda(i+0,25)} \quad (91)$$

Зростання термічного опору для такого випадку відображується даними табл. 6.10.

Таблиця 10

Залежність комплексу $i/(i + 0,25)$ від i

i	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	2,0
$\frac{i}{i + 0,25}$	0,444	0,545	0,667	0,706	0,737	0,783	0,8	0,89

Порівняння з результатами підрахунків, наведеними у табл. 9, вказує на те, що виключення з теплопередавання однієї торцевої поверхні банки приводить до зростання термічного опору системи.

Знайдемо аналогічні співвідношення для кубічної форми упаковки.

Сумарна площа теплопередачі

$$S_{\text{СУМ}} = 6a^2. \quad (92)$$

Оскільки об'єм упаковки $V = a^3$, то

$$\delta_{\text{ЕКВ}} = \frac{a^3}{6a^2} = \frac{a}{6}. \quad (93)$$

Звідси термічний опір теплопередавання

$$\rho_{\text{ЕКВ}} = \frac{a}{6\lambda}. \quad (94)$$

За вилучення з теплопередавання однієї грані одержуємо

$$S_{\text{СУМ}} = 5a^2; \quad \delta_{\text{ЕКВ}} = \frac{a^3}{5a^2} = \frac{a}{5}; \quad \rho_{\text{ЕКВ}} = \frac{a}{5\lambda}. \quad (95)$$

Перехід до паралелепіпеда з квадратним перерізом дає

$$S_{\text{СУМ}} = 2a^2 + 4ac, \quad (96)$$

де c - довжина ребра.

Нехай маємо $c = ai$. Тоді

$$S_{\text{СУМ}} = 2a^2 + 4a^2i = 2a^2(1 + 2i). \quad (97)$$

Оскільки $V = a^2c = a^3i$, то

$$\delta_{\text{екв}} = \frac{a^3 i}{2a^2(1+2i)} = \frac{ai}{2(1+2i)}$$

$$\rho_{\text{екв}} = \frac{ai}{2\lambda(1+2i)}. \quad (98)$$

До числа параметрів впливу на величину $\rho_{\text{екв}}$ відноситься співвідношення c/a . Співвідношення $i/(1+2i)$ в залежності від i представлені у табл. 11.

Таблиця 11

Залежність комплексу $i/(1+2i)$ від i для паралелепіпеда з квадратним перерізом

i	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	2,0
$\frac{i}{1+2i}$	0,143	0,188	0,25	0,273	0,292	0,321	0,303	0,4

Як бачимо з останньої таблиці за умови $c < a$, має місце зменшення комплексу $i/(1+2i)$, що приводить у свою чергу до зменшення $\rho_{\text{екв}}$.

Важливо, що знайдені співвідношення (97), (101), (108) дають можливість здійснити порівняння у часі щодо перебігу теплообмінного процесу. З урахуванням рівняння (90) для порівнюваних умов записуємо

$$E_1 = S_1 \frac{\lambda}{\delta_{1\text{екв}}} \Delta t_1 \tau_1; \quad (99)$$

$$E_2 = S_2 \frac{\lambda}{\delta_{2\text{екв}}} \Delta t_2 \tau_2. \quad (100)$$

В якості припущення будемо вважати, що $\Delta t_1 \approx \Delta t_2$. Розділивши (99) на (100) одержуємо

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{S_1 \lambda \delta_{2\text{екв}}}{S_2 \lambda \delta_{1\text{екв}}} \cdot \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{S_1 \delta_{1\text{екв}}}{S_2 \delta_{2\text{екв}}} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_2}, \quad (101)$$

Звідси знайдемо

$$\tau_2 = \frac{S_1 E_1 \delta_{1\text{екв}}}{S_2 E_2 \delta_{2\text{екв}}} \tau_1, \quad (102)$$

де

$$\begin{aligned} E_1 &= m_1 c(t_{(к)} - t_{(п)}); & E_2 &= m_2 c(t_{(к)} - t_{(п)}); \\ S_1 &= \pi d_1 h_1 + \frac{\pi d_1^2}{2}; & S_2 &= \pi d_2 h_2 + \frac{\pi d_2^2}{2}; \\ \delta_{1\text{екв}} &= \frac{d_1 i}{4(i+0,5)}; & h_1 &= d_1 i; & \delta_{2\text{екв}} &= \frac{d_2 i}{4(i+0,5)}; & h_2 &= d_2 i; \end{aligned}$$

m_1 та m_2 - відповідно маси продукту в упаковках; $t_{(к)}$ - кінцева та початкова температури продукту.

Таким чином, залежність (102) дає можливість оцінити співвідношення у часі теплової обробки в режимі нагрівання (охолодження) циліндричної упаковки як за зміни абсолютних розмірів, так і за зміни співвідношень геометричних параметрів.

Одним з напрямків збільшення поверхні теплопередачі стосовно жерстяних банок є нанесення зігів на їх бічну поверхню. Форма зігів у перерізі виконується найчастіше у вигляді сполучення напівкіл (рис. 9) з радіусом r . Тоді довжина дуги А-В-С, розташованої на одному кроці a

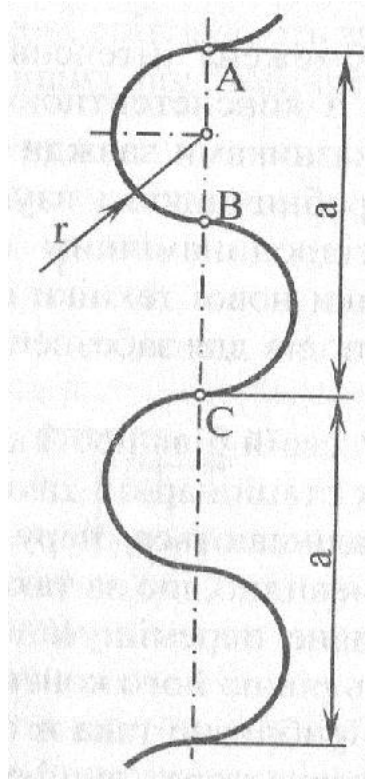


Рис. 9. Схема зігваної бічної поверхні банки

$$l_{\text{дуг}} = 2\pi r. \quad (103)$$

При цьому крок a становить

$$a = 4r. \quad (104)$$

Тоді відношення дуги до кроку визначається

$$\frac{l_{\text{дуг}}}{a} = \frac{2\pi r}{4r} = \frac{\pi}{2} = 1,57. \quad (105)$$

Це означає, що зігвана бічна поверхня банки більша у 1,57 рази за бічну поверхню звичайної циліндричної банки, а її загальна поверхня становить

$$S_6 = 1,57\pi dh + \frac{\pi d^2}{4}. \quad (106)$$

Еквівалентна товщина шару продукту при цьому становить

$$\delta_{\text{екв}} = \frac{\pi d^2 h}{4 \left(1,57 \pi d h + \frac{\pi d^2}{4} \right)}. \quad (107)$$

Ввівши заміну $h = di$ одержуємо

$$\delta_{\text{екв}} = \frac{\pi d^3 i}{4 \left(1,57 \pi d^2 i + \frac{\pi d^2}{4} \right)} = \frac{di}{4(1,57i + 0,25)}. \quad (108)$$

Тоді еквівалентний термічний опір

$$\rho_{\text{екв}} = \frac{di}{4\lambda(1,57i + 0,25)}. \quad (109)$$

Таким чином, зігнання бічної поверхні банок, збільшуючи площу теплопередавання, приводить до зменшення еквівалентного термічного опору.

