

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**В.Г. Федоров, О.І. Кепко, Л.М. Сатир,
В.О. Виноградов-Салтиков, В.М. Кепко**

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ТА ТЕПЛОМАСООБМІН ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Підручник

**Біла Церква
Видавець «Сочінський М.М.»
2025**

УДК: 536.24:641.528
Т34

Автори: *Федоров Володимир Гаврилович*, д-р. техн. наук, проф.
Кепко Олег Ігорович, канд. техн. наук., доц.
Сатир Лариса Михайлівна, д-р. екон. наук., проф.
Виноградов-Салтиков Володимир Олександрович, канд. техн. наук, доц.
Кепко Валентина Миколаївна, канд. екон. наук., доц.

Рецензенти: *Голуб Г.А.*, професор, д-р техн. наук., професор кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту ім. Момотенка НУБіП України;
Белінська С.О., професор, д-р техн. наук., професор кафедри товарознавства і фармації Державного торговельно-економічного університету;
Шурчкова Ю.О., професор, д-р техн. наук., професор кафедри безпеності та якості харчових продуктів, сировини, і технологічних процесів БНАУ.

*Затверджено Вченою радою Білоцерківського національного аграрного університету
як підручник для здобувачів ступеня бакалавра
(протокол №5 від 30 червня 2025 року.)*

Теплопровідність та тепломасообмін при термічній обробці
Т34 харчових продуктів : підручник / В.Г. Федоров та ін. – Умань :
Видавець «Сочінський М.М.», 2025. – 180 с.

ISBN 978-966-304-577-1

Підручник висвітлює теоретичні основи процесів теплопровідності, конвективного і променистого теплообміну, а також нестационарного тепломасоперенесення, що супроводжують термічну обробку харчових продуктів. Розглянуто методи теплотиметричних досліджень, наведено приклади визначення теплофізичних характеристик м'ясних, молочних, хлібобулочних виробів та консервів. Видання містить аналітичні та експериментальні матеріали, необхідні для розрахунку теплових процесів харчових виробництв.

Рекомендовано для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальностями: Харчові технології, Торгівля, Електрична інженерія, а також для викладачів і фахівців харчової промисловості та спеціалістів з теплотиметрії. Видання також буде корисним фахівцям, що працюють в галузі промислової теплоенергетики та енегоаудиту.

УДК: 536.24:641.528

ISBN 978-966-304-577-1

© Федоров В.Г., 2025
© Кепко О.І., 2025
© Сатир Л.М., 2025
© Виноградов-Салтиков В.О., 2025
© Кепко В.М., 2025

ЗМІСТ

ЧАСТИНА 1. ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ТА ТЕПЛОМАСООБМІН.....	5
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. СТАЦІОНАРНА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ТА ДИФУЗІЯ	6
1.1. Аналогія процесів переносу теплоти, речовини та електрики	6
1.2. Основні закони теплопровідності та дифузії	8
1.3. Взаємний вплив рушійних сил молекулярного теплоперенесення	12
1.4. Умови однозначності	13
1.5. Теплопровідність та дифузія плоскої стінки. Теплопередача	15
1.6. Теплопередача крізь циліндричну стінку	18
РОЗДІЛ 2. КОНВЕКТИВНИЙ ТЕПЛОМАСООБМІН.....	22
2.1. Основні поняття теорії подібності	22
2.2. Тепловіддача під час вільної конвекції.....	26
2.3. Тепловіддача при вимушеній конвекції	29
2.4. Тепломасообмін під час кипіння	33
2.5. Тепломасообмін під час плівкової конденсації пари на твердій стінці.....	38
РОЗДІЛ 3. ПРОМЕНИСТИЙ ТА СКЛАДНИЙ ТЕПЛООБМІН	41
3.1. Основні поняття та закони теплового випромінювання	41
3.2. Променистий теплообмін між тілами в діатермічному середовищі....	43
3.3. Складний теплообмін	46
РОЗДІЛ 4. ОСНОВИ ОБЧИСЛЕННЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ	48
4.1. Класифікація теплових процесів та апаратів	48
4.2. Основні типи розрахунків та розрахункові рівняння.....	49
4.3. Визначення температурного напору та коефіцієнту теплопередачі....	52
4.4. Обчислення продуктивності апарату та кінцевих температур теплоносіїв	55
РОЗДІЛ 5. НЕСТАЦІОНАРНЕ ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛОТИ ТА МАСИ	58
5.1. Роль неусталених режимів перенесення у термічній технології	58
5.2. Застосування методів теорії подібності до процесів нагрівання чи охолодження	60
5.3. Тепловий розрахунок процесів заморожування	64
ЧАСТИНА 2. ТЕПЛОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ	67
РОЗДІЛ 6. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОМЕТРІЇ ПРИ ТЕПЛОВІЙ ОБРОБЦІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ.....	67
6.1. Тепломіри.....	67
6.2. Прилади для дослідження ТФХ лабільних продуктів та матеріалів ...	71
6.3. Пристрої для визначення випарної здатності	73
6.4. Складові тепломасообміну під час термічної обробки харчових продуктів	75
РОЗДІЛ 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК М'ЯСА ТА М'ЯСОПРОДУКТІВ	77

7.1. Визначення теплофізичних характеристик м'ясопродуктів	77
7.2. Інтенсивність термічної обробки м'ясопродуктів різними способами	81
7.3. Вплив технологічних факторів на випарну здатність м'яса	86
7.4. Варка шинки в формах	87
7.5. Дослідження теплотехнологічних характеристик виробництва нових м'ясних паштетів	89
7.6. Удосконалення камер варіння ковбас	91
7.7. Охолодження напівтуші	94
7.8. Кінетика заморожування рибопродуктів в блоках	95
7.9. Тепловідвід при заморожуванні у повітрі	104
7.10. Кріогенне заморожування	108
7.11. Розморожування блоків	112
7.12. Вакуум-сублімаційна сушка	118
РОЗДІЛ 8. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ.....	
8.1. Продукти молочного виробництва.....	121
8.2. Формалізація залежності теплофізичних характеристик знежиреного молока від температури і концентрації СЗМЗ	124
8.3. Формалізація теплофізичних характеристик згущеного молока з цукром	129
8.4. Визначення теплофізичних характеристик згущеного незбираного молока з цукром	130
8.5. Встановлення зв'язку технологічних і теплофізичних характеристик молочних продуктів з метою їх експрес-експертизи.....	134
8.6. Тепломасообмін при охолодженні молока з відкритої поверхні	138
8.7. Баластні теплові потоки при термічній обробці сиру	143
РОЗДІЛ 9. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ.....	
9.1. Продукти хлібопекарського та кондитерського виробництва	148
9.2. Дослідження технологічних і товарних показників східних сортів коржиків під час випікання в тандирі	150
9.3. Залежність товарних і теплофізичних показників кексів від матеріалу форм для їх випікання.....	154
9.4. Теплопоглинання тістовою заготовкою в процесі випікання в конвективних хлібопекарських печах.....	156
9.5. Вимір теплових потоків при остиганні хліба	159
9.6. Теплометрія обробки сипких матеріалів	163
9.7. Холодильна обробка хлібобулочних виробів	166
РОЗДІЛ 10. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ ПІДЧАС СТЕРИЛІЗАЦІЇ КОНСЕРВІВ	
10.1. Інтенсифікація теплоперенесення під час стерилізації овочевих консервів	171
10.2. Інтенсифікація стерилізації фруктових консервів	174
Глосарій	176
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	178

ЧАСТИНА 1. ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ТА ТЕПЛОМАСООБМІН

ВСТУП

Термін «термічне оброблення харчових продуктів» широко використовується на переробних підприємствах та об'єднує теплову і холодильну обробку продуктів. Практично всі технологічні процеси при цьому супроводжуються перенесенням теплоти та маси (найчастіше це вода або водяна пара). Метою більшості цих процесів є масообмін: заморожування (перетворення води на лід), дефростація (зворотний процес), варіння (не будемо торкатися карагеніна, що замість звичайного зменшення вологи в продукті збільшує його масу), обжарювання, коптіння харчових продуктів, тощо. Але викликається цей тепломасообмін завжди підведенням теплоти до продукту або відведенням від нього. Процеси тепло- і масообміну відбуваються одночасно, підпорядковуються схожим законам, тому і розглядаються в цій книзі як сумісний тепломасообмін.

У першій частині книги приводяться теоретичні відомості про тепломасообмінні процеси які мають місце при термічній обробці харчових продуктів.

Друга частина книги складається з опису того чи іншого приладу, а також прикладу його застосування під час вимірювання відповідних характеристик харчових продуктів в якій приймали участь автори цієї книги.

Підручник підготовлений в межах вивчення дисциплін «Теплотехніка та теплоенергетичні установки», «Процеси і апарати харчових виробництв», «Товарознавство», «Експертиза харчових продуктів», «Теплотехнічні вимірювання в енергетиці та енергоаудиті» для здобувачів вищої освіти, викладачів технічних, технологічних та економічних спеціальностей вищих навчальних закладів за спеціальностями G13 – Харчові технології, D7 – Торгівля та G3 – Електрична інженерія.

РОЗДІЛ 1. СТАЦІОНАРНА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ТА ДИФУЗІЯ

1.1. Аналогія процесів переносу теплоти, речовини та електрики

З курсу фізики відомо, що перенос різних субстанцій відбувається за однаковими законами. Відміна при цьому виявляється лише у фізичному сенсі характерних для конкретних явищ параметрів чи характеристик, що об'єднуються однаковими рівняннями, їх розмірностей тощо. Такі явища звуться *аналогічними*, а зв'язок між ними *аналогією*.

Розглянемо найпростіші рівняння переносу електрики, теплоти та речовини, коли рушійні сили цих процесів та відповідні опори не змінюються з часом. Зазначимо, що такі процеси мають назву *усталених* чи *стаціонарних*. Якщо до кінців провідника першого роду прикласти різницю потенціалів ΔU , то незважаючи на електричний опір матеріалу R , з якого зроблений провідник, через нього потече струм силою I :

$$I = \frac{\Delta U}{R}. \quad (1.1)$$

Як бачимо, за стаціонарних умов, коли рушійна сила ΔU та опір R є сталими, величина I , тобто кількість електрики, що проходить через провідник за одиницю часу, не буде змінюватись внаслідок їх взаємодії.

Потенціалом перенесення теплоти є температура t , отже рушійною силою є різниця температур Δt , що має бути «прикладена» до різних місць твердого тіла. Переносу теплоти теж буде чинено опір R , який зветься *тепловим* або *термічним опором*, але стаціонарний режим надійде лише через певний, інколи досить довгий відтинок часу. Це пояснюється тим, що на відміну від електричних, теплові провідники мають істотну теплоємність, що має прояву у поступовому прогріванні прошарків тіла, внаслідок чого кількість теплоти, що надходить до тіла за одиницю часу та виходить з нього, є різною. В стаціонарному режимі маємо аналогію із законом Ома:

$$q = \frac{\Delta t}{R_t}. \quad (1.2)$$

У рівнянні (1.2) аналогом сили струму є **поверхнева густина теплового потоку** q , скорочено – **густина теплового потоку**. Це дуже важлива характеристика будь-якого теплового процесу або апарату. Для процесів разових, переривчастих, змінних середню густину теплового потоку можна визначити із тотожності

$$q = \frac{Q}{F\tau}, \quad (1.3)$$

де Q – кількість теплоти, що підводиться (або відводиться) до продукту через його поверхню F за час τ . Вимірюється Q в Дж або кДж. Для процесів усталених, що їх реалізують у апаратах безперервної дії визначальною тотожністю буде

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (1.4)$$

але цього разу Q – це так званий **тепловий потік**, або теплове навантаження апарату. Вимірюється ця величина у Вт або кВт. Величина F тут теплообмінна поверхня апарату. Як бачимо, миттєве значення q для таких апаратів має дорівнювати його середній величині, але фактично через різного роду збурення відхиляється від неї. Усунення цих збурень, або наслідків – головне завдання регулювання теплових процесів.

Щодо перенесення речовини під дією різниці концентрацій Δc як рушійної сили, то за аналогією запишемо

$$j = \frac{\Delta c}{R_D}, \quad (1.5)$$

де R_D – дифузійний опір; j – густина потоку маси.

Як і густина теплового потоку, ця величина для процесів разових та

усталених визначається з тотожностей

$$j = \frac{m}{F\tau}, \quad j = \frac{G}{F}. \quad (1.6)$$

В першому випадку m – це маса речовини в кг, що дифундує через масообмінну поверхню F за час τ , у другому G – це так звана **продуктивність** апарату чи процесу, кг/с. В обох випадках j вимірюється в кг/(м² с).

Визначимо, що аналогія між процесами перенесення різних субстанцій не обмежується наведеними прикладами. При транспортуванні газу чи конденсованої рідини по трубах за рушійну силу править різниця тиску, а знаменником у рівнянні переносу є **гідравлічний опір**. Це ж стосується **фільтрації** води в ґрунті або **інфільтрації** повітря крізь стінки будівель.

Явища аналогії можна використовувати як у аналітичних обґрунтуваннях, так і у практичних обчисленнях. Якщо, наприклад, теплота переходить через стінку, виконану з трьох шарів різного термічного опору, за аналогією із законом Ома (1.1) стає зрозумілим, що для обчислення q з рівняння (1.2) треба у знаменнику поставити суму трьох опорів.

1.2. Основні закони теплопровідності та дифузії

Сукупність миттєвих значень температури у всіх точках простору, що розглядається, має назву **температурне поле**. Оскільки температура належить до **скалярних величин**, поле температур теж є скалярним полем. Звичайна річ, для перенесення теплоти у якомусь тілі необхідно, щоб поле температур у ньому було нерівномірним. Для усталених режимів переносу зміна температур відбувається лише у просторі, для неусталених – іще з часом. Рівномірне поле відповідає **термічній рівновазі**. Якщо з'єднати точки тіла що мають однакову температуру, одержимо **ізотермічну поверхню**. Будь-яка точка може мати лише одну температуру, отже, ізотермічні поверхні не перетинаються, а

розташовуються цілком в середині тіла або виходять на його поверхню.

Перетинання ізотермічних поверхонь площиною дає на цій площині сім'ю ліній, що звуться *ізотермами*. Вони теж можуть перетинатися, але замикаються самі на себе чи теж виходять на край площини.

Найпростіший вигляд мають ізотермічні поверхні та ізотерми у так званій *плоскій стінці*.

Це предмет, два виміри якого набагато перебільшують третій, в напрямку якого відбувається перенесення субстанції (енергії або речовини). В ідеалі – це тонка пластина, обидві поверхні якої є ізотермічними. Оскільки теплота переноситься лише по товщині плоскої стінки, будь-яка площина, паралельна її зовнішнім поверхням, теж буде ізотермічною (рис. 1).

Напруженість поля у будь-якій точці характеризують *градієнтом поля*. Це вектор, що спрямований по нормалі до ізопотенціалі (ізотерми, ізоконцентрації тощо) в бік збільшення функції і маючи довжину, рівну похідній від функції в даній точці. Утворимо градієнт температури для плоскої стінки відповідно до Рис. 1.

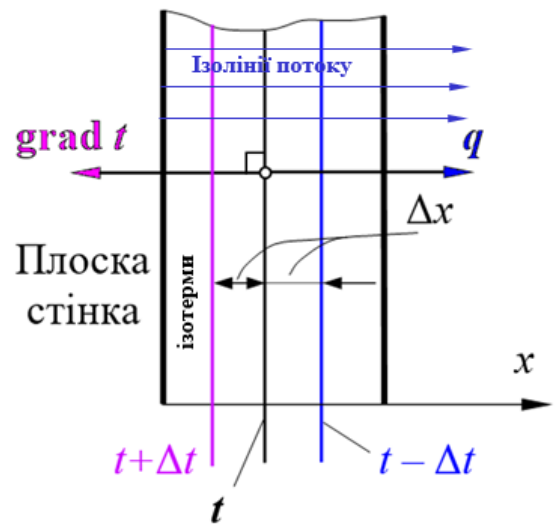


Рис. 1. До визначення температурного градієнта.

$$\text{grad}t = x_0 \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta x} = x_0 \frac{dt}{dx}. \quad (1.7)$$

В цьому рівнянні Δx – це відстань між двома ізотермами, температура яких відрізняється на Δt , x_0 – це одиничний вектор, що надає скалярній похідній dt/dx властивості вектора. Для температурного поля довільної форми його градієнт має форму

$$\text{grad}t = n_0 \frac{dt}{dn}. \quad (1.8)$$

де n – нормаль до ізотермічної поверхні в даній точці, – одиничний вектор

нормалі. Одиницями похідної та градієнта є К/м.

Лінії, дотичні до яких мають такий самий напрям, що й градієнт у відповідній точці тіла, звуть **лініями потоку**. Як і ізопотенціали, до яких вони є ортогональними, ці лінії не можуть перетинатися. Тому твердження, яке наведене в багатьох підручниках з тепломасообміну, що *теплота чи речовина можуть переноситися під будь-яким кутом до ізопотенціалу, не має фізичного обґрунтування*.

Для вертикальної плоскої стінки (рис. 1) **лінії теплового потоку** мають вигляд горизонтальних прямих.

Основним законом теплопровідності є твердження Фур'є, що густина теплового потоку пропорційна градієнту температури в тій самій точці

$$q = -\lambda \operatorname{grad} t. \quad (1.9)$$

За коефіцієнт пропорційності тут править λ – **теплопровідність** тіла в даній точці (стара назва – коефіцієнт теплопровідності).

Це – фізична або точніше теплофізична характеристика тіла, що показує його здатність пропускати через себе теплоту на молекулярному рівні під дією різниці температур. Для однорідних речовин λ – скалярна величина, тобто $\lambda \cdot \operatorname{grad} t$ – це вектор того ж напрямку, що й $\operatorname{grad} t$, тобто спрямований у бік збільшення температури.

Густина теплового потоку q – теж вектор, але має протилежний напрямок, через те доводиться ставити знак мінус. Зазначимо, що перехід до скалярних форм запису закону Фур'є не вимагає усунення цього знаку, бо похідна від температури вздовж лінії потоку від'ємна за визначенням, оскільки теплота завжди передається у бік зменшення температури. Але якщо ми хочемо з'ясувати одиниці теплопровідності з (1.9), обидва вектори треба брати по модулю

$$\lambda = \frac{|q|}{|\operatorname{grad} t|}, \quad \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}. \quad (1.10)$$

Теплопровідність λ одержують здебільшого дослідним шляхом. Це так звана інтенсивна характеристика, що не підлягає закономірності адитивності, тобто знаючи теплопровідність компонентів якоїсь суміші, не можна обчислити λ самої суміші. Приблизні значення λ різних матеріалів та продуктів можна одержати з таблиці, Вт/(м К):

Гази та пари, ізоляційні матеріали	0,001...0,05
Висушені м'ясні харчові продукти, порошки	0,05...0,8
Рідке паливо, органічні рідини	0,01...0,1
Вода, рідкі харчові продукти	0,3...0,6
Водний лід, заморожені продукти	1 – 2
Цегла, скло, бетон, ґрунт, граніт	0,5...3
Метали	10...400
Алмаз	1000...

Теплопровідність різних харчових продуктів та залежність $\lambda(t)$ можна знайти у довіднику [1].

Аналогом закону Фур'є що до дифузії є **закон Фіка**

$$j = -D \operatorname{grad} c. \quad (1.11)$$

де $\operatorname{grad} c$ – градієнт концентрації, кг/м⁴, D – коефіцієнт дифузії, м²/с.

Якщо λ – характеристика однієї речовини, то D – двох: тієї, що дифундує, й тієї, через яку відбувається дифузія. Наприклад, якщо молекулярний водень дифундує крізь повітря при 20°C, маємо $D = 6,1 \cdot 10^{-5}$, крізь газуватий СО – $D = 5 \cdot 10^{-5}$, крізь воду $D = 5 \cdot 10^{-9}$, тобто на чотири порядки менше. Для розчинів твердих та рідких речовин величини D ще на порядок нижчий. На цьому ж рівні іде дифузія різних металів крізь ртуть або води крізь шар продукту.

В останньому випадку, як і в інших технологічних процесах, кількість факторів, що впливають на D , дуже велика, і цей вплив ще докладно не з'ясований. На відміну від дифузії у рідині перенесення речовини крізь тверде тіло часто називають **масопровідністю**.

Закони Фур'є та Фіка придатні як при усталених, так і неусталених режимах перенесення субстанції. Але якщо у першому випадку їх вистачає щоб описати явища переносу, то у другому треба іще враховувати накопичення енергії або речовини в місці, що розглядається. Це призводить до ускладнення рівнянь. Тому рівняння (1.9) та (1.11) інколи звуть *першими законами* Фур'є та Фіка.

1.3. Взаємний вплив рушійних сил молекулярного теплоперенесення

Основні положення законів теплопровідності і дифузії були установлені Ж.Б. Фур'є та К.Л. Бертолле на початку 19 сторіччя, а до середини того ж сторіччя рівняння (1.9) та (1.11) вже мали дослідні підтвердження. Але на той час були зафіксовані й перехресні явища, наприклад перенесення речовини за рахунок **$\text{grad } t$** (термодифузія) або **$\text{grad } p$** (бародифузія).

Для живих клітин тварин та рослин, рідин та розчинів явища концентраційної (звичайної) та бародифузії часто зникаються, оскільки якщо розчин та розчинник розділені поруваютою перегородкою, розчинник проходить крізь неї під дією досить великого тиску, що має назву *осмотичний тиск*, а явище дифузії розчинника – *осмос*. Осмос відіграє величезну роль в органічній природі та харчових технологіях. Внутрішня оболонка живих рослинних та тваринних клітин пропускає воду, але затримує речовини, що в ній розчинені. Внаслідок цього в клітинах розвивається осмотичний тиск, що може перевищувати атмосферний тиск в кілька або кільканадцять разів. Під дією цього тиску клітини отримують *тургор*, тобто напружений стан оболонки, що дозволяє рослинам та тваринам чинити опір силам тяжіння та іншим зовнішнім силам. Наявність тургору істотна теж при зберіганні та переробленні м'ясних та інших харчових продуктів.

1.4. Умови однозначності

Перші закони Фур'є та Фіка є диференціальними рівняннями, тобто описують безліч подібних явищ. Щоб отримати однозначні рішення цих рівнянь, треба мати додаткову інформацію щодо конкретного явища. Ця інформація має назву **умов однозначності**. **Умови однозначності** складаються з **геометричних, фізичних та крайових умов**.

Геометричні умови задають форму та розміри тіла, у якому відбувається процес.

Фізичні умови – це інформація щодо фізичних параметрів – λ , густини ρ тощо.

Крайові умови – це сукупність часових та межових умов. **Часові** (найчастіше *початкові*) умови дають інформацію про розподіл актуальних потенціалів в якусь мить процесу. Звичайно, для усталених режимів часові умови не мають сенсу.

Межові умови стосуються взаємовідносин тіла з оточуючим середовищем чи іншими тілами. Вони можуть бути задані кількома засобами, що звуться родами.

Межові **умови першого роду**, або умови Діріхле дають розподіл потенціалу по поверхні тіла F , для теплопровідності та дифузії у загальному вигляді

$$t_F = f(x, y, z, \tau); \quad c_F = f(x, y, z, \tau). \quad (1.12)$$

Межові **умови другого роду** або умови Неймана визначають розподіл потоків q чи j по поверхні тіла:

$$q_F = f(x, y, z, \tau); \quad c_F = f(x, y, z, \tau). \quad (1.13)$$

Цим умовам для q_F відповідають технологічні процеси, що проводять за рахунок променистої енергії, якщо температура випромінювача значно більша ніж приймача енергії (променистий теплопідвід до кип'ятільних труб парових котлів, сонячне сушіння м'яса або плодовоовочів тощо). В останньому випадку q та j за рахунок випаровування води між собою однозначно зв'язані, тому можна

казати, що мають місце межові умови другого роду теж для дифузії води. Якщо підведення енергії йде за допомогою електронагрівника, то в усталеному режимі це теж відповідає межовим умовам другого роду.

Найбільш поширені межові умови *третього роду* або умови Фур'є задають величину потенціалу в оточуючому тіло середовищі та інтенсивність взаємодії між тілом та середовищем. Якщо ця взаємодія є конвекцією рідини відносно твердої стінки, маємо рівняння

$$q = \alpha (t_c - t_p); \quad j = \beta (c_c - c_p). \quad (1.14)$$

де α та β – коефіцієнти конвективного тепло- та масообміну або тепловіддачі та масовіддачі.

Індекси "c" та "p" відносять потенціали до поверхні стінки тіла та рідини за межами теплового чи дифузійного пристінних шарів рідини, в межах яких змінюється відповідний потенціал. Потенціали t_p і c_p найчастіше визначаються регламентом технологічного процесу, порівняно просто вимірюються та регулюються. Цього не можна сказати про коефіцієнти α і β , які можуть бути функціями великого числа характеристик рідини та параметрів процесу і серед них – власне рушійної сили чи густини потоку. Тому умови (1.14) є суто розрахунковим прийомом, що дає змогу користуватися простішими рівняннями (1.2) чи (1.3) у випадку конвективного тепло- та масообміну, тобто вважати величини $1/\alpha$ чи $1/\beta$ за відповідні опори R .

Межові умови *четвертого роду* або умови ідеального контакту базуються на припущенні, що сусідні тіла (тверді, рідкі або газоподібні) 1 та 2 мають спільні точки, які мають однакові значення потенціалів та потоків:

$$t_1 = t_2; \quad q_1 = q_2 \quad \text{або} \quad c_1 = c_2; \quad j_1 = j_2. \quad (1.15)$$

Перші рівняння в кожній парі (1.15) свідчать про безперервність полів температури чи концентрації, другі – про дію законів збереження на спільній поверхні двох тіл. Ці умови звичайно вживають при обчисленнях багат шарових

стінок, але вони набувають поширення в задачах конвективного тепломасообміну в зв'язку з тим, що в реальних технологіях взаємовплив процесів на молекулярному та на молярному рівні буває надто великий, і не можна задати межові умови третього роду. Це так звані *задачі спряження*.

1.5. Теплопровідність та дифузія плоскої стінки. Теплопередача

Для практичних розрахунків q та j треба (1.9) та (1.11) перетворити на розрахункові рівняння типу (1.2) чи (1.5). Розглянемо плоску стінку товщиною δ (рис. 2). Щоб перевести закон Фур'є в інтегральну форму, перейдемо до скалярів та відокремимо змінні:

$$dt = -\frac{q}{\lambda} dx. \quad (1.16)$$

Якщо прийняти, що режим теплопереносу є усталеним, а теплопровідність λ не залежить від t чи x , то q/λ можна винести з-під знаку інтегралу, тоді інтегрування (1.16.) дасть

$$t = -\frac{q}{\lambda} x + C \quad (1.17)$$

Скористуємось межовими умовами першого роду: нехай температури на поверхнях будуть t_1 та t_2 . Водночас можемо з'єднати відповідні точки прямою лінією, то й отримаємо температурне поле для цих умов, бо з (1.17) виникає лінійна залежність $t(x)$. Якщо $x = 0$, то $t_1 = C$; якщо $x = \delta$, то

$$t_2 = -\frac{q}{\lambda} \delta + t_1. \quad (1.18)$$

З цього виразу виходить розрахункове рівняння q , Вт/м²

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t = \frac{\Delta t}{\delta / \lambda} = \frac{\Delta t}{R_\lambda}, \quad (1.19)$$

Таким чином, термічний опір плоскої стінки дорівнює δ/λ і має одиниці – $(\text{м}^2 \text{ К})/\text{Вт}$.

Аналогічні викладки для першого закону Фіка показують, що дифузійний опір плоскої стінки δ/D і має одиниці $\text{с}/\text{м}$.

Якщо $\lambda = f(t)$, цю залежність треба враховувати при інтегруванні (1.16), і це приведе до криволінійного температурного поля. Зазначимо тільки, що із збільшенням λ з температурою маємо криву 2, що лежить вище прямої 1 (рис. 2), а зі зменшенням – нижче (крива 3).

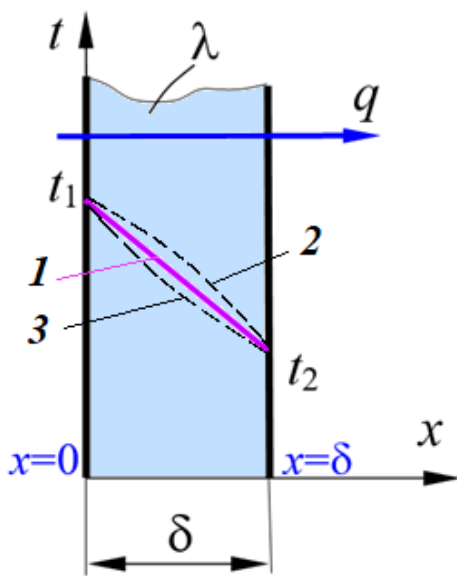


Рис. 2. Однорідна плоска стінка.

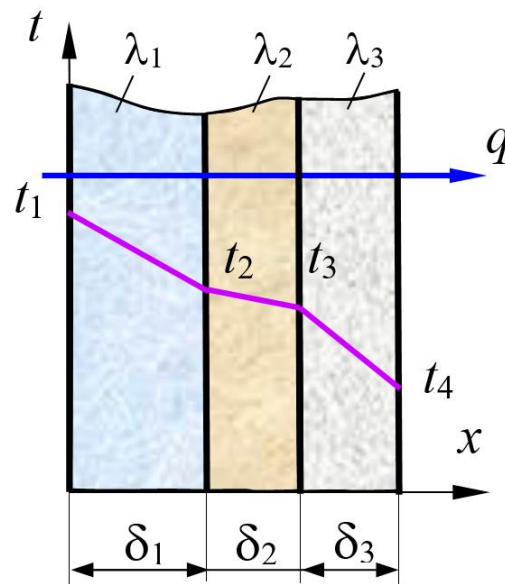


Рис. 3. Багатошарова плоска стінка.

Коли стінка складається з декількох (наприклад – трьох), різних однорідних шарів товщиною $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, (рис. 3), то для одержання розрахункового рівняння крім межових умов першого роду для зовнішніх поверхонь t_1 та t_4 , треба ще задати умови четвертого роду для спільних поверхонь тіл 1 та 2, 2 та 3. Тоді за аналогією із законом Ома для послідовно з'єднаних провідників маємо розрахункове рівняння

$$q = \frac{(t_1 - t_4)}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{\Delta t}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{\Delta t}{R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2} + R_{\lambda_3}} = \frac{\Delta t}{R_t}. \quad (1.20)$$

Температурне поле багат шарової плоскої стінки за умови $\lambda_i \neq f(t, x)$; $i = 1; 2; 3 \dots$ у перерізі має вигляд ламаної прямої. Нахил кожного відрізка тим більше, чим менша λ , це впливає з (1.20).

За заміни умов на зовнішніх поверхнях стінки на межові умови третього роду переходимо до теплопередачі, тобто до перенесення теплоти від гарячої рідини до холодної через стінку, що їх поділяє (рис. 4). Оскільки до термічних опорів δ/λ додається з кожного боку стінки по одному опору тепловіддачі $1/\alpha$, розрахункове рівняння ускладнюється:

$$q = \frac{(t_{p1} - t_{p2})}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (1.21)$$

Різниця температур $\Delta t = t_r - t_x$, що є рушійною силою при теплопередачі, має спеціальну назву **температурний напір**. Відповідні різниці температур, що у сумі складають температурний напір, зветься **частинними температурними перепадами**.

Формулу (1.21) звичайно записують у вигляді рівняння Пекле, аналогічного за формою рівнянню Ньютона (1.14):

$$q = k \Delta t. \quad (1.22)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м² К):

$$k = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (1.23)$$

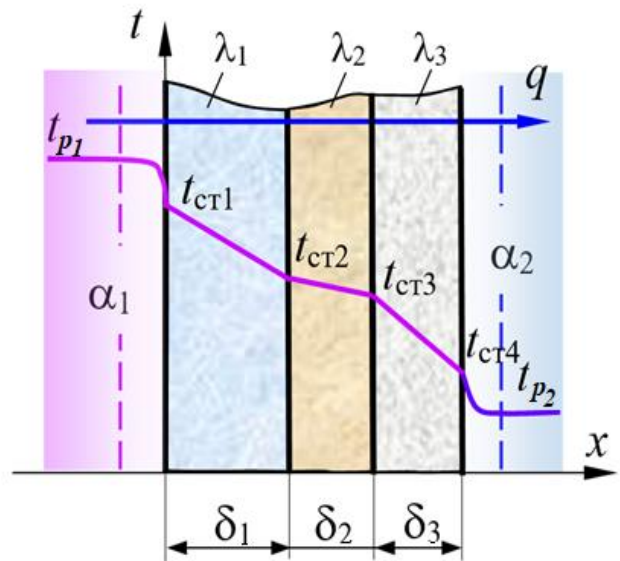


Рис. 4. Межові умови третього роду - теплопередача крізь багат шарову плоску стінку.

У практичних обчисленнях завжди коефіцієнт тепловіддачі від рідини до стінки позначається як α_1 , а від стінки до рідини – α_2 . Відповідно рідини (краплинні чи газуваті) звать *гарячою*, якщо від неї теплота переводиться до стінки, хоч би це був розчин солі, що охолоджується за допомогою труб, в яких проходить холодоагент, та *холодною*, навіть якщо це вода, яка кипить у трубах парового котла.

Щодо *масопередачі*, то цей термін часто вживають для неусталеного перенесення речовини з твердого тіла до рідини [2], хоч за аналогією з перенесенням теплоти цей процес краще було б назвати нестационарною масопровідністю. Перенесення речовини від однієї рідини до іншої крізь тверду або еластичну стінку, що їх роз'єднує – це дуже поширений процес у живій природі та у різних технологіях, тому слід закріпити за ним назву масопередача та обчислювати її інтенсивність за формулами, аналогічними рівняннями (1.21) – (1.22).

1.6. Теплопередача крізь циліндричну стінку.

Циліндрична стінка – це найбільш розповсюджена форма теплообмінних елементів у харчових технологіях. Проте якщо вона відносно тонка, то її можна вважати за плоску стінку і користуватися для обчислення формулою (1.21), Якщо ж товщина стінки перевищує внутрішній радіус труби, треба враховувати її кривину.

В умовах симетричного відведення або підведення теплоти крізь циліндричну стінку температура змінюється тільки в радіальному напрямку, а ізотерми – це коаксіальні циліндричні поверхні, тому можна записати

$$q = -\lambda \frac{dt}{dr}; \quad dt = -\frac{q}{\lambda} dr. \quad (1.24)$$

Інтегрування (1.24) ускладнюється, оскільки $q = f(r) = Q/2\pi rL$, де L – довжина труби. В усталеному режимі тепловий потік крізь стінку не змінюється, а його густина – зменшується від внутрішньої до зовнішньої поверхні. Тому розрахункове рівняння треба скласти для теплового потоку:

$$dt = \frac{Q}{2\pi rL\lambda} dr = -\frac{Q}{2\pi L\lambda} \cdot \frac{dr}{r}. \quad (1.25)$$

Якщо задати $Q = \text{const}$,
 $\lambda = \text{const}$, можна отримати
 невизначений інтеграл від (1.25):

$$t = -\frac{Q}{2\pi\lambda L} \ln r + C, \quad (1.26)$$

тобто температурне поле не є лінійним, із збільшенням r зменшується q , а разом з ним і dt/dr , температурна крива стає менш крутою (рис. 5). За межових умов першого роду $r = r_1, t = t_1, r = r_2, t = t_2$ одержуємо рівняння (1.26) для t_1 та t_2 , звідки

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= \frac{Q}{2\pi\lambda\ell} (\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{Q}{2\pi\lambda\ell} \ln \frac{r_2}{r_1}, \text{ та} \\ Q &= \frac{2\pi\lambda\ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot (t_1 - t_2) = \frac{\pi\ell}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot (t_1 - t_2) = \frac{\pi\ell(t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}. \end{aligned} \quad (1.27)$$

Щоб перейти до теплопередачі, запишемо вирази для Q , що передається від гарячої рідини до стінки та від стінки до холодної рідини

$$Q = \pi\alpha_1 d_1 L (t_1 - t_{\text{ст}1}) = \pi\alpha_2 d_2 L (t_{\text{ст}2} - t_2). \quad (1.28)$$

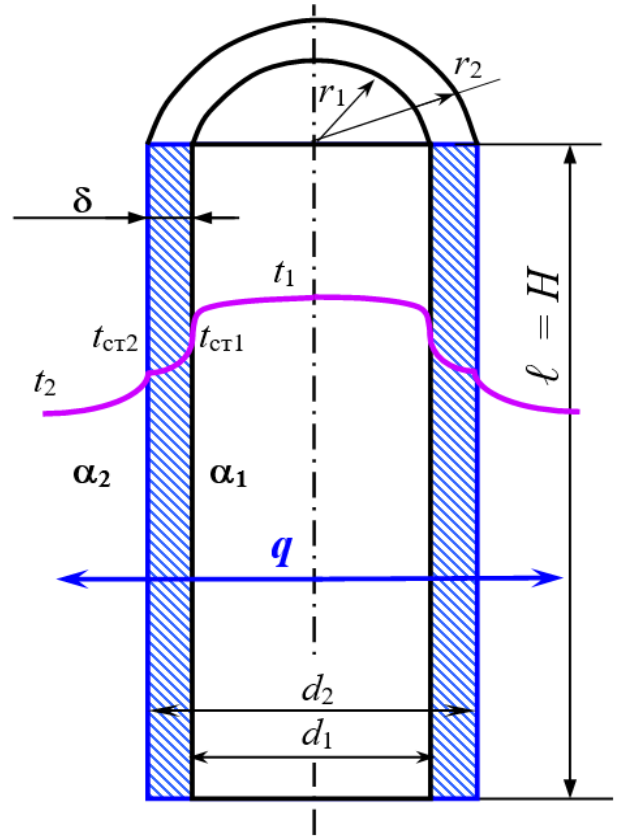


Рис. 5. Однорідна циліндрична стінка.

За аналогією з (1.21) запишемо розрахункове рівняння

$$Q = \frac{t_z - t_x}{\frac{1}{\pi d_1 L \alpha_1} + \frac{1}{2\pi \lambda L} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d L \alpha_2}}. \quad (1.29)$$

На практиці користуються так званою **лінійною густиною теплового потоку**, або тепловим потоком на погонний метр труби q_L , Вт/м

$$q_L = \frac{Q}{L} \quad (1.30)$$

Розрахункові формули для q_L мають вигляд

$$q_L = \frac{t_z - t_x}{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\pi \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2}} = \frac{\Delta t}{R_L} = k_L \Delta t, \quad (1.31)$$

де R_L , мК/Вт – лінійний опір;

k_L , Вт/(мК) – лінійний коефіцієнт теплопередачі.

Лінійний термічний опір багатошарової циліндричної стінки R_L , м·К/Вт

$$R_L = \frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{n+1}}{d_1} + \frac{1}{\pi d_{n+1} \alpha_2} = \frac{\Delta t}{q_L}, \quad (1.32)$$

де n – кількість шарів.

Для спрощення та уніфікації обчислень теплопередачі через циліндричні стінки вводять середнє значення q :

$$q = \frac{Q}{\pi d_x \ell} = \frac{t_z - t_x}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{\Delta t}{R}. \quad (1.33)$$

Значення d_x підбирають таким, щоб тепловий потік Q за формулами (1.33)

та (1.30) – (1.31) були як найближчими. Загальне правило таке:

1. $\alpha_1 \gg \alpha_2$; $d_x = d_{n+1}$;
2. $\alpha_1 \ll \alpha_2$; $d_x = d_1$;
3. $\alpha_1 \approx \alpha_2$; $d_x = 0,5(d_1 + d_{n+1})$.

Значення δ_i в рівнянні (1.33) обчислюють як напіврізницю відповідних діаметрів стінки.

Рівнянням (1.33) можна користуватися при обчисленні теплопередачі крізь кульову стінку, але при цьому

$$Q = q \sqrt{F_1 \cdot F_2},$$

де F_1 та F_2 – внутрішня та зовнішня поверхні кульової стінки.

РОЗДІЛ 2. КОНВЕКТИВНИЙ ТЕПЛОМАСООБМІН

2.1. Основні поняття теорії подібності

У розділі 1.4 визначено, що коефіцієнти конвективного тепло- та масообміну α і β є функціями великої кількості факторів. До них належать швидкість рідини w , її теплопровідність λ , теплоємність c , густина ρ , в'язкість ν , форма каналу, а інколи рушійна сила Δt або Δc , або результати їх дії – потоки q та j . Це спричиняє труднощі у визначенні коефіцієнтів, отже і відповідних опорів.

Визначити α або β вдається аналітичним шляхом, тобто розв'язанням системи рівнянь, що описують процес, але при цьому доводиться нехтувати впливом багатьох факторів, тому точність визначення α і β невисока.

Інший шлях – дослідний. Для визначення величини α треба виміряти різницю температур Δt між поверхнею стінки та рідини за межами її пристінного шару, а також густину теплового потоку q від стінки до рідини чи навпаки. Але якщо *термометрія*, що об'єднує засоби вимірювання температур, є досить розвиненою галуззю експериментальної фізики, то наука про вимірювання густини теплового потоку – *теплометрія* – відносно молода, хоча вона вже добре зарекомендувала себе у термічній технології [3]. Все ж більшість експериментів дають інформацію про усереднені в часі та просторі значення густини теплового потоку. Крім того, цим шляхом не можна дізнатися, які коефіцієнти α або β будуть в апаратах, що лише проектується.

Дати змогу поширювати результати, одержані на одному апараті чи навіть моделі, на інші апарати та зразки можна за допомогою методів *теорії подібності*.

Розглянемо найпростіший приклад застосування цих методів. Відомо, що для визначення висоти гори або дерева досить побудувати два подібних трикутника (рис. 6), в одному з яких шуканий розмір є катетом H . Перехід від малого трикутника, обидва катети якого легко виміряти та який можна назвати моделлю, до великого (зразок або апарат) відбувається за безрозмірним

відношенням катетів. Цей метод моделювання на основі геометричної подібності використовується в геодезії та географії під назвою триангуляція.

Крім *геометричної подібності*, існують різні форми *фізичної подібності*: гідродинамічна, часова, теплова, подібність полів потенціалів, умов однозначності тощо. Для кожного виду можна визначити безрозмірний комплекс характеристик, що не змінюється за величиною при переході від одного явища чи процесу до йому подібного.

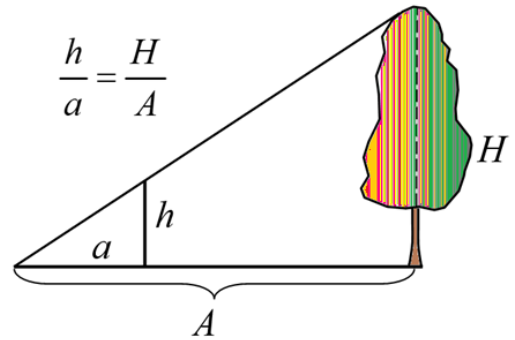


Рис. 6. Приклад геометричної подібності.

Ці комплекси називають *числами подібності* або не завжди правильно – *критеріями подібності*.

Комплекс $\alpha \cdot \ell / \lambda$, де ℓ – товщина пристінного шару рідини, є числом теплової подібності. Йому надано ім'я німецького дослідника **В. Нуссельта**. Звичайно числа подібності позначають першими літерами (латинськими) прізвища дослідника, отже:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \ell}{\lambda}. \quad (2.1)$$

Товщину пристінного шару важко виміряти, тому замість неї підбирають інший, відомий геометричний розмір, пропорційний цій товщині хоча би якоюсь мірою. Цей розмір має назву *визначального розміру* системи. Важливо, щоб в обох системах ця міра пропорційності була однаковою. Теплопровідність λ для рідин, що протікають у моделі та зразку, може залежати від температури, отже, треба брати λ при якійсь характерній температурі системи, яка зветься *визначальній температурі*. Звичайно, температура ця може бути різною для зразка та моделі, але правило її визначення повинно бути одним і тим самим.

1) Рівняння (2.1) відбиває **першу теорему подібності** (Ньютона): для подібних явищ однойменні числа подібності однакові.

Числа подібності часто ділять на визначальні та визначувані. До

визначальних чисел (їх інколи звуть власне критеріями подібності) належать комплекси, що характеризують ті сторони явища, які у дослідях є заздалегідь відомими, тобто становлять умови однозначності для задачі, що вирішується. **Визначуваними** є числа подібності, в які входять невідомі характеристики явища. Коли, наприклад, моделюванню підлягає конвективний теплообмін між повітрям та стінкою труби, через яку його качають, то до визначальних чисел відносять відомий з гідрогазодинаміки **критерій Рейнольдса**, $Re = \frac{wd}{\nu}$, бо швидкість повітря w та діаметр труби d задаються у дослідях, а кінематична в'язкість ν відшукується по таблиці за визначальною температурою. Визначуваним числом, як в усіх випадках дослідження конвективного теплообміну, тут буде число Нуссельта, оскільки воно містить шуканий коефіцієнт тепловіддачі.

2) **Друга теорема подібності** (Бекінгема – Федермана) гласить: рішення системи рівнянь, що описують різні сторони явища, можна зобразити у вигляді функції чисел подібності, що складені на підставі цих рівнянь.

Якщо продовжити наш приклад, коефіцієнт тепловіддачі α треба шукати з рівняння подібності

$$Nu = f(Re) \quad (2.2)$$

Вигляд цієї функції найчастіше беруть **степеневим** (інша назва – логарифмічна функція, оскільки маємо лінійний зв'язок між логарифмами аргументів та шуканої величини). *Такий зв'язок є найбільш ймовірним у різних галузях природи та техніки.* Так у гармонійному музикальному ладі існує лінійний зв'язок не між висотами основних тонів звуків однакової назви та різних октав, але між логарифмами цих висот. Іншим прикладом може бути так званий **ряд найкращих чисел**, що був узаконений, як обов'язковий ще у 1956 році (на даний час ДСТУ ISO 3:2006 / ISO 3:1973), але з яким не усіх студентів навіть знайомлять. На відміну від натурального ряду чисел він є логарифмічною шкалою, що дає однакову відносну похибку для будь-якого

члену ряду. Ряд має чотири градації: від $R5$, в якій відстань між 1 та 10 чи 10 та 100 і так далі поділена на п'ять інтервалів, до найбільш детальної $R40$. До чисел з тієї чи іншої градації треба округляти розміри та продуктивність апаратів, масштаби переходу від зразку до моделі тощо, а градацію вибирати відповідно до точності обчислень чи експериментів. Із самими рядами можна ознайомитись у посібнику [4].

3) *Третя теорема подібності* (Кірпічова – Гухмана) указує на ознаки подібності явищ "Явища подібні між собою, якщо їх описують однакові рівняння, а укладені з умов однозначності числа подібності є попарно рівними". Це є основою моделювання: якщо є певність, що умови однозначності для моделі та зразка подібні, можна вважати, що й явища в них цілком подібні. Наприклад, якщо Re (див. рівняння 2.2) в моделі і зразку мають одну величину, то й Nu теж однакові.

Таким чином, основні теореми подібності дають змогу відповісти на питання, що стоять перед експериментатором, а саме:

1. Які величини треба міряти у досліді? – Ті, що входять до чисел подібності, актуальних для процесу, що вивчаються (перша теорема);
2. Як обробляти результати досліді? – У вигляді залежності визначуваного числа від визначальних чисел подібності (друга теорема);
3. На які процеси можна переносити одержану, інформацію? – На ті, що описуються тими самими рівняннями та мають однакові значення визначальних чисел подібності (третя теорема).

До останнього треба додати, що це перенесення можна робити лише в тих межах змінення визначальних чисел, в яких було одержане рівняння подібності – екстраполяція може привести до істотних помилок у обчисленні шуканої величини.

2.2. Тепловіддача під час вільної конвекції

Тепловіддача під час вільної конвекції як різновид конвективного теплообміну зустрічається в усіх апаратах для використання теплової енергії у вигляді теплоти чи холоду, оскільки рух рідини утворюється сам собою всюди де є різниця температур між стінкою (продуктом) та рідиною.

Теоретичні дослідження довели, що значення α однозначно залежить від товщини пристінного шару δ . Цю величину різними засобами знаходили з рішення системи рівнянь руху рідини та теплообміну Е. Еккерт [5] та інші. Загальний результат цих обчислень можна зобразити у вигляді рівняння

$$Nu = C Gr^{1/4} f(Pr) \quad (2.3)$$

Тут **Gr** – *число Грасгофа*, що характеризує гідродинамічну подібність потоків рідини під дією різниці температур :

$$Gr = \frac{g \ell^3}{\nu^2} \beta \Delta t, \quad (2.4)$$

де ℓ – визначальний розмір, який для вертикальної стінки чи труби дорівнює її висоті; β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Число Прандтля є безрозмірним комплексом фізичних характеристик рідини

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu c_p \rho}{\lambda} = \frac{\nu}{a}, \quad (2.5)$$

де μ – динамічна в'язкість; c_p – теплоємність у ізобарному процесі; ρ – густина.

Розмірний комплекс $a = \lambda / (c_p \rho)$ м²/с має назву *температуропровідність*.

Отже **число Прандтля** характеризує співвідношення полів швидкості, бо в'язкість за відомим законом Ньютона визначає розподіл швидкостей у потоці та

температури – аналогічну роль тут відіграє температуропровідність. Число **Pr** не містить жодного незалежного параметру і є, як ν чи α , фізичною характеристикою рідини. Для ідеального газу залежності $\nu(t)$ та $\alpha(t)$ приблизно однакові, тому **Pr** мало залежить від t , через те $f(\text{Pr})$ у (2.3) для газів близька до одиниці. За розрахунками Екерта для повітря

$$\text{Nu} = 0,504 \text{Gr}^{1/4}, \quad (2.6)$$

якщо α у Nu – це середній коефіцієнт тепловіддачі по висоті стінки.

Для інших рідин найчастіше можна прийняти $f(\text{Pr}) = \text{Pr}^n$, отже при вільній конвекції числа Gr та Pr мають однаковий вплив на α , тому замість (2.6) можна розглянути залежність

$$\text{Nu} = C \left(\frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t \right)^n \cdot \left(\frac{\nu}{a} \right)^n = C \left(\frac{gl^3}{\nu a} \beta \Delta t \right)^n = C \text{Ra}^n \quad (2.7)$$

де **Ra** = GrPr – число Релея.

Фактичний рух рідини відносно стінки є ламінарним (тобто частинки рідини рухаються паралельно одне одному, не перемішуючись) лише до деякої висоти, по досягненні якої починають виникати поперечні течії чи хвилі, які згодом можуть стабілізуватись і утворити разом з основною течією догори вихровий режим. Місцеві (локальні) значення α по висоті спочатку спадають через зростання товщини пристінного шару із зростанням кількості рідини, що змінює температуру, потім збільшуються через появу поперечних потоків рідини, і врешті-решт стабілізуються (рис. 7).

Результати вимірювань середніх α багатьма експериментаторами на різних рідинах для вертикальних стінок чи труб, горизонтальних труб та куль узагальнені на рис. 8 у системі координат $\lg \text{Ra} - \lg \text{Nu}$. Визначальним розміром для горизонтальних труб та куль є їх діаметр. За визначальну температуру тут править середня температура пристінного шару, яку визначають за наближеною формулою

$$t = 1/2(t_c + t_p) \quad (2.8)$$

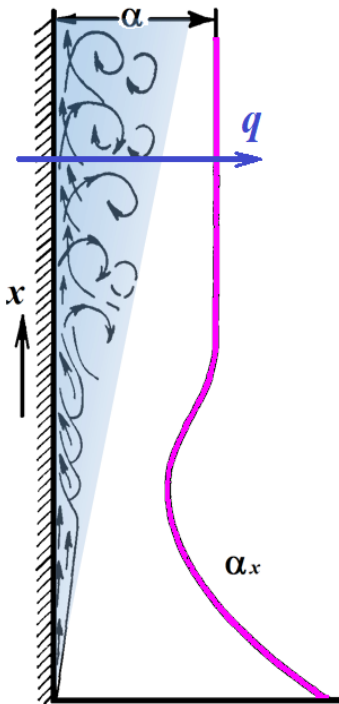


Рис. 7. Зміна коефіцієнта тепловіддачі на вертикальній поверхні за вільним рухом середовища.

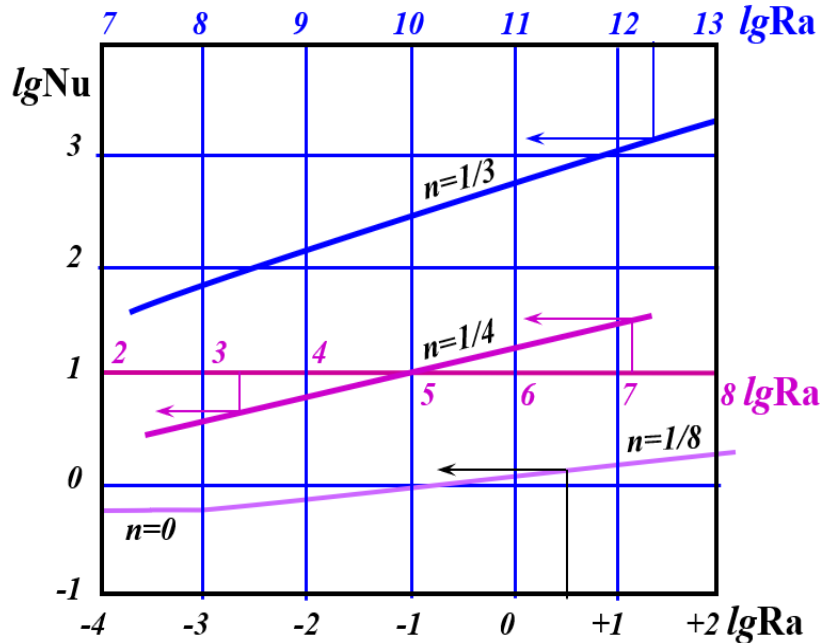


Рис. 8. Експериментальні залежності $\lg Nu / \lg Ra$ для різних поверхонь теплообміну під час вільної конвекції.

З рис. 8 видно, що при дуже малих $Ra < 10^{-3}$ маємо $Nu = \text{const} \approx 0.5$, тобто Δt не впливає на α . Це так званий плівковий режим, коли біля нагрітої дротинки з малими Δt та l утворюється нерухома плівка рідини. Для газів цей режим можна спостерігати при Ra до 10^0 (горизонтальна лінія). Теплота у плівці переноситься лише за рахунок теплопровідності.

Із збільшенням Ra виникає перехідний режим (між плівковим та ламінарним), коли $n = 1/8$, $C = 1,18$, для краплинних рідин тут $10^3 \geq Ra$, для газів може бути до 10^4 . Режим, для якого згідно з теорією $n = 1/4$, має місце для $2 \cdot 10^7 > Ra > 10^3$, середнє значення $C = 0,54$. Для більших Ra превалює вихровий режим, для якого $n = 1/3$, а $C = 0,135$.

Якщо $n = 1/4$, то для повітря маємо $Nu = 0,47 Gr^{1/4}$, тобто добрий збіг з теоретичним результатом.

Усе наведене вище стосується так званої *конвекції у великому об'ємі*, коли товщина пристінного шару значно менша від габаритів місткості чи

приміщення. Якщо пристінні шари рідини, що нагрівається та охолоджується, мають взаємний вплив, маємо справу з конвекцією в шпаринах. Найбільш поширеним засобом обчислення q у цих умовах є використання формул для стаціонарної теплопровідності (див. гл. 1), але замість λ ставити $\lambda_{\text{екв}} = \lambda \varepsilon_k$. Коефіцієнт конвекції ε_k залежить від Ra , при $Ra > 1700$ можна користуватися наближеною формулою.

$$\varepsilon_k = 0,18 Ra^{0,25}. \quad (2.9)$$

При обчисленні Ra в (2.9) для рівняння різницю температур Δt треба брати між гарячою та холодною поверхнями шпарини, визначальний розмір дорівнює її товщині, а визначальна температура – середня між цими поверхнями. При $Ra < 1700$ можна вважати, що конвекція у шпарині відсутня і відбувається тільки теплопровідність, тоді $\varepsilon_k = 1$.

2.3. Тепловіддача при вимушеній конвекції

Згідно з геометричними умовами взаємодії рідини та стінки цей вид теплообміну звичайно поділяють на три різновиди:

- 1) тепловіддача при течії рідини в каналах (внутрішня задача);
- 2) тепловіддача при обтіканні циліндрів, труб чи їх пучків (зовнішня задача);
- 3) тепловіддача при повздовжньому обтіканні плоскої пластини.

Для більшості технологій майже усі практичні обчислення можна звести до розв'язання перших двох задач. З курсу гідрогазодинаміки відомо, що при будь-якому початковому розподілі швидкостей по перерізу циліндричної труби, в якій тече рідина на деякій відстані динамічні пристінні шари зникають, а епюр швидкостей має вигляд правильної параболи при ламінарному режимі течії (рис. 9, а) та зрізаної параболи, якщо режим турбулентний тобто «прошарки» потоку перемішуються (рис. 9, б).

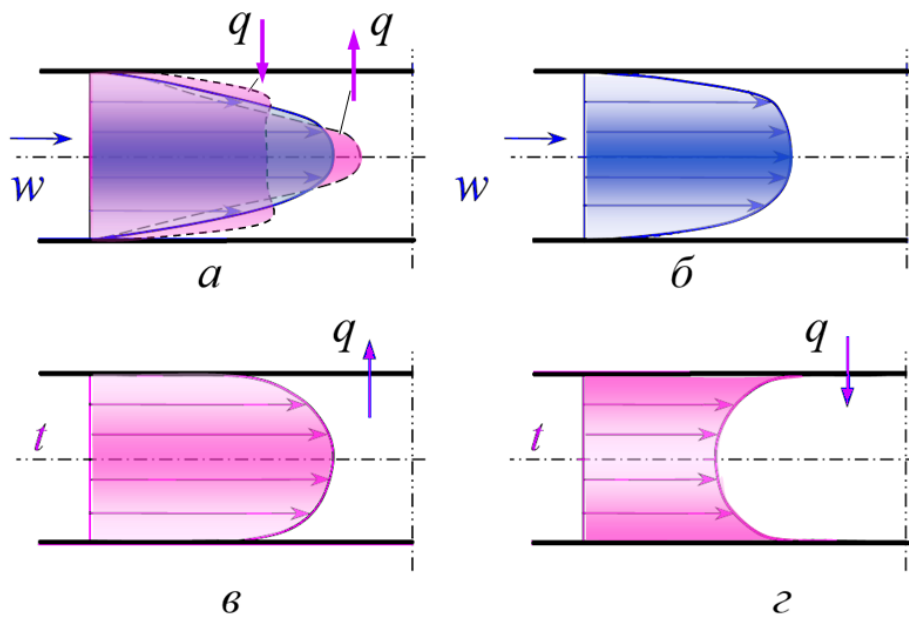


Рис. 9. Епюр швидкості та температури по перерізу труби в залежності від руху теплоносія та спрямування теплообміну

За $Re < 2300$ – режим руху ламінарний,

за $2300 < Re < 10^4$ – перехідний,

за $Re > 10^4$ – турбулентний.

Але такі епюри можуть бути лише при ізотермічній течії. Теплові пристінні шари теж зникаються, епюри температур при наявності теплообміну подібні до епюр швидкості (рис. 9, в – випадок $t_p > t_c$ та рис. 9, г, коли $t_p < t_c$). Але поля температур та швидкостей мають взаємний вплив: якщо маємо випадок рис. 9, а та в, рідина в центральній частині потоку стає легшою, її швидкість відносно збільшується, на периферії – важчою, швидкість зменшується. Здеформовані епюри швидкостей на рис. 9, а та б зображені штриховими лініями. Отже епюр швидкостей залежить від напрямку q (від стінки до рідини чи навпаки). Відзначимо, що до викривлення полів швидкостей призводить теж вільна конвекція у рідині під дією різниці температур, але цей вплив є істотним лише при ламінарному режимі течії, оскільки спричиняє поперечні потоки рідини.

Зрозуміло, що головним критерієм гідродинамічної подібності для цієї задачі є число Рейнольдса $Re = \frac{wd}{\nu}$, треба теж враховувати число Прандтля, рівняння подібності має загальний вигляд

$$Nu = C Re^n Pr^m \varepsilon_q \varepsilon_{вк} \varepsilon_R, \quad (2.10)$$

де ε_q – (рис. 9, а) поправка на напрям теплового потоку, $\varepsilon_q = (Pr_p/Pr_c)^{0,25}$.

Поправка на вільну конвекцію $\varepsilon_{вк}$ для перехідного та турбулентного режимів течії може бути прийнята за одиницю, для ламінарного – обчислена за формулою

$$\varepsilon_{вк} = Gr^{0,1}. \quad (2.11)$$

Якщо трубу скрутити у змійовик, на рідину починає діяти відцентрова сила. Додаткову турбулізацію при цьому враховує поправка на кривину труби

$$\varepsilon_R = 1 + 1,77 \frac{d}{R}, \quad (2.12)$$

де R – радіус змійовика чи повороту труби.

Величина m у різних дослідників лежить близько 0,4 (звичайно 0,42...0,43, рідко підіймається до 0,5...0,6), показник для ламінарного режиму $n = 0,33$, для турбулентного – 0,8. Для перехідного режиму можна користуватись формулою В.Д. Попова [3]

$$Nu = 0,08 Re^{0,9} Pr^{0,43}. \quad (2.13)$$

Таким чином, треба теплообмінники проектувати та експлуатувати так, щоб течія мала перехідний чи турбулентний режим – це підвищує вплив швидкості на теплообмін.

Для газів рівняння подібності спрощується, наприклад для турбулентної течії повітря у довгих прямих трубках

$$Nu = 0,18 Re^{0,8}. \quad (2.14)$$

Якщо переріз каналу не дуже відрізняється від круга (квадрат, прямокутник, трикутник, овал, кільце), визначальний розмір дорівнює еквівалентному діаметру $d = 4F/P$, де F – площа перерізу, P – периметр. Для

визначення Re швидкість w треба брати середню витратну: $w = V/F$, де V – секундна об'ємна витрата рідини. За визначальну температуру править середня температура рідини.

Не менш поширеним у теплотехніці є теплообмін в умовах зовнішньої задачі. Під час обтікання циліндра пристінний шар починає формуватися у лобовій точці A (рис. 10) – спочатку ламінарний, потім вихровий, а на якомусь куті шар відривається від стінки, tworячи застійну зону. Відповідно змінюється локальне значення α : спадає з ростом товщини шару, збільшується з початком завихрень і знов спадає в застійній зоні, а в циркуляційній зоні знову зростає. Це призводить до того, що турбулізація пристінного шару стає помітною при досить малих $Re = 5 \dots 10$ та поступово розвиваються, а ламінарний шар у лобовій зоні зберігаються за дуже великих значень Re .

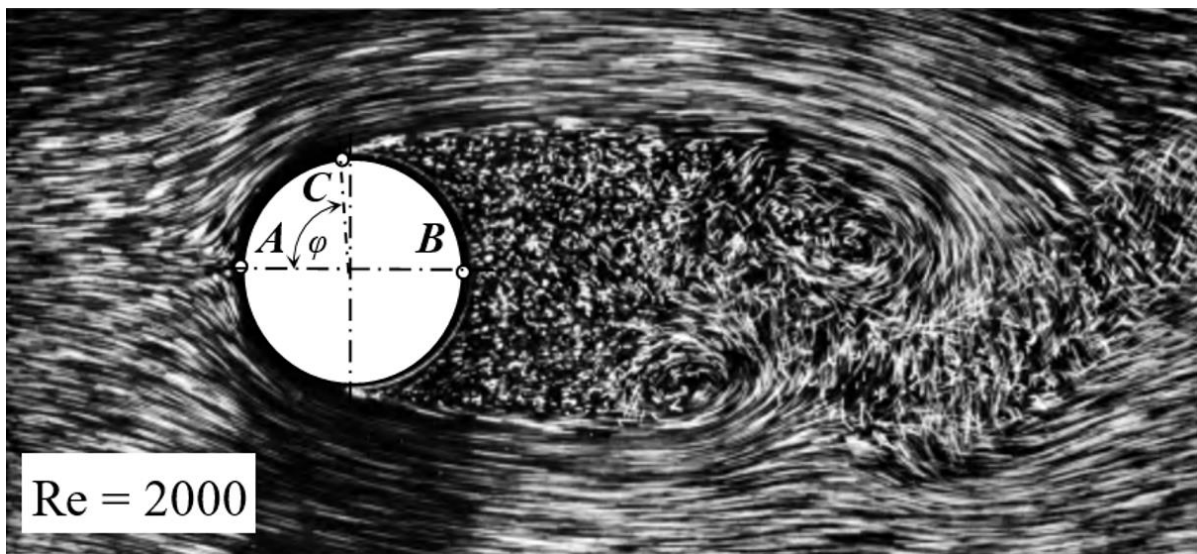


Рис. 10. Характер обтікання поодинокого циліндра потоком за $Re=2000$.

У теплообмінних апаратах труби збирають у пакети, які мають назву пучків, найбільш поширені коридорні та шахові пучки (рис. 11). Гідродинаміка та теплообмін першого ряду є такими самими, як для поодинокого циліндра, але на подальші ряди впливає турбулізація в попередніх рядах, і середній α зростає, але вже на третьому ряду відбувається стабілізація. Шаховий пучок має зсув парних рядів на півкроку, тому дає кращу турбулізацію, але незручний в тих апаратах, де треба спостерігати за станом поверхні труб та чистити їх. Рівняння

подібності для зовнішньої задачі має такий самий вигляд як і для внутрішньої задачі (2.10), але цього разу треба додати важливу поправку на «кут атаки» – ε_ψ , де ψ – кут, під яким рідина чи газ потрапляють на поверхню тіла. Вважається, що при $\psi = 10^\circ$ $\varepsilon_\psi = 0,50$; $\psi = 90^\circ$ $\varepsilon_\psi = 1,0$. Але як показали дослідження авторів статті [6] теплообміну під час заморожування напівтуш, ε_ψ при $\psi = 10^\circ$ значно менший 50%.

За визначальний розмір треба брати зовнішній діаметр труби, за визначальну температуру – середню температуру рідини. Для обчислення **Re** під час обтікання одиничного циліндра треба брати швидкість потоку, що набігає пучка труб – найвищу швидкість, яка відповідає найменшому перерізу каналу з урахуванням труб, що розташовуються у ньому.

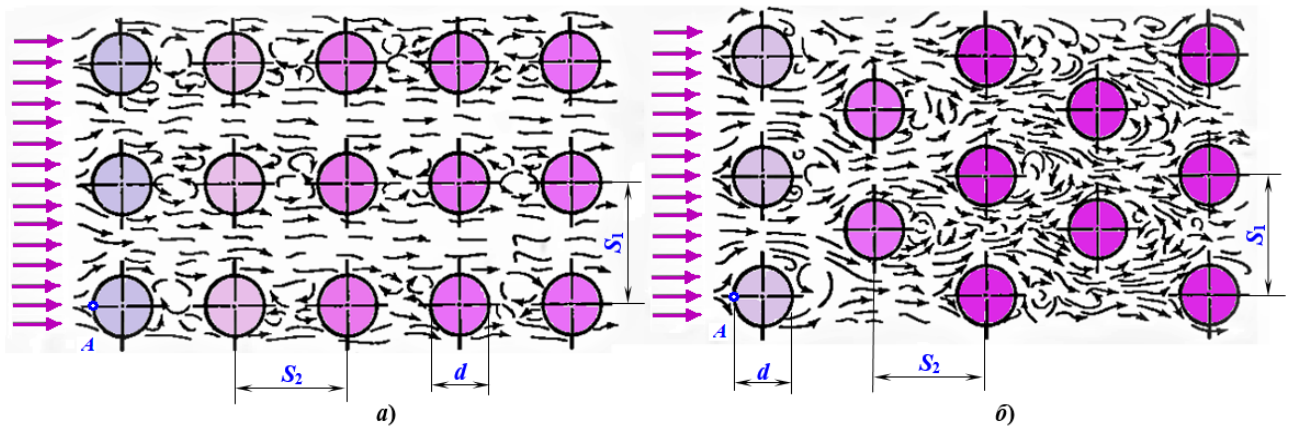


Рис. 11. Картинка омивання потоком рідини чи газу коридорного та шахового пучків труб.

2.4. Тепломасообмін під час кипіння

Сумісний конвективний тепломасообмін має місце, коли речовина у пристінному шарі зазнає фазових перетворень, тобто рідина кипить чи пара конденсується. Інші випадки фазових перетворень (топлення та твердіння, сублімація та десублімація) пов'язані зі зміною стану межі фаз і є неусталеними процесами. Вони набувають усе більшого значення у різних технологіях.

Відомо, що кипіння – це паротворення всередині рідкої фази. Для його ТФХ, треба, щоб температура рідини була більше від температури насичення за даного тиску, та щоб були умови для створення центрів паротворення – так звані

зародки.

Розглянемо фізичні явища, пов'язані з кипінням (рис. 12, а, б, в, г) однокомпонентної рідини, що змочує стінку, та побудуємо залежність $\alpha(\Delta t)$ на рис. 13, це $\Delta t = t_c - t_H$ тобто температуру рідини поза пристінним шаром будемо вважати рівною температурі насичення t_H . Зародками парової фази можуть бути різні шорсткості на поверхні стінки – западини чи опуклості, а також газові бульбашки, що утворюються біля стінки за рахунок зменшення розчинності газів у рідині при її нагріванні. Головне, щоб утворилась крива поверхня, над якою тиск менший, ніж у решті рідини. У просторі біля цієї кривини під дією різниці тиску починають збиратися молекули рідини, що мають найбільшу енергію – утворюється пара. Але подальша доля цих утворень залежить від радіусу кривини зародка: якщо він більший за R_{min} , такий зародок є життєздатним, парова бульбашка починає рости – це й є *центр паротворення*. У випадку $R < R_{min}$ зародок для цих умов є нежиттєздатним, зростання бульбашки не спостерігається. Величину R_{min} можна обчислити з рівняння Лапласа:

$$R_{min} = \frac{2\sigma}{\Delta p}, \quad (2.15)$$

де σ – поверхневий натяг; Δp – згадана різниця тиску.

Для води R_{min} має порядок 10^{-3} мм.

Бульбашка пари зростає досить швидко (рис. 12, а, нерозвинуте бульбашкове кипіння) і відривається від поверхні, коли підйомна сила, пропорційна кубу й діаметру d^3 перевищить сили поверхневого натягу та змочування, які є пропорційними величині d^2 . Відривний діаметр бульбашки d_v можна знайти за формулою.

$$d_v = C\Theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} \quad , \quad (2.16)$$

де Θ – кут змочування; ρ' та ρ'' – густина відповідно киплячої рідини та

пари

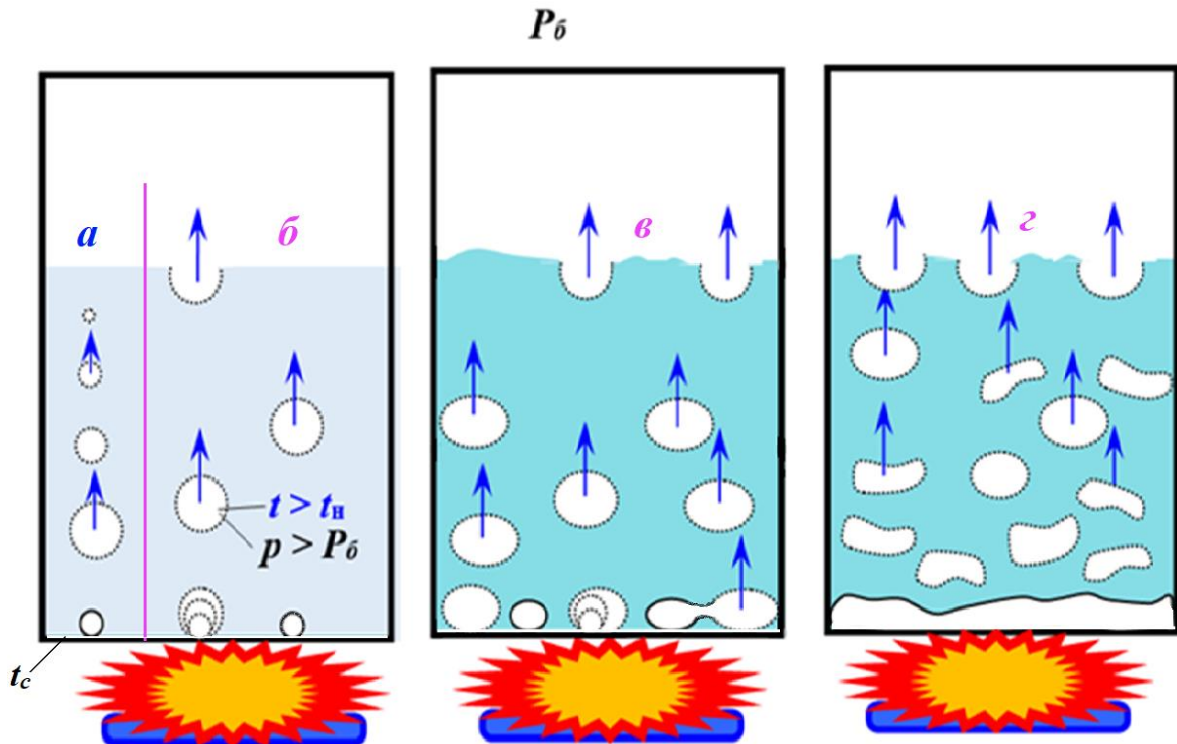


Рис. 12. Стадії розвитку режимів кипіння рідини.

Режим на рис. 12, б та рис. 13, зона II має назву **розвинене бульбашкове кипіння**, він є робочим режимом у більшості теплотехнічних апаратів.

Переважаюча більшість теплоти переходить до бульбашки від стінки через рідину, а не безпосередньо через так звану ніжку бульбашки. Подальше зростання Δt призводить до того, що окремі бульбашки починають зливатися одна з одною, збільшується поверхня стінки, що зтикається з паровою фазою. Оскільки інтенсивність відведення теплоти паром на кілька порядків менша, ніж рідиною, середнє значення α починає знижуватись: $\alpha \approx \Delta t^{-2}$. Це **перехідний режим кипіння** (рис. 12, в, г та рис. 13, III). Врешті-решт бульбашки утворюють суцільну парову плівку, величина α сягає мінімуму, починається **плівковий режим кипіння** (рис. 12, г та рис. 13, IV).

Складний механізм бульбашкового кипіння спричинив різні підходи до узагальнення дослідних даних. За визначальний розмір часто беруть мінімальний радіус зародка R_{min} або величини, що йому пропорційні. Більш фізично обґрунтованим є вибір відривного діаметра d_v , тому зупинимось на цьому

підході. За визначальну температуру править температура насичення.

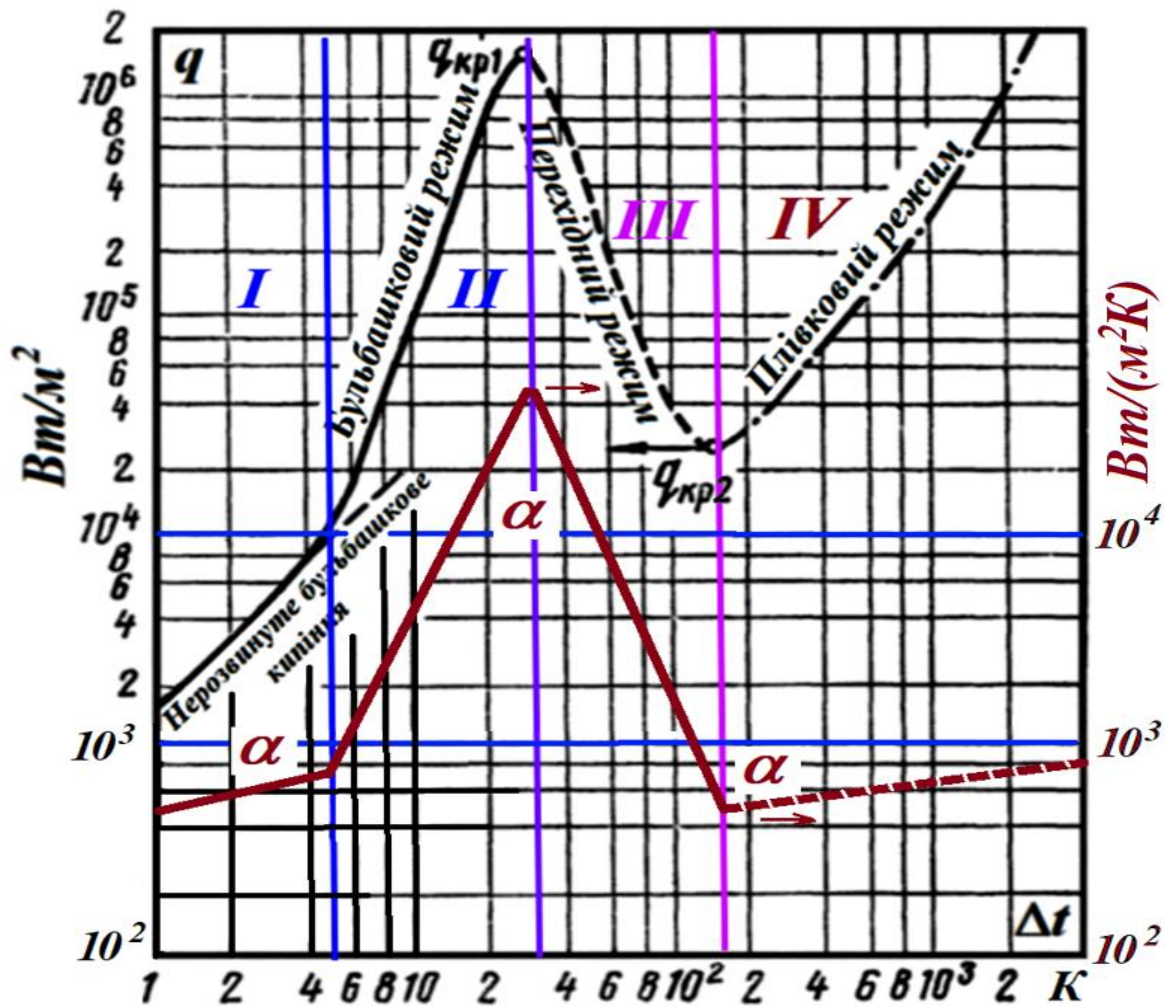


Рис. 13. Залежності q та α від Δt за кипіння води.

Числом гідродинамічної подібності часто беруть числа Рейнольдса $Re_k = \frac{w_k \delta}{\nu}$, де $w_k = \frac{q}{r \rho''}$ – комплекс, що має одиниці м/с і зветься **умовною швидкістю кипіння**, r – теплота пароутворення, ρ'' – густина пари, δ – капілярна стала.

На базі даних кипіння води та різних розчинів у вертикальних трубах випарників за умов кипіння по всій висоті труб М.А. Кичігін та Н.Ю. Тобілевич запропонували рівняння, яке можна застосовувати при кипінні у великому об'ємі:

$$Nu = 3,25 \cdot 10^{-4} Pe_k^{0,6} K_p^{0,7} Ga^{0,125}; \quad Pe_k = 50 \dots 50000, \quad (2.17)$$

де K_p – число подібності тиску; $K_p = p \delta / \sigma$ – число подібності тиску; p –

тиск.

Число K_p враховує вплив тиску на властивості рідини та механізм паротворення. **Число Галілея** $Ga = \frac{g\delta}{v^2}$ характеризує рух рідини тільки під дією сили тяжіння, тобто цього разу повернення рідини, що була ежектована бульбашками пари, до пристінного шару. Зазначимо, що у подальшому рівняння (2.17) було перевірено учнями Тобілевича, причому степінь при Ga поступово знижувався до 0,1 і навіть до 0,05 – можливо, впливом числа Ga можна нехтувати.

Наведене та багато інших рівнянь дають невелику точність обчислення α , інколи $\pm 30\%$. Тому часто при розрахунку кипіння конкретних рідин використовують простіші, хоч і менш універсальні **розрахункові рівняння типу**

$$\alpha = Aq^{0,7}p^{0,15}; \alpha = B\Delta t^{2,33}p^{0,5} \quad (2.18)$$

де A і B знаходять по таблицях чи номограмах для даних рідин та типів апаратів.

Зрозуміло, що масообмін при кипінні однозначно пов'язаний з теплообміном, оскільки мають місце рівняння

$$q = jr \quad \text{або} \quad q = j\Delta h, \quad (2.19)$$

де Δh – різниця ентальпій пари та води, з якої вона утворилась.

Коли кипіння проходить у трубах, то на різних ділянках може бути нагрівання рідини до температури насичення (економайзерна ділянка), кипіння, перегрів пари. Розрахунок довжини ділянок та тепловіддачі на кожній з них розглядається у курсах тепломасообмінних установок та обладнання.

Якщо рідина має вимушений режим течії в каналі з частковим википанням, рівняння подібності повинні містити так звану кратність циркуляції n , тобто частку рідкої фази на виході з каналу. Звичайно вважають вплив n на α позитивним, але досліді з холодильним обладнанням з участю авторів дали

протилежні результати на круглих трубах та прямокутних каналах. У діапазоні зміни n від 5 до 140 при вимушеному русі хладона R22 обробка експериментальних даних (рис. 14) дає можливість запропонувати просту формулу

$$Nu = 21,2 Re^{0,43} n^{-0,63}. \quad (2.20)$$

Зменшення α зі зростом n можна пояснити збільшенням довжини

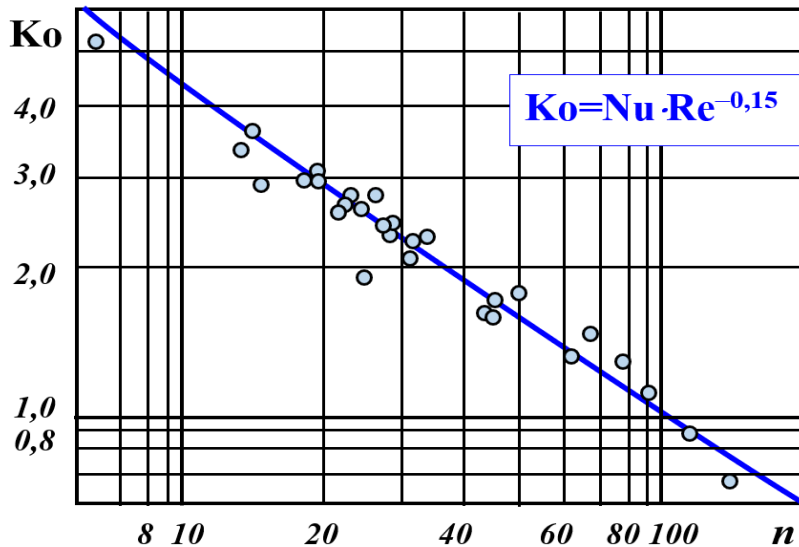


Рис. 14. Дослідні дані взаємозв'язку числа Ko та кратності циркуляції n при вимушеному русі хладона R22

економізуючої ділянки, а також можливим зриванням центрів паротворення з поверхні каналів.

На відміну від попередніх рівнянь в (2.21) за визначальний розмір править гідравлічний діаметр каналу, оскільки тут

переважає вимушений рух рідини.

2.5. Тепломасообмін під час плівкової конденсації пари на твердій стінці

Інші види конденсації, скажемо об'ємну конденсацію у повітрі (туман, хмари) ми не розглядатимемо, оскільки вони не є актуальними для технологічного обладнання. Те саме стосується так званої краплинної конденсації на твердій стінці, коли конденсат не повністю змочує поверхню нагрівання – хоча цей вид дає дуже великі значення α , але щоб його реалізувати, треба нанести на поверхню шар гідрофобної речовини, а це призведе до різкого зростання термічного опору.

Щоб у так званій *паровій сорочці* теплообмінного апарата (рис. 15) успішно відбувалася конденсація пари, треба, крім змочуваності поверхні теплообміну, задовольнити *три головні умови*.

По-перше, температура цієї поверхні має бути нижчою від температури насичення пари $t_c < t_n$, тобто треба забезпечити напрямок потоку теплоти від пари до стінки. За цією умови на поверхні починається з'являтися плівка рідини, що тече донизу під дією сили тяжіння. Конденсат починає збиратися у нижній частині сорочки і поступово закривати поверхню теплообміну.

Звідси – **друга умова**: потреба у своєчасному відведенні конденсату. Конденсатовідвідники, або конденсатні горщики, бувають різних типів: поплавцеві, дросельні, сифонні та інші, але вимога до них єдина – відводити рідину та не випускати пару.

Разом з парою до сорочки потрапляє деяка кількість газів, що не конденсуються. Поступово вони накопичуються, їх парціальний тиск зростає і може досягти сумарного тиску пари – пара не буде потрапляти до сорочки.

Отже, **третьою умовою** – відведення газів, що не конденсуються. Звичайно це компоненти повітря. Вони збираються у верхній частині сорочки, тому і вентиль для їх випускання розміщують у верхній точці. Якщо ці умови виконуються, конденсація пари відбувається вже на поверхні плівки конденсату і встановлюється стаціонарний режим. Для ламінарного стікання плівки, як і у випадку вільної конвекції, можна записати:

$$q = \alpha(t_1 - t_2) = \frac{\lambda}{\delta}(t_n - t_c); \quad \alpha = \frac{\lambda}{\delta}, \quad (2.22)$$

тобто звести задачу визначення величини α до обчислення середньої товщини плівки конденсату δ .

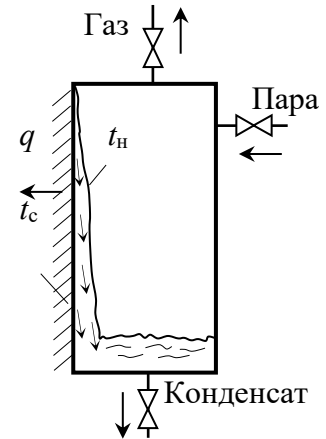


Рис. 15. Конденсація в паровій сорочці ТО.

Для вихрової течії плівки, що має місце в технологічних апаратах, користуються рівнянням

$$Ga = \frac{g\rho'(\rho' - \rho'')h^3}{\mu^2}, \quad (2.23)$$

де h – висота стінки або діаметр горизонтальної труби, *число Галілея* має вигляд – $Ga = gh^3/\nu^2$.

С.С. Кутателадзе показав, що рівняння

$$Nu = 1,13(Ga \cdot Pr \cdot Ku)^{0,25}. \quad (2.24)$$

є справедливим, якщо число **Re** під час конденсації $Re_k = \frac{w_k h}{\nu}$ не перевищує 100.

У рівнянні для визначення умовної швидкості конденсації $w_k = \frac{q}{r\rho'}$ на відміну від кипіння треба ставити густину рідини, тобто знов густину фази, що народжується. Якщо течія плівки стає вихровою, $Re_k > 100$, замість рівняння (2.24) треба брати емпіричну формулу

$$Nu = \frac{0,16Re_k (Ga \cdot Pr)^{0,33}}{Re_k - 100 + 63Pr^{0,33}}. \quad (2.25)$$

Для конденсації на горизонтальних трубах В. Нуссельт одержав рівняння подібності

$$Nu = 0,72(Ga \cdot Pr \cdot Ku)^{0,25}, \quad Nu = 0,16(Ga \cdot Pr)^{0,33}. \quad (2.26)$$

РОЗДІЛ 3. ПРОМЕНИСТИЙ ТА СКЛАДНИЙ ТЕПЛООБМІН

3.1. Основні поняття та закони теплового випромінювання

Із багатьох видів випромінювання, що різняться довжиною хвилі, в теплотехніці розглядають тільки *теплове випромінювання*, до якого відносять інфрачервоний, видимий і почасти ультрафіолетовий діапазони. З видимого діапазону ще треба вилучити явище так званої *люмінесценції*, тобто здатність тіла випромінювати світло не відповідно до температури тіла, а за рахунок різних сил: скажімо, цукор світиться у темряві, якщо його подрібнювати – це явище має назву триболюмінесценція. Якщо ж мати на увазі, що енергія будь-якого випромінювання перетворюється в решті-решт на теплову, діапазон довжини хвилі теплового випромінювання треба вважати від нуля до нескінченності.

За винятком газів з малою кількістю атомів у молекулі, усі тіла випромінюють і поглинають енергію. Наслідком взаємних перетворень теплової та променистої енергії є *променистий теплообмін*. Якщо тіло випромінює та поглинає однакову кількість енергії – це випадок рухливого теплового рівноважного випромінювання. Оскільки промениста енергія перетворюється на теплову, можна потік променистої енергії позначити Q , Вт, як і тепловий потік.

Нагадаємо відомі з курсу фізики *пасивні характеристики* тіла щодо променистого потоку Q_p , що падає на нього (рис. 16). Частина Q_A поглинається тілом, отже $Q_A/Q_p = A$ – *поглинальна здатність* тіла. Інша частина Q_R – відбивається, решта Q_D – проходить крізь тіло без зміни так, що

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q_p; \quad A + R + D = 1, \quad (3.1)$$

де R – відбивальна здатність; D – діатермічність або пропускна здатність тіла.

Якщо $R=D=0$, $A=1$, то маємо *абсолютно чорне тіло АЧТ*. Широко відома модель АЧТ у вигляді порожнини з малим отвором, менш відомим є факт, що Сонце за своїми властивостями стоїть дуже близько до АПЧ. Більшість

рослин, технічних матеріалів та продуктів має $A = 0,8...0,95$.

Коли $R = 1$ – це *абсолютно_дзеркальне* тіло, якщо його поверхня відбиває промені за законами геометричної оптики, і *абсолютно біле*, якщо промені

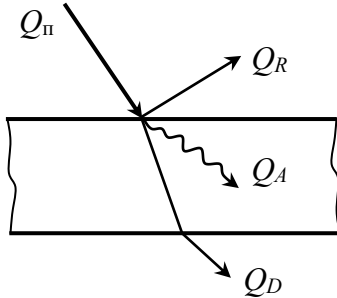


Рис. 16. Розподіл променистого потоку, що падає на тіло

відбиваються у різні боки. Поліруванням золотих, мідних або алюмінієвих поверхонь можна досягти $R = 0,96...0,98$.

У випадку $D = 1$ тіло має назву *прозоре* або *діатермічне* тіло. Шар повітря завтовшки у кілька метрів можна вважати прозорим, повітря завтовшки в 1 км над океаном може мати $D = 0,95$, оскільки воно складається головним чином з кисню та азоту, які є

практично прозорими. Деякі тверді тіла є прозорими тільки для хвиль деякої довжини: кварц є прозорим для ультрафіолетових та видимих, віконне скло – для видимих променів. Камінна сіль та поліетилен добре пропускає видимі та інфрачервоні промені, тому останній застосовується для огорожень парників і теплиць. Харчові продукти та сировина пропускають теплове випромінювання на деяку глибину, і цю їх здатність треба використовувати для інтенсифікації технологічних процесів.

Найважливішою з активних характеристик випромінювання є **випромінювальна здатність E , Вт/м²** – сумарна кількість енергії, що випромінюється з одиниці поверхні за одиницю часу і є еквівалентом густини теплового потоку q . Величина E_{λ} – це монохроматична випромінювальна здатність в діапазоні довжин хвиль від λ до $\lambda + d\lambda$, $E_{\lambda} = dE/d\lambda$, одиниці її вимірювання **Вт/м³**.

Зв'язок *випромінювальної здатності АЧТ E_0* та його абсолютної температури T , що був встановлений Л. Больцманом на основі законів термодинаміки, а та теоретичних досліджень Й. Стефана:

$$E_0 = \sigma \cdot T^4. \quad (3.2)$$

Константа Больцмана σ дорівнює $\frac{\pi^4 \cdot c_1}{15 \cdot c_2^4} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / (м}^2\text{К}^4)$, але численні досліді дають їй трохи більші значення – у середньому $5,73 \cdot 10^{-8}$. Отже, для практичних розрахунків можна брати $\sigma = 5,73 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$.

Закон Стефана – Больцмана (3.2) можна використовувати для визначення поняття сірого тіла:

$$E = \varepsilon \sigma T^4, \quad (3.3)$$

де ε – відносна випромінювальна здатність, або *ступінь чорноти* сірого тіла.

М'ясо та інші продукти мають $\varepsilon = 0,90 \dots 0,98$.

З інших законів випромінювання нагадаємо закон Кірхгофа, що зв'язує випромінювальну E та поглинальну здатність A сірих тіл:

$$\frac{E}{A} = E_0; \quad \frac{E}{E_0} = A; \quad \varepsilon = A. \quad (3.4)$$

Нагадаємо, що цей закон відповідає лише рівноважному випромінюванню, коли температури усіх тіл, що беруть участь у цьому процесі, є однаковими. Мають відхилення від формули (3.4) також деякі гази. Але ступінь нерівноважності більшості технологічних процесів дозволяє користуватись рівнянням (3.4) з достатньою точністю.

3.2. Променистий теплообмін між тілами в діатермічному середовищі

Це дуже поширений вид теплообміну при виробленні та використанні теплової енергії (термічне оброблення та зберігання харчових продуктів). В найпростішому випадку тверді тіла мають плоскі паралельні поверхні, які можна вважати такими великими, що кожний промінь з одного тіла падає на інше тіло (рис. 17). Нехай $T_1 > T_2$, $D_1 = D_2 = 0$. Треба обчислити висхідний потік променистої енергії від тіла 1 до тіла 2.