Розділ 2. Експериментальні дослідження динаміки теплообміну в процесах нагрівання і охолодження упаковок

Дослідження виконувалися стосовно двох типорозмірів пляшок місткістю 0,5 і 0,33 л з застосуванням термозонду, на якому встановлювалися шість термопар. При цьому термопари від першої до п'ятої призначалися для виміру температур по висоті рідинного шару, а шоста термопара в безперервному режимі фіксувала температуру теплоносія. Оскільки одночасно температура теплоносія фіксувалася приладом термостата, то термопара б додатково дозволяла контролювати роботу системи «термозонц-потенціомтр». Схему розміщення термопар відображено на рис. 10.

В складі лабораторного стенду використовувався термостат ТЖА - 40 з можливістю досягнення температур теплоносія в межах від 20 до 95°C і автоматичним підтримуванням температури теплоносія на заданому рівні. Досліди виконувалися з вертикальною і горизонтальною орієнтацією пляшок у гравітаційному полі. При цьому вертикальна орієнтація стосувалася положень пляшок горловою частиною догори і донизу.

З метою оцінки впливів температури теплоносія на динаміку нагрівання продукції її значення змінювалися ступінчасто і складали величини 30, 50, 55, 65, 70, 75 °C.

На рис. 11 і 12 наведено залежності, які відображають динаміку нагрівання від початкової температури $t_{(п)} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ і за температури теплоносія $t_{т.н} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в режимах душіювання і занурення.

Порівняння залежностей по рис. 13 показує наявність температурного розшарування по висоті пляшок. Найбільший рівень розшарування відповідає початку процесу і випадку вертикальної орієнтації пляшки горловою частиною догори. Помітний відрив при цьому має показник температури у верхній зоні, що відповідає термопарі № 5. Очевидно, що це є результатом двох складових впливу, а саме вертикальної циркуляції і радіальної нерівномірності

температурного поля. Остання визначається зменшенням радіуса в горловій частині пляшки. Долю впливу радіальної нерівномірності температурного поля можливо відслідкувати, порівнюючи випадки вертикальної орієнтації догори і донизу горловою частиною.

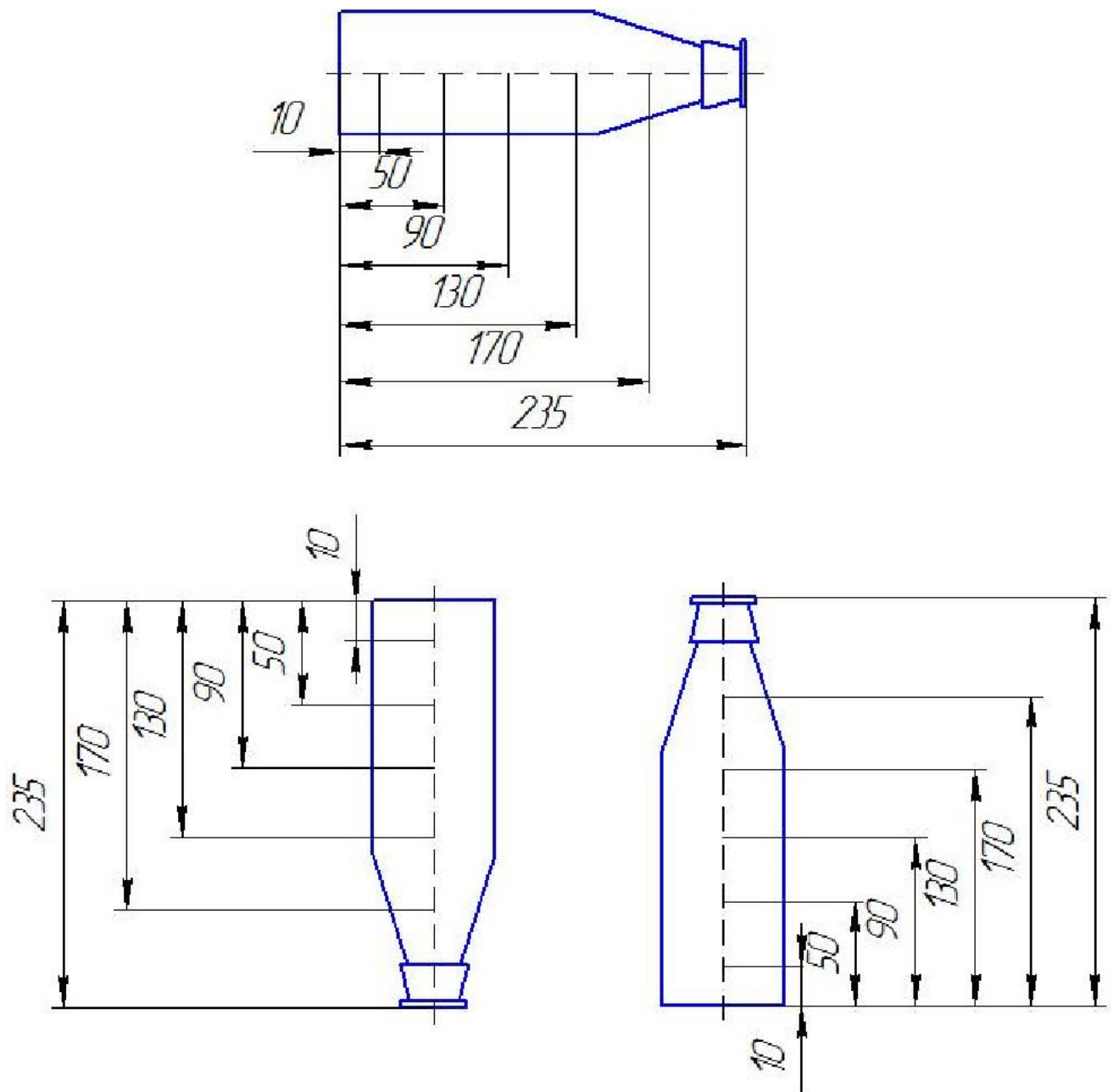


Рис. 10. Схема розташування терморпар на термозонді для випадків вертикальної і горизонтальної орієнтації пляшок