За закон Стефана – Больцмана тіло випромінює $E_{\text{вл}}$ – так звану

інтенсивність власного випромінювання (верхня пряма на рис. 17). Від неї $E_{1\text{вл}}A_2$ поглинається тілом 2, а $E_{1\text{вл}}(1-A_2)$ – відбивається. В сумі з $E_{2\text{вл}}$ цей відбитий потік складає ефективне випромінювання тіла 2, тобто $E_{2\text{еф}} = E_{1\text{вл}}(1-A_2) + E_{2\text{вл}}$. До речі, ефективне випромінювання можна виміряти за допомогою радіометрів, пірометрів чи тепловізором, якщо його чутливий елемент буде напрямлений на поверхню, що випромінює енергію. Таким чином, можна записати для ефективних потоків

$$E_{1\text{еф}} = E_{1\text{вл}} + (1-A_1) \cdot E_{1\text{еф}}; \quad E_{2\text{еф}} = E_{2\text{вл}} + (1-A_2) \cdot E_{2\text{еф}}. \quad (3.5)$$

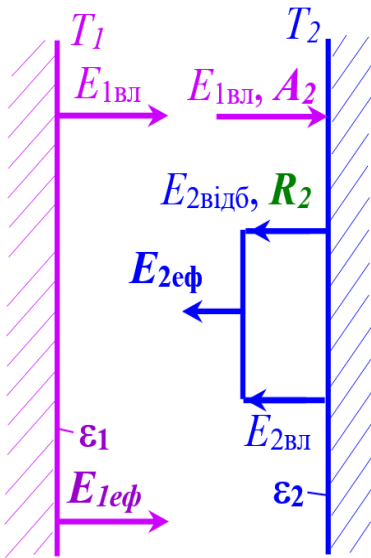


Рис. 17. Схема променистого теплообміну між паралельними поверхнями.

Різниця між ними складає шуканий *вислідний* потік

$$E_{\text{висл}} = q_{12} = E_{1\text{еф}} - E_{2\text{еф}}. \quad (3.6)$$

Рішення системи рівнянь (3.5)... (3.6) з урахуванням рівняння (3.3) для значення $E_{1\text{вл}}$ та $E_{2\text{вл}}$, а також рівняння (3.4) для обох тіл, дає

$$E_{\text{висл}} = q_{12} = \varepsilon_{\text{зв}} \sigma (T_1^4 - T_2^4). \quad (3.7)$$

де $\varepsilon_{\text{зв}}$ – зведений ступінь чорноти системи тіл 1-2, що залежить від ε_1 , ε_2 та $\varepsilon_0=1$,

$$\varepsilon_{\text{зв}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (3.8)$$

Більш поширений є випадок, коли тіло 1 з поверхнею F_1 розміщене у порожнині тіла 2 з поверхнею F_2 (рис. 18): харчові продукти чи трубопроводи з парою, гарячою водою чи холодоносієм у приміщеннях, опалювальні або охолодні батареї, електронагрівники повітря тощо. Цього разу можна користуватися (3.7), аби F_1 не була угнутою, але $\varepsilon_{\text{зв}}$ дещо змінюється:

$$\varepsilon_{\text{зв}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (3.9)$$

де F_1 та F_2 відповідно менша та більша поверхні, що беруть участь у променистому теплообміні.

Температура T_2 може бути більшою за T_1 , але q_{12} завжди обчислюється на одиницю меншої поверхні. Дуже часто $F_1 \ll F_2$, тоді (3.9) гранично спрощується, оскільки $\varepsilon_{3\theta} = \varepsilon_1$.

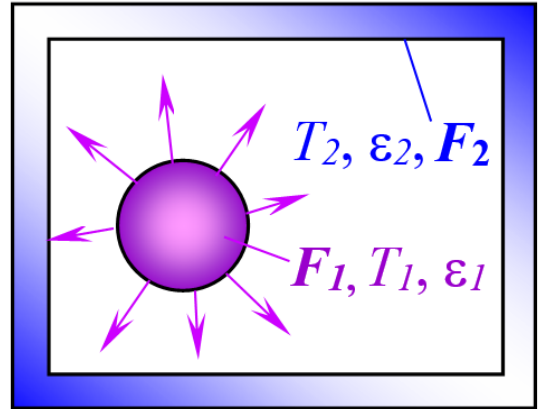


Рис. 18. Приклад випромінювання тіла, розташованого в порожнині іншого.

Якщо треба зменшити променистий теплообмін, застосовують звичайно так звані **екрани**. В найпростішому випадку, коли екран з $\varepsilon_e = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ розміщений між плоскими поверхнями тіл 1 та 2 (рис. 19), можна записати для усталеного режиму

$$q_{1e} = \varepsilon_{3\theta} \sigma (T_1^4 - T_e^4) = q_{2e} = \varepsilon_{3\theta} \sigma (T_e^4 - T_2^4),$$

звідси

$$q_{1e} = 1/2 \varepsilon_{3\theta} (T_1^4 - T_2^4) = 1/2 q_{12},$$

тобто один екран зменшує потік у два рази. Якщо за цих умов поставити n екранів, зменшення потоку буде у $n+1$ разів.

Коли $\varepsilon_e \neq \varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$ то зведений отупінь чорноти треба обчислювати за формулою

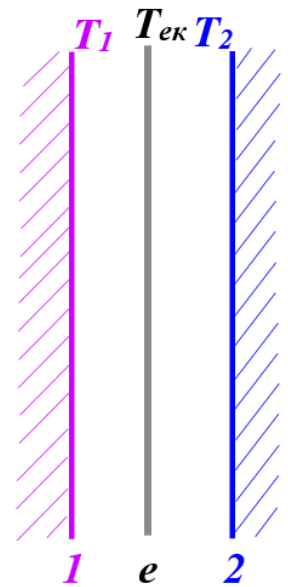


Рис. 19.

Використання тонкостінного екрану між поверхнями

$$\varepsilon_{3\theta} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + n \left(\frac{2}{\varepsilon_e} - 1 \right)} \quad (3.10)$$

3.3. Складний теплообмін

Складним, або комбінованим теплообміном звичайно називають перенесення теплоти променистим та конвективним або кондуктивним способами.

Якщо тверде (в загальному випадку – нерухоме) тіло є повністю прозорим для теплових променів, методика обчислення складного теплообміну дуже проста:

$$q = q_{\text{пр}} + q_{\text{тп}} \quad (3.11)$$

де $q_{\text{пр}}$ – промениста частка сумарної густини теплового потоку. обчислюється за формулами (3.6)...(3.8); $q_{\text{тп}}$ – теплопровідна частка, її розрахунок викладений у розділах 1.5 та 1.6.

Якщо ж тіло частково поглинає променисту енергію, розподіл температури у ньому дуже ускладнюється, відповідно ускладнюється рівняння для обчислення $q_{\text{пр}}$. Звичайно зводять цю задачу до перенесення теплоти теплопровідністю, а частку променистого теплообміну враховують збільшенням ефективної λ , для плоского тіла:

$$q = q_{\text{пр}} + q_{\text{тп}} = \frac{\lambda \Delta t}{\delta}; \quad \lambda = \lambda_{\text{тп}} + \lambda_{\text{пр}}. \quad (3.12)$$

Значення $\lambda_{\text{пр}}$ та $\lambda_{\text{тп}}$ або одразу λ одержують у спеціальних дослідах.

Таку ж саму методику використовують, коли обчислюють перенесення теплоти через ізоляційні, а також зернисті, сипкі та інші поруваті матеріали. Через твердий каркас теплоти передається теплопровідністю через пори – конвекцією та тепловими променями. Й цього разу знаходять ефективну теплопровідність λ з дослідів, а інколи – з аналітичних міркувань.

Більш поширеною є методика зведення променисто-конвективного теплообміну до конвективного шляхом збільшення коефіцієнта тепловіддачі:

$$q = q_{\text{к}} + q_{\text{пр}} = \alpha (t_{\text{г}} - t_{\text{с}}); \quad \alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{пр}}, \quad (3.13)$$

де α – ефективний, або сумарний коефіцієнт тепловіддачі; α_k – коефіцієнт конвективного теплообміну; $\alpha_{пр}$ – умовний коефіцієнт α за рахунок променистого теплообміну.

Ця методика є дуже поширеною, оскільки дає змогу рахувати вислідний потік енергії за єдиним алгоритмом (1.1), тобто як частку від ділення рушійної сили $\Delta t = t_r - t_c$ на загальний опір $R = 1/(\alpha_k + \alpha_{пр})$. Особливо корисною ця методика стає при обчисленні коефіцієнта теплопередачі, для плоскої стінки

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1к} + \alpha_{пр}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{2к} + \alpha_{2пр}}}. \quad (3.14)$$

Тому врахування $q_{пр}$ у вигляді $\alpha_{пр}\Delta t$ часто роблять при обчисленнях теплопередачі через тверду стінку навіть якщо з одного боку стінки переважає променистий теплообмін, хоча обчислювач почасти потрапляє у зачароване коло: щоб обчислити теплове навантаження апарату $q = k(t_{p1} - t_{p2})$ йому треба спочатку обчислити, наприклад $q_{1пр} = \varepsilon_{1зв}\sigma(T_{p1}^4 - T_{c1}^4)$, потім поділити цю величину на $t_{p1} - t_{c1}$ одержати $\alpha_{пр}$, з його допомогою обчислити k , і лише тоді одержати q – шукану густину теплового потоку.

Теплова енергія може переноситись теж за рахунок масообміну, наприклад при холодильному обробленні харчових продуктів разом з водяною парою з поверхні продукту, цей компонент q_m може мати такий самий порядок, що q_k або $q_{пр}$. До врахування цього компоненту ми повернемось у другій частині курсу. На закінчення глав 3 та 3 підкреслимо, що усі методи та формули, які вони містять, відповідають лише усталеним режимам перенесення енергії.

РОЗДІЛ 4. ОСНОВИ ОБЧИСЛЕННЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

4.1. Класифікація теплових процесів та апаратів

Підрозділ технологічних процесів хімічних, харчових та інших виробництв на чотири групи – механічні, гідродинамічні, теплові та фізико-хімічні (масообмінні) – значною мірою є умовними. Більшість процесів відбувається при одночасному впливі перепадів тиску, температур та концентрацій, тому часто буває важко з'ясувати, який з них є визначальним. Оскільки у теплотехнології теплові явища часто супроводжуються масообміном, будемо називати тепловими процесами ті, для яких є взаємозв'язок між цими явищами. До них можна віднести й холодильні процеси, хоча у холодильній технології загальна назва теплових та холодильних процесів є термічні процеси. Апарати, в яких протікають ці процеси, будемо називати *теплообмінними апаратами* чи *теплообмінниками*.

Ці апарати ділять на дві групи. *До першої* належать теплообмінники, в яких є так звана поверхня нагрівання чи охолодження – тверде тіло, що бере участь у перенесенні теплоти від гарячої рідини до холодної, тому їх називають *поверхневими теплообмінними* апаратами. З цієї групи найчастіше використовуються так звані *рекуперативні теплообмінники*, в яких реалізується теплопередача, тобто постійне перенесення теплоти через поверхню нагріву. До неї ж належать *регенеративні теплообмінні апарати*, в яких тверда стінка або так звана *насадка* по черзі стикається із гарячою та холодною рідиною.

Друга група – це так звані *контактні апарати*, тобто в них гаряча та холодна рідина чи продукт мають безпосередній контакт, а поверхня нагріву відсутня. Звичайно до цієї групи відносять теплообмінники змішування: барботери, інжектори, апарати для стерилізації соків чи молока водяною перегрітою парою тощо. Але у теплоенергетиці та теплотехнології широко використовують апарати, в яких немає поверхні нагріву, але нема й змішування. Власне, за поверхню нагріву у них править поверхня матеріалу чи продукту, який

проходить термічне оброблення: грудки вапна у випалювальних печах, напівтуші м'яса при його охолодженні чи заморожуванні, тістові заготовки при випіканні хліба та ін. Цей матеріал чи продукт відіграє роль гарячої чи холодної рідини.

Такі апарати треба віднести до другої групи, а загальна назва для них може бути **апарати контактної обробки**, хоча вони мають більше спільного з теплообмінниками першої групи, ніж з апаратами змішування. Якщо продукт стикається з тепло- чи холодоносієм через еластичну плівку, наприклад упаковку – такий апарат треба теж віднести до апаратів контактної обробки, бо плівка не відіграє ролі поверхні нагрівання.

Тепловий розрахунок цих чотирьох видів апаратів проводиться за різними методиками. В цій главі будуть розглянуті основи розрахунку найбільш поширених рекуперативних теплообмінників, до того ж лише в усталеному режимі їх роботи, бо попередні глави були підготовчими саме до цих обчислень.

До рекуперативних теплообмінників відноситься велика кількість апаратів, які відрізняються як за *призначенням* (нагрівачі, охолоджувачі, випарники, конденсатори, елементи парових котлів та багато інших), так і за *конструктивними особливостями* (рис. 20) – сорочкові **а**, кожухотрубні **б**, елементні **в**, занурювальні **г**, зрошувальні **д**, змійовикові **е** тощо). Детальні обчислення цих типів теплообмінників, які знов мають багато модифікацій, вивчають у спеціальних курсах.

4.2. Основні типи розрахунків та розрахункові рівняння

Тепловий розрахунок рекуперативних апаратів може мати різні вихідні дані та мету, і тому буває **перевірковим** або **проектним** (конструкторським). **В першому випадку** обчислювач має готовий теплообмінник чи вибрав якийсь конкретний типорозмір з каталогу, тобто має інформацію про кількість труб. Їх довжину та діаметр чи безпосередньо про поверхню теплообміну. Метою розрахунку є перевірка, чи задовольнить цей апарат вимогам технологічного

регламенту, або має він відповідну масову продуктивність. **Інший варіант перевірки** – чи забезпечить цей апарат нагрівання (охолодження) продукту до визначеної у регламенті температури. Інколи треба визначити теплову продуктивність і кінцеву температуру продукту.

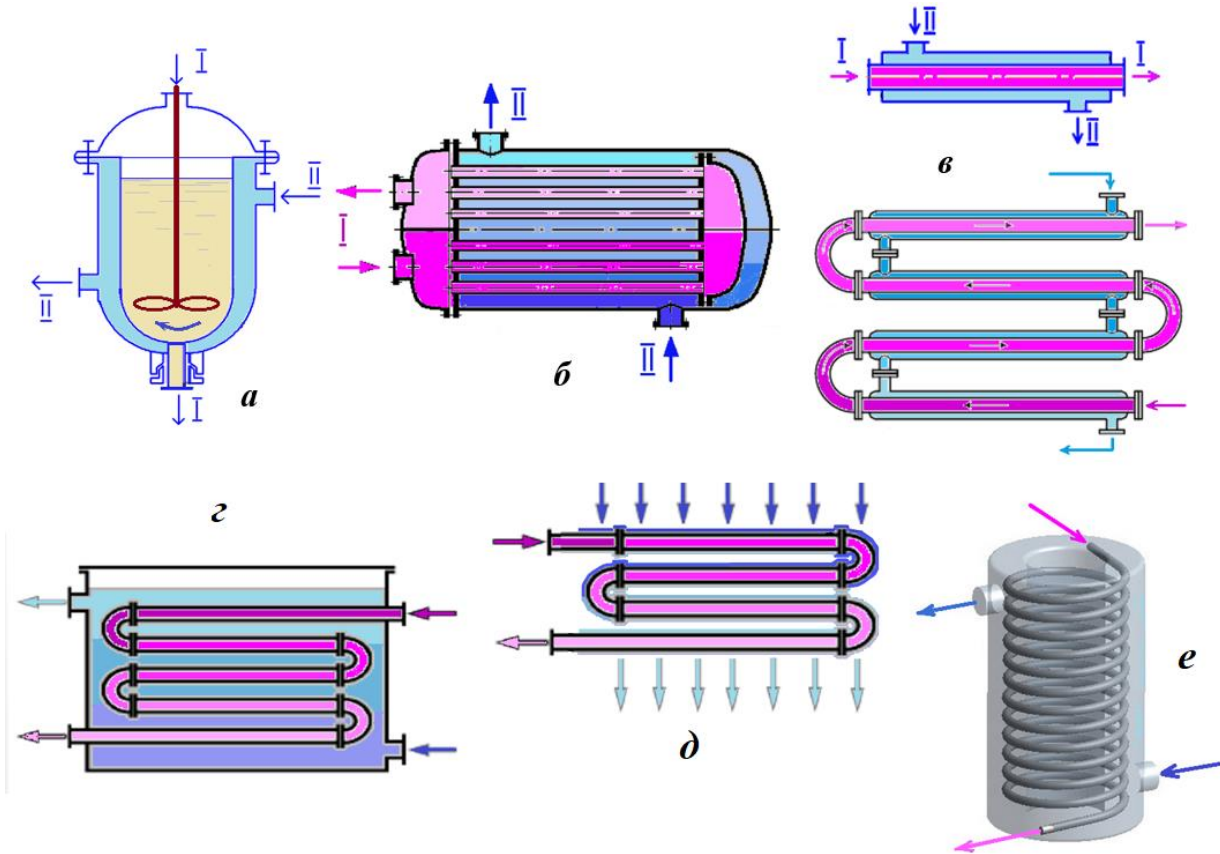


Рис. 20. Схеми рекуперативних теплообмінних апаратів.

Другий тип теплового розрахунку має місце, коли відбувається створення нового апарату, і треба знати, яку він повинен мати поверхню нагріву F , щоб задовольняти вимогам регламенту щодо температури продукту, а також потрібної продуктивності апарата.

Обидва типи розрахунку базуються на двох рівняннях для теплової продуктивності апарату: рівнянні **теплового балансу** та рівнянні **теплопередачі**, у найпростішому запису

$$\begin{aligned} Q &= G \cdot c \cdot \Delta t; \\ Q &= k \cdot F \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Перше рівняння вказує на баланс, тобто рівність енергії, що її віддає гаряча

рідина та одержує холодна рідина, яка нагрівається при цьому на δt , якщо нехтувати тепловтратами. Друге рівняння показує, що потрібний *температурний напір* для передачі цієї енергії дорівнює Δt .

Якщо треба провести перевірковий розрахунок, обчислюють величину Q з рівняння теплопередачі, попередньо обчисливши k та Δt . Значення Q використовують для обчислення масової витрати G чи різниці температур теплоносія δt , з рівняння теплового балансу.

Для проектного розрахунку, навпаки, треба обчислити Q з першого рівняння, тоді з другого підрахувати потрібну поверхню нагріву F .

Загальний вираз рівняння теплового балансу можна одержати, якщо вважати течії гарячої та холодної рідин ізобарними, що з досить великою точністю стверджується у більшості практичних випадків, та врахувати знаком мінус те, що гаряча рідина віддає теплоту. Тоді в усталеному режимі для елементарної поверхні нагріву dF рівняння балансу

$$dQ = - G_{\Gamma} dh_{\Gamma} = G_x dh_x, \quad (4.2)$$

де h_{Γ} та h_x – ентальпія гарячої та холодної рідини.

Якщо G_{Γ} , та G_x не змінюються вздовж усієї поверхні нагріву F , то після інтегрування (4.2) одержимо

$$Q = G_{\Gamma} (h_{\Gamma 1} - h_{\Gamma 2}) = G_x (h_{x 2} - h_{x 1}) \quad (4.3)$$

Для випадків, коли обидві рідини не змінюють фазового стану, можна записати

$$Q = G_{\Gamma} c_{p\Gamma} (t_{\Gamma 1} - t_{\Gamma 2}) = G_x c_{px} (t_{x 2} - t_{x 1}) = G c_p \delta t. \quad (4.4)$$

Замість *ізобарної масової теплоємності* c_p для краплинних рідин можна писати *масову теплоємність* – c , оскільки *ізобарна* c_p та *ізохорна* c_v теплоємності мають майже однакові значення. Добуток $G \cdot c_p = W$, Вт/К по традиції звуть *водяним еквівалентом*, бо у технічній системі одиниць масова теплоємність води дорівнює одиниці, отже W – це масова витрата води, що за своєю теплоємністю

та тепловою дією була еквівалентна витраті гарячої чи холодної рідини.

У системі СІ теплоємність води лежить біля 4,2 кДж/(кг К) отже це поняття втрачає сенс. Але повітря має у системі СІ теплоємність c_p , дуже близьку до 1,0 кДж/(кг·К), воно не менш поширене у теплотехніці ніж вода. тому W можна називати **повітряним еквівалентом**.

З виразу (4.4) виходить, що змінення температури однофазних рідин обернено пропорційні їх повітряним еквівалентам

$$\frac{\delta t_x}{\delta t_r} = \frac{t_{x2} - t_{x1}}{t_{r1} - t_{r2}} = \frac{W_r}{W_x} \quad (4.5)$$

Якщо рідина змінює свій фазовий стан, а температура при цьому не змінюється, $\delta t = 0$, $W = \infty$ рівняння теплового балансу для кипіння або конденсації (у разі, якщо теплотою охолодження конденсату можна нехтувати) має вигляд $Q = Gr$, де r – *теплота кипіння чи конденсації*.

Врахування тепловитрат апарату роблять одним з двох засобів:

$$Q_r = Q_x + Q_{tv}; \quad \eta \cdot Q_r = Q_x, \quad (4.6)$$

де Q_{tv} – тепловтрати апарату за одиницю часу; η – термічний ККД апарату.

Термічний коефіцієнт корисної дії різних рекуперативних теплообмінників може коливатись від 0,8 до 0,99 у деяких конструкціях пластинчатих апаратів.

4.3. Визначення температурного напору та коефіцієнту теплопередачі

Характер змінення температур гарячої та холодної рідини, отже і температурного напору між ними залежить від W_1 та W_2 , а також від схеми їх взаємного руху. Основою для обчислення є теплообмінник труба в трубі (рис. 21, в). Якщо рідини течуть в одному напрямі, це буде прямотокова схема

(рис. 21, а), якщо у протилежному (рис. 21, б) – протитокова схема. В інших апаратах можуть бути перехресна (рис. 21, в) та змішані (рис. 21, г) схеми.

Розглянемо елемент поверхні нагріву dF прямогокового апарату в усталеному режимі, для нього теплова продуктивність

$$dQ = -W_1 dt_1 = W_2 dt_2 = k \cdot \Delta t \cdot dF. (4.7)$$

Враховуючи, що $d(\Delta t) = dt_1 - dt_2$ визначимо $d(\Delta t)$ з (4.9):

$$d(\Delta t) = -dQ \left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} \right) = G dQ, (4.8)$$

де $G = -\left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} \right)$ інтегруємо це рівняння, враховуючи, що (Δt) змінюється від більшого (найбільшого) значення на вході рідин (рис. 21, а) до меншого (найменшого) на виході:

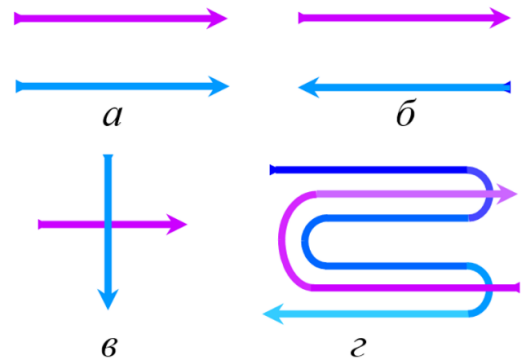


Рис. 21.Схеми руху теплоносіїв.

$$\Delta t_B - \Delta t_M = G \cdot Q; \quad Q = (\Delta t_B - \Delta t_M) / G. (4.9)$$

Використаємо рівняння теплопередачі з (4.9)

$$dQ = \frac{d(\Delta t)}{G} = k \cdot \Delta t \cdot dF. (4.10)$$

Покладемо $k = \text{const}$; $G = \text{const}$, відокремимо змінні та проінтегруємо (4.10)

$$\int_{\Delta t_B}^{\Delta t_M} \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = kG \int_0^F dF. (4.11)$$

Сумісне рішення (4.9) та (4.11) дає

$$Q = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln(\Delta t_B / \Delta t_M)} kF. (4.12)$$

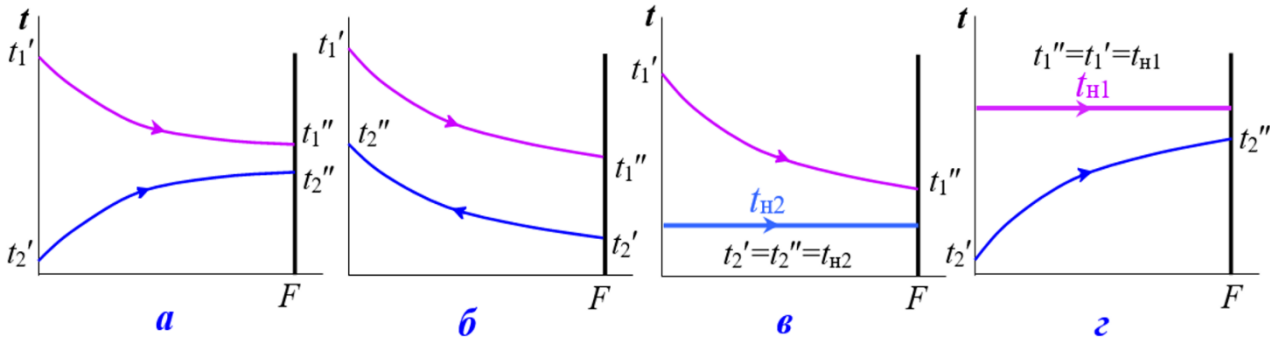


Рис. 22. Характер зміни температур однорідних теплоносіїв за прямотоком **а** і протитоком **б** та зміни фазового стану теплоносіїв – нагрівання для отримання пари **в** та нагрів парною **г**.

Якщо зрівняти (4.12) з рівнянням теплопередачі з (4.1) та поміняти знак у чисельнику і знаменнику, отримаємо

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln(\Delta t_{\text{б}} / \Delta t_{\text{м}})}. \quad (4.13)$$

Величина Δt (4.13) має назву **середній логарифмічний температурний напір**.

Аналогічні викладки для протитокової схеми (рис. 22, б) дають для визначення Δt знов формулу (4.13), хоча тут $G = -\left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2}\right)$ але цього разу $\Delta t_{\text{б}}$ може дорівнювати як $t_{\text{с1}} - t_{\text{х2}}$ так і $t_{\text{с2}} - t_{\text{х1}}$. Інша справа, що модуль G для протитоку завжди менше, ніж для прямотоку, що відповідно до (4.10) дає менший знаменник у (4.12), тобто більший напір при однакових умовах. Це означає, що протитокова схема дає більшу теплову та масову продуктивність апарату. Ця перевага меншає, якщо W_1 та W_2 дуже відрізняються одне від одного ($W_1 / W_2 < 0,05$, або $W_1 / W_2 > 10$), а також якщо Δt значно більш ніж δt_1 , або δt_2 .

Різниця між цими схемами зовсім зникає якщо одна з рідин змінює фазовий стан – кипить ($W_2 = \infty$) чи конденсується ($W_1 = \infty$) (рис. 22, в, г). В випадку $W_1 = W_2 = \infty$ маємо $\Delta t \neq f(F) = \text{idem}$ і втрачає сенс формула (4.13).

Протитокова схема має ще одну перевагу – можна нагріти холодну рідину до температури, вищої від температури гарячої рідини на виході. Єдиний недолік її те, що нерівномірність температури стінки стає актуальною, коли обидві рідини мають високі температури, тому, скажімо, пароперегрівники

котлів з високими параметрами роблять у зоні високої температури газів та пари прямотоковими, а в зоні, де температура стінки не може досягти критичного значення – протитоковими. У решті випадків треба вибирати протитокову схему.

Якщо $\Delta t_m > 0,6\Delta t_B$, заміна середньологарифмічного напору на середньоарифметичний $\Delta t = 0,5(\Delta t_B + \Delta t_m)$ дає похибку в плюсовий бік, що не перевищує 3%.

Для перехресних та змішаних схем обчислюють Δt за (4.13), а потім помножують її на $\varepsilon_{\Delta t}$. Ця поправка визначається за спеціальними номограмами для кожного типу апаратів як функція параметрів $P = \delta t_2 / \Delta t_B$ та $R = \delta t_1 / \delta t_2$.

Умова $k = \text{const}$, за якою одержана формула (4.13), у багатьох технологічних апаратах не здійснюється. Наприклад, в вакуум-апаратах за цикл варіння k змінюється в 3-10 разів, до того ж нерівномірно. Для різних апаратів це змінення враховується за допомогою коефіцієнтів використання поверхні нагріву чи накипоутворення [3].

4.4. Обчислення продуктивності апарату та кінцевих температур теплоносіїв

При проведенні перевіркового обрахування рекуператора дуже часто треба визначати його продуктивність Q , а також кінцеві температури гарячої та холодної рідини t_{r2} та t_{x2} . Для такого обчислення цих температур треба знати t_{r1} та t_{x1} , поверхню нагріву F , повітряні еквіваленти W_1 та W_2 . Для обчислення компонентів k (тобто α_1 та α_2) доводиться брати як визначальні t_{r1} та t_{x1} або наближені значення середніх $\bar{t}_r$ та $\bar{t}_x$. Після визначення t_{r2} та t_{x2} величини визначальних температур та значення α_1 , α_2 та k можна уточнити. Кінцеві температури визначають з рівняння теплового балансу.

$$t_{r2} = t_{r1} - \frac{Q}{W_1}; \quad t_{x2} = t_{x1} - \frac{Q}{W_2}. \quad (4.14)$$

Якщо сприйняти лінійним зміненням температур вздовж поверхні (у

попередньому розділі було відмічено, що це можна робити за умовою $\Delta t_M > 0,6\Delta t_B$) тоді

$$Q = kF \left(\frac{t_{r1} + t_{r2}}{2} - \frac{t_{x1} + t_{x2}}{2} \right). \quad (4.15)$$

Тепер значення t_{r2} та t_{x2} з (4.14) можна підставити у (4.15)

$$Q = kF \left(t_{r1} - \frac{Q}{2W_r} - t_{x1} - \frac{Q}{2W_x} \right), \quad (4.16)$$

звідки

$$Q = \frac{t_{r1} - t_{x1}}{\frac{1}{kF} + \frac{1}{2W_r} + \frac{1}{2W_x}}. \quad (4.17)$$

Це значення Q використовується при визначенні t_{r2} та t_{x2} з рівняння (4.14). Масова продуктивність апарату m визначається з рівняння теплового балансу.

В умовах кипіння або конденсації однієї з рідин її повітряний еквівалент $W = \infty$, прямо- та протитоківі схеми стають рівноцінними. Рівняння для обчислення кінцевої температури другої рідини можна одержати з виразу

$$\delta t_M = \delta t_B \exp \left(- \left(\frac{1}{W_r} + \frac{1}{W_x} \right) kF \right). \quad (4.18)$$

Для конденсатора

$$W_r = \infty; \quad t_{r1} = t_{r2} = t_h; \quad \Delta t_M = t_h - t_{x2}; \quad \delta t_B = t_h - t_{x1}. \quad (4.19)$$

Одержуємо з виразу (4.18)

$$t_{x2} = (t_h - t_{x1}) \exp \left(- \frac{kF}{W_x} \right); \quad Q = W_x (t_{x2} - t_{x1}). \quad (4.20)$$

Для випарника

$$W_x = \infty; \quad t_{x1} = t_{x2} = t_h; \quad \Delta t_M = t_{r2} - t_h; \quad \delta t_B = t_{r1} - t_h; \quad (4.21)$$

$$t_{x2} = t_h + (t_{r1} - t_h) \exp \left(- \frac{kF}{W_r} \right); \quad Q = W_x (t_{x2} - t_{x1}). \quad (4.22)$$

Знайдені за цими формулами теплова та масова продуктивність апарату, а також кінцеві температури гарячої та холодної рідини дозволяють вирішити, чи годиться наявний чи вибраний з каталогу апарат для тих чи інших умов його дії.

Вибір конструкції апарату чи його вдосконалення треба вести з урахуванням економічних показників. Серед них основними є капітальні затрати, пов'язані із спорудженням апарату, та експлуатаційні затрати. *На перші затрати* впливає металоємність апарату, що пропорційна поверхні нагрівання, *на другі* – потужність насосів та вентиляторів. Збільшення, наприклад, швидкості руху рідини призводить до збільшення α та k , отже і до зниження F та капітальних затрат та експлуатаційні затрати. Отже, тепловий розрахунок апарату є часткою задачі по його оптимізації.

РОЗДІЛ 5. НЕСТАЦІОНАРНЕ ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛОТИ ТА МАСИ

5.1. Роль неусталених режимів перенесення у термічній технології

Регенеративні теплообмінники та апарати контактного типу, що служать для нагріву, охолодження та замороження продуктів та матеріалів, працюють завжди у неусталених режимах, тому наведені у попередніх розділах формули зовсім або мало придатні для їх обчислень. Те ж саме можна сказати за більшість дифузійних та екстракційних апаратів, в яких, процеси масоперенесення відбуваються під дією змінної різниці концентрації. Для їх обчислень основні рівняння перенесення – закони Фур'є та Фіка треба ускладнити законами мірностями накопичення енергії чи маси.

Але й для найпоширеніших рекуперативних теплообмінників неусталені режими відіграють істотну роль, хоча основні обчислення для них провадять за формулами стаціонарного перенесення теплоти. Залежності $k(\tau)$, $\Delta t(\tau)$ та $q(\tau)$ що були розглянуті у розділі 4.2, належать до плавних, змінення цих величин йде повільно, що дозволяє брати середні значення. Але при експлуатації апаратів такі змінення часто відбуваються раптово, стрибкоподібно, причому як в процесі регулювання роботи апарату, так і за рахунок різних збурень виробничого чи випадкового характеру (змінення тиску гріючої пари, температури та вологості сировини тощо). Щоб повернути процес до регламентного усталеного протікання, треба мати відповідь на декілька запитань.

Нехай в усталеному процесі паро-парового випарника має місце розподіл температур від t_x до t_r (рис. 23, а). Якщо тепер змінити температуру пари, яка конденсується, до t_r' , раптово піднявши її тиск розпочнеться перехідний тобто неусталений режим теплопередачі. Температура стінки з гарячого боку t_{c1} через деякий час, потрібний для прогрівання шару конденсату на стінці, почне зростати (рис. 23, а). З цього моменту почне зростати й густина теплового потоку q_1 на цій поверхні (рис. 23, б). Це зростання може бути значним, але із поступовим прогріванням стінки градієнт температури в ній зменшується. Ця величина починає спадати, водночас зростає q_2 на протилежному боці стінки за

рахунок збільшення t_{c2} та градієнта температури у пристінному шарі киплячої рідини. Врешті-решт надходить новий усталений режим, q_1 знов дорівнює q_2 .

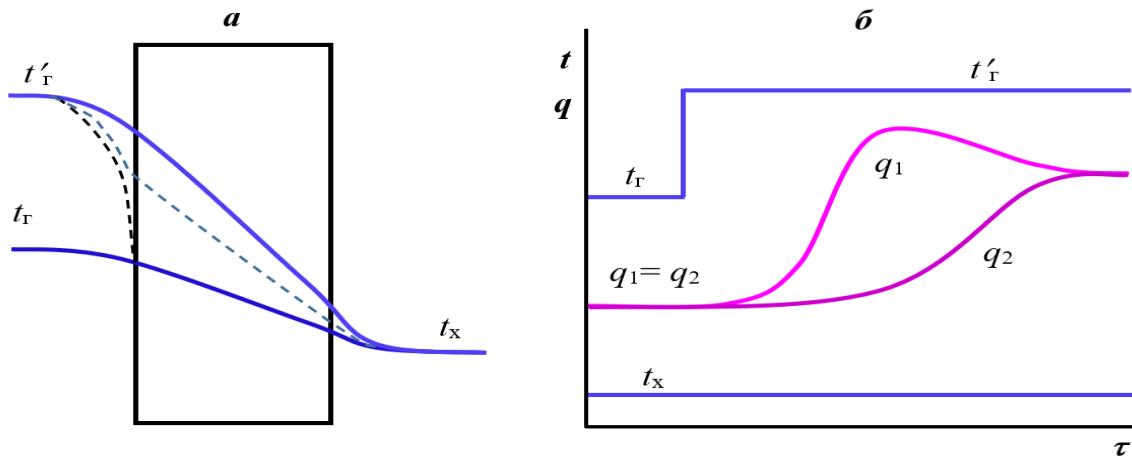


Рис. 23. Характер зміни температур та кількості переданої теплоти в неусталеному режимі

Питання, на які треба відповісти для успішної експлуатавання, регулювання та автоматизації теплообмінника: яка тривалість перехідного режиму між двома усталеними режимами, скільки енергії забирає стінка за перехідний режим (ця величина пропорційна площі замкненої між q_1 та q_2 , на рис. 23, б) – не мають досі певної відповіді. Зрозуміло, що швидкість прогрівання стінки пропорційна її теплопровідності λ та обернено пропорційна об'ємній теплоємності $c\rho$, тобто залежить від їх відношення $a = \lambda/(c\rho)$ з яким ми зустрічалися в розділі «Конвективний теплообмін» під назвою *температуропровідність*. Площа фігури на рис. 23, б пропорційна зміненню її ентальпії, тобто теплоємності матеріалу стінки. Форма ж фігури залежить від характеру збурення – по температурі чи по тепловому навантаженню, яка реалізується наприклад при зміні режиму електронагрівника, на гарячій чи холодній стороні стінки тощо. Класифікація перехідних режимів зроблена у посібнику у зв'язку з розробкою методу комплексного визначення теплофізичних характеристик $(\lambda, c\rho, a, h)$ різних продуктів та матеріалів. Реалізувати цей метод дає можливість безперервне вимірювання t та q на обох боках плоского шару продукту за допомогою *методів теплометрії*, тобто дослідне визначення кривих $t_{c1}(\tau)$, $t_{c2}(\tau)$, $q_1(\tau)$, та $q_2(\tau)$.

Але питання нестационарного теплопередавання дуже мало розроблені, і цього важливого розділу навіть немає у програмах курсу.

5.2. Застосування методів теорії подібності до процесів нагрівання чи охолодження

Звернемось до охолодження нескінченної пластини. Поточна температура у будь-якій точці пластини є функцією параметрів.

$$t = f(t_0, t_{\text{п}}, x, l, \lambda, c, \rho, a, \alpha, \tau), \quad (5.1)$$

причому деякі з них вже сполучені у безрозмірні комплекси, що характеризують той чи інший бік цього складного явища.

Почнемо з геометричної подібності. Крім загального обмеження форми тіла як нескінченної плоскої пластини, маємо ще симплекс x/l . або відносну координату точки.

$$\Gamma = x/l \quad (5.2)$$

Часову подібність процесів може характеризувати комплекс $\frac{a\tau}{l^2}$ або **число**

Фур'є

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2}, \quad (5.3)$$

де τ – поточний час процесу охолодження чи нагрівання, l^2/a можна вважати як масштаб цього часу, що пов'язаний з параметрами стінки. Тому **Fo** називають іще узагальненою змінною або відносним часом процесу. Можна одержати ще один комплекс або **число Біо**

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}. \quad (5.5)$$

Це число характеризує межові умови третього роду, його можна назвати *безрозмірним коефіцієнтом тепловіддачі*. За формою **Bi** збігається з числом

Нуссельта (див. главу 2). Але між ними є багато відмінностей. Якщо l у числі Nu є визначальний розмір рідини у пристінному шару, то у числі Bi це визначальний розмір твердого тіла (для пластини – півтовщини, для циліндра та кулі – радіус). До Nu входить теплопровідність рідини, до Bi – твердого тіла. Навіть α в них можуть бути різні: до Nu входить лише коефіцієнт конвективного теплообміну α_k , а для Bi це може бути сумарний: $\alpha = \alpha_k + \alpha_{пр}$ інколи $\alpha = \alpha_k + \alpha_{пр} + \alpha_m$. Нарешті, Bi відноситься до визначальних чисел чи критеріїв подібності, Nu – до визначуваних.

Визначуваним числом подібності в цій задачі є так званий *температурний критерій*, або відносна надлишкова температура

$$\Theta = \frac{t - t_0}{t_n - t_0} = \frac{\vartheta}{\vartheta_n}. \quad (5.5)$$

Вона містить шукану температуру t , є безрозмірним симплексом, отже відповідає вимогам до чисел подібності.

Таким чином, залежність (5.1) зведена до функції Θ від трьох чисел подібності: Γ , Fo та Bi . Щоб полегшити обчислення Θ цю залежність номографують. Відомо, що найпростіші номограми відповідають функції двох величин – одна з них править за аргумент, друга – за параметр. Тому звільняються від Γ , точніше будують номограми для двох його значень: $\Gamma = 0$ та $\Gamma = 1$. Ці номограми дають можливість обчислити температуру у центральній площині пластини та на її поверхні. Для інженерних обчислень цього буває звичайно досить. Наприклад, якщо якийсь харчовий продукт охолоджується у вигляді плоского блоку, то за симетричного відведення теплоти процес можна завершувати, якщо регламентна температура досягнута для головної площини симетрії блоку, бо в решті точок температура вже буде трохи нижча (за рахунок цього можна не доводити центрального шару до заданої температури, в процесі зберігання зробиться перерозподіл енергії). Але якщо за регламентом не можна, щоб продукт був заморожений – тоді треба обчислювати температуру на

поверхні блока. Отже, треба побудувати по дві номограми для кожного з класичних тіл.

Крім згаданих шести номограм для кожного з класичних тіл будують ще одну, за якою можна для будь-якої миті процесу одержати кількість теплоти, відведеної чи підведеної до тіла. Загальна кількість теплоти $Q_s = Gc(t_n - t_0)$, шукана кількість $Q = Gc(t_n - t)$ де t – середня ентальпійна температура тіла на заданий час процесу. Отже,

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{t_n - \bar{t}}{t_n - t_0} = 1 - \frac{t_n - \bar{t}}{t_n - t_0} = 1 - \bar{\Theta}. \quad (5.6)$$

Для середньоентальпійної температури $\bar{\Theta}$ одержана залежність $\bar{\Theta} = f(\text{Fo}, \text{Bi})$. Для номографування беруть звичайно як аргумент число **Bi**, як параметр – **Fo**, як функцію $1 - \bar{\Theta} = \frac{Q}{Q_0}$.

Таким чином, ці номограми дають можливість обчислити температуру в центрі чи на поверхні класичних тіл, а також кількість теплоти на будь-яку мить процесу. Ці обчислення є важливою частиною перевіркових теплових розрахунків контактних апаратів, в яких відбувається нагрівання чи охолодження. За допомогою номограм можна виконувати також розрахунки проектного характеру. Наприклад, якщо температура на поверхні чи в центрі тіла задана за регламентом, можна обчислити тривалість технологічного процесу. Для цього треба обчислити Θ та **Bi**, а із номограми знайти $\text{Fo} = f(\Theta, \text{Bi})$ а з нього час, необхідний для реалізації процесу $\tau = \frac{\text{Fo} l^2}{a}$.

Продукти та матеріали, що підлягають термічній обробці за своєю формою рідко відповідають класичним тілам. Значно частіше їх можна уявити як переріз двох чи трьох перпендикулярних до себе класичних тіл. Так, формову хлібину, що остигає після випікання, можна уявити як переріз трьох пластин, а череневу – кулі та пластини, тушковане м'ясо у жерстяній банці – як переріз вертикального

циліндру та горизонтальної пластини (рис. 24). Кожна точка предмету, обмеженого поверхнями класичних тіл, охолоджується чи нагрівається разом з кожним тілом, процес відбувається швидше.

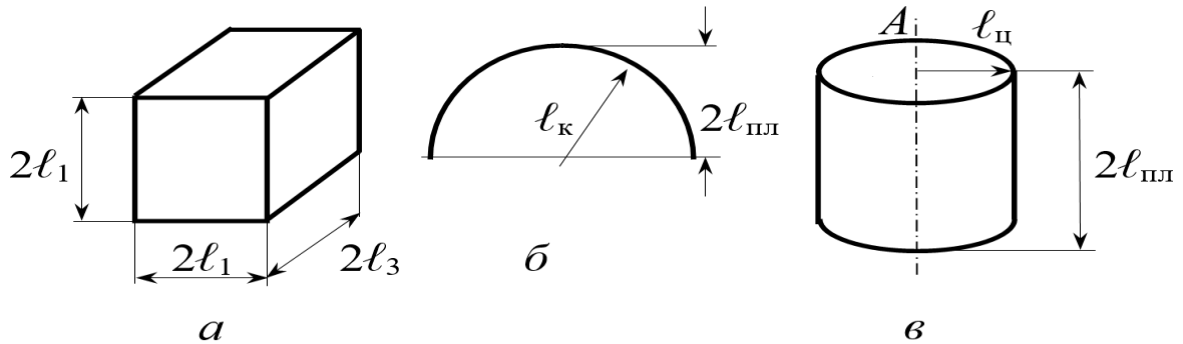


Рис. 24. Параметри для обчислення температурного критерію

Принцип суперпозиції дає можливість обчислити температурний критерій обмежених тіл як добуток Θ кожного з класичних тіл. Так, для предметів, зображених як рис. 24, буде справедливим

$$\Theta_{\phi} = \Theta_{\text{пл1}} \Theta_{\text{пл2}} \Theta_{\text{пл3}}; \quad \Theta_{\text{чх}} = \Theta_{\text{пл}} \Theta_{\text{к}}; \quad \Theta_{\text{тм}} = \Theta_{\text{ц}} \Theta_{\text{пл}}, \quad (5.7)$$

де індекс «ф» значить брикет фарша, «пл» – пластина, «чх» – хлібна черені, «тм» – тушонка м'ясна і тощо.

Під час користування формулами типу (5.7) треба уважно дивитись, яка з номограм водиться для розрахунків – для $\Gamma = 0$ чи $\Gamma = 1$. Наприклад, точка А для короткого циліндру має $\Gamma = 0$ для циліндру та $\Gamma = 1$ для пластини, з яких він побудований. Іще треба брати відповідні визначальні розміри (для циліндра та кулі це радіус, для пластини напівтовщина), тобто числа **Vi** та **Fo** будуть мати різні значення для кожного з класичних тіл. Тому знайти час, потрібний для досягнення заданої температури, можна лише для центра куба чи циліндра з однаковим діаметром та висотою. У формі (5.7) визначають температури обмежених тіл при межових умовах першого та третього роду. Для межових умов другого роду принцип суперпозиції дає рішення у вигляді суми температур, що набуває обмежене тіло разом із кожним з класичних тіл.

5.3. Тепловий розрахунок процесів заморожування

Задача обчислення тривалості заморожування має велике значення не тільки для харчових технологій, але й для металургії теплоенергетиці, будівництві, геології – скрізь, де в твердому чи пластичному тілі проходить поступова фазове перетворення чи інші фізико-хімічні процеси з виділенням теплоти та її відведенням в окресленому напрямку. Це коло питань відоме як задача Стефана, спроби аналітичного розв’язання дають, звичайно, дуже складні формули навіть за деяких спрощень при їх виведенні.

Разом з тим для заморожування плоского блоку продукту, що містить воду, є досить проста формула, яку вивів Р. Планк у 1913 році і яка досі лишається основною для теплових обчислень морозильних апаратів [7].

Нехай початкова температура блока-пластини дорівнює кріоскопічній температурі $t_{кр}$. Оскільки $t_{кр} > t_0$ на поверхні блоку за часом $d\tau$ утворюється шар замороженого продукту товщиною dx . Кількість теплоти, що треба при цьому відвести з 1 м^2 поверхні продукту, можна підрахувати з теплового балансу, а також з рівняння теплопередачі, якщо вважати, що теплоємність замороженого шару дорівнює нулю, тобто його температура не змінюється:

$$qd\tau = r\rho dx = \frac{t_{кр} - t_0}{\frac{x}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}} d\tau, \quad (5.8)$$

де r – теплота заморожування в розрахунку на 1 кг продукту,

λ_3 – теплопровідність замороженого шару,

α_2 – коефіцієнтні тепловіддачі від блоку до холодоагенту.

Якщо між блоком та рідиною є стінка апарату чи плівка упаковки, їх опором нехтують.

Інтегруванням по τ від 0 до кінця обробки τ_k та по x від 0 до напівтовщини блоку l , де зійдуться зони фазових перетворень, тобто процес заморожування

закінчиться, одержимо

$$\tau_k = \frac{2r\rho l}{t_{кр} - t_0} \cdot \left(\frac{l}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right). \quad (5.9)$$

Середня густина теплового потоку відповідно до умов Планка може бути одержана інтегруванням (5.26) по x від 0 до l

$$\bar{q} = \frac{t_{кр} - t_0}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l}{2\lambda}}. \quad (5.27)$$

Початкову, кінцеву та середню густина теплового потоку з врахуванням змінення R від R_n до R_k запишемо як

$$q_n = \frac{t_{кр} - t_0}{R_n}; \quad q_k = \frac{t_{кр} - t_0}{R_k}; \quad \bar{q} = \frac{2q_n q_k}{q_n + q_k}. \quad (5.10)$$

За рахунок того, що Δt у процесі заморожування зменшується, а R – збільшується, теплове навантаження q зменшується в декілька разів. Кінетику змінення q треба враховувати при виборі холодильної установки, що обслуговує морозильний апарат. Для цього треба мати залежність $q=f(\tau)$ яка була б придатна для різних апаратів та для різних режимних параметрів кожного з них.

Дослідним шляхом були одержані залежності $q = f(\tau)$ для різних апаратів та продуктів. Для їх узагальнення були використані методи теорії подібності. Щоб одержати безрозмірні q та τ , можна відносити їх до базових величин. Такими базовими величинами при заморожуванні можуть бути середнє теплове навантаження q та час обробки продукту τ_k . Між цими величинами є однозначний зв'язок q . Отже, можна запропонувати два числа подібності – безрозмірний час процесу $\pi_\tau = \frac{\tau}{\tau_k}$ – та відносне теплове навантаження $\pi_q = \frac{q}{\bar{q}}$.

З'ясування функції $\pi_q = f(\pi_\tau)$ дає можливість для будь-якого морозильного апарату, у тому числі й тих, що проектується, в будь-яку мить процесу τ

обчислити теплове навантаження q .

Чисельні досліді при заморожуванні м'яса у напівтушах, м'яса та риби у блоках, хлібобулочних виробів тощо показали, що є загальна закономірність у кінетиці заморожування різних продуктів у різних апаратах. Ця загальність

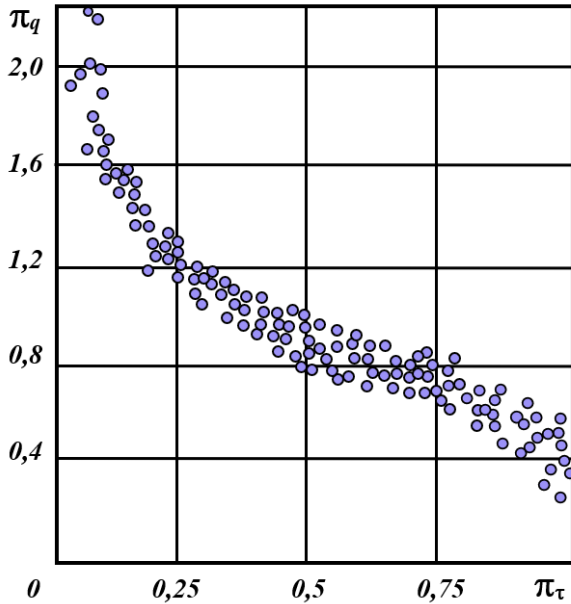


Рис. 25. Закономірності зміни теплового навантаження на охолоджувальні поверхні апаратів або продуктів в часовому інтервалі.

пояснюється тим, що в перший період $0 \leq \pi_\tau \leq 0,25$ тепловий потік знижується в основному по експоненті регулярного режиму, яка по досягненні на поверхні продукту криоскопічної температури уповільнює зниження t за рахунок теплоти заморожування – ця основна ділянка має межі від $\pi_\tau = 0,25$ до $\pi_\tau = 0,75$. Нарешті криоскопічна температура досягає центру продукту, на останній ділянці $\pi_\tau = 0,75 \dots 1,0$

відбувається в основному охолодження замороженого продукту – густина теплового потоку від продукту знов падає по експоненті. На рис. 25. наведені результати дослідів, які показали, що нові числа подібності мають право на існування. Статистична обробка експериментальних даних показала, що зв'язок між π_τ та π_q можна зобразити у формі кубічної параболі

$$\pi_q = 2,17 - 5,76\pi_\tau + 8,75\pi_\tau^2 - 5,12\pi_\tau^3 \pm 0,1. \quad (5.11)$$

Рівнянням (5.11) можна користуватись не лише для обчислення поточного теплового навантаження, але й для вирішення інших практичних задач. Наприклад, якщо на апараті встановити теплотеметричний пристрій, то за його показами можна обчислити загальну тривалість процесу t_k , тобто цей пристрій буде не тільки контролювати, а ще й прогнозувати хід процесу, тобто на його основі можна будувати систему управління апаратом.

ЧАСТИНА 2.
ТЕПЛОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

РОЗДІЛ 6. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОМЕТРІЇ ПРИ
ТЕПЛОВІЙ ОБРОБЦІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

6.1. Тепломіри

Дослідження сумісного локального тепломасообміну під час термічної обробки харчових продуктів почалось на базі теплометрії – науки про вимірювання локальних теплових потоків. На поверхні продукту під час теплової або холодильної обробки густина теплового потоку q складається як правило з трьох компонентів – конвективного q_k , променистого q_{np} , та масообмінного q_m . В середині продукту q_{np} та q_k , q_m – це теплота за рахунок випаровування потоку вологи j , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ з поверхні продукту (усихання, усушка).

Для вимірювання сумарного "сухого" теплового потоку $q_c = q_k + q_{np}$ досить одного тепломіра – малогабаритної, малоінерційної платівки (діаметр або сторона квадрата від 10 до 25 мм і товщиною 1,5–2,5 мм), що має вбудовану гіпертермопару, сигнал якої є пропорційним q . Якщо треба виміряти q_k та q_{np} треба два тепломіра з різним ступенем чорноти ε , один з $\varepsilon_1 = 0,15$ (алюмінієва фольга), другий з $\varepsilon_2 = 0,96$ – вкритий фарбою, останній дає більший сигнал і за різницею їх сигналів визначають q_k та q_{np} .

Ці тепломіри є суцільними платівками і не пропускають вологу, яка надходить від продукту під час термічної обробки. Для визначення q_m розроблені дифузно-проникні тепломіри. Цей тепломір додається до двох перших або тільки до другого, якщо не треба визначати q_{np} . Сигнал третього тепломіра відрізняється від другого на q_m .

Таким чином народилась галузь теплометрії – тепломасометрія. Так в м'ясній промисловості тепломасоміри знайшли застосування під час холодильного оброблення напівтуші [8]. Згодом тепломасоміри почали

використовувати під час дослідження інших харчових продуктів [3].

Були запропоновані виміряні і обчислені нові характеристики харчових продуктів – випарна здатність та інтегральна густина випаровування, важливі для розробки технологічних регламентів з метою найменшого усихання продукту.

За допомогою тепломірів було розроблено і впроваджено кілька приладів для вимірювання теплофізичних характеристик (ТФХ) різних продуктів і матеріалів.

Були розроблені декілька класів приладів для вимірювання теплообміну [3].

Радіометри. Радіометри – пристрої для вимірювання густини падаючого на будь-яку поверхню променистого потоку, що застосовуються в теплотермії та тепломасометрії для градування базових елементів та приладів для дослідження похідних характеристик. За методом вимірювання променистих потоків радіометри поділяють на інерційні, компенсаційні, із заміщенням.

Для апаратів контактної обробки продуктів характерне різне співвідношення конвективних та променистих потоків як за довжиною апарату, так і за його шириною та висотою. Дослідити поля падаючих потоків за допомогою тепломірів, закріплених на поверхні виробу або на стінках апарату важко, а при великій протяжності випромінюючих поверхонь не завжди можливо. У зв'язку з цим виникла потреба у розробці пересувних малогабаритних радіометрів-моделей досліджуваного продукту.

Альфаміри. Перші пристрої вимірювання коефіцієнта тепловіддачі засобами тепломасометрії склалися з двох суцільних секцій з покриттями різного ступеня чорноти та однієї термопари. Один спай термопари розміщений у фользі «темної» секції, а другий, захищений від променистого теплообміну екраном з фольги, що відбиває, розташовується в повітрі навпроти секції за межами прикордонного шару. Інформація про температурний перепад Δt дозволяє розраховувати повний коефіцієнт тепловіддачі α та його компоненти

α_n і α_l за рівнянням $\alpha_i = q_i / \Delta t$.

Бетаміри. Найпростіший бетамір складається з тепломасоміру, який розташовується на поверхні продукту або під поверхневим шаром завтовшки 0,5...3 мм, та психрометра. На поверхні масообмінної секції чи поверхні продукту над нею закріплюється спай термopар. За допомогою цього пристрою визначають коефіцієнт масовіддачі $\beta \equiv j \cdot (p_n - p_s)^{-1}$.

Серед різних конструкцій тепломірів (одиначні, галетні тощо) для дослідження харчових продуктів здебільшого застосовуються **шаруваті** давачі. Електричний сигнал при малих q виробляється за рахунок великої кількості елементарних давачів-термopар, один спай яких розташований на одній поверхні давача, і інший на другій. Перші одиначні тепломіри розташовували на поверхні труби, через стінку якої теплота від пари йшла на сушіння зернистих продуктів, що рухались всередині труби.

Прискорена технологія виробництва шаруватих тепломірів виглядає наступним чином. Брaли стандартну плівку шириною 35 мм і розрізали на стрічки шириною 0,8-1 мм та довжиною на кожний давач 700-800 мм. На стрічну навивали м'яким константовим дротом товщиною 0,1 мм із кроком 0,15 мм. Після навивки стрічну пропускають крізь ручні вальці для зняття напруги в дроті.

З одного боку стрічку вкривали цапонлаком, а з другого міддю шляхом гальванічного міднення. Далі стрічку обробляли ацетоном для розчинення цапонлаку і целулоїдної кіноплівки. Залишається пласка спіраль із ділянками чистого константану та вкритого міддю. Кожна пара цих ділянок, оскільки константан, вкритий міддю товщиною в кілька мікрометрів, виробляє електрорушійне силу майже таку, як чиста мідь.

Спіраль з обох боків вкривали лаком АК-20 і викладали на дошці з голками так, щоб переходи від чистого константана до мідненого знаходились на різних сторонах майбутнього тепломіра. Спіраль покривається епоксидною смолою, "шари" тепломіра утворюються складанням спіралі сходи́нками (для

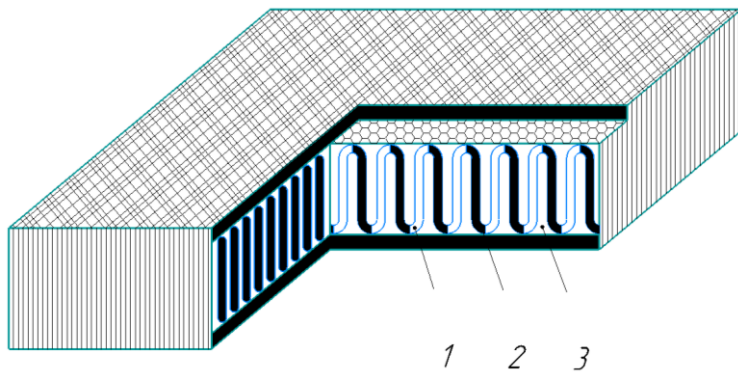


Рис. 26. Модуль перетворювача першого типу

1 – термоелектрод із основного матеріалу;
2 – термоелектрод гальванічний, 3 – заповнювач

кінців спіралі та приварювали до них струмоз'ємні мідні дроти в ізоляції. Стандартні давачі закладали в кільце діаметром 25 мм з нержавіючої сталі або алюмінію, виводили крізь нього струмоз'ємні дроти та заливали епоксидною смолою з додаванням сажі. Це дає можливість використовувати їх під час холодильного і теплового оброблення продукту. Часто потрібні були давачі меншого розміру, тому робили квадратні давачі 8x8x1 або 10x10x1,5 мм без охоронних кілець (рис. 26).

"стандартного" довжиною 17 мм) та стисканням сходинок теж до 17 мм.

Монолітний шаруватий блок 17x17x1,2 мм підігрівали паяльником в місцях виходу

Для вимірювання t в тому ж місці де і q , мідь-константанову термопару

товщиною 0,2 мм в ізоляції, яка закріплюється смолою до бруска. Ці давачі успішно працювали при температурі від 60 до 120°C.

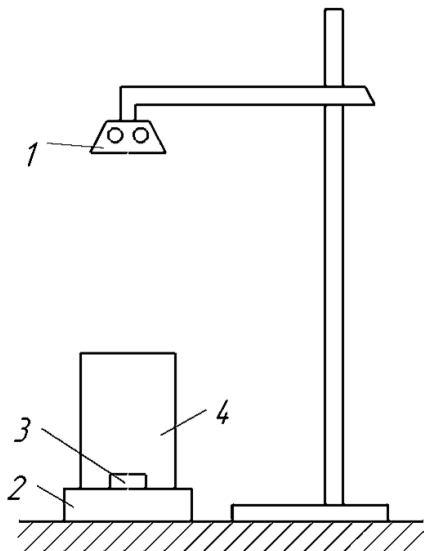


Рис. 27. Схема станда для градування

Градування термомірів, тобто встановлення залежності густини теплового потоку, що проходить крізь термомір від терморушійної сили, що виробляє гіпертермопара, відбувається різними способами [9]. Найпоширенішим і досить точним є використання променистої енергії (рис. 27).

Випромінювач 1 складається з двох ламп НІК-220-1000, живлення ламп проводиться через стабілізатор напруги та автотрансформатор. Відведення тепла від термомірів, що градуються і

абсолютних радіометрів 3 проводиться з допомогою плоского холодильника 2, включеного в ланцюг ультратермостата. У той же ланцюг включено і бленду 4, за допомогою якої усувається можливість місцевих коливань температури повітря біля поверхні елемента. Залежність q (ЕРС) – майже пряма лінія $\pm 3\%$, що і є максимальною похибкою вимірювання.

6.2. Прилади для дослідження ТФХ лабільних продуктів та матеріалів

Блоковий принцип створення ТФГ-приладів. Сировина, продукти та матеріали, які піддаються впливу теплових процесів у різних галузях промисловості, дуже різноманітні за консистенцією, лабільністю. Різноманітний діапазон температур, в якому ведуть ці процеси. Тому при створенні ТФГ-приладів доводиться враховувати, з одного боку, вимоги до їх універсалізації, щоб за допомогою одного пристрою охопити дослідженням якомога більше матеріалів, з іншого – до їх спеціалізації, щоб досягти максимальної точності вимірювань, простоти в обслуговуванні приладу.

Поєднання цих вимог можливе, якщо використовувати блоковий (модульний) принцип конструювання ТФХ-приладів, тобто створити набір блоків, з яких можна «складати» прилади для різних температурних та теплових навантажень різних за консистенцією продуктів.

Кожен теплометричний ТФХ-прилад складається з трьох основних блоків (рис. 28) – підведення та відведення теплоти та вимірювального. Блоки підведення та відведення теплоти можуть бути взаємозамінними, оскільки служать для однієї і тієї ж мети забезпечити за заданою програмою зміну густини теплового потоку через зразок і температуру зразка.

У блоках підведення теплоти застосовуються три типи джерел енергії: термостатована камера ТК, електронагрівач Е, інфрачервоне джерело ІЧ. Для блоків відведення теплоти використовуються три типи стоків – термостатована

камера ТК, термостатована пластина ТП та термоелектричний (напівпровідниковий) термостат ТЕ. Комбінація різних блоків підведення та відведення теплоти ще більше розширює діапазон конструкцій ТФХ-приладів. Широко застосовуються комбінації ТК-ТК та Е-ТК, що забезпечують високу точність вимірювань, але у порівняно вузькому діапазоні температур. Варіанти ТК-ТП та Е-ТП значно розширюють температурні межі вимірювань, але роблять складнішим обслуговування установки. Прилади з ІЧ-ТК та ІЧ-ТП застосовуються, наприклад, для дослідження електропровідних матеріалів, коли потрібно створити прямокутний імпульс теплового навантаження на зразок.

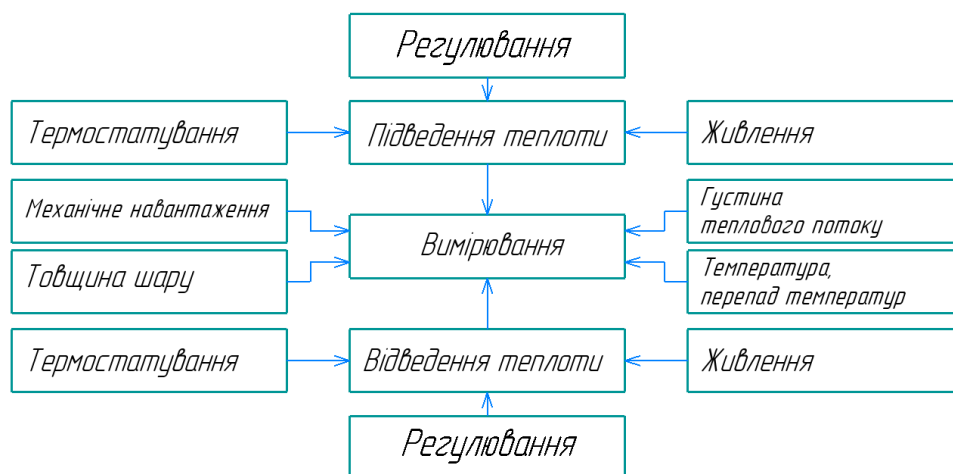


Рис. 28. Блок-схема ТФХ-приладів

Прилади ТК-ТК використовувалися для визначення ТФХ найрізноманітніших продуктів, напівфабрикатів і сировини. При товщині зразків 3...12 мм і теплових навантаженнях 10...100 Вт/м² похибка вимірювання ТФХ не перевищує $\pm 3\%$ по λ , $\pm 5\%$ по $c\rho$, $\pm 7\%$ по α і b .

В якості стаціонарного лабораторного ТФХ-приладу з блоками Е-ТК використовується вдосконалений λ -прилад із двома пластинами вимірювального блоку. Він обладнаний усім необхідним для комплексного вимірювання ТФХ продуктів різної консистенції. У цьому приладі визначають залежність ТФХ від механічного навантаження. Діаметр камери тут дорівнює 100 мм, максимальна товщина шару складає 10 мм.

Ще менший робочий діаметр плит у портативного ТФХ-приладу – 75 мм

(рис. 29, а), працюючого за схемою Е-ТП або Е-ТК.

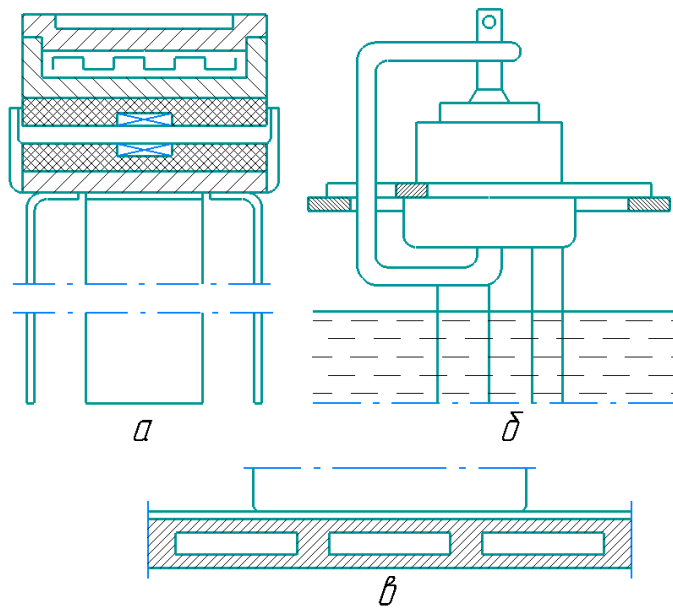


Рис. 29. Конструкція ТФХ-приладів

У верхній плиті замуровано електронагрівач, до нижньої прикріплені мідні ребра. Цими ребрами користуються для відведення теплоти від зразка, поміщаючи їх у термостат (рис. 29, б), прикріплюючи до випарника холодильного агрегату (рис. 29, в) чи вставляючи в посудину Дьюара з рідким азотом.

6.3. Пристрої для визначення випарної здатності

Дослідження показали, що використання випарної здатності для характеристики ґрунтів, сировини або продуктів, підданих термічній обробці в газоповітряному середовищі, спрощує розрахунок тепломасообміну в цих умовах.

Спрощення розрахунків полягає в тому, що з'являється можливість використовувати інформацію про величину коефіцієнта масовіддачі при випаровуванні води з відкритої або рясно змоченої поверхні

Інтенсивність випаровування з поверхні м'яса та інших продуктів під час термічної обробки є різною. Для сушіння це є позитивною характеристикою, для охолодження або заморожування – негативною. В кожному випадку вона регламентується за умов обробки чи зберігання, і відхилення від норми є порушенням технологічного регламенту. З цим поняттям пов'язані усихання, втрата маси, час обробки, якість готового продукту тощо. Для визначення власне інтенсивності випромінювання пропонувалися різні величини, але вони мають ті

чи інші недоліки [3]. Використання тепломасометрів дає можливість запропонувати для характеристики поверхневого шару продукту відношення здатності випаровування з його та з поверхні чистої води за тих самих умов. Ця величина названа «випарна здатність продукту ε_{np} ».

Для визначення ε_{np} досить двох тепломасомірів. Поверхня масообмінної секції одного з них вкривається водою або змоченим водою капілярно-шаруватим тілом, а другого шаром продукту, що досліджується.

Для контролю рівномірності потоку повітря за потребою перед кожним тепломасоміром встановлюють тепломір.

Пристрій для роботи при швидкості повітря 2–7 м/с і температурі 30...100°C (рис. 30) має усі вимірювальні прилади на одній плиті 3, тепломіри 2 врівень з її поверхнею, і тепломасоміри 1 – на заглиблення 3 мм так, щоб їх секції можна було б вкривати шаром 4 еталона або дослідного зразка через, отвори в плиті йде вода до кожної масообмінної секції окремо. Електронагрівник 5 і проточні камери 6, що підключені до окремих термостатів, дозволяють задавати для кожного тепломасоміра необхідне теплове і температурне навантаження.

Поверхнева плівка, або тонкий шар продукту закріплюється за допомогою тонких шпильок 7, для надійного контакту з тепломіром термопара 8 може з'єднуватись з термопарою 9, що розташована на поверхні приладу, для підтримки їх на одному рівні.

На рис. 31 наведено результати типових дослідження залежності $\varepsilon_{np} = (\tau)$ для матеріалів різної структури – річного піску, агар-агара і яловичини.

Розрахунки вели за спрощеною формулою

$$\varepsilon_{np} = \frac{q_{11} - q_{12}}{q_{21} - q_{22}} \quad (6.1)$$

де перші індекси 1 відносяться до величин вимірюваних на продукті, що досліджується, 2 – до еталону, другі – до двох секцій кожного з тепломасомірів (1 – «мокра», 2 – «суха» секція) [3].

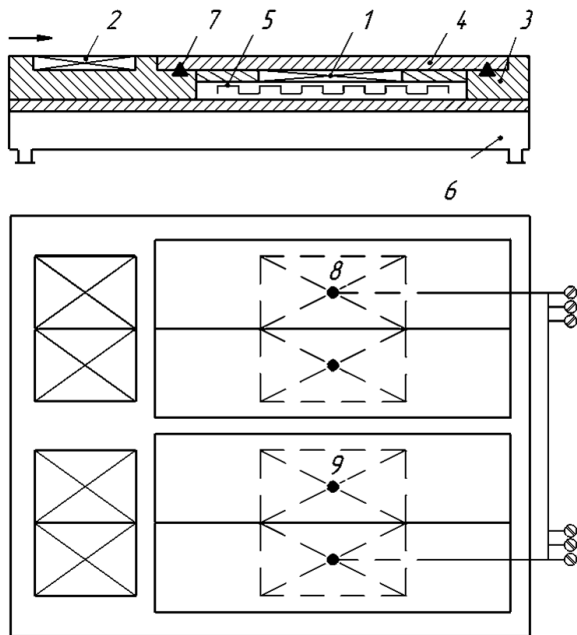


Рис. 30. Пристрій для вимірювання випарної здатності продукту

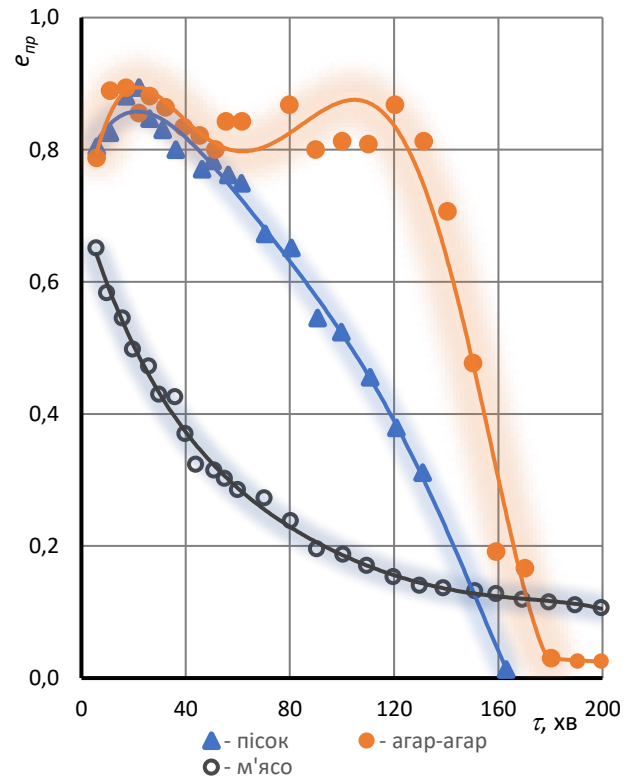


Рис. 31. Кінетичні криві для випарної здатності різних матеріалів

6.4. Складові тепломасообміну під час термічної обробки харчових продуктів

Більшість процесів термічної обробки м'ясопродуктів супроводжуються перенесенням теплоти трьома способами: конвекцією, випромінюванням та за рахунок фазових перетворень (випаровування, конденсація, сублімація), вектори цих складових завжди спрямовані до поверхні продукту під прямим кутом, але знаки їх можуть не збігатися. Тому їх треба складати по модулю. Наприклад, під час зберігання заморожених продуктів конвективна складова q_k спрямована до продуктів і витрачається на масообмін q_m – теплоту сублімацією. Продукт усихає навіть якщо він герметично упакований [10].

Для визначення q_k , q_{pr} та q_m досить мати три тепломіри з різними властивостями (рис. 32). Тепломіри 1 і 2 мають нульову дифузійну проникність. Тепломір 3 має отвори для дифузії крізь нього вологи. Ступінь ε_1 і ε_3 та продукту

приблизно однакові, а ε_2 – якомога менша ($\varepsilon_3 = 0,1 \div 0,21$).

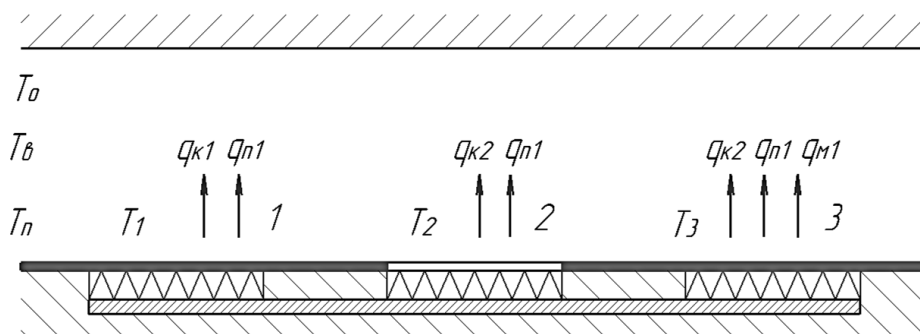


Рис. 32. Схема вимірювання потоків теплоти та маси

Авторами встановлено [11] встановлено, що за цих умов між сигналами q_1 , q_2 та q_3 і складовими тепломасообміна q_k , q_{np} та q_m існує однозначний зв'язок:

$$q_{np} = \varepsilon \frac{q_1 - q_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (6.2)$$

$$q_k = q_1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} q_{np} \quad (6.3)$$

$$q_m = q_3 - q_1 \quad (6.4)$$

Розрахунки за цими формулами дають цілком задовільні результати.

За відсутністю масообміну досить тепломірів 1 та 2, якщо треба знайти Σq – то №1.

РОЗДІЛ 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК М'ЯСА ТА М'ЯСОПРОДУКТІВ

7.1. Визначення теплофізичних характеристик м'ясопродуктів

Теплофізичні характеристики м'яса вивчалися численними дослідниками в основному окремо – окремо λ , c , α , i або густина ρ , тому результати сильно відрізняються за кожною ТФХ. Ми досліджували комплексно основні ТФХ м'яса та м'ясних продуктів у зв'язку з розробкою фронтального способу холодильної обробки, узагальненням дослідів із варіння шинки, модернізацією скороморозильних агрегатів тощо. Спочатку використовували метод циклів на всьому діапазоні температур, потім лише в зоні найбільш активних фазових перетворень, а в інших зонах – квазістаціонарний метод. Така комбінація дозволяє отримувати забезпечену в метрологічному відношенні інформацію якнайшвидше. Особливого значення тут надавали відтворюваності експерименту та достовірності його результатів. У цьому відношенні показові досліди визначення ТФХ м'яса яловичого методом циклів і комбінованим методом. Наприклад, λ м'яса при $t = 50^\circ\text{C}$ у першому випадку дорівнювала $0,533 \pm 0,006$, у другому – $0,548 \pm 0,011$, при 20°C , відповідно, $0,525 \pm 0,006$ і $0,511 \pm 0,01$ Вт/мК.

Основні експерименти з яловичим і свинячим м'ясом проводили, починаючи від кімнатної температури 20°C , нагріваючи або охолоджуючи зразок (поперек волокон) у квазістаціонарному режимі. При нагріванні витримували теплове навантаження, що відповідає варінню шинки, до $t = 70^\circ\text{C}$, тобто до стану готовності, виявилось можливим вести дослід, не змінюючи режиму. Деякий розкид ТФХ в області $45\text{--}70^\circ\text{C}$ і відхилення від лінійної залежності (рис. 33), можливо, визначаються денатурацією білків м'яса.

При охолодженні теплове навантаження на зразок визначалося умовами повітряного охолодження і заморожування яловичих напівтуш або свинячих туш, але як показав чисельний розрахунок полів q і t і його порівняння з дослідними даними при заморожуванні м'яса в блоках, результати адекватні

ТФХ при більших навантаженнях, що виникають у швидкокомрозильних роторних агрегатах.

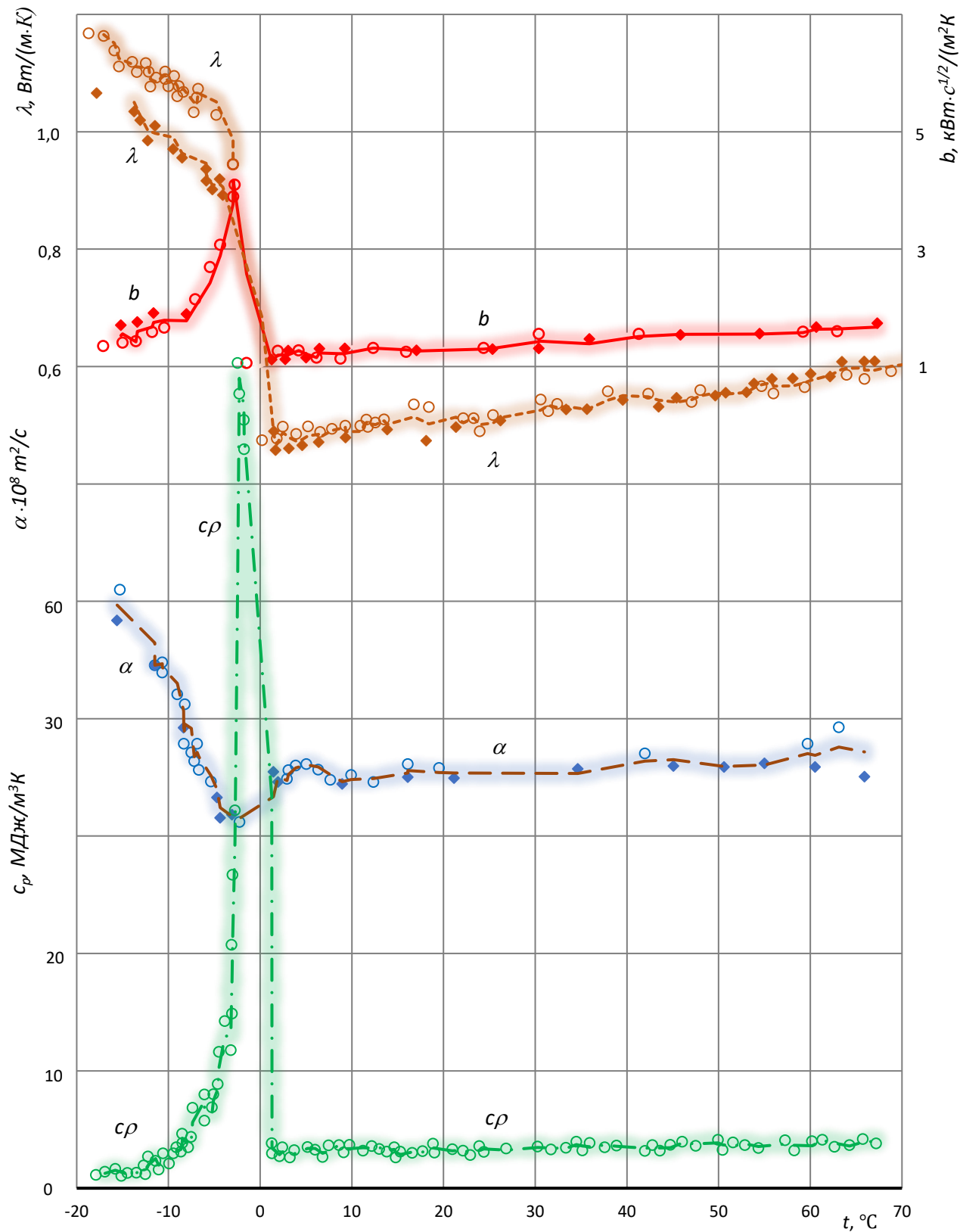


Рис. 33. ТФХ яловичого та свинячого м'яса

У зв'язку з незворотністю процесів теплової обробки м'яса дослідів

визначення ТФХ при охолодженні готового продукту не проводили.

Квазистаціонарний режим охолодження витримували до 0°C або до моменту зриву через затвердіння жиру, потім до -5°C робили цикли з кроком $0,3 \div 1 \text{ K}$ і закінчували до -20°C в квазістаціонарному режимі (рис. 33). Дані ТФХ, отримані при нагріванні і при охолодженні від $+20^{\circ}\text{C}$, а також різними методами, задовільно стикуються між собою (рис. 33). ТФХ одного і того ж зразка, замороженого та розмороженого одноразово, несуттєво відрізняються між собою, тобто гістерезис ТФХ не виявлено.

Залежність $\lambda(t)$ у негативній ділянці підпорядковується закономірності запропонованої Г.Б. Чижовим, $\lambda(t) = A + Bt_{кр}/t$, але починаючи вже з -5°C , вона добре укладається на пряму лінію. Можливо, на результатах наших досліджень позначилося зниження осмотичного тиску зразка через його відносно малу товщину і велику кількість розрізаних клітин. Разом з тим, дані Ленца щодо яловичини 74% вологості, а також Міллера і Сандерленда підтверджують вихід залежності $\lambda(t)$ на пряму, паралельну льоду $\lambda(t)$, починаючи з $-3 \dots -5^{\circ}\text{C}$.

Кількісний збіг отримано з даними Ріделя, а також Шорта та Ульріха при $t = 5 \dots 20^{\circ}\text{C}$. У діапазоні t , що включає область теплової та холодильної обробки, дані по комплексному визначенню λ , c_p , α та b м'яса наводилося вперше (рис. 33). За результатами визначення c_p яловичого та свинячого м'яса ми розраховали залежність $i(t)$ – при $t > 0$, результати вийшли середніми між даними Рютова для свинини та яловичини, рекомендовані як довідкові, а при $t < 0$ – лежать на 10–12% нижче цих даних (рис. 34).

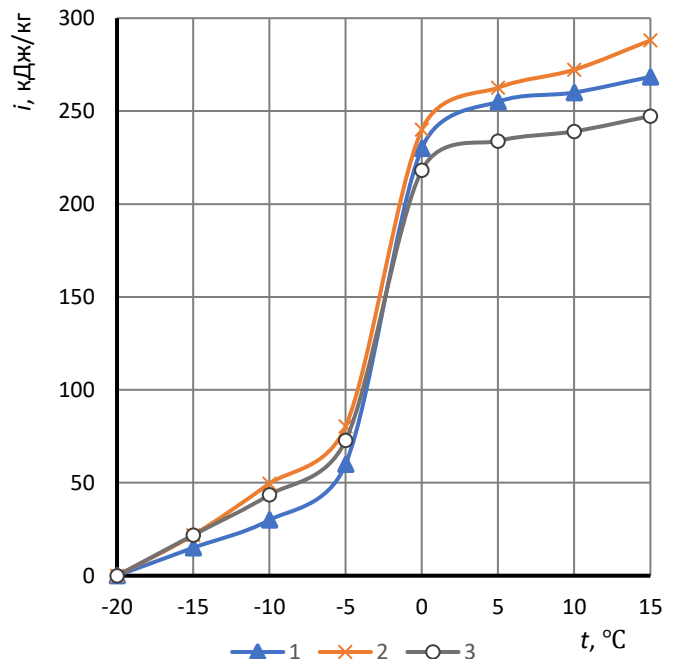


Рис. 34. Ентальпія яловичого та свинячого м'яса

У зв'язку з розробкою нової технології виробництва м'ясо-кісткового борошна було визначено ТФК знежиреної шквари методом циклів.

Шквару, до складу якої входило 90 % м'якої сировини (кудрявка, книжка, м'ясний обріз та інші конфіскати) та 10 % кістки, знежирювали на центрифугі після першого етапу термічної обробки у вакуум-горизонтальному котлі.

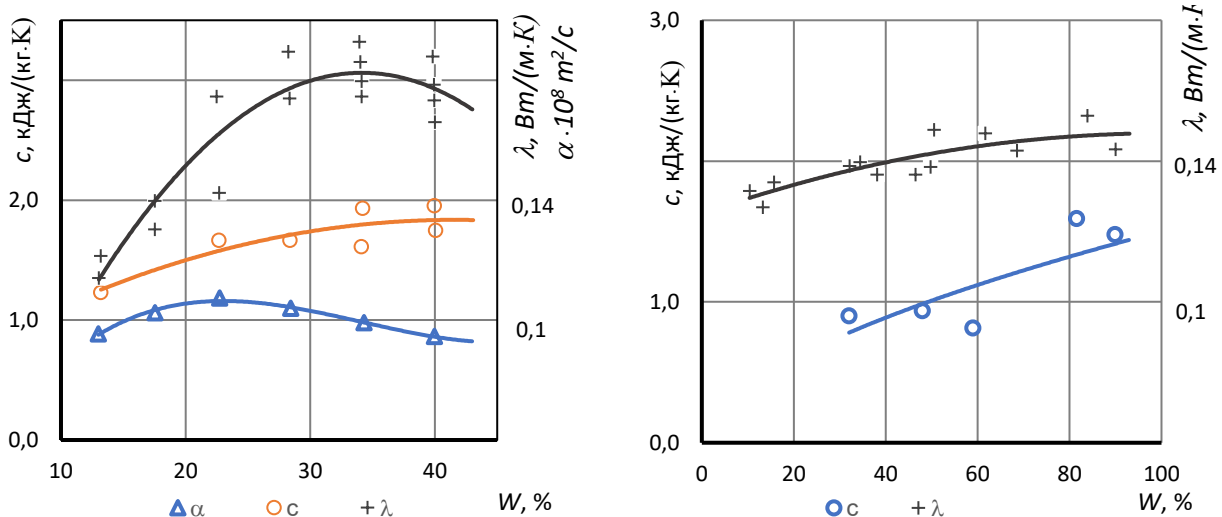


Рис. 35. ТФХ вології шквари

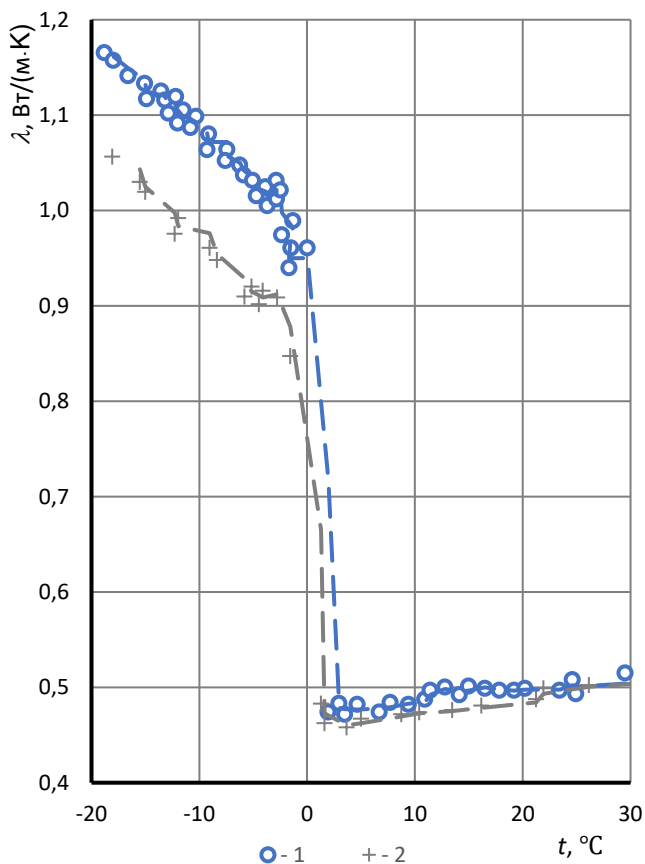


Рис. 36. Результати експериментального визначення коефіцієнта теплопровідності м'яса

Залежності $\lambda(t)$ і $c_p(t)$ визначали на зразках $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$ та $W = 9\%$, а залежності $\lambda(W)$, $c_p(W)$ та $\alpha(W)$ – при температурі від 22 до 28°C (рис. 35). Теплові навантаження на зразки підбирали відповідними конвективним сушінням шквари, щоб вплив термовологопровідності на ефективніше ТФХ був таким же, як в умовах технологічного апарату, що дало можливість використовувати дані для його розрахунку.

На рис. 36 нанесено дослідні дані $\lambda = f(\tau)$ для яловичини 1 та свинини 2 [10], в нижній камері циркулював хладон, а за потребою – вода. На інших установках визначали також об'ємну теплоємність c та температуропровідність a . Узагальнені дані наведено для практичних розрахунків в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1

ТФХ м'яса		
Вид м'яса	Діапазон температур, $t, ^\circ\text{C}$	Параметри
Яловичина	0...70	$\lambda = 0,470 + 0,00156 \cdot t$ $a = 0,256 - 55(516+t)^{-1}$ $c\rho = 3,15 + 0,0061 \cdot t$
Свинина	-20...+2,5	$c\rho = (0,04 \cdot t - 0,074)^{-1}$
Яловичина	-20...+2,5	$\lambda = 0,969 - 0,01 \cdot t$
Свинина	-20...+2,5	$\lambda = 0,856 - 0,001 \cdot t$

7.2. Інтенсивність термічної обробки м'ясопродуктів різними способами

Знизити температуру м'ясних продуктів можна шляхом зменшення їх внутрішньої енергії. Тому для штучного охолодження створюють такі умови, за яких теплова енергія відводиться від продукту та сприймається іншим, більш холодним тілом. Для тривалого охолодження необхідно, щоб сприйняття тепла охолоджуючим тілом відбувалося без підвищення його температури, оскільки інакше температури обох тіл стануть однаковими та охолодження припиниться.

Інтенсивність відведення або підведення теплової енергії визначається поверхневою густиною теплового потоку q , Вт/м², дорівнює кількості теплоти, Дж, що передається через одиницю теплообмінної поверхні, м², за одиницю часу, с. Для технологічних розрахунків користуються рівнянням:

$$q = \alpha \cdot \Delta t \quad (7.1)$$

яке прийнято називати законом або принципом Ньютона. Тут $\Delta t, K$ – різниця температур між поверхнею продукту та холодоносієм за межами його пристінного шару α , Вт/(м²·К) – коефіцієнт конвективного теплообміну, або

тепловіддачі.

Найбільш розповсюдженими термічними обробками м'ясопродуктів є охолодження та заморожування. Температура на поверхні продукту після охолодження не має бути нижче за криоскопічну (це температура початку утворення льоду без переохолодження, для м'ясопродуктів – 1,2...2°C), а в термічному центрі – не вище за +4°C. Охолоджений продукт допускає лише короткострокове зберігання за температури +4°C.

Відомий вплив кристалів льоду, що зростають під час заморожування, на цілісність клітин і витікання з них розчину солей та інших рідких компонентів. Відомо, що чим інтенсивніший процес заморожування, то кристали льоду меншого розміру, менші втрати білкових і екстрактивних речовин із м'ясним соком. Але може виникнути небезпека появи мікроорганізмів на поверхні м'яса, що може призвести до погіршення якості розмороженого продукту.

Розроблені основи проміжного методу холодильного оброблення харчових продуктів – підморожування, процес коли температура продуктів стає нижче за криоскопічну, так, що відбувається часткова кристалізація вологи в поверхневому шарі.

Метою досліджень було – узагальнення інформації, визначення коефіцієнтів тепловіддачі від поверхні м'ясних продуктів до різних теплоносіїв та отримання практичних рекомендацій.

Об'єктом досліджень стали процеси охолодження та заморожування м'ясних продуктів а предметом досліджень – м'ясні продукти: яловичина, язик яловичий та мозок яловичий [12].

Для розрахунків процесів і апаратів холодильного оброблення м'ясної галузі необхідно мати інформацію про величину коефіцієнта тепловіддачі $\alpha = q/\Delta t$ для кожної пари «продукт – теплоносій» з урахуванням залежностей $\alpha = f(\Delta t, q, W...)$. За допомогою тепломірів, розроблених у НУХТ, було одержано інформацію щодо динаміки q та Δt під час дослідження різних способів інтенсивності холодильного оброблення м'ясних продуктів.