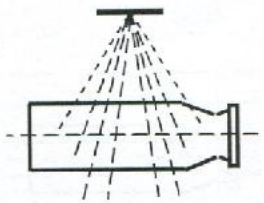
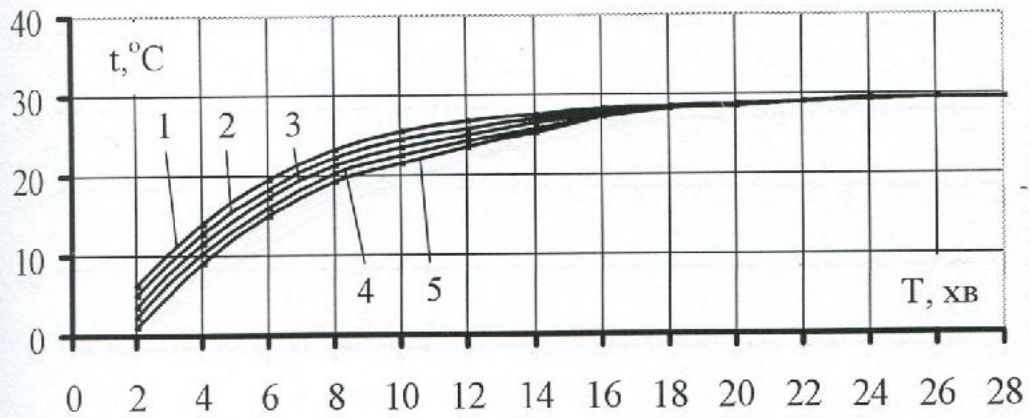
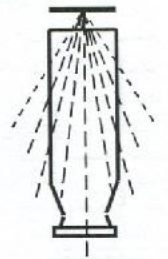
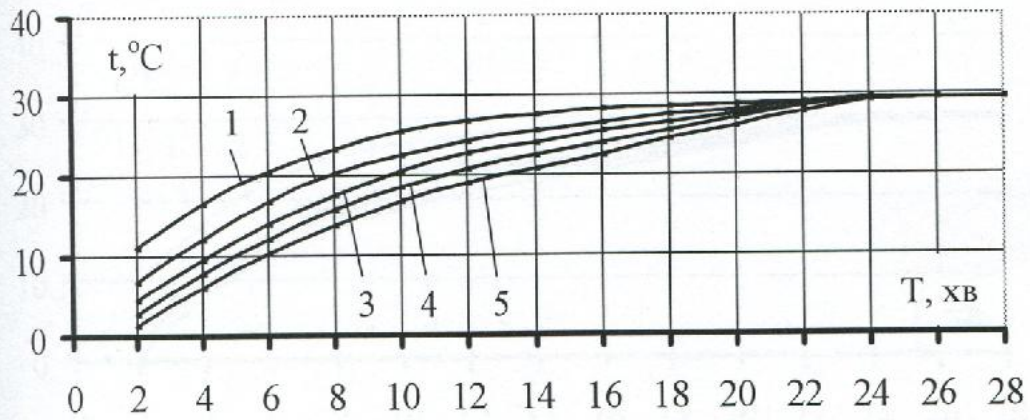
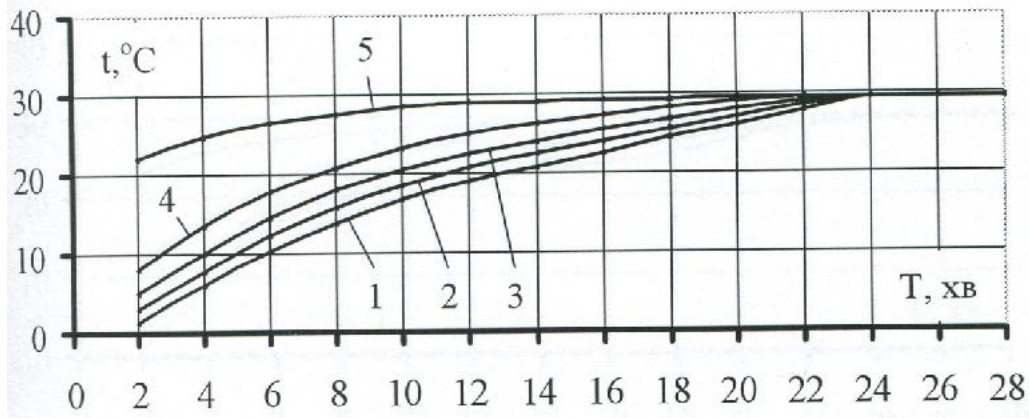


Рис. 11. Динаміка нагрівання продукту в пляшці (0,5л) в режимі зрошування з різною орієнтацією пляшки при температурі теплоносія $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{(п)} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1, 2, 3, 4, 5 - криві, що відповідають точкам вимірів на термозонді

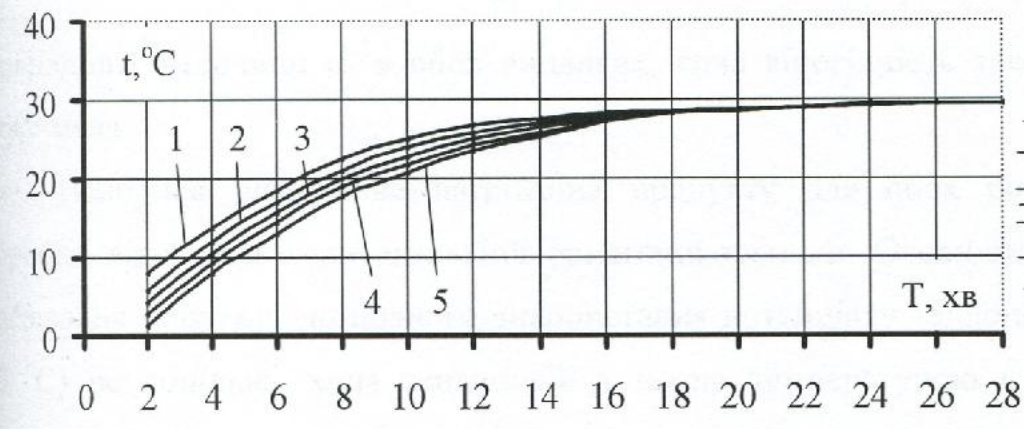
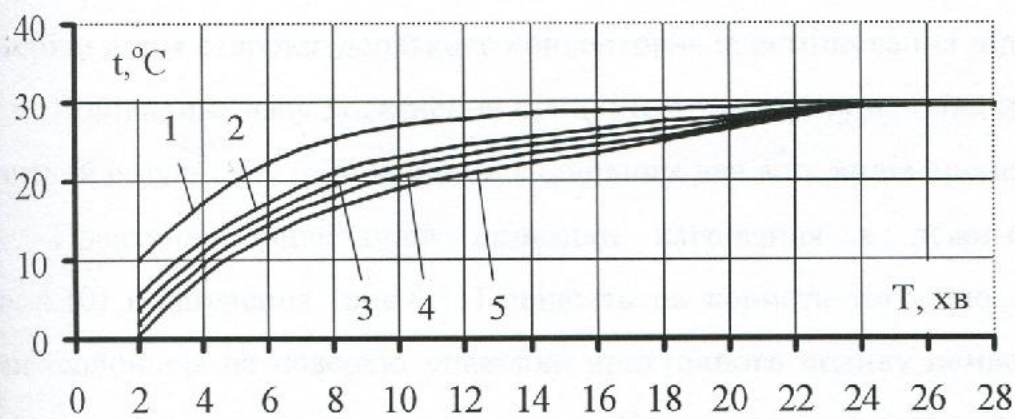
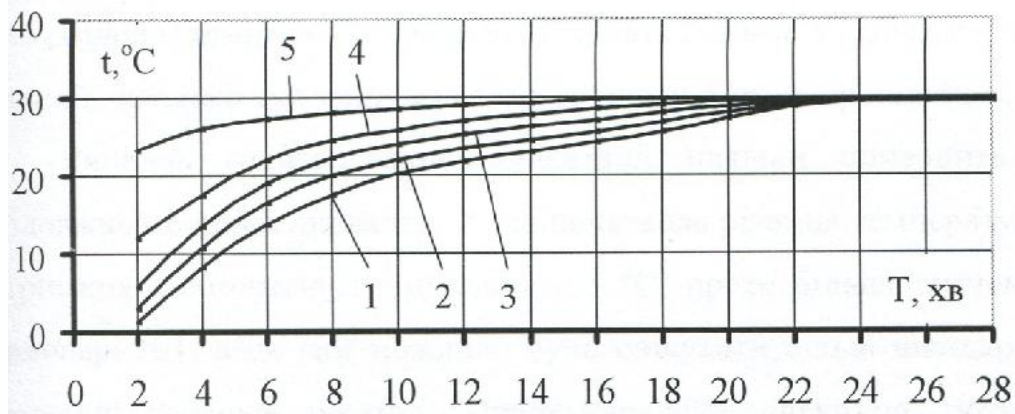


Рис. 12. Динаміка нагрівання продукту в пляшці (0,5л) в режимі занурювання з різною орієнтацією пляшки при температурі теплоносія $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{(п)} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1, 2, 3, 4, 5 - криві, що відповідають точкам вимірів на термозонді

Відрив температури верхньої точки рідини у другому випадку помітно менший, оскільки тут менший вплив радіальної теплопровідності.