Теплометрія продуктів в умовах охолодження за умов вільної конвекції повітря показала, що інтенсивність відведення теплоти залежить також від розмірів зразка та стану його поверхні (зволоженість, жорсткість тощо). На рис. 37 наведено динаміку q під час охолодження зразка яловичини розміром $10 \times 10 \times 8 \text{ см}^3$, яловичого язика 2 та яловичого мозку). Сумарний коефіцієнт тепловіддачі (частина теплової енергії відводиться від зразка випромінюванням та випаровуванням води) змінюється від 12 до $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; для практичних розрахунків можна прийняти $\alpha = 11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

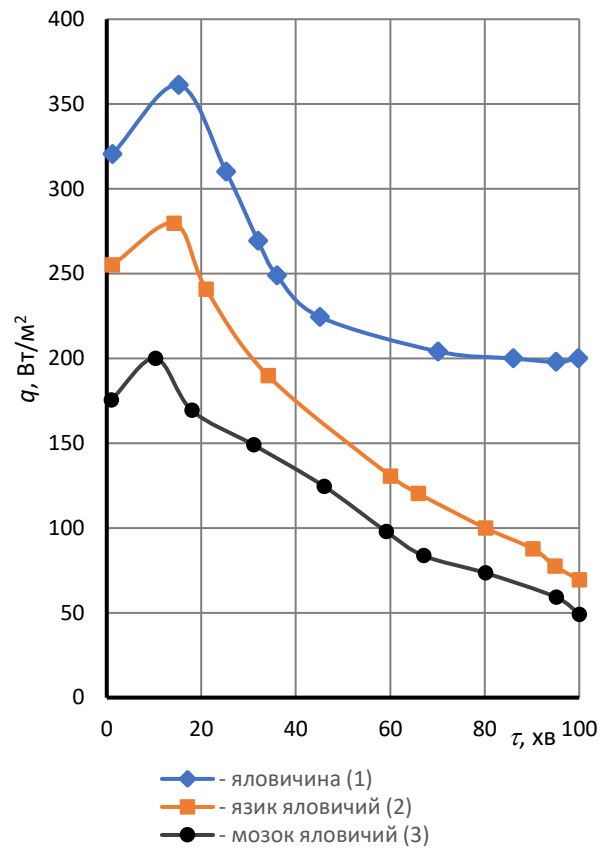


Рис. 37. Теплові потоки під час охолодження

Крива має експоненціальний характер, у системі координат $\tau - \lg q$ (τ – час процесу) вона стає прямою, що підтверджує змінення q і Δt продукту. З рис. 38 бачимо, що на сотій хвилині зразок промерз до термічного центру, отже, процес можна закінчувати.

Вплив температури та швидкості руху повітря на q та τ досліджували під час розроблення раціональних режимів заморожування продуктів із м'ясною начинкою. За умови зниження температури повітря від -20 до -60°C та швидкості 5 м/с τ знижується від 52 до 8 хв, α зростає від 48 до $52 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Зміна швидкості повітря від 3 до 10 м/с привела до зростання α від 36 до $74 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для одержання достатньо дрібних кристалів льоду в продуктах цих значень α недостатньо, тому актуальними є нові способи інтенсифікації процесу заморожування.

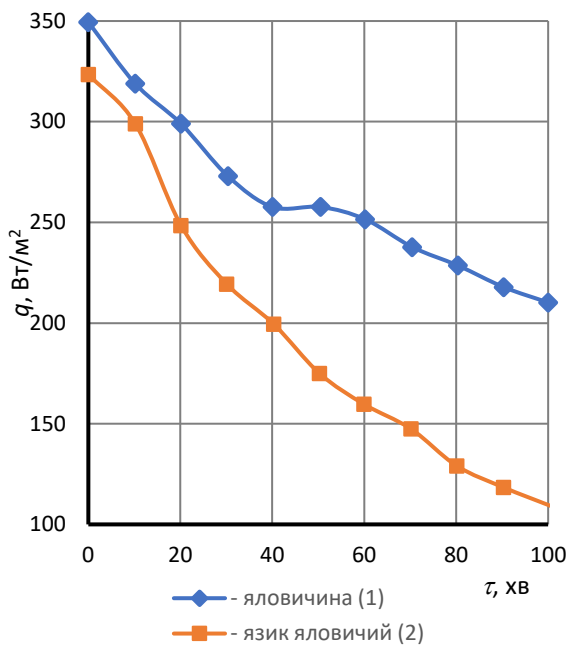


Рис. 38. Теплові потоки під час заморожування

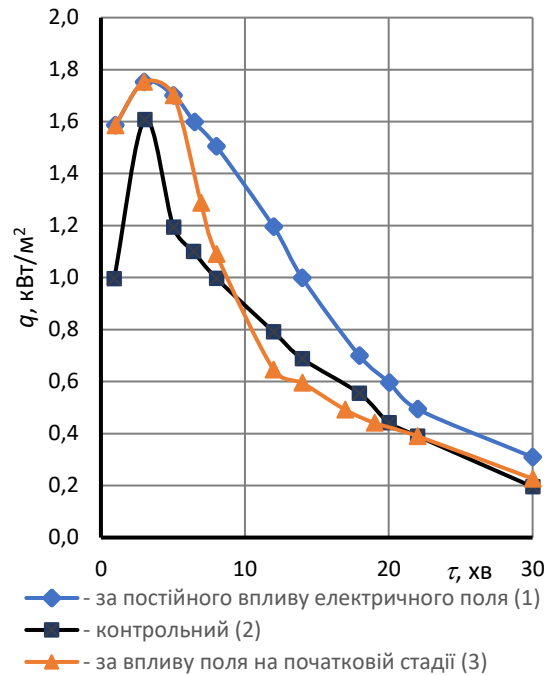


Рис. 39. Зміна інтенсивності тепловідведення під час заморожування брикету м'яса

Дослідження впливу вібрації продукту на τ під час заморожування пластин яловичини завтовшки 7,5 см за $W = 3$ м/с та температури повітря -25°C показало скорочення τ на 12...25%, якщо пластина вібрує з частотою 12...25 Гц та амплітудою 3–5.

Наближено такий ефект дає накладання магнітного поля на продукт, очевидно, за рахунок переорієнтації саркоплазматичних білків і структурних елементів у напрямку вектора напруженості поля. Це збільшує теплопровідність продукту та інтенсифікує зростання кристалів.

Значно більший ефект дає накладання електричного поля (рис. 40). За $t = -40^{\circ}\text{C}$ та $W = 3$ м/с заморожували брикети яловичого фаршу розміром $6 \times 6 \times 2,8$ см³. Електричне поле створювали за допомогою коронуючого та заземленого електродів, установлених паралельно напрямку повітряного потоку.

Напруженість поля змінювали від $2,5 \cdot 10^5$ до $5,5 \cdot 10^5$ В/м. Під дією поля в повітрі та на поверхні продукту утворюються частинки, унаслідок кулонівської взаємодії між ними утворюється «електричний вітер», що може переміщувати повітря біля поверхні та інтенсифікувати тепловідведення. За кілька хвилин

поверхня продукту замерзає, розряджається, «вітер» зникає.

Динаміка q (рис. 40) підтверджує ці міркування – за умови постійної дії поля q може стати на деякий час менше, ніж із поверхні контрольного зразка. Інформація про температуру повітря на поверхні брикету дала можливість установити залежність середнього за процес α від напруженості поля (рис. 40).

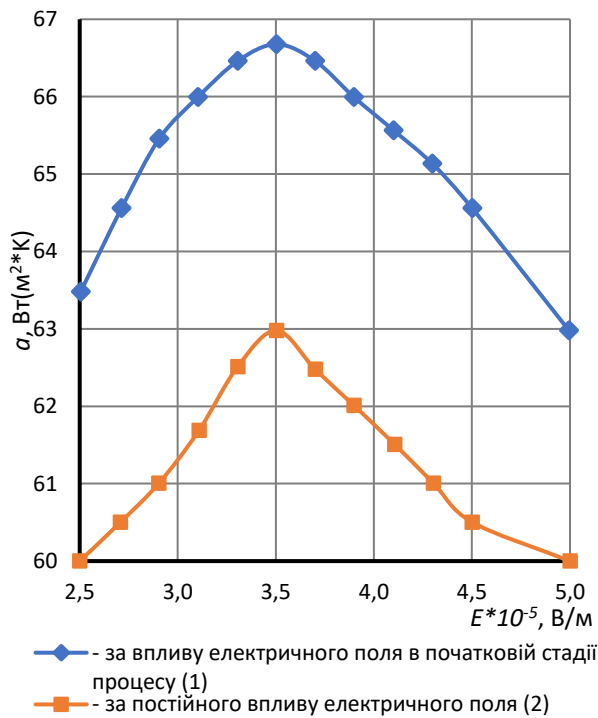


Рис. 40. Залежність зміни коефіцієнта тепловіддачі під час заморожування дослідного зразка

Як бачимо, інтенсифікація процесу є очевидною. Але теоретичні розрахунки показують, що для дослідження оптимальних розмірів кристалів у продукті коефіцієнт тепловіддачі має бути на рівні 500...600 Вт/(м²·К). Тому досліджували криогенні холодоносії, відведення теплоти до яких може супроводжуватися фазовими перетвореннями холодоагента.

Було досліджено заморожування шматків яловичини 10x10x8 см, мозку та гіпофіза в

атмосфері вуглекислоти. У теплоізовованій камері 1 (рис. 41) на дні розміщували сухий лід (CO_2) 2, на перфорований лист – зразки, на інший лист під кришкою – також сухий лід.

Таким чином у замкнутому об'ємі камери утворювалися потоки вуглекислого газу в суміші з повітрям. Температура суміші залежала від кількості закладеного сухого льоду та продукту, а q – ще й від властивостей і розмірів зразка 3. Максимальне значення q для м'яса було 1000 Вт/м², що в тричі більше, ніж під час заморожування в атмосфері повітря (рис. 41). Крива 2 рис. 41 відповідає заморожуванню частки яловичого мозку, 3 – гіпофіза. Кульки гіпофіза укладали в 1 шар у формочки, тепломір щільно притискався до поверхні одного

з них. Безперервне вимірювання Δt дало можливість підрахувати α , його значення змінювалося від 12 Вт/(м²·К) для гіпофіза до 15 Вт/(м²·К) для яловичини та для технологічних розрахунків може бути взятий на рівні 14,5 Вт/(м²·К).

Висновки: засоби теплотерії дозволяють одержувати корисну інформацію для розрахунків дослідження, налагодження та інтенсифікації технологічних процесів; можливості повітряного холодильного оброблення є недостатнім для замороження продуктів високої якості й тому потребують удосконалення, накладання магнітних, електричних полів і механічної вібрації суттєво збільшує інтенсивність холодильного оброблення, але може бути небезпечним та нерентабельним.

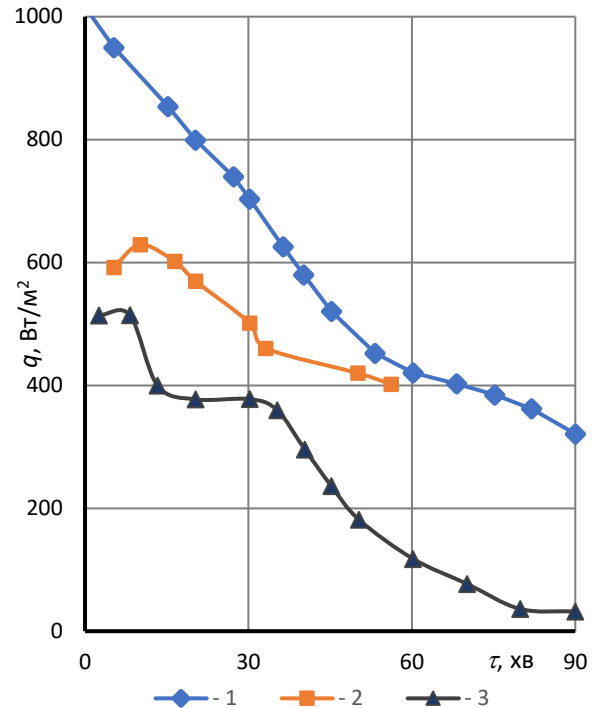


Рис. 41. Заморожування в атмосфері вуглекислоти

7.3. Вплив технологічних факторів на випарну здатність м'яса

Досліди по визначенню впливу швидкості повітря на ε_{np} (рис. 42, а) проводили за умов постійної температури $t_{noc} = 0 \pm 1,5^\circ\text{C}$ і температурі поверхні м'яса 12...15°C, що відповідає середині процесу охолодження напівтуші. Різні ε_{np} при різних W та однакових J вказують на те, що за більше W в поверхневому шарі продукту утворюється прошарок, що утримує випаровування. Це треба враховувати під час створення оптимальних режимів холодильної обробки м'яса, наприклад, на початку процесу збільшувати швидкість повітря.

Під час з'ясування ролі механічної обробки частину дослідів проводили із

зразками без поверхової плівки. Величина ε_n різко зростала і починала знижуватись після досягнення $J = 0,3 \dots 0,5 \text{ кг/м}^2$. Отже плівка зменшує усушку та зберігає якість.

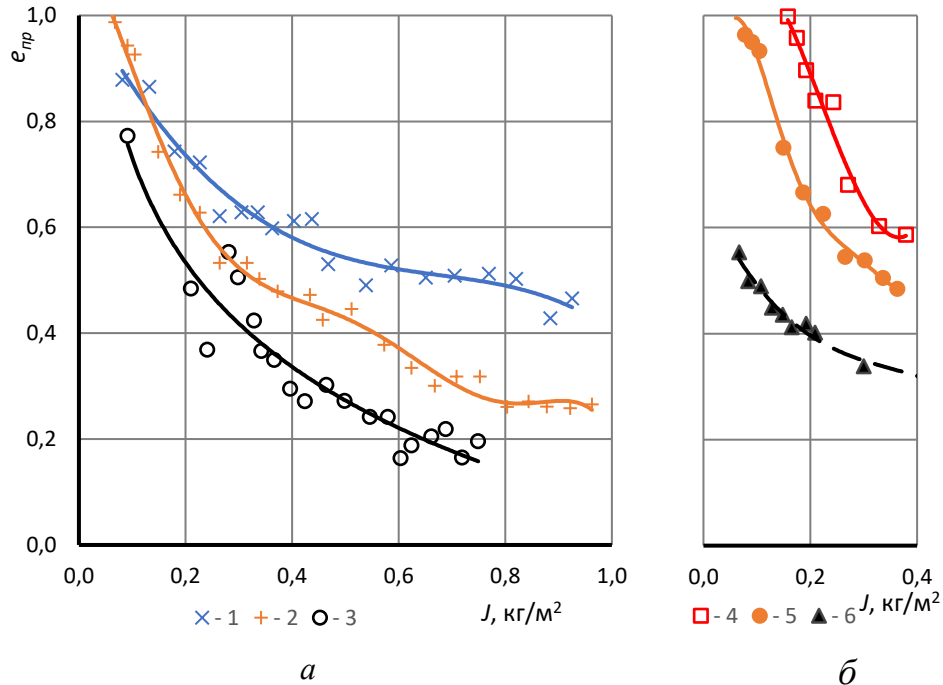


Рис. 42. Вплив швидкості та температури охолоджуючого повітря на випарну здатність м'яса:

1 – $t_b = 15^\circ\text{C}$, $w = 2 \text{ м/с}$; 2 – $t_b = 15^\circ\text{C}$, $w = 4 \text{ м/с}$; 3 – $t_b = 15^\circ\text{C}$, $w = 6 \text{ м/с}$;
4 – $t_b = 4^\circ\text{C}$, $w = 4 \text{ м/с}$; 5 – $t_b = 15^\circ\text{C}$, $w = 4 \text{ м/с}$; 6 – $t_b = 35^\circ\text{C}$, $w = 4 \text{ м/с}$.

Вплив температури поверхні продукту (на рис. 42, б при $v = 4 \text{ кг/с}$) на $\varepsilon_{пр}$ проявився в тому, що в усіх серіях дослідів за більших $t_{нов}$ згаданий прошарок (його можна ототожнити із скоринкою підсихання) утворювався за нижчих значень J , тобто коли поверхня зразка підсихала менше. Це підтверджує вірність вибору високих W на початку холодильної обробки, тобто при більших температурах поверхні продукту.

7.4. Варка шинки в формах

Дослідження варіння шинки в формах проводили в лабораторних та виробничих умовах.

Кількість теплоти, що витрачається на теплову обробку м'ясопродуктів

(обжарювання, варіння тощо) визначається, як і під час холодильної обробки, із балансних співвідношень – за приростом температури продукту та середньою теплоємністю продукту. Остання може збільшуватись за рахунок фазових перетворень, наприклад теплоти плавлення жиру. Різновидом є використання приросту ентальпій сирого м'яса та готової шинки.

Ці методи не дають можливості обрати найбільш доцільний спосіб підведення теплоти до продукту, а також прослідкувати динаміку процесу.

Основними елементами лабораторної установки були дві посудини із нержавіючої сталі овальної форми з максимальною висотою зразка 80 і 44 мм.

Густину теплового потоку q вимірювали тепломіром, що приклеювали з середини до центра днища посудини. Контакт тепломіра з м'ясом забезпечували притисканням кришки до зразку за допомогою чотирьох "барашків" через гумову прокладку.

Температуру в центрі зразка вимірювали мідь-константановою

термопарою, гарячий спай якої вводили в зразок через отвір в кришці, проколюючи гумову прокладку.

Шинка робилась з підсоленої яловичини, вирізався шмат по формі та висоті посудини, пустоти заповнювали малими шматками м'яса. Посудина опускалась повністю в термостат з гарячою водою, температуру якої підтримували на рівні $80 \pm 0,5^\circ\text{C}$. На рис. 43 наведено зміну теплових потоків

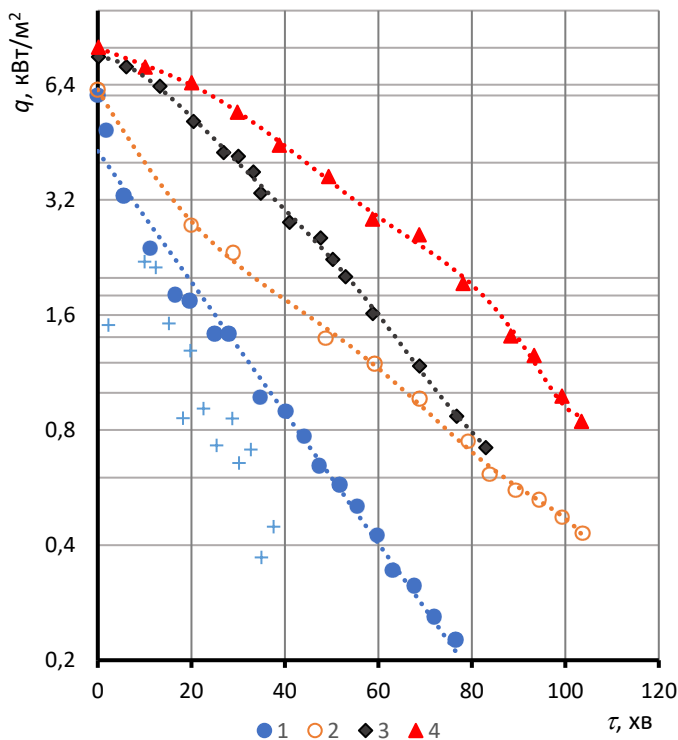


Рис. 43. Характеристики процесу варіння шинки у формах

1, 2 та температури центру 3, 4 для низької та високої форм при завантаженні

м'яса відповідно 220 та 400 г. [8].

Дослідні дані по q даного прямої лінії (ознака регулярності режиму) вже на восьмій хвилині процесу. Різниця температур "вода-центр зразка", тобто "рушійна сила нагрівання", для малої форми теж дає пряму, а для великої – після 80-ї хвилини різко припиняється – причину цього не з'ясовували.

Під час дослідження варіння шинки у виробничих умовах паро-повітряною сумішшю величини q є меншими, ніж при варінні водою, і змінюються стрибками із-за незадовільного перемішування пари та повітря (рис. 43, хрестики). Відсутність чіткої закономірності в динаміці q вказує на необхідність прийняття спеціальних засобів з парозмішування пари та повітря та підтримування її вологості такою, щоб температура поверхні форми з м'ясом-шинкою весь час залишалась нижче за точку роси.

7.5. Дослідження теплотехнологічних характеристик виробництва нових м'ясних паштетів

Моделями паштетів різної обробки і упаковки та їх компонентів під час охолодження служили шматки яловичини розміром $10 \times 10 \times 8$ см³, яловичі язики та долі яловичого мозку. Тепломіри-диски діаметром 12–15 мм і товщиною 1,2–1,5 мм накладали та закріплювали в центральній частині поверхні зразка. Сигнали електрорушійної сили тепломірів, що є пропорційними поверхневій густині теплового потоку q , Вт/м² реєстрували електронним приладом. За камеру охолодження правив замкнутий випарник малої холодильної установки із вільною конвекцією повітря з температурою – 6°C [13].

За 120 хв охолодження (рис. 44) тепловий потік від зразка яловичини знизився з 350 до 200 Вт/м² (зразок 1), язика – від 330 до 70 Вт/м² (зразок 2), долі мозку (зразок 3) – від 330 до 50 Вт/м². Таку нерівномірність теплового навантаження на холодильну установку треба враховувати під час технологічних та апаратурних розрахунків.

На рис. 45 показана динаміка теплового навантаження. Дослідні дані з варіння у воді добре апроксимуються. Це свідчить про те, що має місце регулярний тепловий режим. Для нього теплові розрахунки технологічних процесів значно спрощуються.

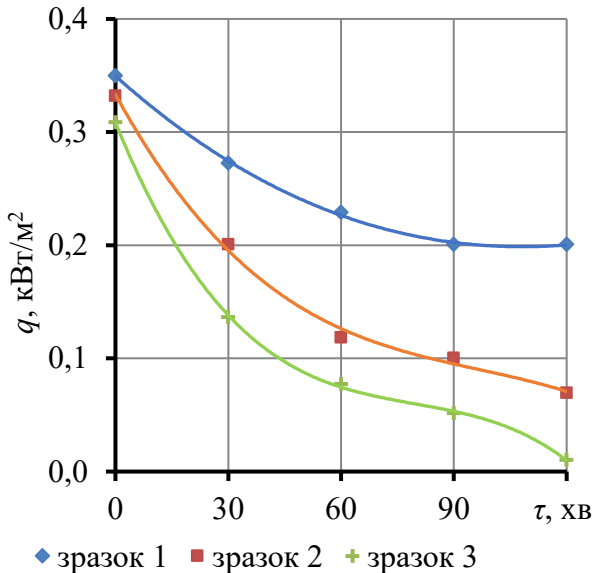


Рис. 44. Тепловий потік при охолодженні моделей пащтетів

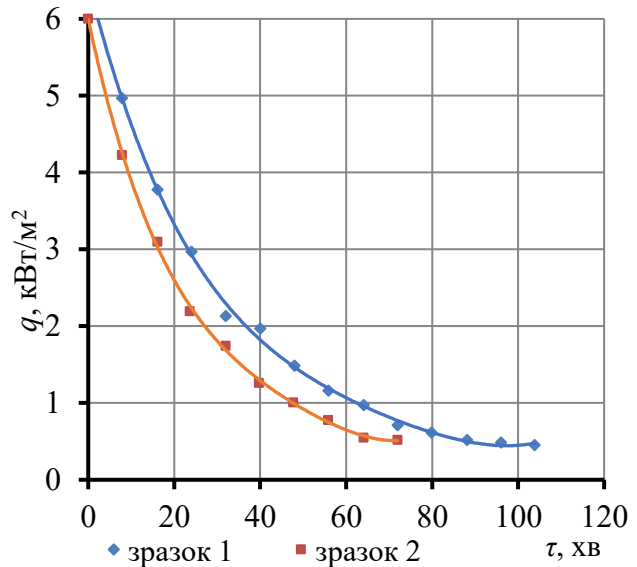


Рис. 45. Динаміка теплового навантаження під час варіння моделей пащтетів

Динаміку теплового навантаження під час варіння м'ясопродуктів вивчали із зразками в посудинах овальної форми з нержавіючої сталі. Товщина зразків становить 80 мм (зразок 1) або 44 мм (зразок 2), вага зразків становила відповідно 400 та 200 г. Заповнена посуда герметично закривалася.

Варили зразки в термокамері пароповітряною сумішшю з температурою 80–82°C.

Під час варіння пароповітряною сумішшю теплове навантаження змінюється стрибками через незадовільне перемішування пари і повітря: тепловіддача від пари, що конденсується на посудині значно більша, аніж від гарячого повітря.

Послідовність технологічних операцій під час виробництва пащтетів включала підготовку м'ясної сировини, приготування фаршу. Основну та допоміжну сировину кутерували 8–12 хв, готову пащтетну масу наповнили в оболонки та зв'язали батони. Термічна обробка включала в себе варіння при

$t = 85\text{--}90^\circ\text{C}$ та $\tau = 120\text{--}180$ хв, до t в центрі батона $71 \pm 1^\circ\text{C}$. Охолоджували батони при $t = 8\text{--}10^\circ\text{C}$, $\tau = 10\text{--}30$ хв.

7.6. Удосконалення камер варіння ковбас

Досліджувалися теплові потоки, температури та коефіцієнти тепловіддачі в різних точках універсальної камери при виробленні в ній варених ковбас типу Докторської та Любительської (рис. 46). Рівномірність теплоприпливів до заготовок як у часі, так і в просторі досліджувалась за допомогою тепломірів діаметром 14...25 і товщиною 1,5...2 мм, чутливістю 3...10 мкВ ($\text{Вт}/\text{м}^2$) та інерційністю не більше 10 секунд. У кожен із них вмонтували спай поодинокі МК-термопар, другий спай розташовувався в робочому середовищі агрегату (навпроти датчика) на відстані 2 см від його поверхні. Таким чином, відношення сигналів тепломіра та термопар дає значення локального сумарного коефіцієнта тепловіддачі. Виведення від датчиків комутували за допомогою штекерних роз'ємів та броньованого кабелю на самописний потенціометр ЛЗ-1. Крім мідних дротів, у кабелі було прокладено константановий провід, що у поєднанні з термостатуванням холодного спаю дозволяло вимірювати температуру батона ковбаси чи робочого середовища.

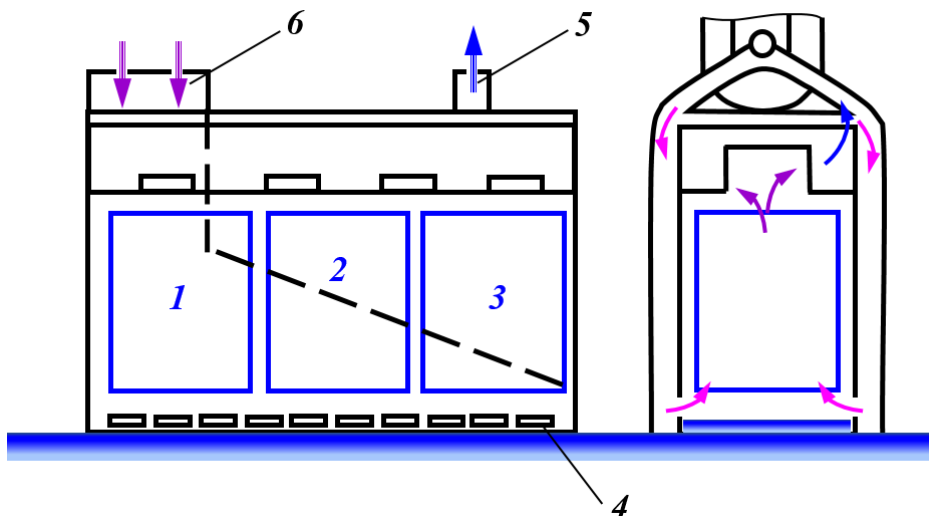


Рис. 46. Схема універсальної камери:

1–3 – рами з продукцією; 4 – сопла для подачі димоповітряної суміші в камеру;
5 – вихід відпрацьованої суміші; 6 – подача гарячого повітря та диму.

Для вимірів відбирали батони однакової маси. Тепломіри закріплювали на зовнішній поверхні половині довжини батона чи під шаром целофану (через малий термічний опір целофану показання таких тепломірів практично збігалися). Потім батони навішували на рами, які завантажували за звичайною нормою ковбасою та поміщали у камеру. Задана програма режиму обробки підтримувалася автоматично (обсмаження 1 год при 105°C, варіння 1,5 год за 80°C).

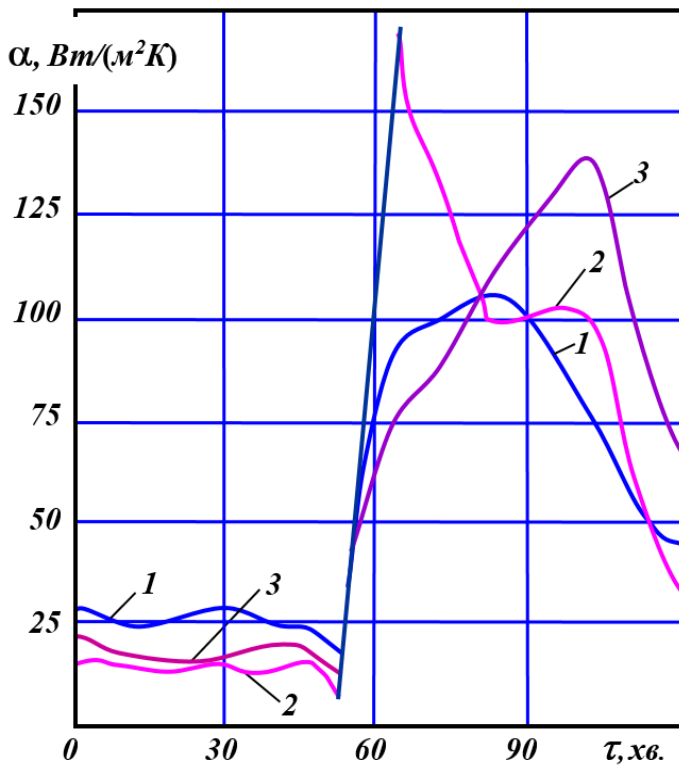


Рис. 47. Коефіцієнти тепловіддачі під час вироблення ковбаси

1–3 – рами з продукцією: 4 – сопла для подачі димоповітряної суміші в камеру; 5 – вихід відпрацьованої суміші; 6 – подача гарячого повітря та

Результати вимірювань показали, що при обсмажуванні теплові потоки та коефіцієнти тепловіддачі в різних точках камери різні. Якщо інтенсивність тепловіддачі до батонів, розташованих у крайніх нижніх рядах рам поблизу сопел, через які вдується димоповітряна суміш, становить 32...38 Вт/(м²·К), то у глибинних рядах вона нерідко знижується до 7...8 Вт/(м²·К).

Зворотний розрахунок за критеріальним рівнянням теплообміну

$Nu = f(Re)$ під час вимушеного обтікання плоских поверхонь дає для першої пари чисел швидкість омивання 3,5...4 м/с, друга пара лежить нижче за рівень коефіцієнта тепловіддачі під час вільної конвекції у великому об'ємі.

Під час варіння пароповітряною сумішшю тепловіддача нестабільна в часі, для будь-якого ряду батонів її інтенсивність змінюється від 15 до 570 Вт/(м²·К), залежно від того, яке середовище омиває в даний момент батон – залишки

димоповітряної суміші, пара, що конденсується або повітря.

Температура в центрі батона після обсмажування в окремих дослідах становила 55°C замість 45...47°C по режимній карті. В кінці варіння задана температура 70...72°C досягається в різних точках камери неодночасно, що в окремих випадках викликає недоварювання продукту або його переварювання з розривом оболонки. Проведено кілька дослідів із завданням параметрів обробки вручну. При цьому вдалося трохи зменшити нерівномірність теплопідведення до батонів. Температуру гріючого середовища в одному з дослідів (ковбаса Любительська) під час обсмажування підтримували на рівні 110°C, завдяки чому час варіння скоротився на 0,5 год без погіршення якості готового продукту. Результати вимірювань у цьому досліді, де досліджувані батони розміщувалися у центрі всіх трьох рам, показано на рис. 47 та рис. 48.

Під час обсмажування теплові потоки спочатку різко зростають (камера заповнюється гарячою сумішшю), а потім плавно зменшуються через підвищення температури поверхні батонів і зниження температурного напору. Коефіцієнти тепловіддачі у часі майже не змінюються. При подачі пари для варіння знову підвищуються теплові потоки у зв'язку із збільшенням коефіцієнта тепловіддачі, а в кінці варіння обидві ці характеристики та температурний напір падають. Як видно з цих рисунків, рама 1 знаходиться в

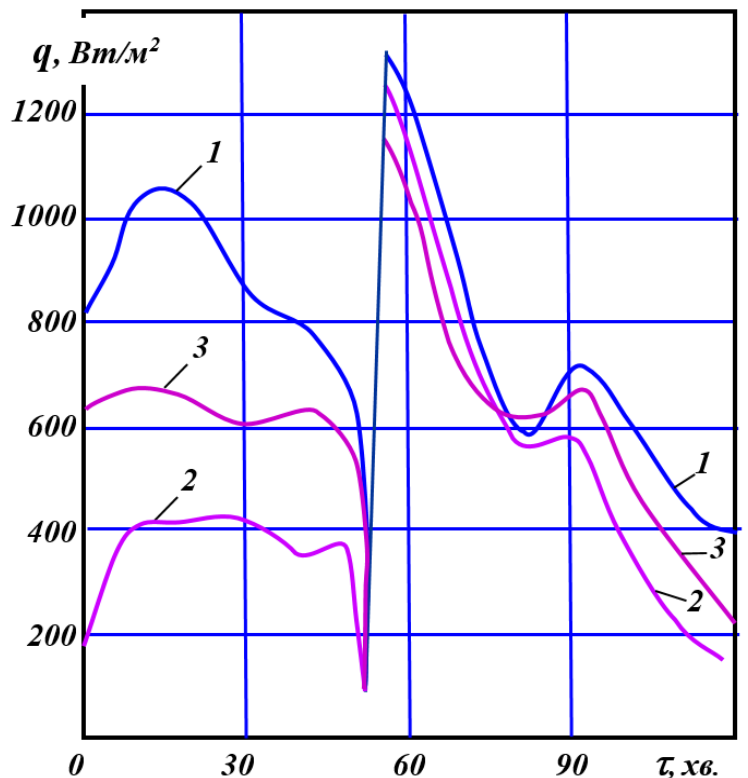


Рис. 48. Графік теплових потоків до батонів ковбаси в процесі обсмажування та варіння
1–3 – рами з продукцією; 4 – сопла для подачі димоповітряної суміші в камеру; 5 – вихід відпрацьованої суміші; 6 – подача гарячого повітря та диму.

більш сприятливих умовах під час обсмажування, що пояснюється тим, що сопла цієї частини камери робочу суміш подають під більшим тиском. Результати роботи можуть бути використані при налагодженні і експлуатації універсальних та комбінованих термокамер.

7.7. Охолодження напівтуші

За допомогою шаруватих тепломірів досліджувались у виробничих умовах охолодження коров'ячих туш [8]. Давачі q і t закріплювали на поверхні напівтуші за допомогою тваринного жиру, що заповнював нерівності поверхні м'яса для зменшення контактного термічного опору. В подальших дослідках закладали давачі під плівку з'єднувальної тканини або тонкий шар м'яса. Для цього робили тангенціальний надріз довжиною 40-50 мм та шириною на 2-3 мм більше за діаметр давача. Природний натяг плівки затискає давач, знижує до мінімуму контактний опір, а також можливу різницю у променистому та конвективному теплообміні давача та поверхні продукту.

Комутація тепломірів і термодатчиків дозволяє розташовувати вторинну апаратуру за межами камери термічного оброблення.

Для з'ясування розподілу тепловтрат напівтуші та вибору найбільш характерних точок, вимірювали розподіл q в різних місцях напівтуші на шостій годині її спокійного охолодження (рис. 49). Ця інформація необхідна для раціонального конструювання приладів охолодження, особливо систем розподілу, оскільки різниця тепловтрат у Вт/м^2 в різних місцях напівтуші надзвичайна.

Як характерні точки були обрані центральні частини стегна, лопатки та ребра. Для цих точок фіксували динамічні залежності $q(\tau)$ на поверхні напівтуші масою 83 кг при тихому охолодженні (рис. 50). На центральній частині стегна було закріплено один біля другого три тепломіра – на поверхні, під плівкою та під шаром м'яса товщиною 1 мм. Їх сигнали під час охолодження давали

практично однакові значення q , тому були узагальнені кривою 1. На лопатці тепловтрати були майже такі, як на стегні (крива 2).

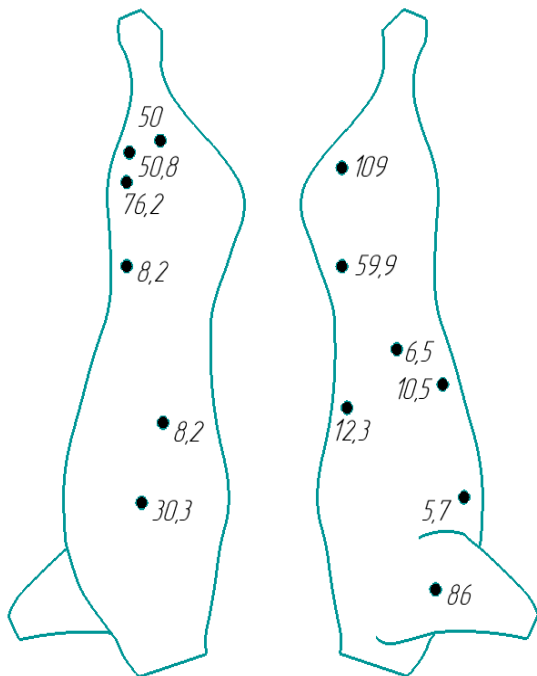


Рис. 49. Розподіл тепловтрат при охолодженні напівтуші по її поверхні

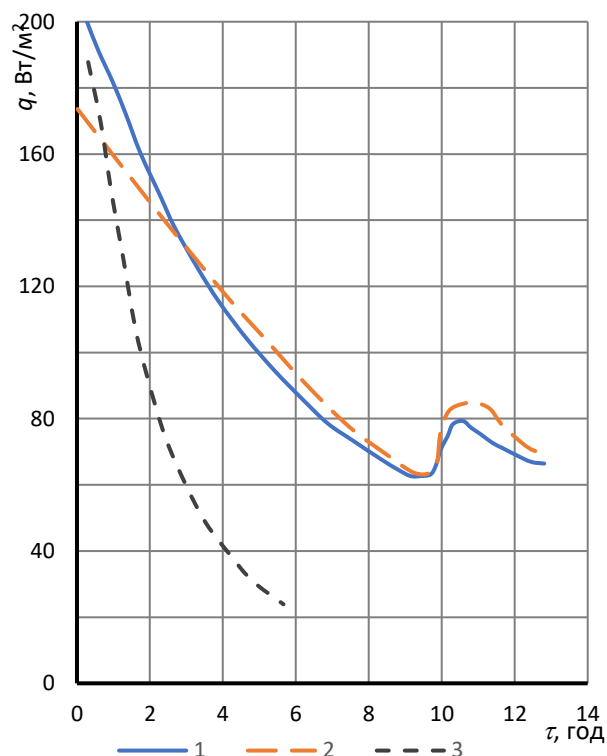


Рис. 50. Тепловідведення при охолодженні яловичих туш

Тонша реберна частка остигла значно раніше (крива 3), тому в подальших дослідах за характерні точки служили центральні частини стегна та лопатки. Через 9 годин 35 хвилин "хазяї" камери включили додаткові компресори, температура повітря в камері зупинилась, на це тепловіри збільшили сигнали (рис. 50) у зв'язку із збільшення $\Delta t = t_n - t_{нов}$, оскільки знизилась температура повітря $t_{нов}$. Таким чином, сигнали тепловірів можна використовувати для дослідження динамічних властивостей системи "компресор-камера охолодження-напівтуша".

7.8. Кінетика заморожування рибопродуктів в блоках

Заморожування у вигляді плоских блоків у пластинчастих морозильних камерах є розповсюдженим способом збереження харчових продуктів, оскільки

дозволяє прискорити процес заморожування, зробити його швидким і механізувати його. Відповідні системи широко використовуються в рибній промисловості, особливо на рибальських судах, а також в м'ясній промисловості. Завдяки розробці нових роторних систем заморожування з інтенсивним відведенням тепла від продукту, цей процес також можна успішно використовувати для заморожування інших харчових продуктів.

Збільшення теплопередачі в цих морозильних камерах ґрунтується на високому коефіцієнті теплопередачі між пластиною та розсолом або холодоагентом, що випаровується, аміаком чи фреоном, які циркулюють у каналах усередині плити. Матеріал плити повинен мати високу теплопровідність, ефективність показали алюмінієві сплави типу АД-31. Виріб розміщується між двома такими пластинами і піддається певному додатковому тиску за допомогою пружин для поліпшення контакту з ними. В результаті час, необхідний для заморожування продукту, скорочується порівняно з системами заморожування потоком повітря, в яких тепло передається потоку холодного повітря, що рухається зі швидкістю близько 5 м/с. Таким чином, час, за який рибні блоки можуть охолоджуватися від +10 °С до –25 °С, скорочується майже до 1/5 для блоку товщиною 40 мм і приблизно до 3/4 для товщини 100 мм.

Тривалість τ_k заморожування продукту в пластинчастих морозильних камерах розраховується за формулою Р. Планка:

$$\tau_k = \frac{l \cdot g \cdot \Delta i}{2(t_{kr} - t_o)} \cdot \left(\frac{l}{4\lambda} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{l}{\alpha} \right) \quad (7.2)$$

де l – товщина блоку виробу, м; g – густина продукту, кг/м³; Δi – різниця ентальпії продукту між початком і кінцем процесу твердіння, ккал/кг; t_{kr} – температура застигання продукту, °С; t_o – температура випаровування холодоагенту, °С; λ – теплопровідність продукту, ккал/м год град; δ_i – товщина пакувального матеріалу і пластини, м; λ_i – теплопровідність пакувального

матеріалу та пластини, ккал/(м·год·град); α – коефіцієнт теплопередачі між пластиною та холодоагентом, ккал/(м²·год·град).

При складанні цієї формули (7.2) було прийнято, що продукт спочатку охолоджений до t_{kr} , ентальпія замороженого продукту дорівнює нулю, а всі значення, крім l і τ_k , залишаються постійними. Спроби аналітичного врахування того факту, що початкова температура продукту вища за температуру затвердіння, призводять до складних і розширених формул, які не використовуються на практиці.

Формули типу (7.2) використовуються для визначення середньої кількості переданої теплоти (густини теплового потоку) q_{sr} в ккал/(м²·год) при заморожуванні блоку з двох сторін, де F являє собою площу контакту продукту і пластин в м². Охолоджувальна потужність холодильних систем, що використовуються для процесу заморожування, визначається на основі величини q_{sr} . Зміна теплообміну в часі часто не враховується, що призводить до збоїв у роботі холодильної системи та збільшення енерговитрат при заморожуванні.

$$q_{rs} = \frac{l \cdot g \cdot \Delta i}{2F \cdot \tau_k} \quad (7.3)$$

Традиційно, при визначенні цієї інформації, наприклад, у рибній промисловості, виходять з кількості тепла, що виділяється рибою, коли вона охолоджується до температури затвердіння, потім із затвердіння води і, нарешті, з переохолодження замороженого продукту. Інтенсивність тепловиділення для цих трьох фаз становить від 1:2:1,5 для повільного заморожування до 1:10:2. Експериментально отримані значення для заморожування хлібобулочних виробів і м'ясних виробів в потоці холодного повітря показують різний процес: спочатку виникають максимальні теплові потоки, потім відбувається сильне зниження в першій фазі, рівномірне зменшення у другій фазі і знову сильне скорочення у третій фазі.

Однак при заморожуванні риби та інших продуктів у пластинчастих

морозильних камерах необхідно зберегти той самий характер зміни теплового потоку. Рушійна сила тепловіддачі – різниця між температурою t_n на поверхні продукту і температурою t_o холодоагенту – спочатку максимальна, але згодом може зменшуватися або залишатися незмінною. Припускаючи, що опір теплопередачі, а саме опір теплопровідності шарів упаковки та пластини, контактний опір на межі між продуктом та упаковкою та між упаковкою та пластинами, а також опір теплопередачі від пластини до холодоагенту – не змінюється в ході процесу τ , відповідно до звичного співвідношення інтенсивність тепловиділення $q(\tau)$ повинна якісно дорівнювати функції $\Delta t(\tau) = t_n - t_o$.

$$q(\tau) = \frac{t_n - t_o}{\sum R_j} \quad (7.4)$$

Кінетику заморожування рибних продуктів досліджували на моделі пластинчастої морозилки. Для таких заповнювачів встановлено емпіричну залежність тривалості τ_{ks} в хв заморожування продукту від $+10\text{ }^\circ\text{C}$ до $-25\text{ }^\circ\text{C}$ від товщини блоку l в мм [14].

$$\tau_k = 0,168 l^{1,545} \quad (7.5)$$

З формул (7.2) і (7.5) випливає, що чим менша товщина l продукту, тим менший період повного заморожування. При цьому в технологічний процес входять також допоміжні операції, тривалість яких залишається незмінною незалежно від товщини виробу (наприклад, зважування, пакування тощо). В результаті впливу на ці операції морозильна камера досягає максимальної продуктивності при певній товщині продукту. Наприклад, така оптимальна товщина для рибних виробів становить 45 мм. Для риби в природному стані представляється доцільним збільшити товщину шару до 60...70 мм. Тому також досліджували кінетику тепловиділення при заморожуванні блоків риби товщиною близько 65 мм.

Для вимірювання теплових потоків використовувалися шаруваті

тепломіри товщиною 1,8 мм і діаметром 14...25 мм, які містили 800...3000 датчиків температури. Щоб забезпечити хороший контакт між тепломіром і рибою, вимірювальний прилад був прикріплений до поверхні тіла риби перед упаковкою риби. Поверх блоку було покладено іншу частину риби, регулюючи товщину рибного шару так, щоб верхня пластина притискала до тепломіра. Температуру риби вимірювали за допомогою термопар і мікротерморезисторів, підключених до моста Уїтстона.

Модель морозильної камери складалася з 2 пластин, які були підключені паралельно до системи охолодження R22 як випарник. Температуру фреону вимірювали в змішувальному апараті, який був вбудований між пластинами та всмоктувальною лінією. Температуру підтримували постійною протягом усього експерименту.

Між плитами горизонтально затискали форму блоку, яка була розрахована на два рибних блоки розмірами 0,79 м х 0,25 м х 0,068 м. Кожен блок наповнювали 10...11 кг балтійських шпрот довжиною 12...16 см кожна. Потім блоки покривали поліетиленовою плівкою товщиною 80 мкм.

По-перше, теплотічильники були розміщені лише посередині нижньої та верхньої поверхонь блоку, тоді як терморезистори були розміщені в геометричному центрі блоків. На рис. 51 наведено типові криві тепловіддачі для даної серії випробувань, в якій холодоагент мав температуру $38^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Це графічне представлення показує всі три фази процесу, для яких співвідношення інтенсивності теплопередачі становило приблизно 1:0,75:0,35. Для порівняння, графічне представлення на основі літературної інформації було включено до того самого зображення.