Випадок горизонтальної орієнтації пляшки приводить до відсутності поздовжнього перемішування. Хоча початкова різниця температур на 2-ій хвилині нагрівання і обмежена величиною ~ 5 °С, проте більші значення відповідають термопарі № 1. Між тим можливо було очікувати більш швидкого прогрівання у завуженій горловій частині. Такий парадокс, очевидно, потребує пояснення, одним з варіантів якого може бути утворення додаткової вертикальної поверхні теплопередавання дійця. Саме вертикальна (або близька до неї) орієнтація поверхні дійця створює додаткове конвективне перемішування рідини.

Порівняння часу досягнення продуктом температури теплоносія показує, що кінцевий результат у ~ 24 хвилини є спільним для всіх видів орієнтації пляшок.

Практичне співпадіння динаміки нагрівання в режимах душіювання (рис. 13) і занурення (рис. 14) свідчать на користь того, що гідродинамічний стан теплоносія на поверхні упаковки практичного впливу немає, хоча за своїми характеристиками ці стани суттєво різні. Це дає підставу зробити висновок про те, що термічний опір тепловіддачі $\frac{1}{\alpha_1}$ не є лімітуючим або ж вважати, що має місце співпадіння величини α_1 в обох випадках, хоча вірогідність такого співпадіння дуже мала.

Найбільш рівномірне нагрівання продукту для обох режимів теплової обробки відповідає горизонтальній орієнтації пляшки. Очевидно, що реалізація нагрівання продукту до повного використання потенціалу теплоносія (тобто до ~ 30 °С) не доцільна, хоча теплоносій з такою температурою в пастеризаторах застосовується в якійсь з зон нагрівання. Процес теплопередавання слід припинити за певної різниці температур теплоносія і середньої інтегральної температури продукту, наприклад при $\Delta t \sim 10$ °С. З рис. 13 і 14 видно, що це відповідає приблизно 8-мій хвилині. Цьому моменту часу відповідає помітна різниця температур по висоті пляшки.

Перехід в наступну зону нагрівання означає зростання температури теплоносія. Якщо припустити, що вона складатиме 50°C, то для точки, що відповідає термопарі № 5 у випадку вертикальної орієнтації пляшки горловиною догори різниця температур становитиме 22-23 °С, а для зони, прилеглої до площини встановлення термопарі № 1 - 30-35 °С. Такий суттєвий розрив по температурних перепадах не можливо залишати поза увагою, призначаючи температури теплоносія по зонах обробки.

Додаткова експериментальна оцінка нерівномірності радіального температурного поля показала, що різниця температур в периферійних і центральних шарах залежить від діаметра упаковки і у нашому випадку не перевищувала 2-3 °С. Це ще раз підкреслює необхідність врахування повисотних перепадів температур при призначенні більшої температури теплоносія в наступній зоні обробки.

Зростання температури оброблюваного продукту супроводжується змінами таких фізичних і теплофізичних параметрів, як в'язкість, поверхневий натяг, коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт температуропровідності. Очевидно, що напрямок впливу вказаних параметрів на процес нагрівання в значній мірі визначається властивостями самого продукту, а тому вони не підлягають зовнішньому коригуванню. Проте деяку корисну інформацію можливо отримати за рахунок додаткового аналізу експериментальних залежностей $t = t(\tau)$. На рис. 15 наведено залежності, що відображають зміни середньо інтегральної температури і її похідних по часу. З них видно, що швидкість зміни температур має найбільше значення на початку процесу і з його плином монотонно зменшується. З точки зору доцільності організації процесу теплової пастеризації слід обмежити величину $\frac{dt}{d\tau}$ певною величиною $\frac{dt}{d\tau} min$, якій відповідає час обробки $\tau_i = \tau_{min}$. Разом з тим, графіки залежностей $t = t(\tau)$ дають можливість оцінити динаміку зміни теплової енергії накопиченої продуктом (рис. 42)

$$Q = cm(t_{(к)} - t_{(п)}), \quad (110)$$

де відповідно $t_{(п)}$ і $t_{(к)}$ - початкова і кінцева температури продукту; c і m - відповідно теплоємність і маса продукту.

Оскільки $t = t(\tau)$ то в певному проміжку часу

$$Q = cm(t(\tau) - t_{(п)}) = cmt(\tau) - cmt_{(п)}, \quad (111)$$

Або

$$Q = cm \int_0^\tau t(\tau) d\tau - cmt_{(п)}. \quad (112)$$

На рис. 43 і 44 наведено залежності $t = t(\tau)$ для випадку теплової обробки пляшок теплоносієм з температурою $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Оскільки початкова температура складала значення $t_{(п)} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$, то маємо стрімке зростання температури продукту і цьому зростанню повисотна різниця температур для вертикальної орієнтації пляшки складає $\sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Для горизонтальної орієнтації пляшки вона суттєво менша і обмежується значенням $\Delta t \sim 8... 10 \text{ }^\circ\text{C}$. При цьому в режимі душіювання

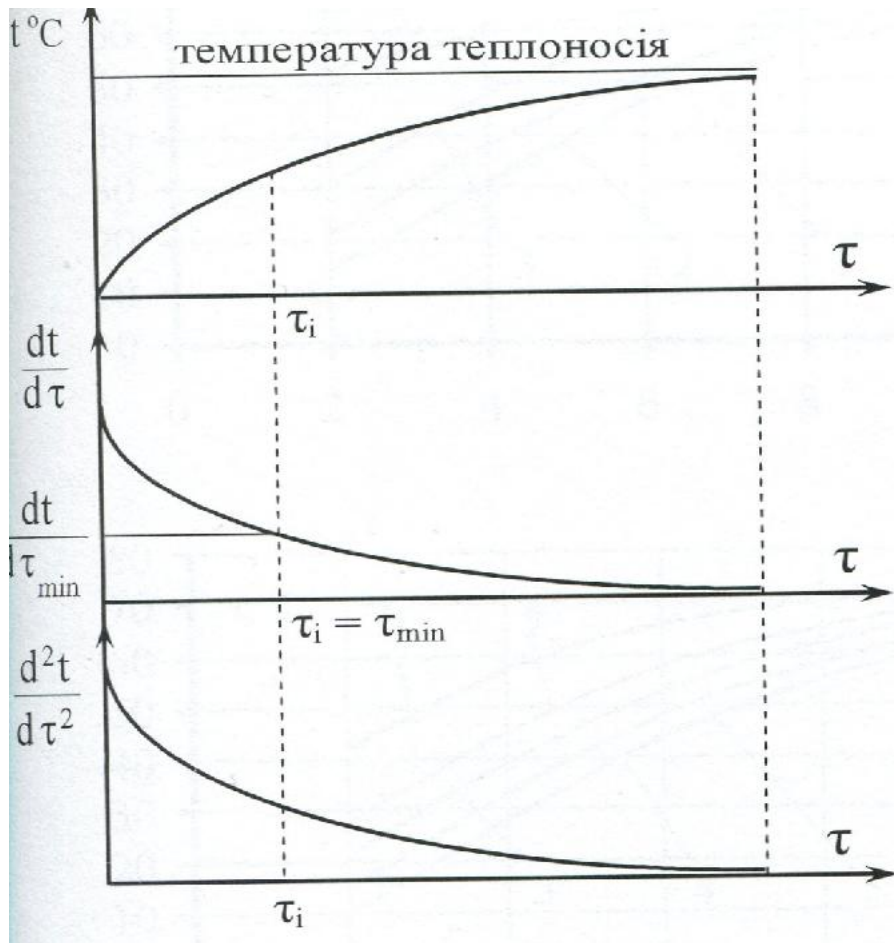


Рис. 13. Графіки зміни середньо-інтегральної температури і її похідних

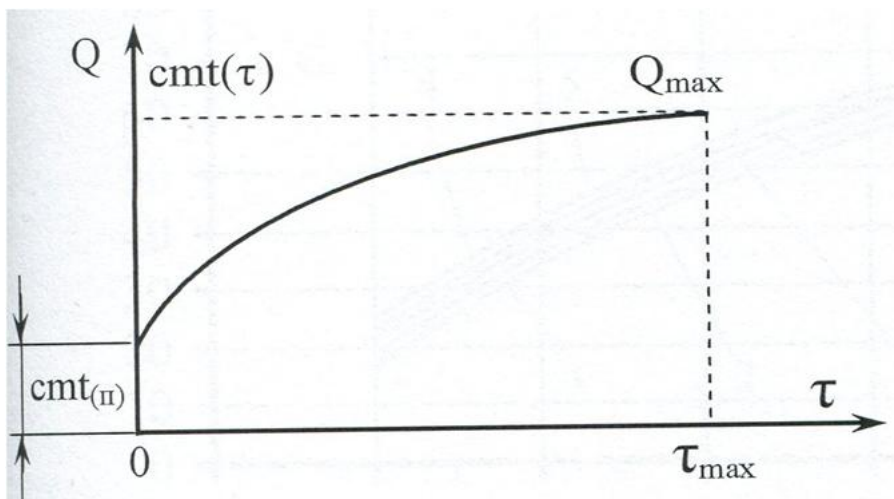


Рис. 14. Графік, що відображує зміну кількості сприйнятої теплової енергії у процесі нагрівання

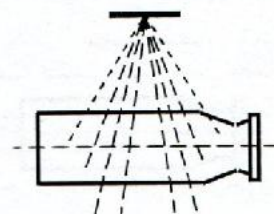
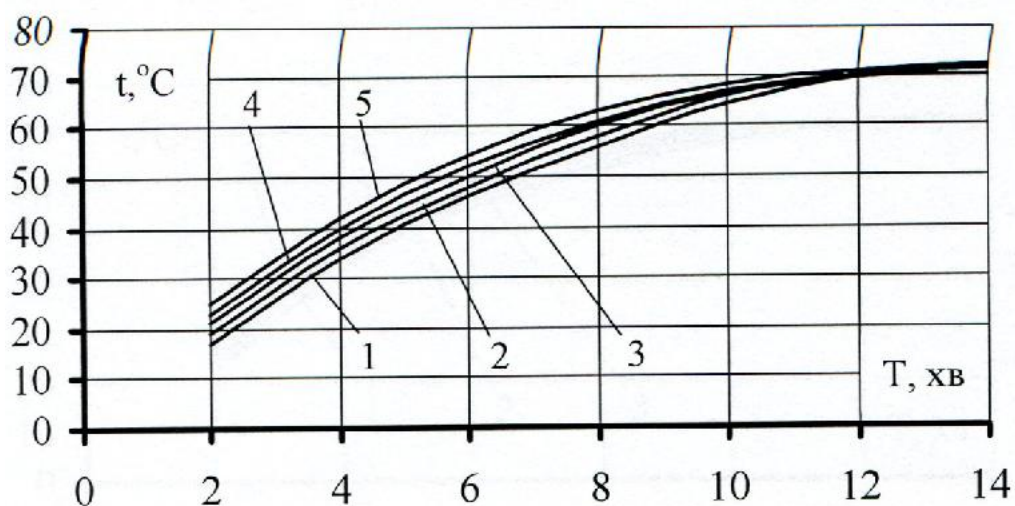
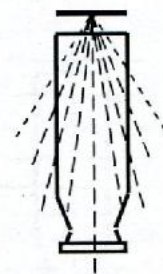
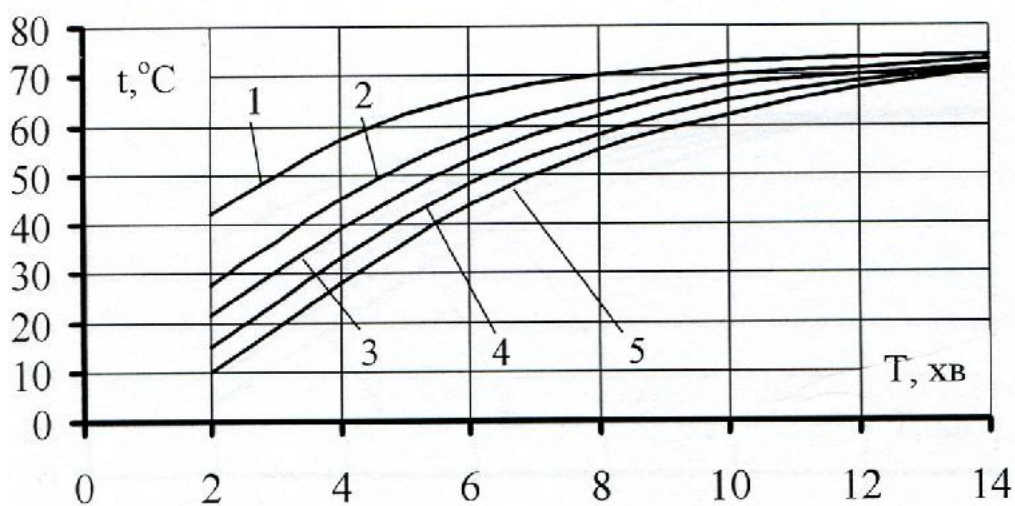
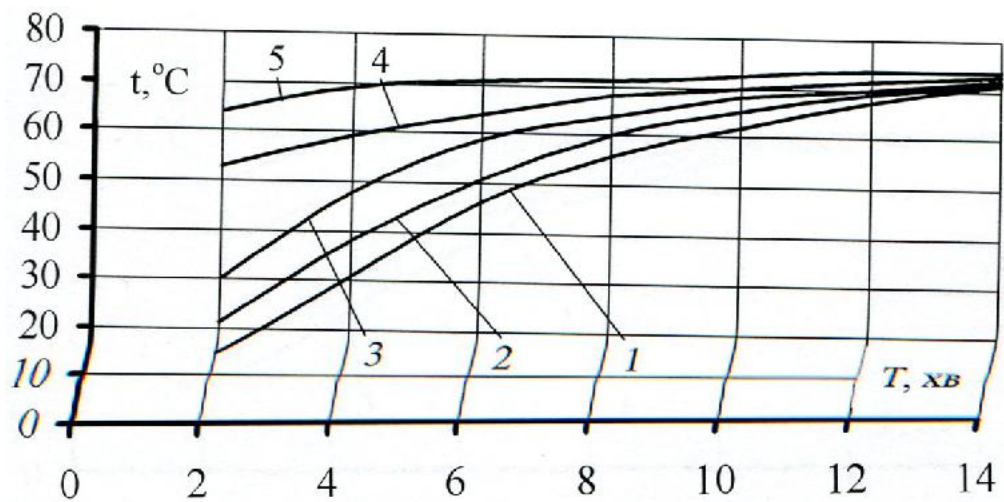


Рис. 15. Динаміка нагрівання продукту в пляшці (0,5л) в режимі зрошування з різною орієнтацією пляшки при температурі теплоносія $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{(п)} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; 1, 2, 3, 4, 5 - криві, що відповідають точкам виміру на термозонді