Тривалість процесу в обох випадках приблизно однакова. Незважаючи на наближений перерахунок інтенсивності тепловіддачі до умов наших дослідів, можна відзначити, що час та інтенсивність тепловіддачі для основної фази замерзання води були приблизно однаковими.

Як видно на рис. 51, протягом усього процесу виділення тепла майже

завжди було більш інтенсивним у верхній частині, ніж у нижній. Всі термічні опори R_j зверху і знизу істотно не відрізняються один від одного, за винятком тепловіддачі до теплоносія. Зверху пластина оточена рідким фреоном у точці вимірювання теплового потоку, і коефіцієнт теплопередачі для холодоагенту вищий, ніж для газоподібного фреону, який обтікає нижню пластину. Це призводить до збільшення опору теплопередачі та зменшення теплового потоку через нижню пластину. Температурні криві для цього експерименту повністю відповідають кривим теплового потоку (рис. 52). Верхня поверхня блоку охолоджується швидше, ніж нижня. Температура в центрі блоку падає повільніше, ніж на двох зовнішніх поверхнях. Це зменшення сповільнюється в основній фазі, але прискорюється в третій фазі через збільшення λ у замороженій рибі.

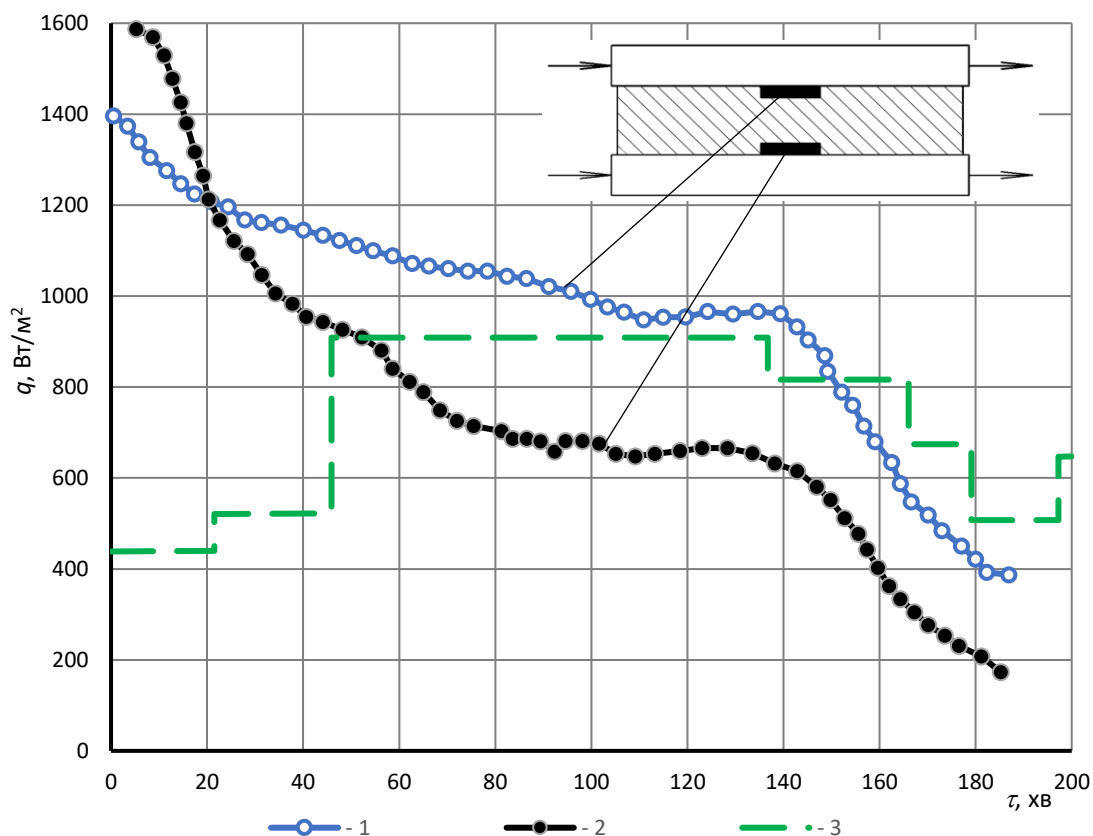


Рис. 51. Кінетичні криві теплових потоків
1 і 2 – експериментальні дані; 3 – розрахункові дані

У цих випробуваннях час охолодження від $+10^{\circ}\text{C}$ до -25°C у центрі блоку перевищував час, розрахований за рівнянням (7.5), на 50-60 відсотків. З цієї причини при підготовці наступної серії дослідів були вжиті заходи щодо

скорочення часу заморожування та щільнішого стиснення блоків та зниження

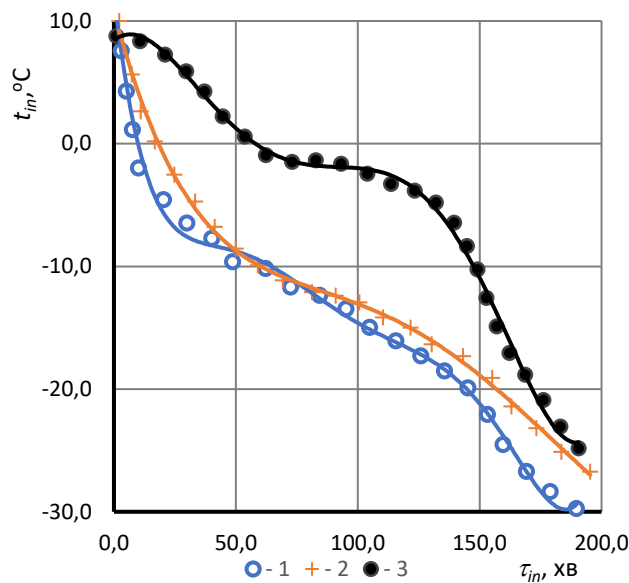


Рис. 52. Зміна температури в рибному блоці при заморожуванні
1 – верхня поверхня; 2 – нижня поверхня;
3 – центр

температури фреону від -40°C до -41°C . В результаті цих заходів період заморозки скорочено до тривалості, розрахованої за (7.5), що відповідає умовам роботи швидкої заморозки.

На рис. 53 показано результати дослідження кінетики теплових потоків одного з експериментів. В обертовому морозильному агрегаті, в якому кожна пластина повільно

повертається у верхнє та нижнє положення приблизно три рази, кінетичні криві теплових потоків для обох пластин, звичайно, приблизно однакові. Тому було необхідно використовувати криві теплового потоку обох пластин для узагальнення експериментальних значень. Таке узагальнення було можливе в безрозмірному представленні $q/q_{sr} = f(\tau/\tau_k)$. На рис. 54 наведена розрахункова кінетична крива теплових потоків у безрозмірних координатах під час замерзання з урахуванням умов, заданих Планком.

У реальних умовах форма кінетичної кривої є складнішою, ніж парабола, зображена на рис. 54. Початкова ділянка охолодження спочатку виглядає неупорядкованою, потім у фазі охолодження виникає експоненціальна залежність, за якою слідує парабола після досягнення температури затвердіння на поверхні блоку. Тут замерзла поверхня починає переохолоджуватися і додається додатковий показник ступеня.

Аналітичний опис повної кривої складний, тому цікаво отримати експериментально узагальнені криві. На рис. 55 показано результати такого узагальнення для двох серій тестів, описаних вище. Використовувалися

значення, які були визначені при вимірюванні теплових потоків з обох сторін блоку на різних відстанях від входу холодоагенту в пластини. Значення q_{sr} було розраховано за допомогою наступного рівняння:

$$q_{sr} = \frac{1}{\tau_k} \int_{\tau} q d\tau \quad (7.6)$$

Інтеграли в цьому рівнянні були визначені планіметричним розрахунком площі під експериментально визначеними кривими $q(\tau)$.

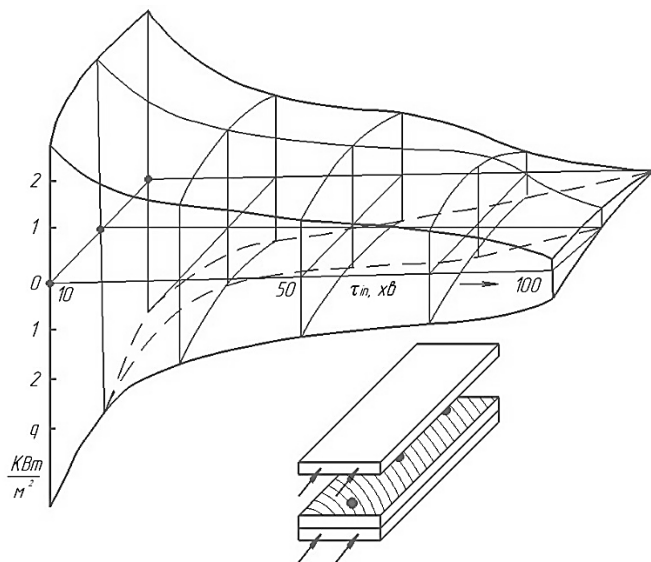


Рис. 53. Виділення тепла від рибного блоку в різних точках поверхні

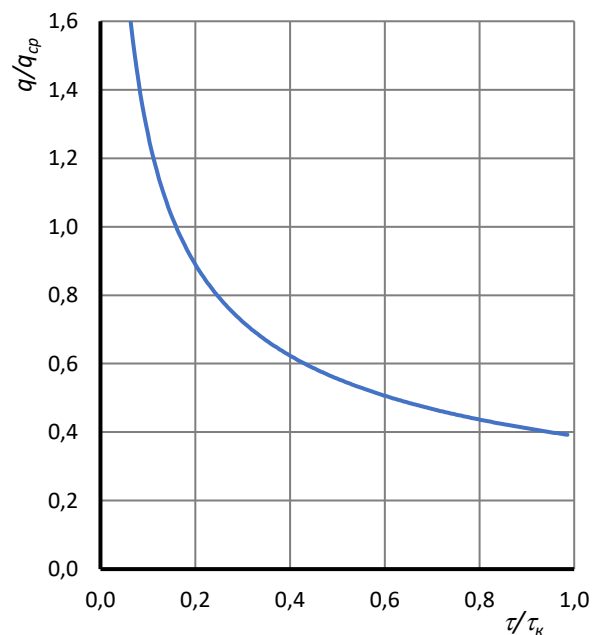


Рис. 54. Тепловиділення від плити при заморожуванні (теоретична крива)

Контрольні точки на рис. 55 згруповані навколо кривої складної природи. З практичних цілей їх можна розбити на три ділянки довжиною $0,25 : 0,5 : 0,25 \tau/\tau_k$ і в межах цих ділянок залежність q/q_{sr} визначити q_{sr} від τ/τ_k лінійно. Це призводить до ламаної лінії замість кривої. Тестові точки розташовані не більше ніж на 10 відсотків від цієї лінії (на початку процесу). Для практичного розрахунку зміни теплового навантаження під час заморожування продуктів у блоках можна припустити, що це навантаження зменшується лінійно з різним нахилом для трьох фаз. При заморожуванні рибних продуктів можна використовувати такі залежності:

$$\begin{aligned}
 \tau/\tau_k &< 0,25; & q/q_{sr} &= 2,0 - 3,2 \tau/\tau_k; \\
 \tau/\tau_k &= 0,25 - 0,75; & q/q_{sr} &= 1,45 - \tau/\tau_k; \\
 \tau/\tau_k &= 0,75 - 1; & q/q_{sr} &= 1,9 - 1,6 \tau/\tau_k;
 \end{aligned}
 \tag{7.7}$$

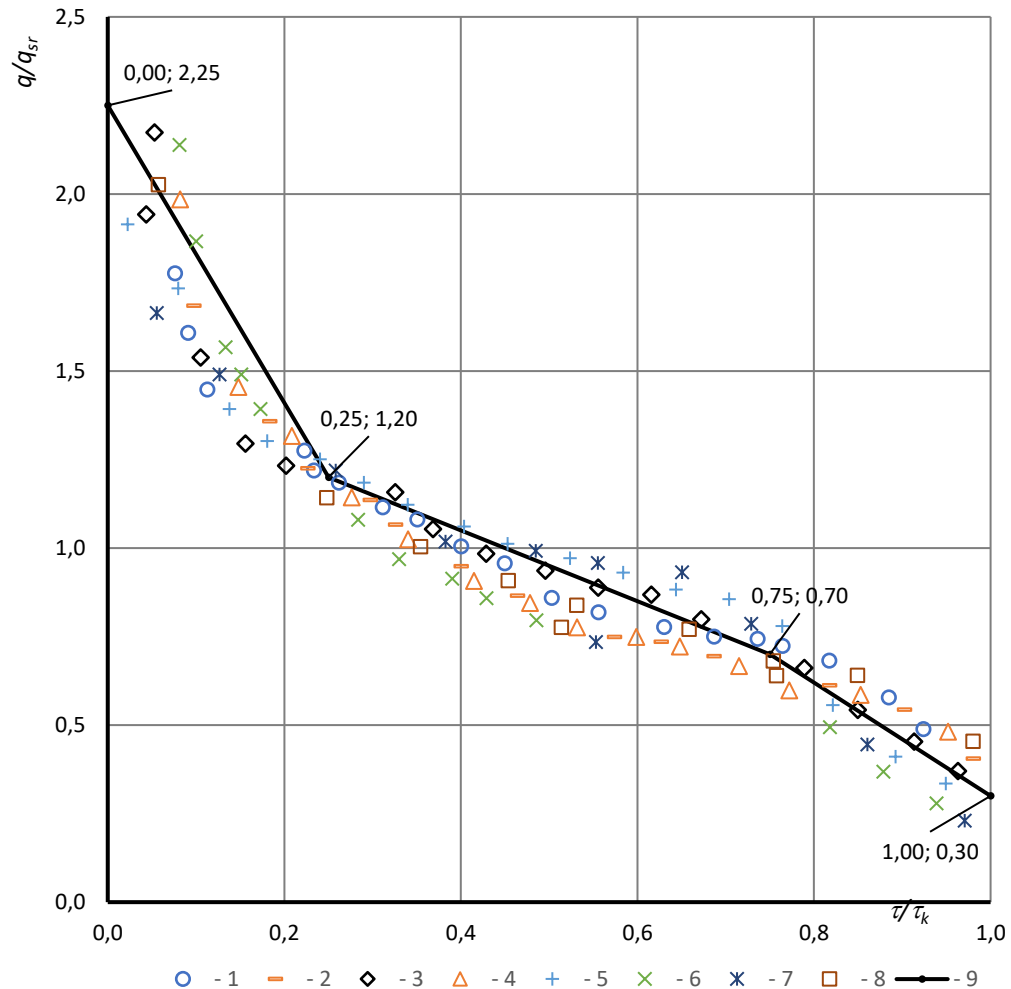


Рис. 55. Узагальнення кінетичної залежності теплового потоку

1 і 3 – у точці входу холодоагенту вище; 2 і 4 – у точці входу холодоагенту нижче; 5 – середина блоку вгорі; 6 – середина блоку внизу; 7 – середніх значень для першої серії дослідів заморожування риби; 8 – значень при заморожуванні пшеничних булочок з використанням процесів, в яких тепло передається шляхом конвекції та випромінювання.

При визначенні теплового потоку q в будь-який момент часу за формулами (7.7) можна розрахувати загальний час замерзання τ_k за формулою (7.5) і середню густину теплового потоку q_{sr} за рівнянням (7.3), беручи визначені значення Δ_i і ρ продукту.

Можливо, що кінетична крива на рис. 55 і її спрощене представлення у вигляді формул (7.7) застосовуються не тільки до блочних агрегатів і рибних

продуктів, але й до інших харчових продуктів при заморожуванні різними методами. Наприклад, лінія значень для заморожування риби в блоках, показана на рис. 55, також відповідає кінетичним значенням, записаним у безрозмірних координатах для заморожування невеликих хлібобулочних виробів з використанням процесів, у яких тепло передається шляхом конвекції та випромінювання.

7.9. Тепловідвід при заморожуванні у повітрі

Інтенсифікувати відведення теплоти при заморожуванні в повітряних апаратах можна шляхом зниження температури охолоджуючого середовища або збільшення швидкості руху.

Вивчення впливу температури та швидкості руху повітря на теплове навантаження та тривалість заморожування із застосуванням теплометричних пристроїв, розроблених авторами, було проведено в МТІММП [9]. У повітряній камері заморожували пироги з м'ясною начинкою (товщина продукту 28 мм) від 20 до -18°C . Встановлено, що при зниженні температури охолоджуючого повітря, від 20 до -60°C при швидкості руху 5 м/с тривалість заморожування продукту скорочується від 52 до 8 хв. При цьому коефіцієнт тепловіддачі збільшується, мабуть, внаслідок вільної конвекції від 48 до 52 Вт/(м²К).

Найбільше скорочення тривалості заморожування (в 1,52 рази) та збільшення коефіцієнта тепловіддачі спостерігаються при зниженні температури повітря від -20 до -30°C . При зниженні температури від -30 до -40°C тривалість заморожування зменшується в 1,25 рази, а при зниженні від -40 до -50°C – тільки в 1,12 рази. Враховуючи зростання витрат на виробництво низькотемпературного холоду, дослідники дійшли висновку, що раціональною є температура повітря -40°C . Збільшення коефіцієнта тепловіддачі при цьому позначається на тривалості заморожування меншою мірою, ніж зниження температури охолоджуючого середовища. Найчастіше тепловіддачу повітряних

апаратах інтенсифікують, збільшуючи швидкість руху середовища. Так, зі збільшенням швидкості руху повітря від 3 до 10 м/с коефіцієнт тепловіддачі збільшується від 38 до 74 Вт/(м²К). Водночас зі збільшенням швидкості руху повітря суттєво зростають енерговитрати.

Відповідно до теоретичних розрахунків для інтенсивного заморожування продуктів у блоках коефіцієнт тепловіддачі має бути 500–600 Вт/(м²К). Досягти таких значень у повітряних апаратах внаслідок збільшення швидкості руху охолоджуючого середовища майже неможливо. Тому останніми роками активно розробляються нові фізичні способи інтенсифікації процесу заморожування повітряних камерах. Встановлено, що тривалість заморожування птиці при абсолютному тиску 0,8–1 мПа скорочується приблизно 2–3 рази.

В Одеському технологічному інституті холодильної промисловості (ОТХП) під керівництвом І.Г. Чумака досліджували процес заморожування блоків під час вібрації [9]. В результаті отримали, що тривалість заморожування блоків яловичини товщиною 75 мм при швидкості руху повітря 3 м/с та температурі –23°C скорочується на 12–25%, якщо блок вібрує з частотою 12–25 Гц і амплітудою 3–5 мм.

Перспективним напрямом інтенсифікації теплообмінних процесів повітряних апаратах є розробка способів заморожування в електромагнітному полі.

При заморожуванні м'яса у постійному магнітному полі відбувається орієнтація макромолекул саркоплазматичних білків і структурних елементів у бік вектора напруженості поля. Це інтенсифікує зростання кристалів при виморожуванні води та на 13–20%, збільшує теплопровідність продукту.

З результатів досліджень, проведених в МТІММП [9], випливає, що при заморожуванні в електричному полі значно збільшується коефіцієнт тепловіддачі. У камері при температурі –40°C і швидкості руху повітря 3 м/с заморожували брикети яловичого фаршу розміром 60 X 60 X 28 мм³. Електричне поле створювали за допомогою двох електродів – коронуючого та заземленого, встановлених паралельно напрямку руху повітряного потоку та підключених до

джерела постійного струму. Напруженість поля змінювали в інтервалі від $2,5 \cdot 10^5$ до $5,5 \cdot 10^5$ В/м. При дії електричного поля суттєво інтенсифікується теплообмін у початковій стадії процесу (рис. 56). Так, протягом 6–7 хв після початку заморожування температура поверхні досліджуваного брикету 2 (рис. 56, а) знижувалася зі швидкістю 3,7 К/хв. Швидкість зниження температури поверхні контрольного зразка, який заморожували поза електричним полем, у цей час становила 2,1–2,5 К/хв.

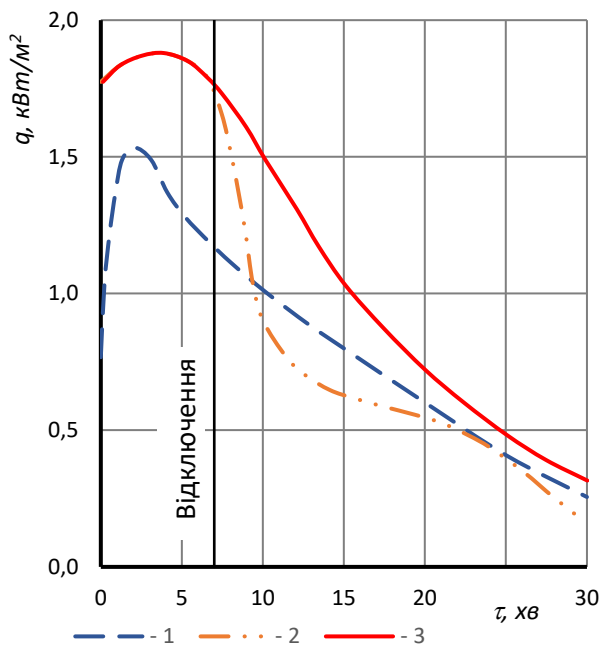


Рис. 56. Зміна та інтенсивність тепловідведення при заморожуванні брикету м'яса

1 – контрольного; 2 – при постійному впливі електричного поля; 3 – при дії поля в початковій стадії процесу

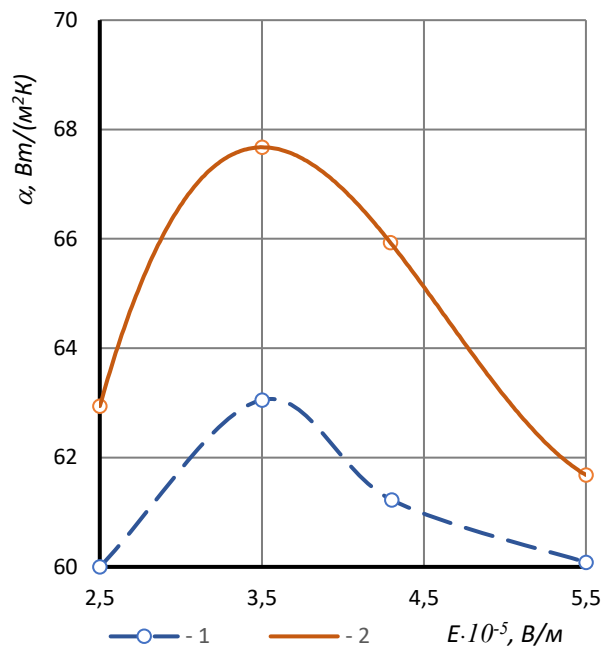


Рис. 57. Залежність зміни середнього за процес коефіцієнта тепловіддачі при заморожуванні брикету м'яса від напруженості електричного поля

1 – при постійному впливі електричного поля; 2 – при впливі електричного поля в початковій стадії процесу

Густина теплового потоку з поверхні зразка, що досліджується, приблизно на 20% більше, ніж контрольного (рис. 56, б). Потім швидкість зміни температури поверхні досліджуваного зразка різко зменшується до 1,5 К/хв, а інтенсивність відведення теплоти стає меншою, ніж для контрольного зразка.

Інтенсифікацію заморожування продукту під впливом електричного поля дослідники пояснюють в такий спосіб. При проходженні між електродами повітря з'являються заряджені частинки. У результаті кулонівської взаємодії заряджених

частинок повітря між собою та із зарядами на поверхні продукту з'являється так званий “електричний вітер”. Він посилює переміщення обсягів повітря поблизу поверхні продукту і тим самим інтенсифікує відведення теплоти. У міру заморожування брикету кількість зарядів з його поверхні зменшується, оскільки зменшується електропровідність продукту. Це послаблює електричний вітер. Вочевидь, що з ослаблення електричного вітру поле доцільно зняти.

Криві 3 (див. рис. 56, а, б) показують зміну температури та густини теплового потоку при заморожуванні брикету фаршу в електричному полі, яке через 6–7 хв після початку обробки було знято. І тут на кривих $t = f(\tau)$ і $q = f(\tau)$ немає різких перегинів. Після зняття електричного поля швидкість зміни температури поверхні продукту залишається досить високою, приблизно 2,4 К/хв. Густина теплового потоку поступово зменшується. За результатами вимірювання густини теплового потоку q та температурного напору Δt розраховували коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = q/\Delta t$ (рис. 57). При відключенні поля через 6–7 хв після початку обробки середній за процес коефіцієнт тепловіддачі на 3–8% вищий, ніж для заморожування за постійного впливу електричного поля.

У табл. 7.2 наведено результати визначення тривалості заморожування та середнього за процес коефіцієнта тепловіддачі в залежності від напруженості поля E , знятого через 6 хв після початку обробки, порівняно з результатами визначення τ_k і α для контрольного блоку–брикету ($E = 0$).

Таблиця 7.2

Тривалість заморожування та коефіцієнт тепловіддачі

Напруженість поля, В/м	Тривалість заморожування, хв	Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²К)
2,8	22	63
3,5	21	68
4,3	21,5	66
5,5	22,5	62
0	25	57

З даних табл. 7.2 та рис. 57 слідує, що з напруженості електричного поля $E = 3,5$ В/м коефіцієнт тепловіддачі найбільший, а тривалість заморожування

найменша. При заморожуванні зразка, розташованого в електричному полі, у початковій стадії процесу коефіцієнт тепловіддачі збільшується на 16% і настільки скорочується тривалість процесу порівняно з контрольним зразком.

7.10. Кріогенне заморожування

Застосування кріогенних рідин, зокрема рідкого азоту, для швидкого заморожування напівфабрикатів, готових страв, а також ендокринно-ферментної та інших видів біологічно цінної сировини вже є рентабельним. У рідкому стані азот нешкідливий, нетоксичний. Теплота випаровування його при атмосферному тиску та температурі $195,8^{\circ}\text{C}$ становить 198 кДж/кг . Дані про теплопровідність, теплоємність та густина рідкого та газоподібного азоту для цих умов наведені в табл. 7.3.

Швидке і глибоке заморожування за допомогою кріогенних рідин призводить до того, що у продукті утворюються кристали льоду дуже малого розміру, які не деформують клітин. У цьому практично припиняються біологічні процеси. Таким чином, виграш у якості продукту компенсує порівняно великі витрати на заморожування. Разом з тим при заморожуванні рідким азотом у продукті утворюються великі градієнти температур і, як наслідок, з'являються внутрішні напруження. Це може спричинити деформацію продукту, його розтріскування. Тому в кріогенних апаратах, як правило, організовують поетапне заморожування. Найчастіше продукт послідовно обробляють газоподібним, рідким, а потім знову газоподібним азотом.

Таблиця 7.3

Теплофізичні властивості азоту

Фізична величина	Рідкий	Газоподібний
Теплопровідність	0,207	0,026
Теплоємність	2,06	1,04
Густина	810	1,15

На першому етапі заморожування в конвеєрному апараті (рис. 58) температура газоподібного азоту знижується приблизно від 0 до $-180 \div -190^{\circ}\text{C}$. Температура на поверхні продукту знижується швидше, ніж у центрі. Тому градієнт температур за товщиною продукту плавно збільшується. На другому етапі заморожування продукт вступає в контакт з рідким азотом – занурюється в рідкий азот або зрошується ним. Різниця між температурами в центрі та на поверхні продукту досягає максимального значення 70–90 К. Потім продукт виходить із зони контакту з рідким азотом. На третьому етапі у разі підвищення температури газоподібного азоту вирівнюється температурне полі продукт доморожується.

З результатів досліджень, проведених в МТІММП [41], впливає, що заморожування продукту з малою товщиною (до 20–25 мм) можна вести в два етапи. Якість продукту не погіршується, якщо він відразу входить у контакт із рідким азотом. При зануренні теплового продукту рідкий азот у продукті виникає дуже нерівномірне температурне поле (рис. 59). Після того, як середня температура продукту досягне заданого рівня, продукт виводять із контакту з рідиною. Вирівнювання температурного поля та доморожування продукту до заданої кінцевої температури ведуть в атмосфері газу.

Вибір раціональних умов кріогенного заморожування складніший, ніж для заморожування в плиткових апаратах, оскільки процес послідовно проводять у двох різних середовищах. У зв'язку з цим є доцільним роздільне вивчення закономірностей заморожування в атмосфері газу і при контакті з киплячою кріогенною рідиною. Такі роботи з використанням методик, розроблених авторами, були проведені в МТІММП. Пластинки м'яса товщиною 20 мм заморожували в газоподібному азоті при температурі $-30 \div -150^{\circ}\text{C}$ шляхом занурення в рідкий азот (імерсійне заморожування), а також при розпиленні рідкого азоту (струменевий вплив). За результатами вимірювань густини теплового потоку, а також різниці між температурами поверхні продукту і середовища розраховували коефіцієнт тепловіддачі.

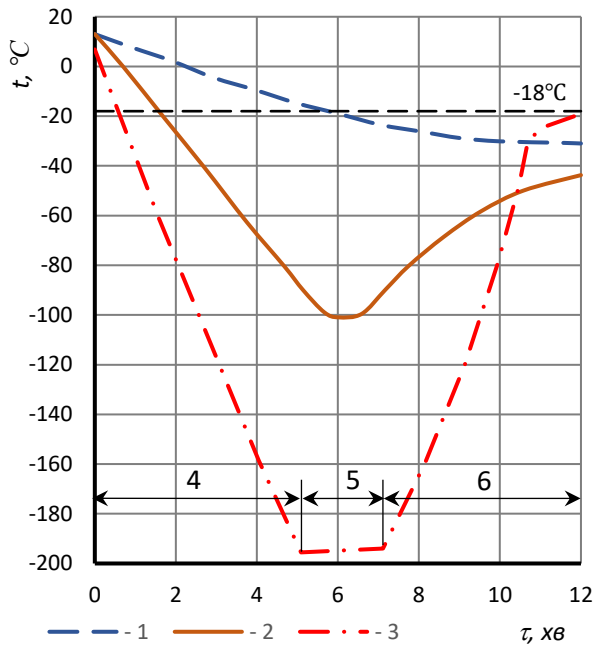


Рис. 58. Зміна температури за довжиною конвеєрного криогенного апарату

1 – у центрі продукту; 2 – на поверхні продукту; 3 – охолоджуючого середовища; 4 – зона попереднього охолодження продукту; 5 – зона на продукт криогенної рідинию; 6 – зона вирівнювання температури продукту

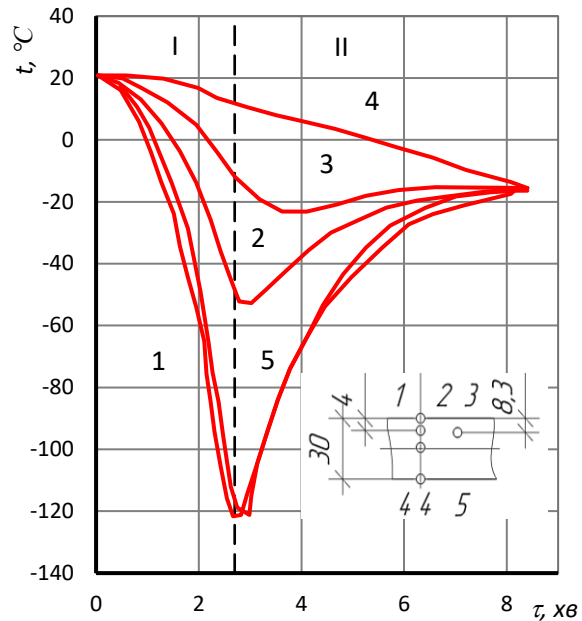


Рис. 59. Схема розташування термопар та зміна температури по шарах блоку при криогенному заморожуванні

I – зона на продукт криогенної рідинию; II – зона вирівнювання температурного поля продукту

При заморожуванні в умовах природної конвекції газоподібного азоту кінетичні криві густини теплового потоку мають такий самий вигляд, що і при заморожуванні в плиткових апаратах та в атмосфері повітря. Однак теплове навантаження має вищий рівень. Так, залежно від температури середовища, максимальна густина теплового потоку на початку процесу була від 1 до 4 кВт/м². До кінця заморожування інтенсивність тепловідведення зменшувалася до 0,1–0,2 кВт/м². З експериментів випливає, що з пониженням температури середовища від –30 до –150°C середній за процес коефіцієнт тепловіддачі збільшується від 22 до 30 Вт/(м²·К).

При заморожуванні продукту в контакт з рідким азотом інтенсивність відведення теплоти з 1 м² поверхні продукту обчислюється десятками кіловат, а тривалість процесу скорочується за кілька хвилин. З експериментальних даних випливає, що середній за процес коефіцієнт тепловіддачі при струминному впливі рідким азотом на 20% нижче, ніж при імерсійному заморожуванні.

Приблизні величини α при імерсійному заморожуванні $600 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, при струминному впливі $-500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

Як відомо, збільшення коефіцієнта тепловіддачі від 500 до $600 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ не дає суттєвого скорочення тривалості заморожування. Тому, враховуючи, що при струминному заморожуванні витрата азоту менше, ніж при імерсійному, і не потрібні спеціальні заходи щодо забезпечення правил безпеки (наприклад, суворий контроль рівня рідкого азоту та концентрації кисню в апараті), цей спосіб заморожування слід визнати раціональнішим.

На рис. 60 наведено типові криві зміни густини теплового потоку, температури в центрі та на поверхні об'єкта, а також коефіцієнта тепловіддачі при струминному впливі рідким азотом. Протягом перших $20\text{--}30$ с густина теплового потоку різко збільшується від 0 до $45\text{--}50 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Потім характер кривої $q = f(\tau)$ аналогічний кривим тепловідведення при заморожуванні блоків у плиткових та газових апаратах. Наявність початкової ділянки тривалістю $20\text{--}30$ с не є особливістю кінетичних кривих $q = f(\tau)$ при струминному впливі рідким азотом. Подібні ділянки можна отримати для заморожування у плиткових та газових апаратах. Вся справа в тому, що прийняти за початок процесу. В даному випадку за початок процесу прийнято момент подачі рідкого азоту в камеру заморожування. Необхідний час для зниження температури середовища в камері, в даному випадку – $20\text{--}30$ с.

Одночасно зі зниженням температури середовища в камері дещо

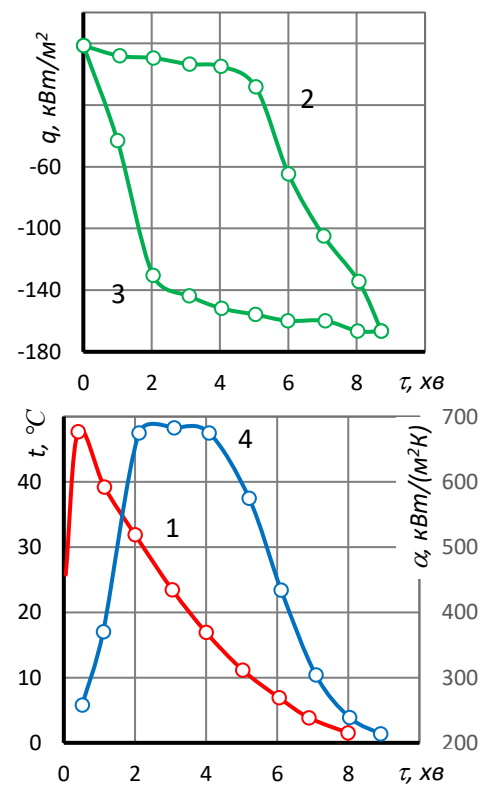


Рис. 60. Зміна теплофізичних характеристик процесу заморожування продукту при струминному впливі рідким азотом

1 – густини теплового потоку; 2 – температури у центрі блоку; 3 – температури на поверхні блоку; 4 – коефіцієнта тепловіддачі

знижується температура продукту, тому густина теплового потоку $45\text{--}50 \text{ кВт/м}^2$ не вважається максимальною. Якщо припустити, що теплий продукт досить швидко подається у вже охолоджений апарат і відразу вступає в контакт з рідким азотом, то максимальна густина теплового потоку на початку процесу може досягти рівня, що має місце при імерсійному заморожуванні, тобто $110\text{--}130 \text{ кВт/м}^2$.

Вид кривої (див. рис. 60), що характеризує зміну коефіцієнта тепловіддачі від продукту до струмків азоту, свідчить про те, що швидкості зміни густини теплового потоку і температурного напору в системі поверхня продукту – середовище, що охолоджує, в процесі заморожування неоднакові між собою, а рівень – про те, що необхідні подальші розробки соплових апаратів для струминної обробки поверхні блоку. Складні гідродинамічні умови струминного омивання поверхні тут супроводжуються різними видами кипіння (плівкове, бульбашкове).

Можливе відведення теплоти без зміни агрегатного стану як рідким, так і пароподібним азотом. Для вирішення задачі максимальної інтенсифікації процесу заморожування з використанням рідкого азоту доцільно використовувати теплометричні пристрої, оскільки іншими засобами дуже важко отримати інформацію про теплове навантаження, температурний перепад і величину коефіцієнта тепловіддачі.

7.11. Розморожування блоків

З теплофізичної точки зору розморожування – це процес переходу води продукту із кристалічного стану в рідкий. При фазовому переході виділяється теплота плавлення. Теоретично він протікає при постійній температурі, що дорівнює криоскопічній температурі продукту. На практиці під розморожуванням зазвичай розуміють процес нагрівання продукту від температури зберігання в замороженому стані до необхідної (вище за

кріоскопічну температуру) для виконання технологічних операцій з подальшої переробки продукту або його вживання в їжу.

Як правило, розморожування протікає відповідно до зворотної температурної кривої технологічного заморожування, на якій, як і при заморожуванні, можна виділити три стадії.

На першій стадії продукт нагрівається від температури зберігання до кріоскопічної. Температура продукту швидко підвищується, оскільки заморожений продукт має порівняно більшу температуру. Ця стадія розморожування є зворотною по відношенню до стадії доморожування продукту. Поблизу зони кріоскопічної температури темпи росту температури продукту істотно уповільнюються, і далі на температурній кривій виходить "полка". Ця ділянка температурної кривої відповідає власне розморожуванню.

Друга стадія процесу розморожування є зворотною стосовно стадії власне заморожування. Після проходження кріоскопічної зони темпи зростання температури продукту при технологічному розморожуванні знову збільшується. Ця третя стадія технологічного розморожування називається процесом утеплення. Вона є зворотною по відношенню до першої стадії технологічного заморожування – процесу охолодження продукту.

Застосовувані практично способи розморожування блоків продукту можна розділити дві основні групи. До першої групи відносяться традиційні способи нагрівання продуктів, коли тепло підводять до блоку через його поверхню. Джерелами теплової енергії можуть бути повітря, пара, рідина, металева теплообмінна поверхня, різні види випромінювачів. До другої групи відносять способи нагрівання, при яких тепло генерується безпосередньо в товщі блоку. Це звані електрофізичні, чи способи внутрішнього нагрівання продукту.

Тривалість розморожування блоків традиційними способами, так само як і тривалість заморожування, залежить від різниці температур між продуктом і середовищем, що гріє, величини термічного опору переходу гріюче середовище – продукт, товщини блоку і теплофізичних характеристик продукту.

Разом з тим, умови теплоперенесення при розморожуванні блоків відрізняються від умов теплоперенесення при заморожуванні. При інтенсивному заморожуванні теплота від глибинних шарів передається до поверхні блоку через заморожений шар продукту, в той час як при інтенсивному розморожуванні потік теплоти направлений в протилежний бік через розморожений шар. Теплопровідність розмороженого продукту в 2–2,5 рази менша, ніж замороженого, і при великій різниці температур можуть виникнути місцеві перегріву поверхні блоку, що негативно позначиться на якості продукту.

Тому при розморожуванні традиційними способами температуру середовища, що гріє, зазвичай не піднімають вище 20°C для продуктів тваринного походження і вище 40°C для продуктів рослинного походження. Виняток становлять процеси, у яких розморожування поєднується, наприклад, з кулінарною обробкою продукту. У цих випадках температура гріючого середовища може бути суттєво збільшена.

Найбільш часто гріючим середовищем при розморожуванні блоків є повітря. На рис. 61 наведено результати дослідження авторами цієї книги процесу розморожування брикету яловичина 100x100x80 мм³ у спокійному повітрі при температурі 19°C.

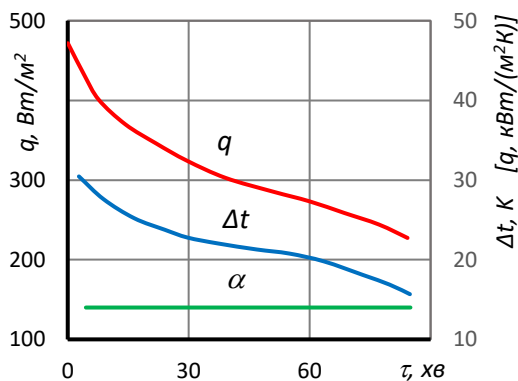


Рис. 61. Залежність теплового потоку та температурного напору від тривалості процесу

Як і заморожуванні, кінетична крива теплових потоків має три зони з різною швидкістю зміни функції. Перша зона з різким падінням густини теплового потоку відповідає часу досягнення криоскопічної температури на поверхні блоку.

У другій зоні швидкість падіння теплових потоків значно менша, ніж у першій. Це пов'язано з виділенням теплоти плавлення. У третій зоні додаткове тепловиділення продукту закінчується і зовнішні теплоприпливи знову зменшуються. Густина теплового потоку та перепад температур за 3 год

розморожування зменшується більш ніж у 2 рази, причому форма кінетичних кривих $q(\tau)$ та $\Delta t(\tau)$ майже збігається. Тому кінетична залежність ефективного коефіцієнта тепловіддачі представляється як пряма горизонтальна лінія.

З результатів дослідів з розморожування брикетів м'яса в спокійному повітрі впливає, що для інженерних розрахунків процесу можна прийняти рівною 12–15 Вт/(м²·К). Ця величина майже вдвічі перевищує значення α , розраховані з рівняння подібності для вільної конвекції. Отже, істотну роль грає променистий теплообмін, навіть якщо немає спеціальних випромінювачів (випромінювачами служили стіни приміщення, в якому проводили досліди з розморожування). Підведення теплоти випромінюванням слід вважати перспективним при розморожуванні, тому що він не викликає усушки продукту.

З метою інтенсифікації розморожування процес зазвичай проводять при вимушеному русі повітря. А.П. Шеффер рекомендує розраховувати коефіцієнт тепловіддачі при вимушеному русі повітря за формулою $Nu = 0,032 \cdot Re^{0,8}$.

Необхідно відмітити, що при збільшенні швидкості повітряного потоку збільшується усушка продукту. Тому доцільно застосовувати повітря із відносною вологістю не нижче 90%. Вплив упаковки блоку також неоднозначний. З одного боку, вона є додатковим термічним опором і її наявність негативно позначається на тривалості процесу. З іншого боку, упаковка перешкоджає усушуванню продукту. Зазвичай блоки продукту, призначеного для промислової переробки, розморожують у незапакованому вигляді. Продукт, який після розморожування є готовим для споживання, розморожують, як правило, в упаковці.

В якості теплоносія при розморожуванні в рідких середовищах зазвичай застосовують воду, а в деяких випадках – 5% розчин кухонної солі. Блоки розморожують зануренням у рідину або зрошенням. Розморожування зрошенням є ефективнішим, хоча й технічно складним способом. Для досягнення максимального ефекту необхідно забезпечити рівномірне зрошення поверхні блоку продукту, що не вдається досягти.

При розморожуванні рідких середовищ рекомендується невелика швидкість руху теплоносія, що не перевищує 0,3 м/с. У рідких середовищах продукти зазвичай розморожують в упакованому вигляді.

Блоки, заморожені в закритих блок-формах або плиткових апаратах, тобто мають строго правильну геометричну форму, можна розморожувати цим способом.

Для розморожування через металеву теплопередавальну поверхню, тобто контактним способом, застосовують пристрої, за конструкцією аналогічні плитковим морозильним апаратам, але як теплоносій використовують воду. З метою зменшення термічного опору переходу вода – продукт плити злегка притискають до блоку. При розморожуванні змінюється густина продукту, тому хоча б одну з плит пристрою необхідно виконувати рухомою. Щоб не викликати додаткового механічного зневоднення продукту в результаті притиску плит, силу притиску в процесі розморожування доводиться плавно зменшувати. Ця обставина суттєво ускладнює конструкцію пристрою. Дане зауваження стосується всіх видів плиткових розморожуючих пристроїв незалежно від орієнтації плит у просторі (горизонтальне, вертикальне, роторне). Справа в тому, що навіть частково розморожений блок, наприклад, м'яса в статичних умовах має механічну міцність, достатню для збереження своєї форми, і самоущільнення при розморожуванні продукту навіть між вертикальними плитами тривалий час може не бути.

Велика товщина блоку при розморожуванні традиційними способами, як і заморожуванні, негативно б'є по тривалості процесу. За даними А.П. Шеффера, тривалість розморожування блоків м'яса товщиною 20, 40 та 80 мм при швидкості руху повітря 1 м/с становить 1,6; 3; 6 год, а при швидкості 4 м/с відповідно 1,1; 2; 4,2 год.

Звідси природним є пошук методів розчленування великих блоків замороженого продукту, призначеного для промислової переробки, на дрібні шматки. Одним із перспективних напрямів цього пошуку є вивчення процесів

подрібнення харчових продуктів при криогенних температурах. При низьких (близько -196°C) температурах тканини більшості харчових продуктів втрачають свої пластичні властивості, стають крихкими і можуть бути подрібнені на спеціальних млинах. Дрібні шматки продукту можна швидко розморозити одним із розглянутих способів.

Електрофізичні способи розморожування, або способи внутрішнього нагрівання, в даний час у промисловій практиці застосовують рідко. Це пояснюється недостатньою вивченістю механізму впливу електромагнітного поля на продукти, недосконалістю наявних зразків устаткування.

На низці рибопереробних підприємств країни для розморожування блоків із дрібної риби застосовують так званий електроконтактний спосіб нагрівання.

Суть цього способу полягає у наступному. Блок риби, що розморожується, надійно включають в електричну мережу змінної напруги промислової частоти. У цьому продукті збуджується електричний струм, що сприяє швидкому виділенню теплоти в об'ємі продукту. Установка електроконтактного розморожування блоків риби складається з ванни, виготовленої з діелектричного матеріалу, в якій циркулює проточна вода. На торцевих стінках ванни розташовані виконані з нержавіючої сталі перфоровані електроди, між якими розміщують блок продукту, що розморожується. Розморожування проводять при напрузі між електродами 380 В. Тривалість розморожування 2–3 хв. Витрата енергії на розморожування одного блоку риби становить 0,8–1,2 кВт·год.

Розморожування у високочастотних установках (мікрохвильове розморожування) застосовують рідше, ніж електроконтактне. При мікрохвильовому розморожуванні блок продукту вміщують у змінне електричне поле між двома металевими пластинами, які приєднують до високочастотного генератора. Вплив поля відбувається за відсутності електричного контакту між електродами та продуктом. При цьому останній швидко розігрівається через безперервне зміщення електричних зарядів в атомах і молекулах. Продукти, що розморожені в мікрохвильових установках, добре зберігають смакові якості.