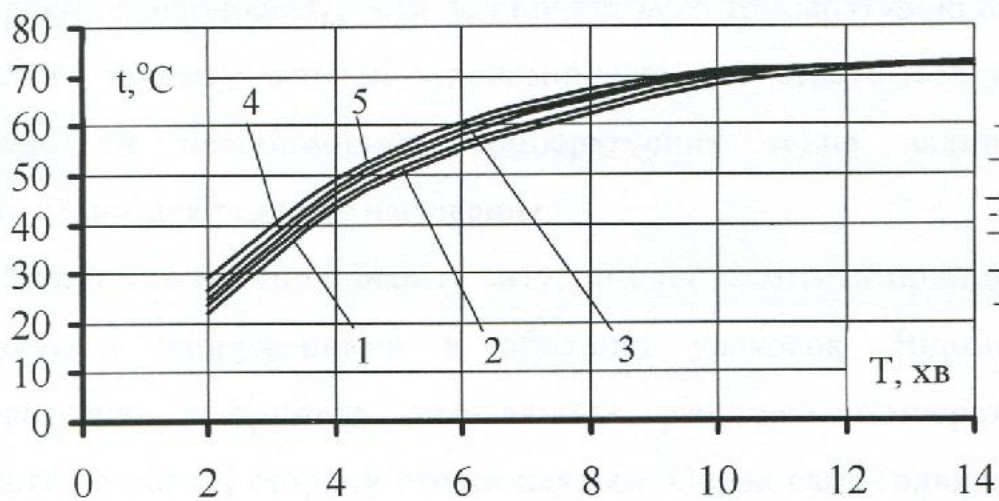
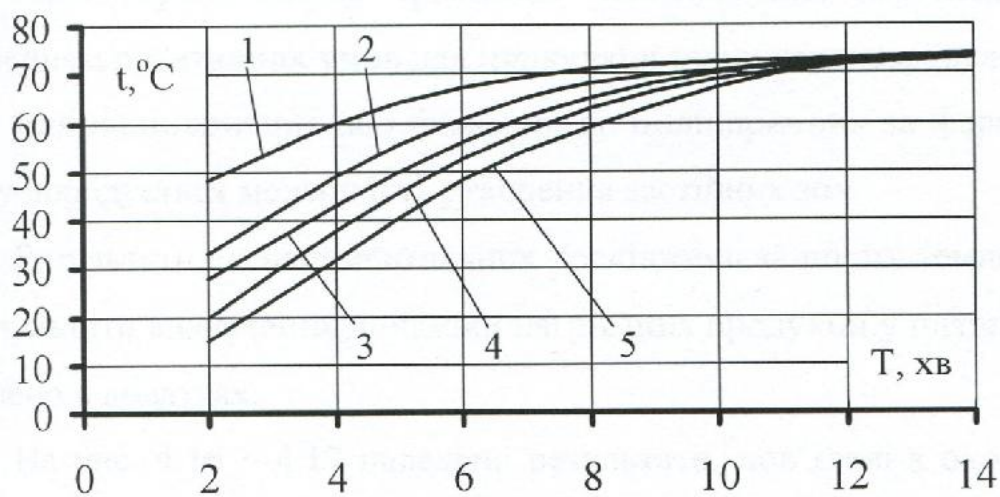
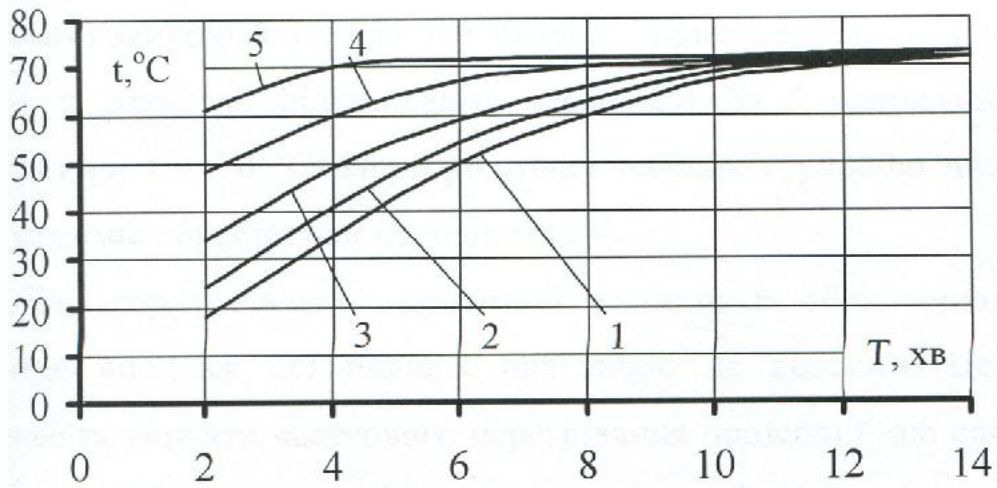


Рис.16. Динаміка нагрівання продукту в пляшці (0,5л) в режимі занурювання з різною орієнтацією пляшки при температурі теплоносія $75\text{ }^\circ\text{C}$ і $t_{(п)} = 1\text{ }^\circ\text{C}$; 1, 2, 3, 4, 5 - криві, що відповідають точкам вимірів на термозонді

і в режимі занурювання для вертикальної орієнтації пляшок горловою частиною догори в зоні, що відповідають термопарі № 5 одержуємо на 4-й хвилині температури $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$. Переорієнтація пляшок горловою частиною донизу для обох режимів обробки цей недолік знімає.

Для горизонтальної орієнтації пляшок в обох випадках температурні перепади вдовж осі пляшок практично не відчутні. Це означає важливу можливість уникати часткового перегрівання продукції, що слід використовувати особливо за обробки габаритних паковань.

Саме горизонтальна орієнтація паковань має перспективи у зв'язку зі створенням позитивних умов для циркуляції продукту у вертикальній площині.

Для циліндричних або близьких до циліндричних за формою паковань при цьому ліквідується можливість утворення застійних зон.

Результати експериментальних досліджень за інших температур теплоносія, та результати визначення динаміки нагрівання продукції у пляшках об'ємом 0,33 л наведено в додатках.

На рис. 17 - 18 наведено результати, пов'язані з охолодженням вмісту пляшок (0,5 л) в режимах зрошування і занурювання з різною орієнтацією їх при температурі теплоносія $t_{\text{т.н}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ і початковою температурою продукту $t_{\text{п}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$. Для цього процесу основні закономірності, що стосуються впливів орієнтації паковань та нерівномірних температурних полів залишаються подібно встановленим для режимів нагрівання.

Проте з точки зору аналізу ситуації слід відмітити принципову відмінність, пов'язану з напруженнями в оболонці упаковок. Відомо, що величина температурних напружень визначається різницею температур теплоносія і продукту по обидві сторони стінки пляшки. Однак саме підвищення температури продукту в упаковці визначає зростання тиску в ній. Тому найбільшій температурі герметично закритої упаковки відповідає найбільший внутрішній тиск. У зв'язку з