Продуктивність установок залежить від потужності генераторів. У зв'язку з тим, що використовуються в даний час генератори виготовляють тільки на одну частоту, що відповідає вихідній потужності, питому потужність установок можна практично змінювати, тільки змінюючи напругу живлення. Рациональна робоча частота мікрохвильових установок залежить від товщини блоків, що розморожуються. Зі збільшенням частоти зростає ефективність нагрівання, проте знижується здатність проникнення енергії в глиб продукту. Ступінь поглинання енергії та глибина проникнення електромагнітного випромінювання визначаються також діелектричними властивостями блоку, які неоднакові у замороженого та розмороженого продукту. Через різну поглинальну здатність складових частин продукту (наприклад, м'язової та жирової тканин м'яса) розморожування блоку може проходити нерівномірно. При мікрохвильовому розморожуванні допускається використання пакувальних матеріалів, що мають діелектричні властивості.

7.12. Вакуум-сублімаційна сушка

Цей спосіб консервування харчових продуктів вирізняється від інших тому, що зневоднення продукту відбувається шляхом сублімації, тобто переходу вологи з твердого стану до газуватого, повз рідкий стан, завдяки чому у сухому продукті зберігаються усі цінні властивості замороженої сировини. Великі труднощі для реалізації цього методу – створення глибокого вакууму, тому в Україні він впроваджений лише у фармацевтичній промисловості для сушіння компонентів деяких ліків.

Вакуум-сублімаційну сушку відносять до холодильних процесів, за рахунок заморожування сировини та десублімації водяної пари з льоду, що утворюється з продукту. Для цього треба підводити теплоту до продукту і це є тепловий процес. Для цього використовують променисту енергію від високотемпературних електронагрівачів. Вони займають значну частину об'єму

сушильної камери, тому дослідження сушіння яєчного білка проводили на нових сітчастих електронагрівачах, що є більш компактними та дозволяють більш рівномірно підводити теплоту до продукту.

Один тепломір діаметром 14 мм з вбудованою в нього термopарою вклеювали в центрі металевого листа знизу, другий вморозували навпроти першого в верхню поверхню зразка наприкінці його заморожування лист з продуктом і тепломірами було підвішено до квадратної ваги ВТК-500, що дало можливість відслідкувати кінетику зміни маси зразка під час сушіння. Сітчасті нагрівачі розташовані з обох боків листа паралельно його денцю, їх температуру вимірювали за допомогою термopар, підклеєних до них так, щоб уникнути електричного контакту між ними [15].

На рис. 62 наведено результати досліду з товщиною яєчного білка 5 мм. Величини q зверху та знизу склалися для порівняння з розрахованим q за законом Стефана-Больцмана [3]

$$q = \sum_1^2 \varphi \varepsilon_{зв} \sigma (T_{ен}^4 - T_{зр}^4) \quad (7.8)$$

де φ – кутовий коефіцієнт з врахуванням розмірів електронагрівника і листа із зразком; $\varepsilon_{зв}$ – зведений ступінь чорноти системи "електронагрівник-нижня поверхня листа або верхня поверхня продукту; $T_{ен}$ та $T_{зр}$ – абсолютні температури поверхонь електронагрівачів та поверхні продукту; σ – константа Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{K}^4\text{)}$.

Як бачимо з рис. 62, виміряні та розраховані за (1) значення q лягають на одну динамічну криву (верхню).

Спроба обчислення q за показниками ваги

$$q = \frac{\Delta m \cdot r}{F} \quad (7.9)$$

де Δm – секундний убуток маси зразка, кг/с; r – теплота випаровування, Дж/кг²; F – поверхня зразка м².

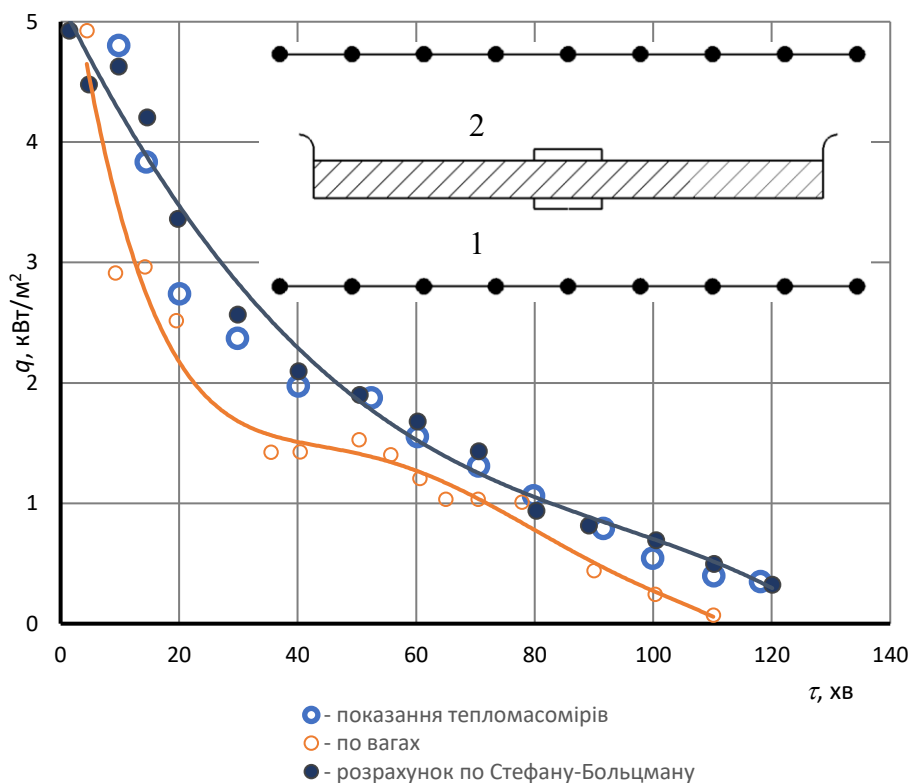


Рис. 62. Сублімаційне сушіння яєчного білка в шарі товщиною 5 мм

Крива 2 лежить нижче ніж 1, але еквівалентна їй, отже різниця викликана систематичною похибкою, можливо замість r треба ставити різницю ентальпій, до та після досліду Δm , але для цього не було надійних табличних даних.

За допомогою тепломірів, розроблених в КТІХП-НУХТ, Одеському НПК НДІ розроблені прилади безконтактного вимірювання температури поверхні продукту і десубліматора, в інших містах – для визначення рівномірності поверхні десубліматора та рівня хладагента в ньому [3].

РОЗДІЛ 8. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ

8.1. Продукти молочного виробництва

Інформація про ефективні ТФХ молока та молочних продуктів суперечлива, це пов'язано з високою лабільністю та неоднорідним складом зразків. Були виконані дослідження щодо створення високопродуктивних установок для вироблення вершкового масла в частині визначення ТФХ, тому основними об'єктами дослідження були вершки, молочний жир та знежирене молоко. Дослідження підтвердили можливість розглянути вершки як нереагуючу суміш жиру та знежиреного молока, це важливо для опису їх властивостей.

Вологість зразків молочного жиру не перевищувала 0,3 %, йодне число (Й.Ч.) змінювалося від 30,8 до 41,9, основні дослід з Й.Ч = 37,0. У зв'язку з лабільністю більшості компонентів жиру його ТФХ досліджували комбінованим методом при повільному охолодженні зі швидкістю близько $3 \cdot 10^{-3}$ К/с зразка з розплавленого стану при 70°C, а також при нагріванні з такою ж швидкістю зразка, швидко охолодженого до – 80°C.

Коефіцієнт теплопровідності твердого молочного жиру (рис. 63), як і інших неметалічних матеріалів, зростає з підвищенням t і не залежить від режиму обробки і від Й.Ч. Ці фактори починають впливати на λ разом з плавленням окремих фракцій – в режимі нагріву ефективна λ менше, ніж у режимі охолодження – має місце тепловий гістерезис, різниця в λ максимальна в районі 0°C і досягає 10 %. Гістерезис по λ не можна пояснити лише інерційністю системи, оскільки метод циклів передбачає суворе витримування стаціонарного режиму – мабуть, при плавленні рідкі фракції інакше розташовуються у твердому жирі, ніж при затвердінні.

При досягненні 10–15°C рідка фаза починає переважати, і зі збільшенням зменшується, вплив режиму обробки і передісторії процесу знову зникає.

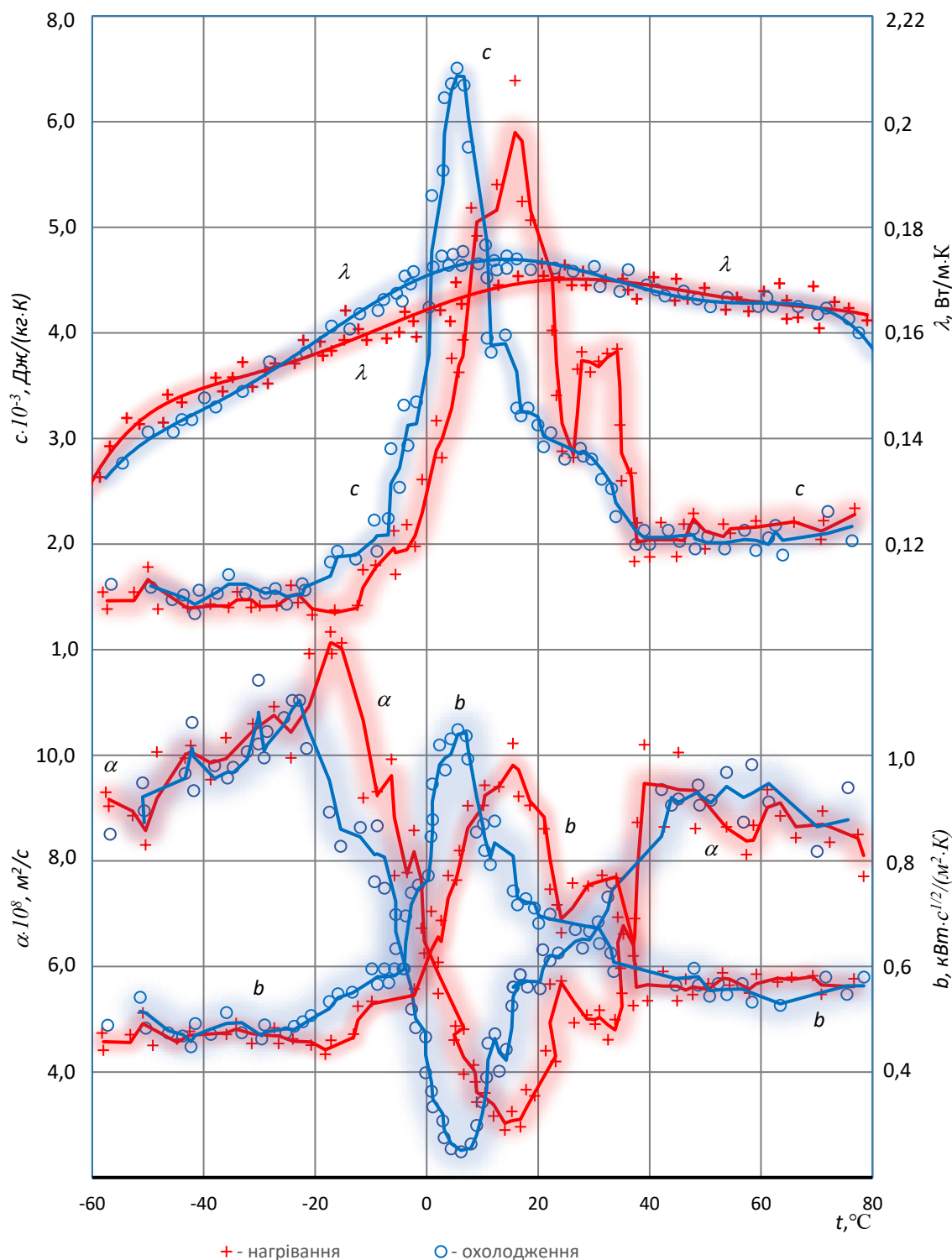


Рис. 63. ТФХ молочного жиру

Теплоємність твердого жиру практично однакова і у діапазоні $-75... -25^{\circ}\text{C}$ становить $1,468 \pm 0,099$ кДж/кг·К (рис. 63). У діапазоні $-25... +37^{\circ}\text{C}$ в ефективну c включена теплота фазових і структурних перетворень, це призвело до появи двох циклів – близько 6 кДж/кг·К при 15°C і 3,7 при 30°C . Гістерезис по

теплоємності проявляється у зміщенні піків та різної їх висоти. Додаткові дослідження жиру з $\text{Й.Ч} = 30,8$ та $41,9$ показали, що гістерезис залежить від стану жиру. Отже, при плавленні і затвердінні утворюються комплекси з різною енергією зв'язку, що і проявляється у величині ефективної теплоємності.

На характер залежності $\alpha(t)$ та $b(t)$, природно, впливає підвищення основних ТФГ λ , c та ρ (рис. 63). Другий компонент вершків – знежирене молоко – при нормальній концентрації сухих речовин близько $0,09$ кг/кг має ТФХ, близькі до ТФХ води. У зв'язку з необхідністю розрахунку процесів згущення знежиреного молока встановлено залежність ТФХ знежиреного молока від вмісту сухих речовин ϕ кг/кг (рис. 64).

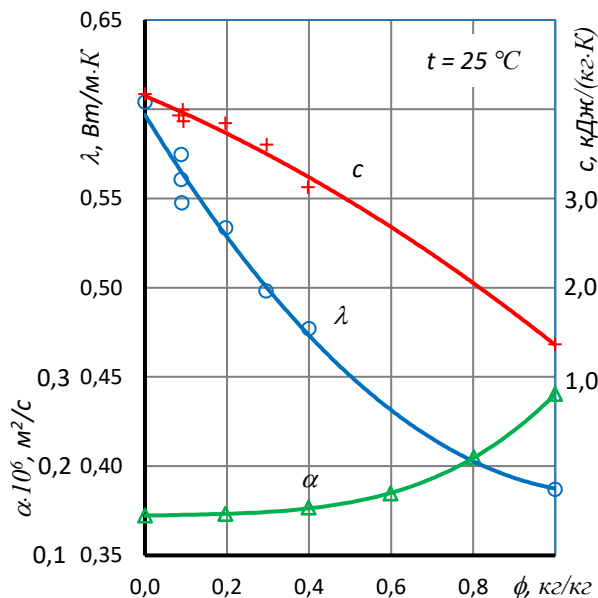


Рис. 64. Залежність ТФХ знежиреного молока від ϕ

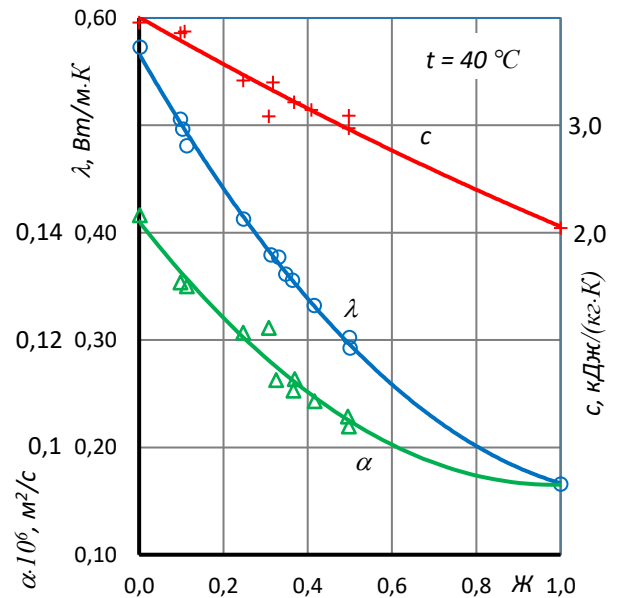


Рис. 65. Залежність ТФХ вершків від жирності

Для визначення ТФХ вершків використовували зразки з різною жирністю J , що дозволило побудувати залежності від J (рис. 65). Узагальнюючі лінії для теплоємності c отримані з закону адитивності, а для λ в рідкому стані при $+40^\circ\text{C}$ – з моделі Л.П. Філіпцова. Залежно ТФХ від t при $J = 0,25$ кг/кг наведено на рис. 66.

З інших молочних продуктів наведемо ТФХ сиру різної жирності та способу приготування (рис. 67).

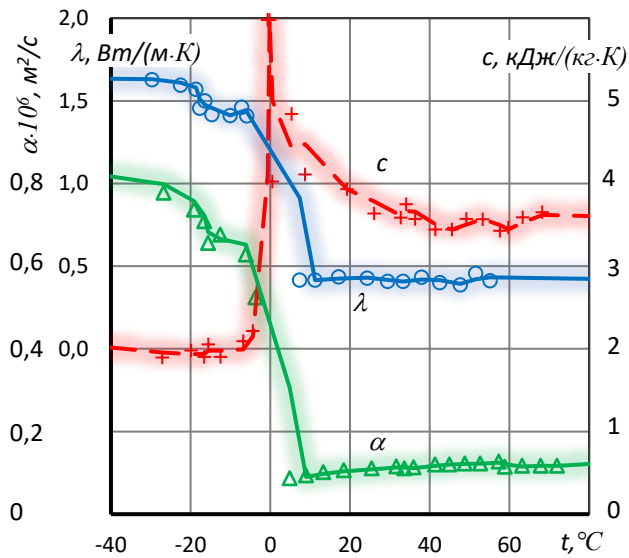


Рис. 66. Залежність ТФХ вершків від температури

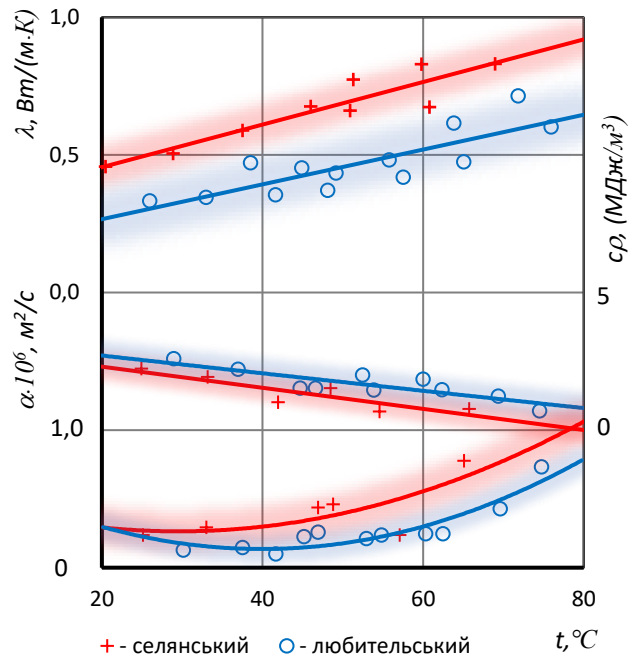


Рис. 67. ТФХ сиру

8.2. Формалізація залежності теплофізичних характеристик знежиреного молока від температури і концентрації СЗМЗ

Дослідження процесів та обладнання для термічної обробки (теплової і холодильної) харчових продуктів і сировини під час їх виробництва та зберігання є одним із ключових напрямів у харчовій науці. Зокрема, у виробництві концентрованого знежиреного молока — сировини для харчових продуктів, кормів для телят, медичних засобів і технічних напівфабрикатів — застосовуються теплові процеси з метою підвищення вмісту сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ). Для ефективного випаровування вологи в таких процесах необхідно мати дані про теплофізичні властивості знежиреного молока різної концентрації за різних температур.

На кафедрі теплотехніки НУХТ співробітниками було розроблено комплексний теплотетричний метод калориметрії з керованим потоком теплоти, заснований на використанні компактних і майже безінерційних приладів для вимірювання локальної в часі й просторі густини теплового потоку. Цей метод призначений для визначення теплофізичних властивостей продуктів і матеріалів

різної консистенції. На дослідній установці, яка втілювала створений метод, проведено комплексне вимірювання теплофізичних характеристик: теплопровідності λ , Вт/(м·К) і об'ємної теплоємності c_p , Дж/(м³·К) знежиреного молока на інтервалах зміни температури від 0 до 90°C і масової частки СЗМЗ від 0,092 до 0,5.

Отримані результати вимірювання теплопровідності λ наведені в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1

Теплопровідність знежиреного молока λ , Вт/(м·К)

t , °C	Масова частка СЗМЗ					t , °C	Масова частка СЗМЗ				
	0,092	0,2	0,3	0,4	0,5		0,092	0,2	0,3	0,4	0,5
0	0,525	0,492	0,464	0,439	0,417	50	0,598	0,558	0,528	0,501	0,478
5	0,532	0,499	0,47	0,445	0,423	55	0,599	0,564	0,534	0,507	0,484
10	0,539	0,505	0,477	0,451	0,429	60	0,606	0,571	0,541	0,514	0,49
15	0,545	0,512	0,483	0,457	0,435	65	0,613	0,577	0,547	0,52	0,496
20	0,552	0,519	0,49	0,464	0,441	70	0,619	0,584	0,554	0,526	0,502
25	0,559	0,525	0,496	0,47	0,447	75	0,62	0,591	0,56	0,532	0,508
30	0,565	0,532	0,502	0,478	0,453	80	0,633	0,597	0,566	0,539	0,514
35	0,572	0,538	0,509	0,482	0,459	85	0,64	0,604	0,573	0,545	0,52
40	0,579	0,545	0,515	0,489	0,465	90	0,647	0,61	0,579	0,551	0,526
45	0,586	0,551	0,522	0,495	0,472						

Для визначення емпіричної функції, яка б описувала залежність цієї характеристики від обох аргументів – температури t і масової частки СЗМЗ ξ , були побудовані окремі графіки її залежності від температури і масової частки СЗМЗ, представлені на рис. 68. На верхньому графіку зображені експериментальні значення коефіцієнта теплопровідності (λ) знежиреного молока за різних концентрацій СЗМЗ (кожна концентрація позначена окремим маркером) у досліджуваному температурному діапазоні. На нижньому графіку подано значення тієї ж характеристики за фіксованих температур (для кожної температури використано свій маркер) у межах варіювання концентрації СЗМЗ.

З наведених графіків видно, що теплопровідність молока при досліджуваних концентраціях СЗМЗ зростає пропорційно з підвищенням температури, тоді як зі збільшенням концентрації СЗМЗ – зменшується. У зв'язку з цим для апроксимації залежності теплопровідності від температури та

концентрації СЗМЗ було обрано лінійну функцію з двома змінними:

$$\lambda(t, \xi) = 0,201 + 1,278 \cdot 10^{-3} \cdot (t + 273) - 0,279 \cdot \xi, \quad (8.1)$$

де t – температура молока, °С; ξ – концентрація СЗМЗ, масова частка.

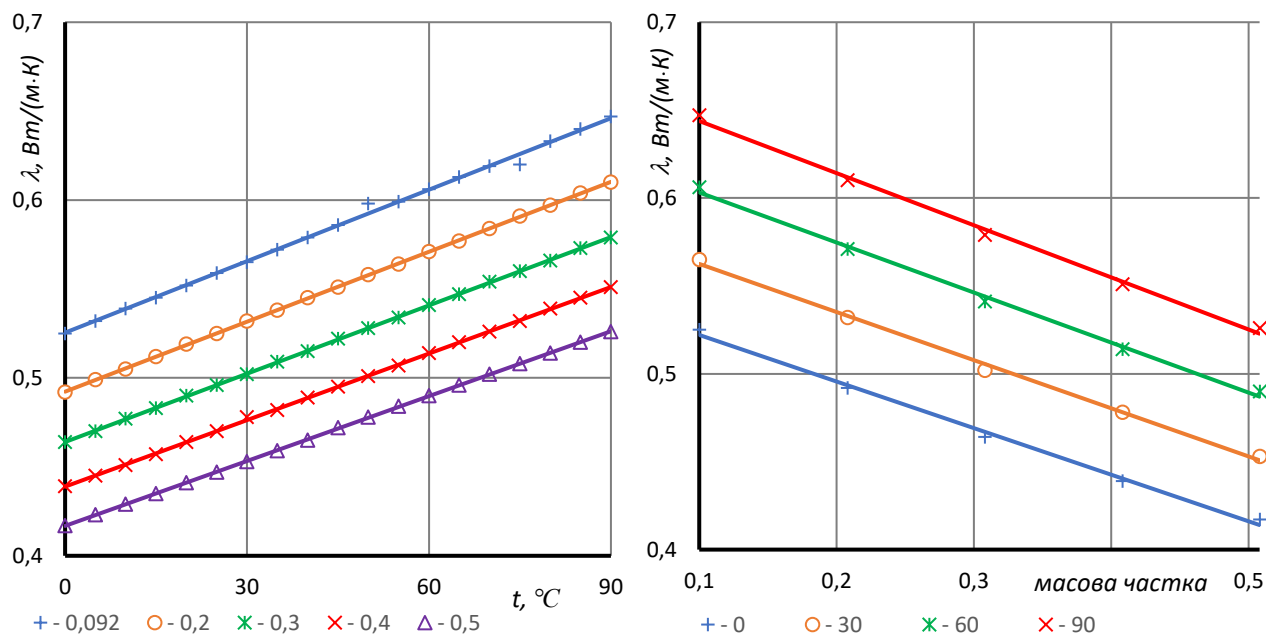


Рис. 68. Залежність теплопровідності знежиреного молока від температури і концентрації СЗМЗ

Відхилення обчислених значень теплопровідності $\lambda(t, \xi)$ за формулою (8.1) від отриманих експериментально не перевищує 1,5 %.

На обох графіках рис. 68 побудовано суцільні лінії визначеної емпіричної функції $\lambda(t, \xi)$ (8.1) з відповідно усталеними і змінними аргументами t і ξ , які практично узагальнюють експериментальні точки, що наочно свідчить про адекватність описання цією функцією теплопровідності знежиреного молока на зазначених інтервалах температури і концентрації СЗМЗ.

Переважає більшість методик теплових розрахунків процесів і обладнання харчової промисловості використовує масову теплоємність c , Дж/(кг·К), тому, з метою спрощення використання отриманих результатів і розширення кола їх користувачів, експериментально виміряну об'ємну теплоємність $c\rho$, Дж/(м³·К) перераховано в масову теплоємність c , Дж/(кг·К) з використанням залежності

питомого об'єму молока від температури і концентрації СЗМЗ із, і результати наведені в таблиці 8.3.

Таблиця 8.32

Теплоємність знежиреного молока c , Дж/(кг·К)

t , °C	Масова частка СЗМЗ					t , °C	Масова частка СЗМЗ				
	0,092	0,2	0,3	0,4	0,5		0,092	0,2	0,3	0,4	0,5
0	3914	3566	3244	2922	2600	50	3987	3725	3483	3240	2997
5	3921	3582	3268	2954	2640	55	3994	3741	3506	3272	3037
10	3929	3598	3292	2986	2679	60	4002	3757	3530	3304	3077
15	3936	3614	3316	3017	2719	65	4009	3773	3554	3335	3117
20	3943	3630	3339	3047	2759	70	4016	3789	3578	3367	3157
25	3951	3646	3363	3081	2799	75	4023	3805	3602	3399	3196
30	3953	3661	3387	3113	2839	80	4031	3820	3626	3431	3236
35	3965	3677	3411	3145	2878	85	4036	3836	3649	3463	3276
40	3972	3693	3435	3176	2918	90	4045	3852	3673	3494	3315
45	3980	3709	3459	3208	2958						

Для з'ясування характеру залежності теплоємності молока від температури t та концентрації СЗМЗ ζ побудовано відповідні графіки (рис. 68). На верхньому графіку зображено експериментальні дані теплоємності молока при різних концентраціях СЗМЗ (кожній концентрації відповідає окремий маркер) у залежності від температури. З графіка видно, що теплоємність зростає зі збільшенням температури та зменшується зі зростанням концентрації СЗМЗ. Крім того, спостерігається, що за вищої концентрації СЗМЗ зростання теплоємності з температурою відбувається інтенсивніше.

На нижньому графіку представлено зміни теплоємності при фіксованих температурах (кожній температурі відповідає свій маркер) залежно від концентрації СЗМЗ. З нього видно, що зі збільшенням концентрації СЗМЗ теплоємність знижується, а зі зростанням температури – зростає, при цьому підвищення температури пом'якшує зменшення теплоємності внаслідок збільшення концентрації СЗМЗ.

Такі особливості поведінки теплоємності свідчать про наявність взаємозв'язку між її аргументами. Тому для формалізації впливу температури та концентрації СЗМЗ на теплоємність молока була запропонована емпірична модель, яка, окрім лінійного впливу кожного чинника, враховує також їхню

парну взаємодію.

$$c(t, \xi) = 4193 + 0,051 \cdot (t+273) - 7468 \cdot \xi + 15,62 \cdot (t+273) \cdot \xi, \quad (8.2)$$

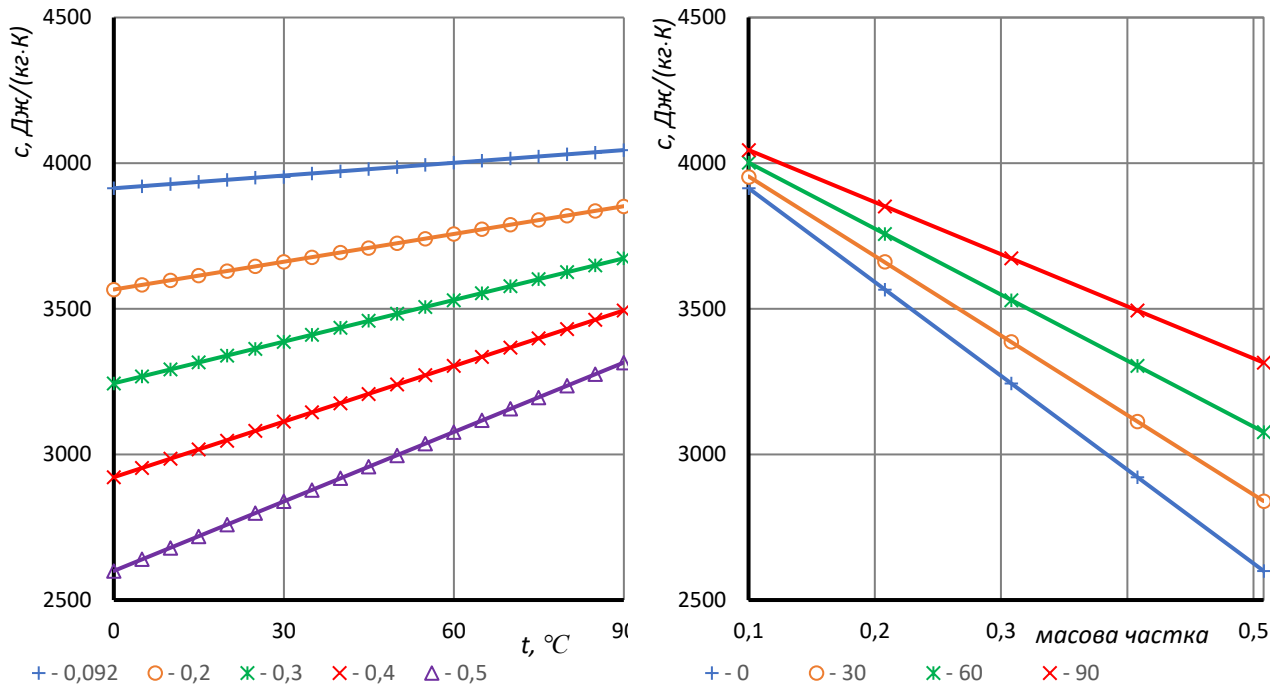


Рис. 69. Залежність теплоємності знежиреного молока від температури і концентрації СЗМЗ

Обчислені значення теплоємності $c(t, \xi)$ за формулою (2) відрізняються від отриманих експериментально не більше ніж на 0,5 %. За визначеною емпіричною залежністю (2) на обох графіках рис. 69 побудовано суцільні лінії $c(t, \xi)$, за відповідно фіксованих і змінних аргументах t і ξ , які добре збігаються з експериментальними точками, що свідчить про адекватність описання визначеною функцією (2) теплоємності знежиреного молока.

Оскільки в розрахунках теплообмінних та гідродинамічних процесів харчової промисловості значно ширше використовується теплофізична характеристика – густина ніж питомий об'єм, то використовуючи із залежність питомого об'єму знежиреного молока, було побудовано емпіричну функцію густини ρ досліджуваної сировини на визначених інтервалах зміни температури t і концентрації ξ СЗМЗ у вигляді лінійного полінома:

$$\rho(t, \xi) = 1149 - 0,531 \cdot (t + 273) + 440,67 \cdot \xi, \quad (8.3)$$

Відхилення обчислених значень густини $\rho(t, \xi)$ знежиреного молока за формулою (8.3) від обчислених за формулою із не перевищує 1,0 %.

Виконані експериментальні дослідження теплофізичних характеристик знежиреного молока розширюють обсяг знань про харчові продукти, а їх формалізація розрахунковими залежностями значно спростить алгоритмізацію розрахунків на комп'ютерах процесів і обладнання молочної промисловості.

8.3. Формалізація теплофізичних характеристик згущеного молока з цукром

З метою уточнення технологічних режимів виробництва згущеного молока з цукром за рецептурою: масова частка жиру – 8,5%; цукру – 43,5%; вологи – 43,5% за участю авторів було проведено комплексне теплометричне дослідження його теплофізичних характеристик. Для зручнішого використання отриманих результатів вони формалізовані у вигляді розрахункових формул для обчислення ізобарної масової теплоємності c_p , Дж/(кг·К) і теплопровідності λ , Вт/(м·К) на інтервалі температури від 20 до 80 °С.

Для визначення теплоємності c_p згущеного молока з цукром, зазначеного складу, експериментальні дані його об'ємної теплоємності перераховані в масову теплоємність з використанням температурної залежності густини згущеного молока з цукром із. На рис. 70 представлено графік, де обчислені значення масової теплоємності c_p нанесені точками з маркером "ромб" (◆) в залежності від температури, дані обчислені за розрахунковою формулою (8.1) – суцільна крива. Із графіка помітно пропорційну залежить теплоємності c_p від температури, тому для її аналітичного описання обрано лінійним поліном:

$$c_p(t) = 2450 + 3,6945 \cdot t, \quad (8.4)$$

графік якого накреслено суцільною прямою.

Відносна похибка обчислення теплоємності c_p за формулою (8.1) не перевищує 3,2%.

Графік експериментальних даних із залежності теплопровідності λ згущеного молока від температури t , представлений на рис. 70, відображає збільшення цієї характеристики з підвищенням температури, тому розрахунковою формулою для її обчислення обрано також лінійний поліном:

$$\lambda(t) = 0,344 + 1,54 \cdot 10^{-3} \cdot t \quad (8.5)$$

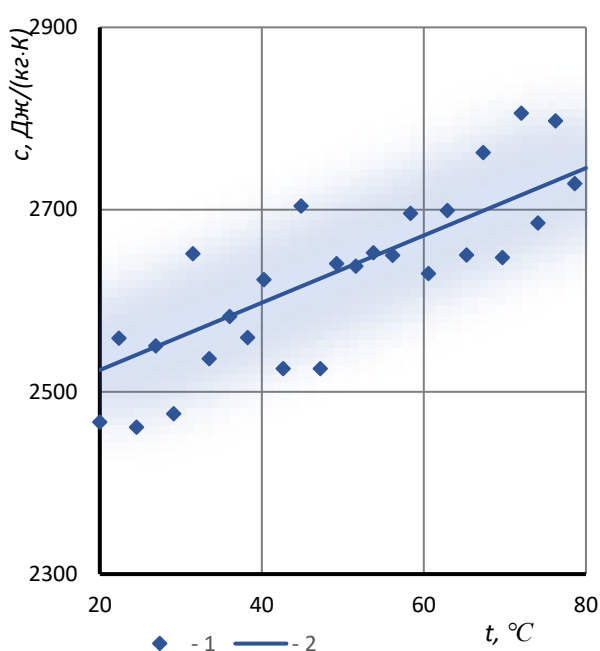


Рис. 70. Залежність теплоємності згущеного молока з цукром від температури

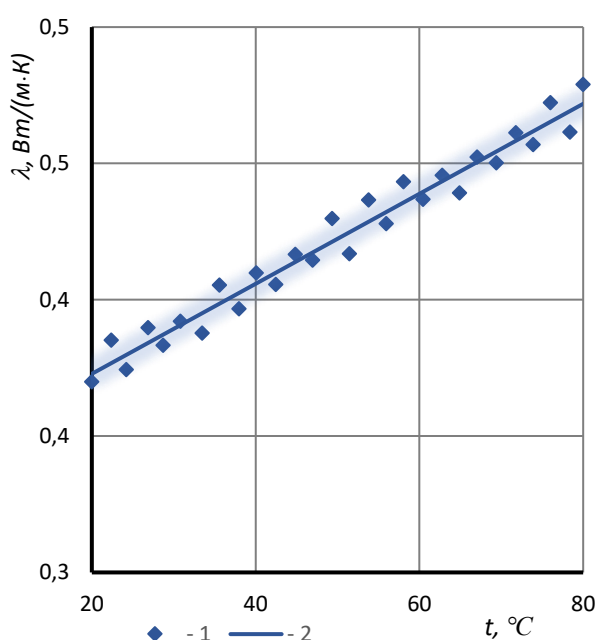


Рис. 71. Залежність теплопровідності згущеного молока з цукром від температури

Відносна похибка обчислення теплопровідності за формулою (8.5) не перевищує 1,7%. Експериментальні дані позначені маркером $\blacklozenge$, дані обчислені за розрахунковою формулою (8.5) – суцільна крива.

8.4. Визначення теплофізичних характеристик згущеного незбираного молока з цукром

Висока лабільність молочних продуктів потребує застосування теплотиметричного методу комплексного визначення ТФХ. Цей метод заснований

на безперервному вимірюванні густини теплового потоку через обидві поверхні плоского зразка і різниці температур Δt на цих поверхнях [3]. Якщо в актуальному діапазоні температур очікують значні фазові перетворення продукту, доцільно працювати циклами, чергуючи стаціонарні та перехідні теплові режими – для визначення, відповідно, λ і $c\rho$, з поступовою зміною температури зразка від циклу до циклу. При плавній зміні фазового стану зразка вимірювання теплопровідності та теплоємності можна робити безперервно, якщо витримувати один із регулярних теплових режимів.

Відповідно до блочного принципу побудови ТФХ-приладів [3], установка для дослідження лабільних продуктів виконана з трьох основних блоків: взаємозамінних блоків підведення та відведення теплоти у вигляді термостатованих плоских камер та вимірювального блоку. Між камерами 1 (рис. 72) розташовується зразок 2. Теплова ізоляція 3 служить для зменшення бокових втрат теплоти зразком (при необхідності можна використовувати також екранну ізоляцію). Камери стягуються болтами, на які встановлені прокладки 4. Товщина зразка h визначається висотою фіксаторів 5. Основу вимірювального блоку складають тепломіри 6, спай батарейної мідьконстантанової термопарі 7 для вимірювання різниці температур, а також температури поверхонь. Холодний спай термопарі поміщений в посудину Дьюара 8 з льодом, що тане. При налагоджувальних дослідах та для контролю основних дослідів сигнали тепломірів та термопар подаються на цифровий мілівольтметр 9 через перемикач 10. Зведені до мінімуму баластні характеристики вимірювального блоку, а також низькі значення теплоти фазових переходів продуктів, що випробовуються, дозволяють проводити досліди в регулярному режимі другого роду. Постійні в часі густини теплового потоку підтримуються на поверхнях зразка q_1 і q_2 . Пошук ТФХ визначають за формулами

$$\lambda = h \left(\frac{2\Delta t}{q_1 + q_2} - R_6 \right)^{-1} \quad (8.6)$$

$$c\rho = \left(\frac{q_1 - q_2}{u} - P_6 \right) h^{-1} \quad (8.7)$$

де P_6 – баластові термічні опори та теплоємність, визначені по гліцерину (як еталонному зразку); u – швидкість зміни температури зразка.

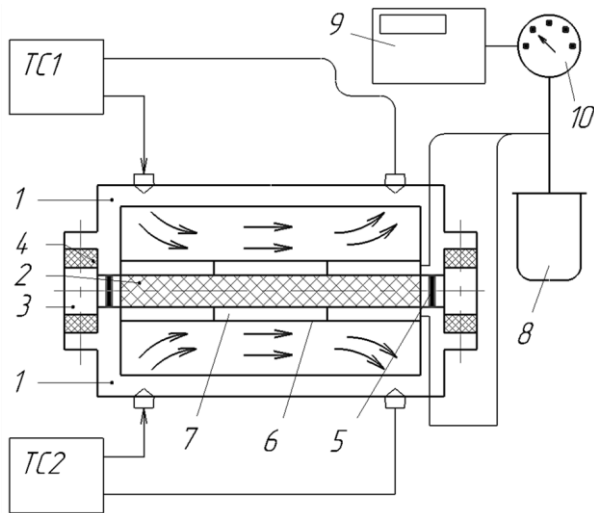


Рис. 72. Схема установки визначення ТФХ лабільних продуктів

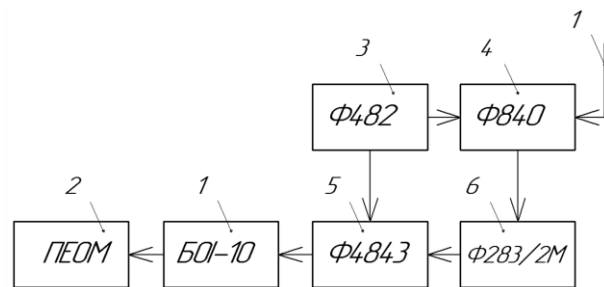


Рис. 73. Схема комутації установки з ПЕОМ

Первинні перетворювачі вимірювального блоку – тепломіри та термопари пройшли метрологічну атестацію, тарування установки по гліцерину дозволяє встановити межі похибки вимірювання $\lambda - \pm 3\%$, $c\rho - \pm 5\%$ у діапазоні температур зразка $+20...+80^\circ\text{C}$.

Стабільна робота нової установки на продуктах різної консистенції дозволила перевести її на режим діалогу з ЗВМ. Така потреба пояснюється тим, що точність визначення ТФХ у звичайному режимі залежить від особистих якостей та досвіду оператора, наприклад, у підтримці умов постійної густини теплового потоку $q = \text{const}$ та лінійної зміни температури у часі $\tau t = t_o + \alpha_\tau$. Тому установку 1 (рис. 73) підключили до ПЕОМ 2. Для цього використовували серійний агрегатний комплекс К484, який складається з таймера Ф482 3, комутатора Ф840 4 і транскриптора Ф4843 5, а також вольтметр Ф283/2М 6 і розроблений фахівцями науково-виробничого підприємства "Технополіс" блок погодження та передачі інформації БОІ-10 7.

За допомогою клавіш управління комутатором задається перелік каналів,

які потрібно опитати (їх п'ять) та режим роботи (очікування). Таймером задаються проміжки часу між опитуваннями каналів (1 сек) і між вимірюваннями (5 хв.) Інформація про ЕРС тепломірів і термопар за допомогою транскриптора і блоку узгодження передається в порт СОМ 1 комп'ютера. Потім програмним засобом інформація обробляється за заданим алгоритмом, вводиться на екран дисплея і записується в потрібний файл. Зворотний зв'язок полягає у контролі теплового режиму зразка. Наприклад, якщо відхилення q_1 або q_2 від постійної величини перевищує допустимий рівень, на екрані дисплея з'являється застереження і подається звуковий сигнал. Розрахунок ТФХ не проводиться до того часу, поки знову не буде відрегульований необхідний режим роботи установки.

На рис. 74 представлені залежності коефіцієнта теплопровідності та теплоємності згущеного незбираного молока з цукром (масова частка води –

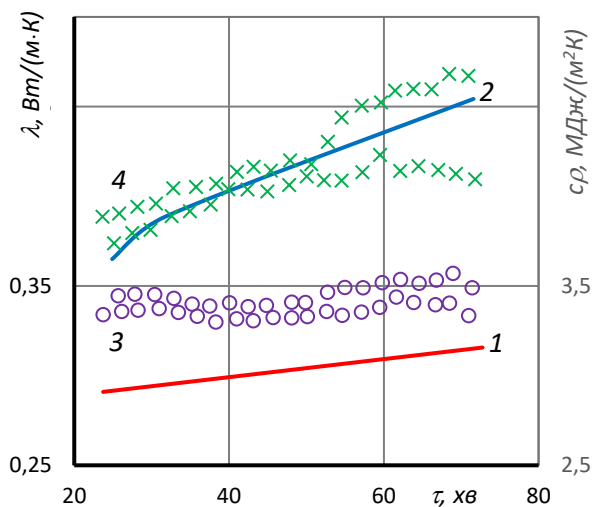


Рис. 74. Результати визначення коефіцієнта теплопровідності та теплоємності згущеного молока з цукром
1, 2 – дані за М.А. Громовим;
3, 4 – дослідні дані

25,9%, сухих речовин – 74,1 у т.ч. жиру – 8,8%, цукру – 44,6%, білка та мінеральних речовин – 20,7%) від температури. Як видно із рис. 74, збіг з результатами, опублікованими М.А. Громовим, задовільний, що дає підставу рекомендувати нову установку для широкого використання в якості робочого приладу. Розбіжності з літературними даними, що виходять за межі зазначеної вище похибки, а також

деякий розкид дослідних даних можна пояснити різним складом досліджених продуктів, особливо тригліцеринів, які в робочому діапазоні температур зазнають істотних фазових перетворень.

8.5. Встановлення зв'язку технологічних і теплофізичних характеристик молочних продуктів з метою їх експрес-експертизи

На сучасному етапі формування ринку молочних продуктів значну роль відіграють як передбачувані, так і несподівані чинники. Основним детермінантом рівня споживання такої продукції залишаються економічні умови, що впливають на попит і пропозицію. Через нестабільність на сировинному ринку виробники змушені урізноманітнювати асортимент, впроваджуючи у виробництво продукти, де молочний жир частково замінюється рослинними компонентами, а білки – соєвими аналогами.

Контрольні перевірки якості свідчать про поширені випадки фальсифікації, зокрема під час виготовлення продуктів із використанням немолочних жирів. Масовість подібних порушень негативно позначається на обсягах споживання молочних продуктів. Усунення цієї проблеми можливе лише за умов системного державного втручання.

Впровадження відповідних регуляторних заходів і створення експрес-методів розпізнавання молочних та молоковмісних виробів сприятимуть як зростанню довіри споживачів до продукції, так і обґрунтованому вибору товару [16].

Встановлення залежності теплофізичних характеристик (ТФХ) молочних продуктів (теплоємність, теплопровідність, ентальпія, в'язкість і т. ін.) від технологічних параметрів ТП (жирність, вологість, кислотність, температура і т. ін.) допомагає наблизити до оптимальних розрахунки процесів і апаратів молочної промисловості. Інформація про деякі ТФХ використовується під час проектування, налагодження та експлуатації обладнання як ТП. Наприклад, основні термічні параметри речовини – температура, тиск, об'єм, маса – є одночасно основними ТП молочного виробництва. Іншими прикладами є інтенсивність теплового оброблення сухого молока, яка за стандартом ISO 11814/IDF 162:2002 оцінюється методом високороздільної рідинної хроматографії, а також методи визначення температури та ефективності

пастеризації молочних продуктів і сировини на основі інактивації ферментів (пероксидаза, фосфатаза) при певній температурі пастеризації.