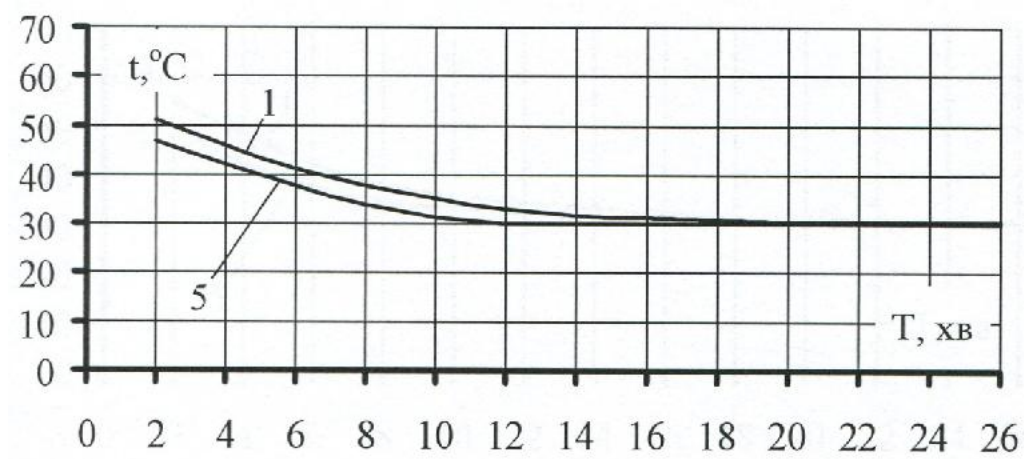
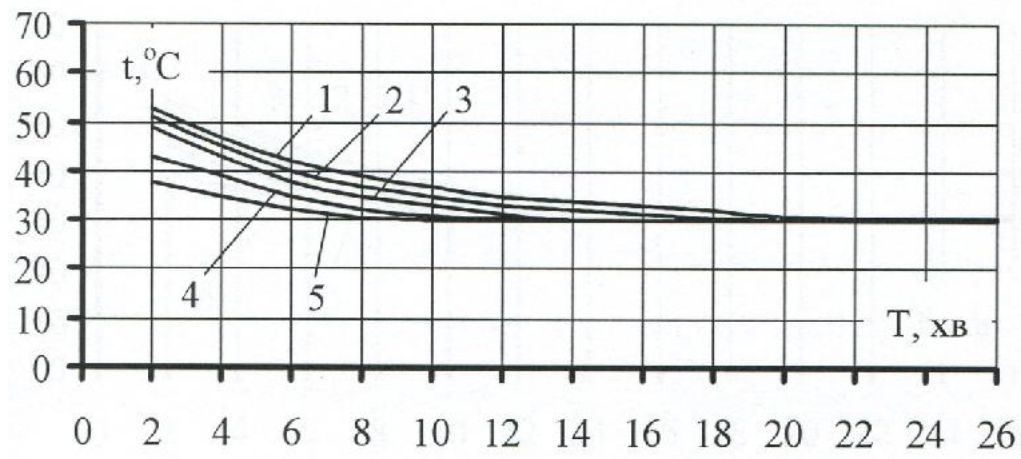
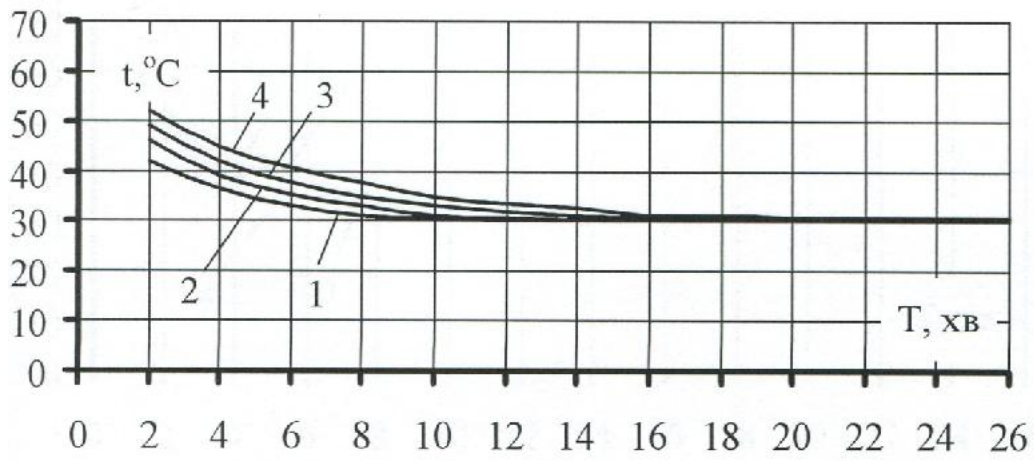


Рис. 17. Динаміка охолодження продукту в пляшці (0,5л) в режимі зрошування з різною орієнтацією пляшки при температурі теплоносія 30 °С і $t_{(II)} = 55$ °С: 1, 2, 3, 4, 5 - криві, що відповідають точкам вимірів на термозонді

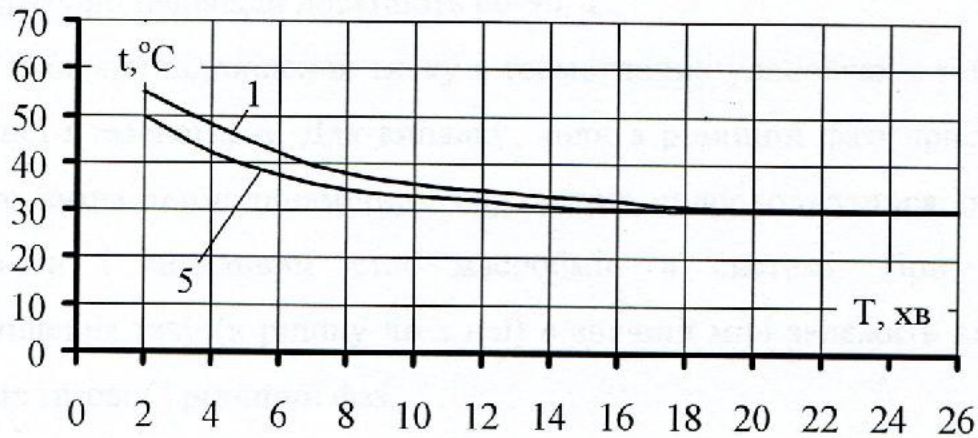
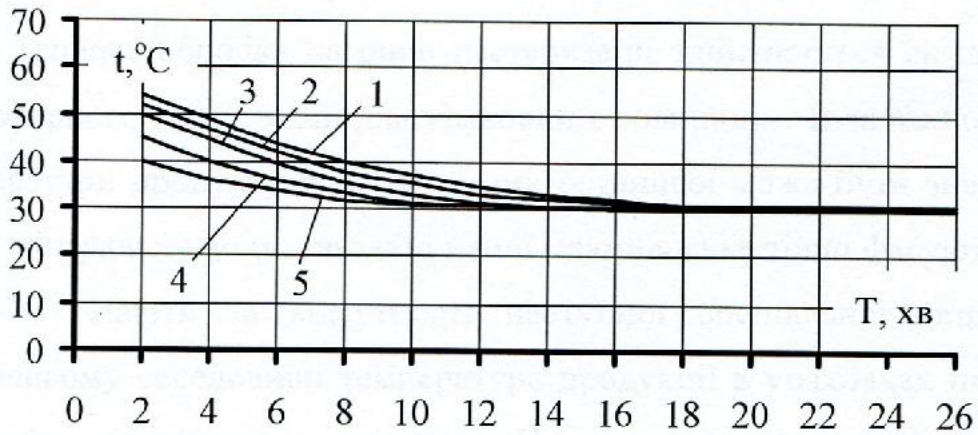
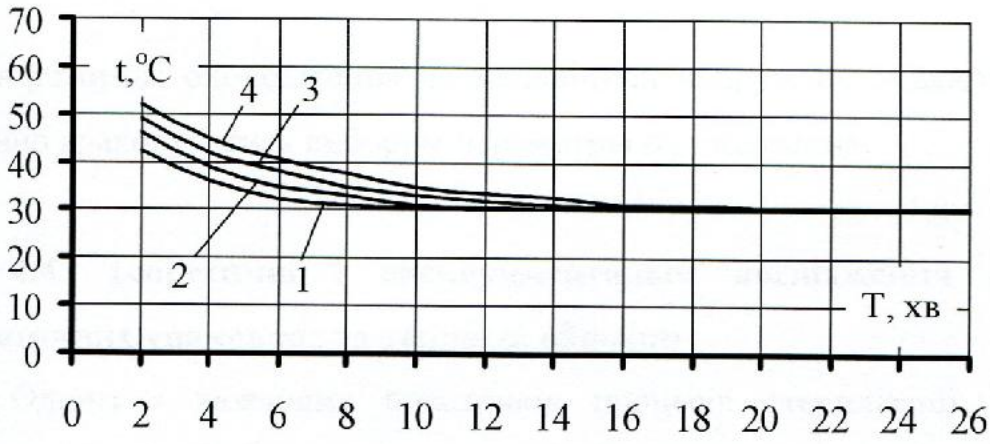


Рис. 18. Динаміка охолодження продукту в пляшці (0,5л) в режимі занурювання з різною орієнтацією пляшки при температурі теплоносія 30 °С і $t_{(н)} = 55$ °С: 1, 2, 3, 4, 5 - криві, що відповідають точкам вимірів на термозонді

цим в режимах охолодження до механічних напружень додаються термічні і це повинно враховуватися вибором параметрів охолодження.

Висновки

Магістерська робота присвячена вирішенню проблеми підвищення ефективності пакування рідких харчових продуктів фасувально-пакувальними машинами-автоматами та оптимальному вибору їх компоновальних рішень.

В результаті виконання магістерської роботи було проаналізовано закономірності теплової обробки фасованої продукції; проаналізовані матеріали і оболонки упаковки; розглянуті фізико-хімічні методи підготовки до фасування споживчої тари, матеріалів і продукції; розраховані енергетичні витрати в процесах фасування напоїв; проаналізована динаміка теплообміну в процесах теплової обробки; розглянута оцінка фізичних впливів на тару в процесах підготовки до фасування рідинної продукції.

Проведено експериментальні дослідження щодо визначення впливу розташування пляшок у просторі при здійсненні теплової обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Babu G., Seiresch Jachi P. C. UVB i induced reduced in biomass and overall
2. Belyaev I.Y., Sheheglov V.S., Alipob YD. Charge and field effects in biosystems /Pt III/ Eds Allen M.I. Et al. Boston. Birkhauser Publ., 1992.
3. Biological effects of exposure of static and time varing electromagnetic fields *md* radiation // Doc NRPB. - 1992. - 1(3).
4. Block S.S., Seng V.P., Goswami D.W. Chemically enhanced sunlight for gailing bacteria // Trans ASME. J. Sol. Energy Eng. - 1997. - V. 119, № 1. - p. 85-91
5. Brawn S.W., Oliver S.G. Isolation of ethanol - tolerant mytants of yeast by continuous selection // Eur. Journal of applied microbiology and biotechnology. - 1982. -V. 16. - № 2-3. P. 119-122.
6. Grad H. - In: Encyclopaedia of Physics (ed. S, Flügge), vol. XII - Berlin: Springer-Verlag, 1958. -205p.
7. Influence of lamp intensity and water tranimittance on the UV disinfection of water: Selec. Pap YAWQ 8th. Int. Symp. Health-relfft. Water M icrobiol., Mallogca, G-10 Oct., 1996 // Water Sci. and Technol 1997, V, 35, Mil 1-12,-P. 113-118.
8. Ismail A.A., AH A.M.M. Selection of high ethanol-yielding Saccharomyces. Ethanol tolerance and effect of training in saocharomyces cerevisial Hansen // Folia microbiology. - 1971. - V. 16. -№ 5. P, 346- 349.
9. Ismail A.A., AH A.M.M. Selection of high ethanol-yielding Saccharomyces. Genetic of ethanol tolerance // Folia microbiology, - 1971, V. 16. - № 5. P. 350 - 354.
10. Jimenez I., Benitez T. Selection of ethanol-tolerant yeast hibrids in ph-regulated continuous culture // Applied and environmental microbiology. - 1988. -V, 54, - №4, P. 917-922.
11. productivity of cyanobacteria // Biochem. And Biofis Res. Commun. 1 1998.1 V. 13.

12. Webe P. Become Saccharomycsf savvy // Zyimirgy. - 1994. - V. 17. ~ № 2. p 44-47.
13. Бахмач В.О., Дядечко О.В. Стабілізаційні системи для низькожирних
14. Бех 1,1. Основи фізичного вакууму та вакуумної техніки. Методи отримання високого і надвисокого вакууму: Навч. посібн. -К.: 2001. - 105 с.
15. Василів В.П., Герасименко Ю.І., Гулий І.С. та ін. Дослідження змін мікробіологічного забруднення соків цукрового виробництва при електроіскровому обробленні // Наукові праці УДУХТ. - К.: УДУХТ. - 2001. - № 10.-С. 151.
16. Васильєва Н.І., Романчук І.О. Дослідження властивостей деяких стабілізаторів для кисломолочних продуктів // Харчова промисловість. Додаток до журналу № 3. - К.: НУХТ. - 2004. - С. 63.
17. Годовиченко О.Т., Потемська О.І., Кіссь Н,Ф, Дослідження умов стабілізації біомаси заквашуваної культури для сиру кисломолочного // Харчова промисловість. Додаток до журналу № 3. - К: НУХТ. - 2004 С 66 67,
18. Гончаров Г.І., Я в Орський В.В. Вплив антиокислювальних властивосіей копильного препарату "SANSMOKE PB 2060-4,8" на стійкість жиру // Наукові праці УДУХТ. - К.: УДУХТ. - 2001. - № 10. - С. 61-63,
19. Гулий І.С., Кисла Л.В., Погорєлов В.В. та ін. Дослідження біоефектів при надвисокочастотному та ультрафіолетовому опроміненні дріжджових клітин //Наукові праці УДУХТ. - К.: УДУХТ. - 1998. - № 4, - С. 31-32,
20. Гулий І.С., Українець А.І., Дашковськи Ю.О. та ін. Електроіскрові технології в харчовій промисловості: перспективи застосування // Наукові праці НУХТ.- 2002. - № 13. - С. 34-39.
21. Гулий І.С., Українець А.І., Серпученко В.Г. та ін. Прогнозування процесу ультрафільтрації "солодкої" сирної сироватки крізь мембрани PSF-30-1,2 на основі полісульфону //Харчова промисловість. - К, НУХТ. - 2003. - № 2, - С. 47-52.

22. Гулий І.С., Шиян П.Л., Домарецький В.А. та ін. Вплив антисептиків на технологічні показники спиртових бражок у технології спирту із крохмалевмістної сировини // Наукові праці УДУХТ. - К.: УДУХТ. - 2001. - № 10, - С. 22-23.
23. Гуцалюк В.М., Гулий І.С., Усяк В.Г. Масообмін у примембранноу шарі мембрани PSF на основі полісульфаноу при ультрафільтрації сирної сиворотки // Харчова промисловість. - 1998. - Вил. 43—44. - С. 31-33.
24. Дашковський Ю.О., Олішевський В.В., Василів В.П. Вплив електрогідравлічного ефекту на життєздатність мікроорганізмів харчових продуктів // Наукові праці УДУХТ. - К.: УДУХТ. - 2001.-№ 10. - С. 153.
25. Жестерева Н.А., Зоткіна Л.В., Сергеев С.С. Вплив лазерного випромінювання на активність пивних дріжджів // Наукові праці УДУХТ. - К.: УДУХТ. -2001.- № 10.-С. 138-139.
26. Застосування електрогідравлічної обробки для одержання високостабільних тиксотропних дисперсних систем / М.М. Круглицький, П.П. Малюшевський, В.П. Третинник, Д.Н. Ляпіс // Вісник Академії наук УРСР. - 1984. -№1.-С. 64-71.
27. Корженевський СВ. Шляхи підвищення ефективності знезараження повітря УФ-випромінюванням функціональних приміщень: Автореф. дис... канд. мед. наук. / - К., 1996. - 24с.
28. Кривицький Є.В. Динаміка електровибуху в рідині. - К.: Наук, думка, 1986. - 208 с.
29. Кулінченко В.Р., Мотуз І.К., Онопрієнко О.О. Вплив поверхневих сил і тиску на гідростатичну рівновагу парової бульбашки. // Наукові праці УДУХТ. -К: УДУХТ, 2001. -№ 10. - С. 123-124.