Ці методи, як і більшість інших способів визначення ТП є досить дорогими та відносно тривалими. Основним недоліком цих методів є неможливість регулювати технологічний процес в режимі «он-лайн» за результатами вимірювання того чи іншого технологічного показника. Пошук експрес-методів визначення ТП, які були б позбавлені цих недоліків, є перспективним та необхідним.

Метою досліджень було встановлення однозначного зв'язку основної характеристики складу молочних продуктів – жирності J (у масових відсотках) – та якоїсь ТФХ, яку можна визначати за досить короткий час. Існуючий стандартизований метод визначення масової частки жиру в молоці, молочних продуктах та консервах – кислотний метод Гербера (ДСТУ ISO 1735:2005) – вимагає певної кваліфікації лаборанта (на точність визначення в значній мірі впливає людський фактор) та істотних витрат часу і ресурсів. Тому актуальним є пошук методів експрес-визначення частки жиру та інших компонентів молочних продуктів, наприклад, на базі встановлення зв'язків між технологічними (жирність, вологість, кислотність тощо) і теплофізичними (теплоємність, теплопровідність, температуропровідність, в'язкість тощо) характеристиками продукту.

Потреба в таких методах особливо зростає в сучасних умовах, коли має місце фальсифікація харчових продуктів. Для молочних продуктів фальсифікати можуть бути дуже різні, інколи неорганічного походження, для вершкового масла найчастіше відбувається заміна молочного жиру дешевими жирами рослинного походження.

Виявленню та запобіганню фальсифікації молочних продуктів за рахунок використання немолочних жирів присвячені роботи: за величиною числа Рейхера-Мессля [17] та різницею показників заломлення [18].

Оскільки визначення вмісту жиру, білків, цукру та інших ТТХ вимагає

великих витрат часу та ресурсів, в цій роботі була поставлена задача розв'язати інверсну задачу – знайти залежність якості ТТХ від її ТФХ, яку можна визначати експрес-методом. Для вершків та інших незбираномолочних продуктів також кореляцією виявилась залежність між вмістом жиру і теплопровідністю [19], [20].

Авторами [21] наведено результати вимірювання ТФХ різних лабільних матеріалів, в тому числі молочних продуктів, теплотиметричним експрес – методом. Ми скористалися даними визначення теплопровідності λ , Вт/(м·К) для знежиреного молока ($\mathcal{J} = 0,2\%$) та вершків із $\mathcal{J} = 10-15\%$, що були вироблені на Київському міськмолзаводі №1 (наведена назва підприємства, зареєстрована на час проведення дослідів), а також вершків із $\mathcal{J} = 40\%$, вироблених на заводі «Вітерфельд» (м. Кьотен, Германія). Усі дослідні дані було узагальнено у вигляді залежності $\lambda = f(\mathcal{J}, t)$:

$$\lambda = (0,525 + 0,00135 t) \cdot (1 - 0,72 \cdot \mathcal{J}) + (0,174 - 0,000155 t) \cdot (1 - 0,72 \cdot \mathcal{J}) \cdot \mathcal{J} \quad (8.8)$$

Аналіз та формули (8.8) показали, що залежність $\lambda(\mathcal{J})$ є значно

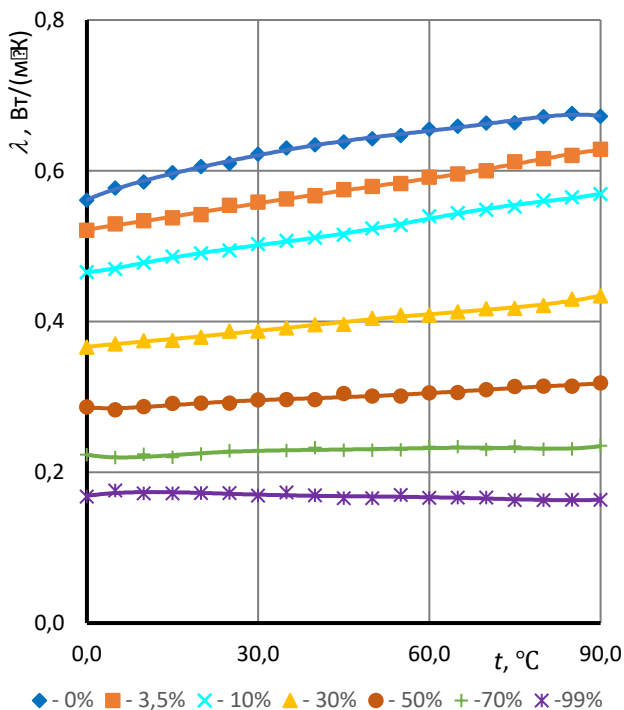


Рис. 75. Залежність теплопровідності води, молока і вершків різної жирності та жирових сумішей від температури

виразнішою, ніж $\lambda(t)$, тому поставили задачу знайти умови, за яких залежність $\lambda(\mathcal{J})$ була б наближена до функціонального зв'язку.

Аналіз зібраних графіків $\lambda(t)$ за умови, що $\mathcal{J}$ змінюється від 0 до 99% (рис. 75) підтвердив слабкість залежності $\lambda(t)$, а також показав, що ця залежність змінюється із збільшенням $\mathcal{J}$ від прямо пропорційної до обернено пропорційної.

Тому ці дані було перебудовано: за аргумент взято жирність, а за параметр – температуру (рис. 76). Залежність $\lambda(\mathcal{J})$ має експоненціальний характер:

$$\lambda = 0,5966 \cdot \exp(-0,0133 \cdot \mathcal{J}) \quad (8.9)$$

Найбільші відхилення (до $\pm 7,5\%$) експериментальних даних від узагальнюючої, що відповідає рівнянню кривої 2, маємо для води та знежиреного молока, для жирних та, особливо, високо жирних вершків воно різко зменшується. Це дає підставу розв'язати інверсну задачу – поміняти місцями аргумент та функцію (рис. 77).

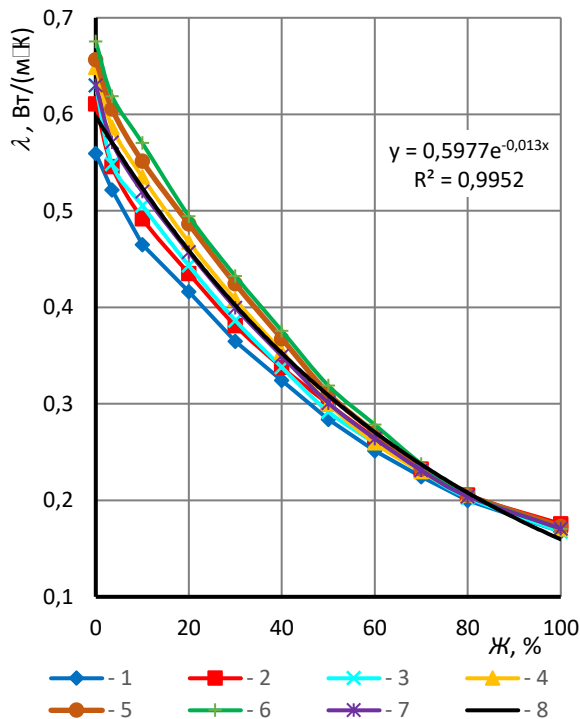


Рис. 76. Залежність теплопровідності води, молока і вершків різної жирності та жирових сумішей від жирності

1 – 0°C; 2 – 20°C; 3 – 40°C; 4 – 60°C; 5 – 80°C; 6 – 90°C; 7 – середнє значення температури; 8 – лінія тренда.

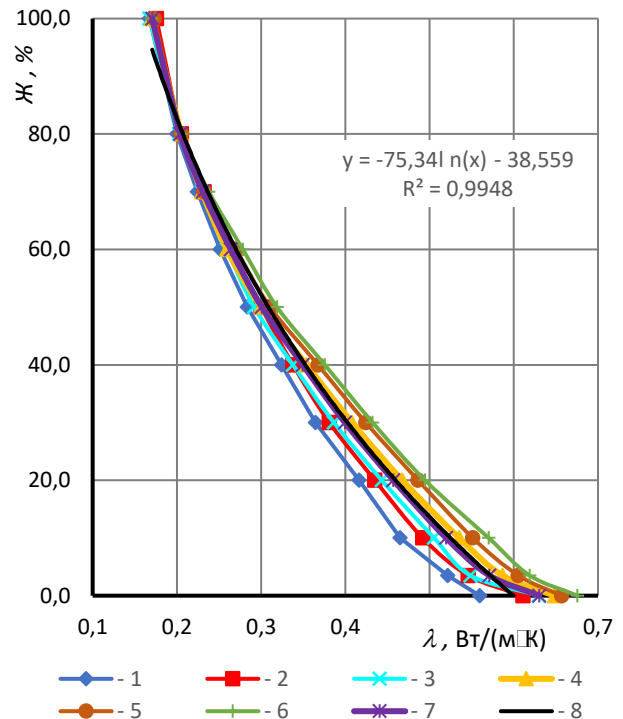


Рис. 77. Залежність жирності води, молока і вершків різної жирності та жирових сумішей від теплопровідності

Узагальнення усіх наявних даних дає логарифмічну залежність:

$$\mathcal{J} = -74,617 \cdot \ln(\lambda) - 38,361 \quad (8.10)$$

Для наближення до функціонального зв'язку між λ та $\mathcal{J}$ звузили діапазон температур від 0÷90°C до 15÷40°C – за межі цього діапазону не виходить, наприклад, температура вершків на шляху від збірника до маслоутворювача в

процесі поточного виробництва масла. В результаті одержано залежність, яку можна вважати функціональним зв'язком (рис. 78):

$$Ж = -77,369 \cdot \ln(\lambda) - 42,732 \quad (8.11)$$

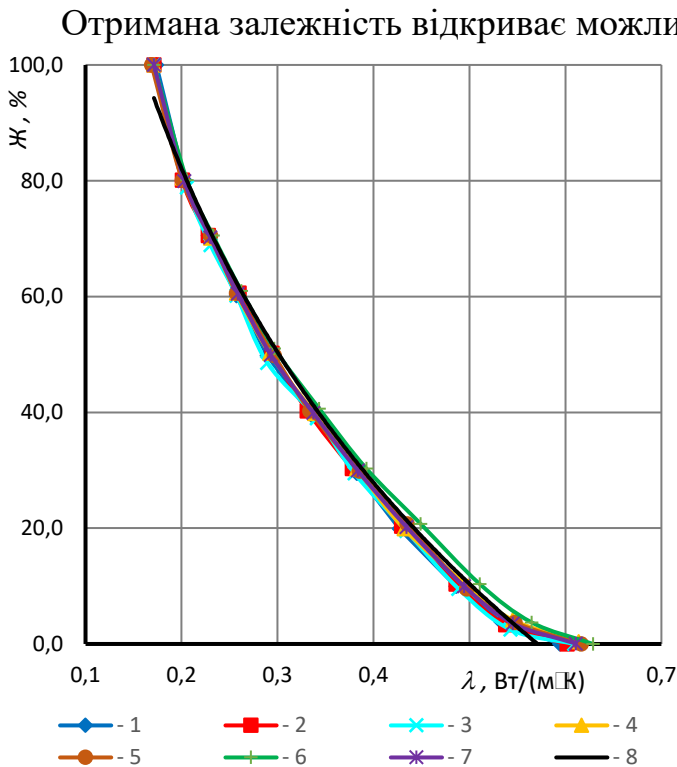


Рис. 78. Залежність жирності вершків від теплопровідності

1 – 15°C; 2 – 20°C; 3 – 25°C; 4 – 30°C; 5 – 35°C; 6 – 40°C;
7 – середнє значення температури; 8 – лінія тренда.

цей метод для експрес-експертизи молочних продуктів.

8.6. Тепломасообмін при охолодженні молока з відкритої поверхні

У молочній промисловості є цілий клас технологічних апаратів, в яких оброблюваний продукт має відкриту поверхню (ванни для охолодження парного молока, контактні сушарки і т.д.). При зіткненні з повітрям або парогазовим середовищем продукт охолоджується або нагрівається і частково випаровується. Для розрахунку таких апаратів потрібні відомості про інтенсивність цих процесів.

Тепловіддачу при охолодженні молочних продуктів в умовах вільної конвекції ми досліджували за допомогою кювети 12х8х3 см, теплоізованої з боків та знизу (рис. 79). На поверхні продукту закріплювались базові елементи ($\varepsilon_1 = 0,95$; $\varepsilon_2 = 0,31$) так, щоб поверхня датчика, на яку виходять "гарячі" спаї термоелементів, весь час стикалися з продуктом, а друга поверхня – з повітрям у камері охолодження. Вимірювали також температуру рідини біля поверхні, повітря в камері та стінки випарника за допомогою МК-термопар.

Дані представлені на рис. 79 відносяться до охолодження пастеризованого молока від 52 до 4°C; теплові потоки 1 і 2, температура поверхні продукту t_n (лінія 4), температура повітря t_v , надлишкова температура продукту $V = t_n - t_e$ та температура стінки випарника під інієм.

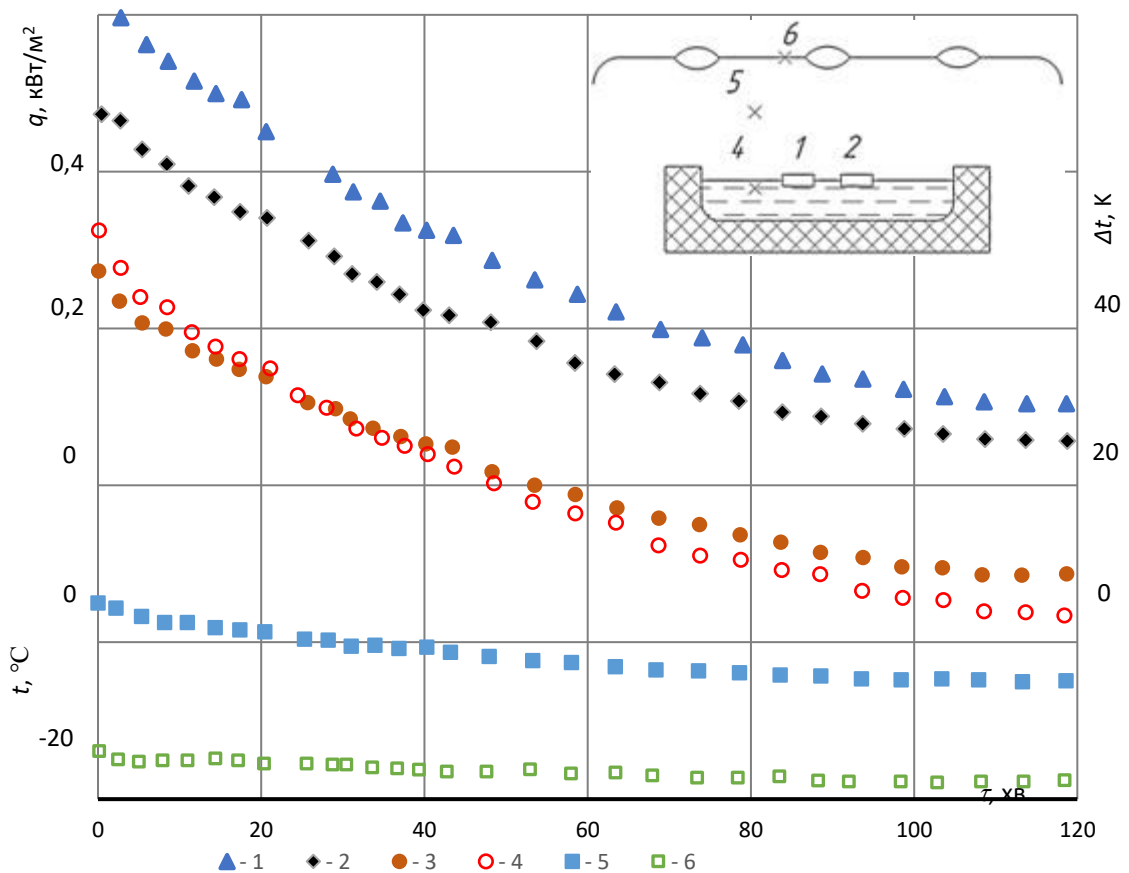


Рис. 79. Зміна теплових потоків та температури при охолодженні молока з відкритої поверхні

Поверхня шару молока, що наливається в кювету-датчик, покривалася поліетиленовою плівкою товщиною 0,05 мм для запобігання випаровування і

пов'язаних з ним методичних похибок. Для умов описуваних дослідів ступінь чорноти (поглинальна здатність) молока склала $\varepsilon = 0,94 \pm 0,05$.

Результати розрахунку α , α_l і α_k нанесені на рис. 80 у вигляді відповідно ліній 4, 5 і 6. Сумарний α від молока до повітря плавно падає від 13,8 до 12,2 Вт/(м²К) і для практичних розрахунків може бути прийнятий постійним $\alpha = 13$ Вт/(м²К). α_k також плавно падає за рахунок зменшення рушійної сили вільної конвекції Δt і може бути прийнятий рівним 6 Вт/(м²К).

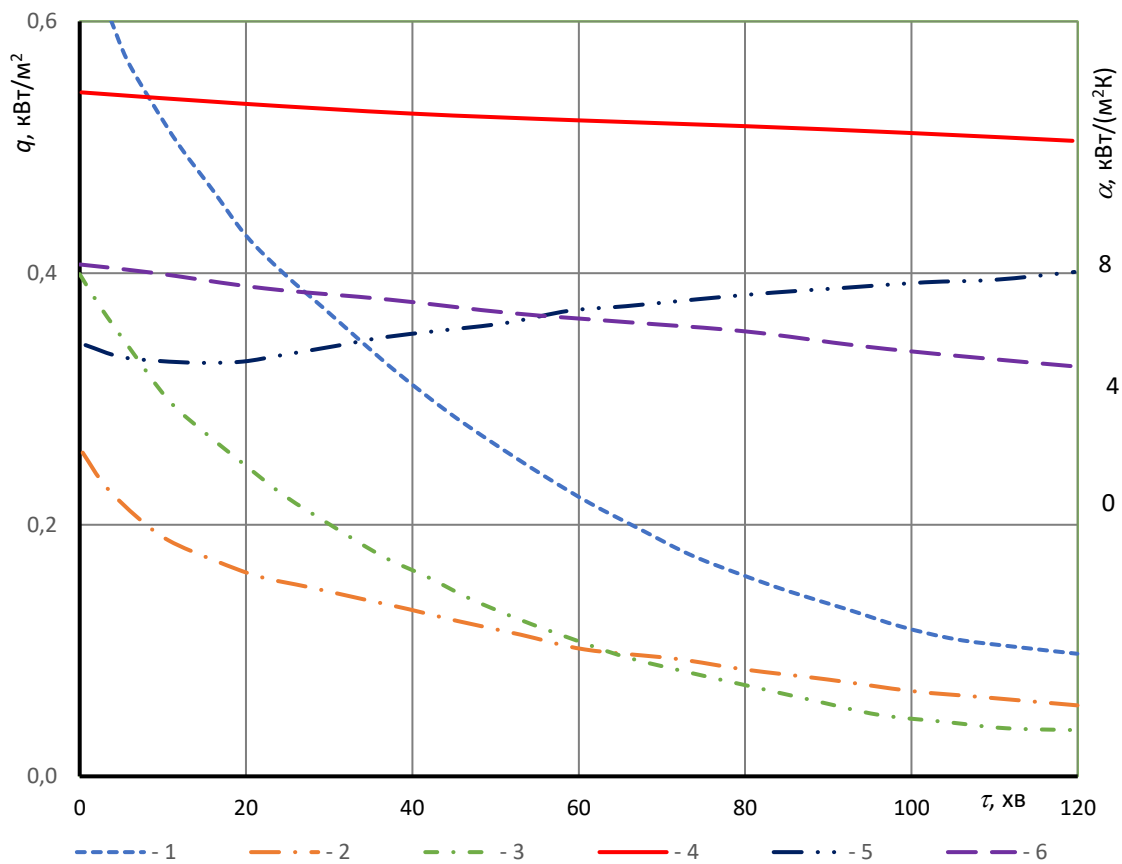


Рис. 80. Складові теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі при охолодженні молока

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням α_l зростає протягом майже всього процесу (починаючи з 8-ї хвилини) від 5 до 7,6 Вт/(м²К). Це зростання є фіктивним у зв'язку з умовністю самого поняття α_l . Величини q_l і V мало пов'язані між собою з фізичної точки зору: теплообмін випромінюванням відбувається між поверхнями продукту та інію на стінках випарника, величина V є різницею температур між поверхнею продукту та повітрям. Зростання $\alpha_l = q_l/V$ говорить лише про те, що у процесі охолодження V може зменшуватися швидше,

ніж q_l .

Оскільки число Релея $Ra = Gr \cdot Pr$ для дослідів, що описуються, не перевищило $2 \cdot 10^6$, не вдалося для порівняння скористатися формулою А.В. Нестеренка для розрахунку тепловіддачі від рідини до газу в усталеному режимі (вона рекомендована для $Ra > 3,6 \cdot 10^6$). Наведемо результати перевірки дослідних даних з різних формул для середини процесу (60-я хвилина). α_k розрахований за рівнянням подібності $Nu = 0,7Ra^{0,25}$, що дало величину $\alpha_k = 6,1 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ (в досліді отримали $6,3 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$). Хороший збіг можна віднести за рахунок того, що в замкнутій камері установки не було сторонніх струменів повітря.

Величину q_l для перевірки α_l розраховували за рівнянням $q_l = \varepsilon_{np} \sigma (T_n^4 - T_v^4)$. Результат розрахунку $q_l = 7,9 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ у досвіді отримали $7,1 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$. Можливим поясненням настільки завищеного розрахункового значення є та обставина, що не враховувалося падіння температури по товщі інію.

Оскільки дифузійна проникність базових елементів була однаковою, порядок величини α_m , тобто тепловіддачі, пов'язаної з випаром вологи з поверхні молока, визначали, прийнявши справедливим відоме співвідношення Льюїса про рівність коефіцієнтів температуропровідності повітря і дифузії водяної пари в повітрі $L_e = 1$. Це дає можливість використовувати рівняння

$$\alpha_l = \frac{\alpha_k r}{c \rho} (d_n - d_v) \quad (8.12)$$

Для 60-ї хвилини отримали $\alpha_m = 7,6 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$, тобто всі теплові втрати, що складають, з поверхні молока приблизно однакові.

Отримані дані дають можливість встановити, якою мірою справедливі при охолодженні рідин закономірності регулярного охолодження твердих тіл. Для температури поверхневого шару молока в координатах $\ln V - \tau$ одержали плавну криву 4, яку, починаючи з 10 хвилини процесу, можна апроксимувати прямою з

похибкою не більше $\pm 1\%$ (рис. 81).

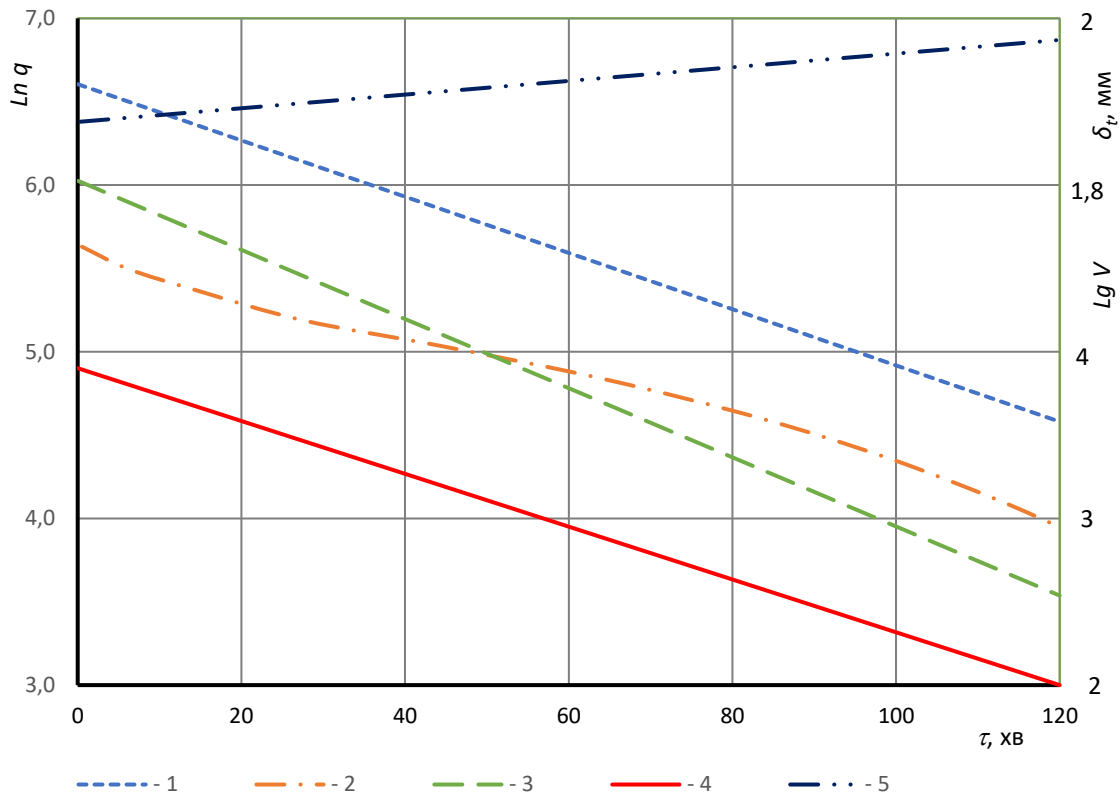


Рис. 81. Ступінь регулярності процесу та зміна товщини примежового шару при охолодженні молока з відкритої поверхні

Представимо кінетику відведення тепла при охолодженні молока також у напівлогарифмічних координатах. З рис. 81 видно, що лінія сумарного q 1 практично еквівалентна лінії надлишкової температури 4. Конвективна складова 3 поводить себе як чиста експонента з самого початку охолодження, але показник експоненти (нахил прямої) більший, ніж для сумарних тепловтрат. Залежність для q_l простою експонентою не апроксимується. Таким чином, можна встановити зв'язок між інтенсивністю тепловтрат q_i при охолодженні молока і часом τ :

$$q_i = q_{oi} \exp(-m_i \tau) \quad (8.13)$$

В описаних дослідах $q_o = 680 \text{ Вт/м}^2$, $m = 3,25 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}$, $q_{ок} = 410 \text{ Вт/м}^2$, $m_k = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}$.

Отримання дослідних даних з кінетики α і α_k дозволяє оцінити товщину теплового прикордонного шару $\delta_t = \lambda_v / \alpha_k$ і простежити за її зміною в процесі

охолодження (рис. 81, лінія 5). Помітно плавне незначне зростання товщини шару від 1,88 до 1,97 мм. Розраховано також відстань від поверхні продукту до напрямної точки $S = \lambda_m / \alpha$, у якій дотична до температурної кривої у шарі молока перетинається з повітрям. Незважаючи на складну температурну залежність λ_m , отримали також плавне зростання S від 3,7 до 3,9 см, тобто теж приблизно на 5%. Для практичних розрахунків величини δ_t і S можна приймати постійними: $\delta_t = 1,9$ мм, $S = 3,8$ см.

8.7. Баластні теплові потоки при термічній обробці сиру

Технологічні параметри харчових продуктів (зовнішній вигляд, структура, жирність, вологість тощо) тісно пов'язані з їх теплофізичними характеристиками (інтенсивність перенесення теплоти, теплоємність, температуропровідність, відбивна здатність та ін). Деякі фізичні характеристики є одночасно типовими технологічними параметрами – температура, густина, в'язкість, температура плавлення або кипіння [1]. Використання новітніх засобів вимірювання теплофізичних характеристик на основі теплотрії та тепломасометрії [3] дозволяє отримувати нову інформацію про перебіг технологічних процесів, економити сировину та енергію.

При вивченні дозрівання твердого сиру автори встановили, що до 30 % теплоти, що виділяється в голівці сиру за рахунок ферментативного розкладання білків, розщеплення лактози мікрофлорою та інших екзотермічних процесів та відводиться охолоджуючим повітрям, повертається до голівки сиру.

Повернення теплоти до сиру є баластним навантаженням на холодильну машину камери дозрівання сиру. Його ліквідація чи зведення до мінімуму є напрямком енерго- та ресурсозбереження.

Наскільки відомо авторам, сам факт зворотних (інверсних) теплових потоків при холодильній обробці харчових продуктів не був вивчений ні у вітчизняній, ні у світовій науці.

Можливо, це пояснюється тим, що дані, подані на рис. 82, отримані прямим вимірюванням густини теплового потоку q , Вт/м², за допомогою малоінерційного малогабаритного та високочутливого тепломіра – диска діаметром 20 мм та товщиною 1,2 мм, який закріплювався в центрі верхньої поверхні головки молодого сиру за допомогою парафіну. Тепломір реагує не тільки на включення та вимикання холодильної установки, але і на флуктуації теплового потоку за рахунок зміни швидкості охолоджуючого повітря, що омиває головку, які важко відобразити графічно при комп'ютерному виконанні рисунків.

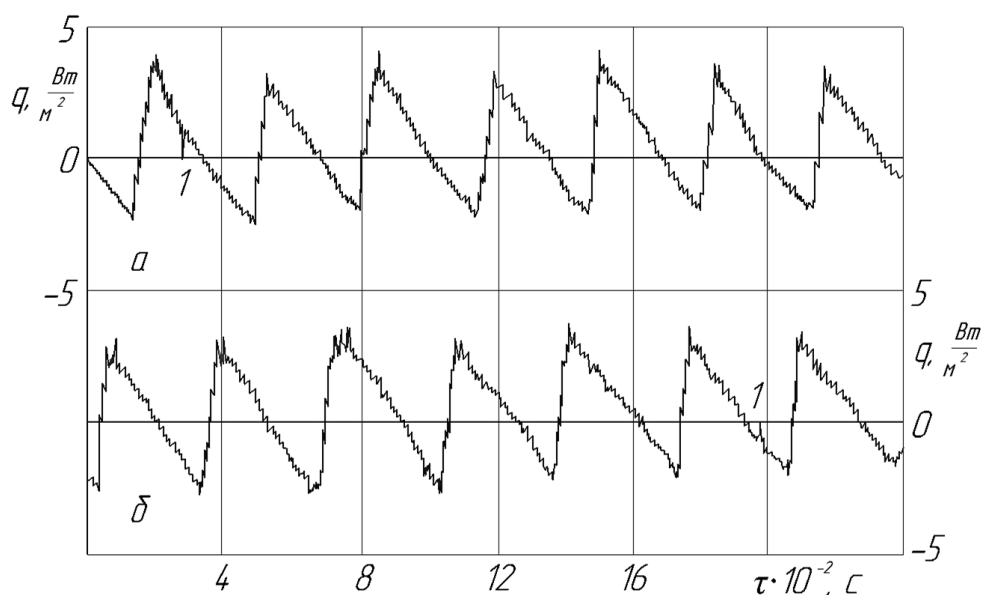


Рис. 82. Густина теплового потоку через поверхневий шар головки сиру на 22-й (а) та 24-й (б) день дозрівання
1 – відмітка нульового сигналу реєстратора

Баластні теплові потоки можуть виникати не тільки при холодильній, але і при тепловій обробці харчових продуктів. При стабілізації поверхневого шару варених ковбас за допомогою осцилюючого інфрачервоного обсмажування тепломір діаметром 14 мм і товщиною 1,5 мм фіксувався на внутрішній стороні порожнистого циліндра, в якому формувався шприцюванням батон за рецептурою молочної ковбаси, а другий аналогічний тепломір під поверхневим шаром фаршу товщиною 2,5 мм. Після електрокоагуляції батон виймали з циліндра і поміщали модель термокамери на опори, що дозволяють осьове обертання батона ковбаси.

Підведення енергії до батона 1 (рис. 83) проводилося за допомогою інфрачервоного випромінювача КІ 3.

Час стабілізації поверхневого шару (обсмажування) становив $5 \div 7$ хв, швидкість обертання батона – приблизно 1 об/хв.

Тепломіри 2 розташовували на протилежних сторонах діаметра батона, так що коли показання одного з них максимальні (проти випромінювача), другого – близькі до мінімуму або навіть негативні (рис. 83).

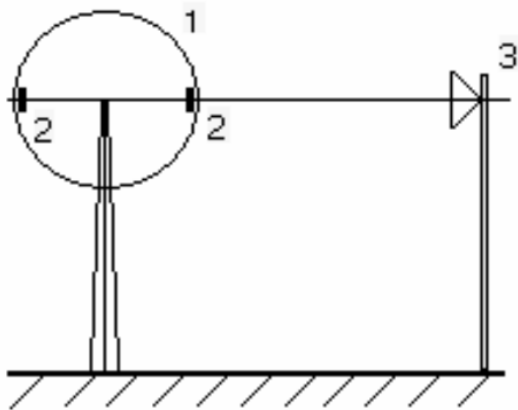


Рис. 83. Схема інфрачервоної стабілізації поверхневого шару ковбаси:
1 – батон ковбаси; 2 – тепловіміри; 3 – випромінювач

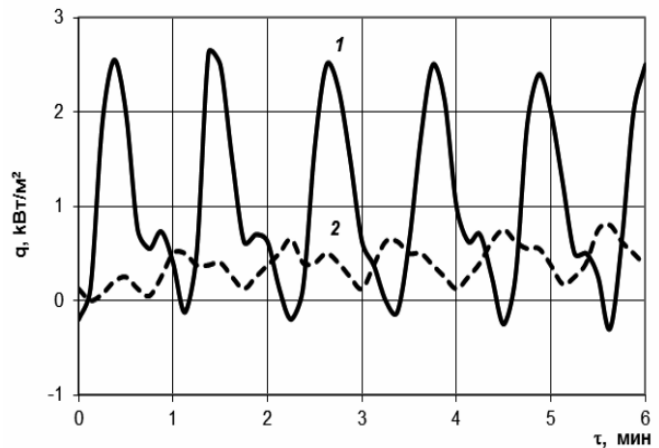


Рис. 84. Густина теплового потоку через поверхню батона (1) та на глибині 2,5 мм (2) після підбору раціональних параметрів обсмажування

Інверсія теплових потоків відбувається в момент, коли тепловімір знаходиться на протилежному боці (в тіні) від випромінювача, а температура навколишнього середовища нижча ніж поверхня батона. Таким чином, причина виникнення зворотних теплових потоків та сама, що й при дозріванні сиру – різниця температур «поверхня продукту – навколишнє повітря» змінює знак.

При вихідних режимних параметрах обсмажування: температура ковбаси після коагуляції 62°C , максимальна густина теплового потоку через поверхню батона $3\text{--}3,3 \text{ кВт/м}^2$ – непотрібний транзитний потік до глибинних шарів становить до двох третин від висхідного потоку через поверхню. Інверсію теплового потоку зафіксовано тепловімірами не тільки на поверхні ковбаси, а й на глибині 2,5 мм. Підбором часу коагуляції та напруги на випромінювачі вдалося

знизити баластовий теплоприплив у центральні шари до однієї третини (крива 1 на рис. 84), а інверсний потік від цих шарів – до нуля (крива 2 на рис. 84). Максимальна густина теплового потоку (а разом з нею та загальна витрата енергії) знижена на 15–20 %.

Таким чином, прямий вимір густини теплових потоків дозволяє розробляти раціональні режими термічної обробки харчових продуктів та виявляти особливості перенесення теплової енергії, недоступні для вимірювання температур. Це пояснюється тим, що тепловий потік визначається не температурою в цій точці продукту, а її градієнтом у цій точці відповідно до першого закону Фур'є:

$$q = -\lambda \text{grad}(t) = -\lambda \frac{dt}{dn} \quad (8.14)$$

де λ – теплопровідність продукту, Вт/(м·К); n – напрямок перенесення теплоти. Знак мінус означає, що вектори густини теплового потоку q , Вт/м² і градієнта температури, К/м, спрямовані в протилежні сторони.

Іншими словами, температура показує потенціал теплової енергії, а густина теплового потоку – напрямок та інтенсивність її перенесення.

Якщо при тепловій обробці з баластними тепловими потоками порівняно легко боротися, то при холодильній обробці необхідно вживати спеціальних заходів. Так, у розглянутому випадку дозрівання сиру, відведення теплоти проводилося за допомогою компресорної холодильної установки, і підтримка температури охолоджуючого повітря на рівні $10 \pm 0,25^\circ\text{C}$ проводилося терморегулюючим пристроєм. Зниження діапазону регулювання температури зменшило б кількість баластної теплоти, але при цьому пропорційно зменшилося б і кількість теплоти, що відводиться за кожний цикл «включення – вимкнення». При цьому час циклу скоротився б, що призвело б до більш швидкого зношування деталей холодильної машини. Єдиним корисним ефектом при зменшенні діапазону регулювання температури буде зменшення товщини

поверхневого шару продукту, що охолоджується, в якому відбувається знакозмінне перенесення теплоти.

Ідеальним рішенням у ліквідації баластових потоків теплоти при використанні компресорних холодильних машин є наявність у камері обробки продуктів буферної ємності – приміщення, де повітря добре перемішується. Якщо такої можливості немає, то терморегулюючий орган потрібно встановлювати якнайдалі від охолоджуваних продуктів. Встановлений факт можливості баластових теплових потоків – ще один аргумент на користь переходу на абсорбційні холодильні установки з використанням вторинного тепла, потенціал якого є досить великим на будь-якому харчовому підприємстві, включаючи молочні та сироробні заводи.

РОЗДІЛ 9. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ

9.1. Продукти хлібопекарського та кондитерського виробництва

Дослідження споживчого сегмента борошняних кондитерських виробів засвідчує, що цей ринок продовжує зростати, попри окремі коливання. Обсяги продажу залишаються високими, що вказує на стабільний попит. Такі вироби міцно входять до повсякденного раціону середньостатистичного українця й регулярно купуються. Доцільність збагачення борошняних кондитерських виробів фізіологічно функціональними компонентами зумовлена тим, що вони є продуктами масового споживання [22].

На необхідність визначення ефективних ТФХ тіста-хліба з одного досліду (з урахуванням масообміну) в умовах, подібних до умови процесу випічки, вказав ще в 1955 р. А.С. Гінсбург. У його монографії наведені способи та результати визначення ТФХ борошна, тіста, м'якуші та кірки різних сортів хліба. Декілька методів визначення ТФХ для цих умов розробив Лісовенко, в одному з них використовується вимірювання густини теплового потоку.

Для визначення ТФХ на лабораторних установках таких лабільних матеріалів, як тісто, використовували переважно метод циклів, оскільки він дозволяє більш ефективно контролювати стан зразка.

Теплофізичні характеристики бісквітних напівфабрикатів визначали у зв'язку з розробкою в НУХТ нової тари для випікання та реалізації продукції, а також для балансових розрахунків промислових печей, які вперше застосовувались для цих цілей, та для узагальнення експериментальних даних.

Густина теплового потоку підбирали досить малою, щоб не змінювати властивостей продукту, настільки лабільного, як тісто для бісквіту, при досить високому сигналі датчиків, що визначає точність вимірів. Задоволення обох вимог відбивалася на стабільних показаннях датчиків теплового потоку при стаціонарному режимі, тобто при визначенні λ . Оскільки первинним є температурний напір у термостатованих камерах прилади ТК-ТК, між якими

розташовували зразок, при вимірі його властивостей неминуче повинен був змінитися і тепловий потік через нього.

Для приготування тіста в лабораторну венчикову збивальну машину завантажували 90 г цукру та 150 г яєць та збивали 10–12 хв. На повільному ході машини додавали 91,5 г пшеничного борошна. Готове тісто з вологістю 36% і густиною 480 кг/м^3 відливали у форму шаром висотою близько 30 мм, з поглибленням до центру, щоб після випікання верхня кірка виявилася практично плоскою. Випікання проводили в лабораторній печі з променисто-конвективним підведенням тепла, при температурі середовища пекарної камери 165°C протягом 26 хв. Верхню або нижню кірку відокремлювали від м'якуша або формували плоский шар м'якуша і не пізніше ніж через 30 хв, починали дослід, загальна протяжність яких з одним зразком не перевищувала трьох годин.

При дослідженні властивостей тіста його не більше ніж через 5 хв після збивання відливали до спеціальної касети, дном якої була нижня камера приладу. Верхню камеру опускали в касету, витісняючи надлишок тіста і створюючи плоский шар потрібної товщини. У зв'язку з лабільністю структури тіста для кожного дослід готували новий зразок (загальний час теплової обробки не вище 25 хв).

Незважаючи на вжиті заходи, відтворюваність дослідів виявилася невисокою, що відбилося у розкиді значень ТФХ при розподілі їх температурної залежності, особливо $c\rho$ і α (рис. 85). Чим менш лабільний матеріал, тим менший розкид.

Так для верхньої корки можна вважати ТФХ постійними: $\lambda = (6,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $c\rho = 1,3 \pm 0,16 \text{ МДж/(м}^3\text{К)}$, $\alpha = (5,0 \pm 0,7) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, $b = 0,3 \pm 0,03 \text{ кВт}\cdot\text{с}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Для нижньої λ трохи збільшується зі збільшенням t і її можна вважати незмінно $\lambda = (11,2 \pm 0,16) 10^{-2}$. Зі зростанням температури теплопровідність тіста знижується від 0,22 через збільшення пористості і наближається до нижньої кірки. Теплоємність тіста знижується з цієї причини від 1,6 до 0,6 МДж/(м³К) при $t = 50\text{--}70^\circ\text{C}$, а потім $c\rho$ м'якушу дещо зростає, можливо, через екзотермічні процеси, а також через ущільнення м'якуша.

Результати дослідження ТФХ, зокрема новий факт настільки різкої

відмінності для верхньої і нижньої кірки, допомогли з'ясувати, чому температурне поле тіста-бісквіта так різко відрізняється в центральному шарі під верхньою кіркою від полів інших хлібобулочних та кондитерських виробів. Дуже мале значення верхньої кірки призводить до того, що остаточний прогрів цього шару відбувається головним чином підведенням тепла знизу.

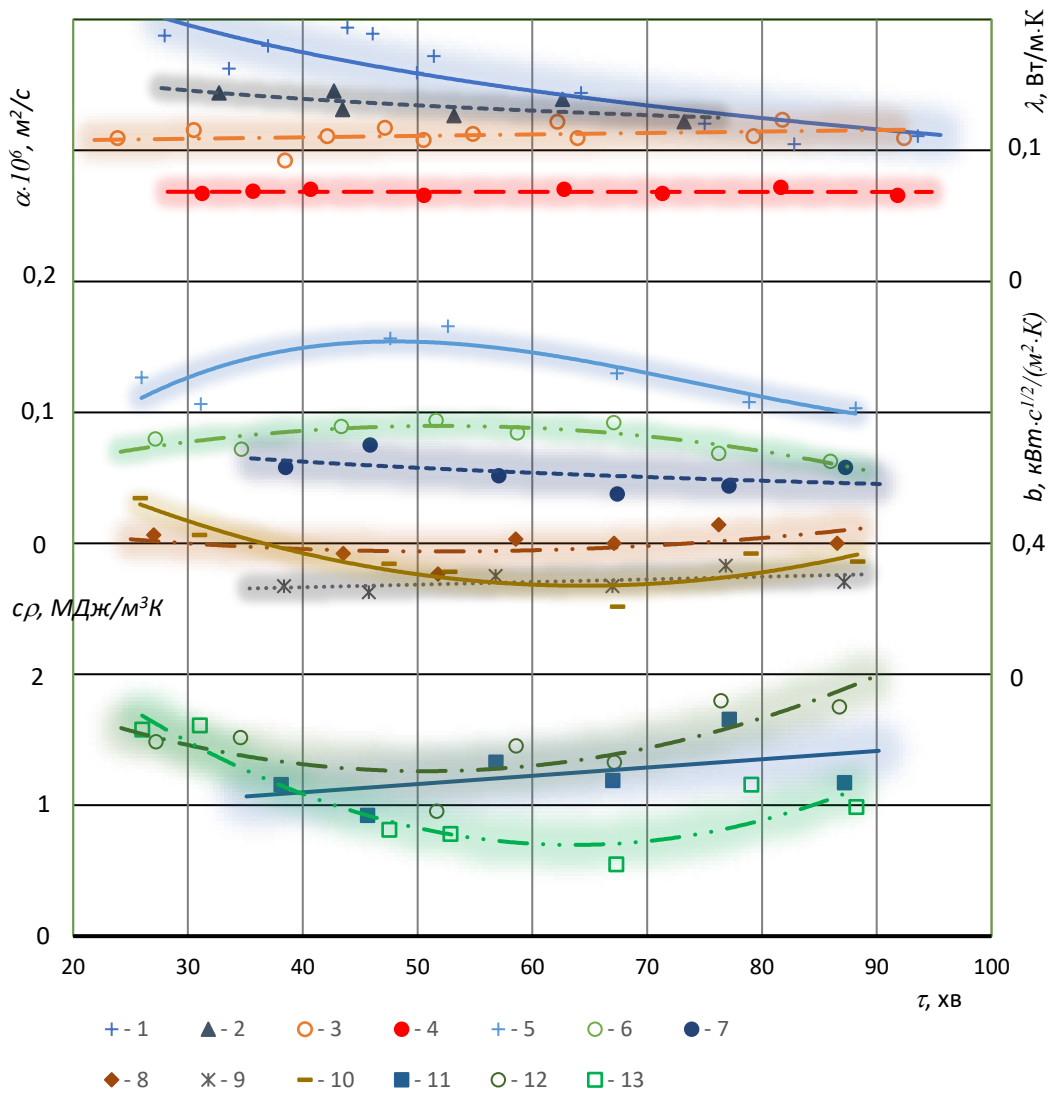


Рис. 85. ТФХ бісквітних напівфабрикатів

9.2. Дослідження технологічних і товарних показників східних сортів коржиків під час випікання в тандирі

Метою роботи було дослідити теплове навантаження в часі та просторі на продукт, звести тепловий і матеріальний баланси, порівняти результати з

відомими даними з випікання коржиків в механізованих печах. Крім того з'явилась можливість перевірити аналітичний розв'язок задачі з неоднорідними граничними умовами в зв'язку з простою геометричною формою коржиків.

Пекарна камера тандира має форму горизонтально розташованого горщика з відкритою вузькою частиною, через яку на розігріту за допомогою інфрачервоного пальника поверхню пода наліплюють тістові заготовки круглої форми. Таким чином, підведення теплоти відбувається від «черіня» теплопровідністю, від пальника – випромінюванням, а від середовища пекарної камери – конвекцією.

У дослідну заготовку з обох боків по центру втискували малогабаритні (10 x 10 x 1,2 мм) малоінерційні датчики теплового потоку [9] з вмонтованими в них термопарами, а в центрі закладали окрему термопару. Вимірювали також температуру середовища пекарної камери і убуток маси коржика.

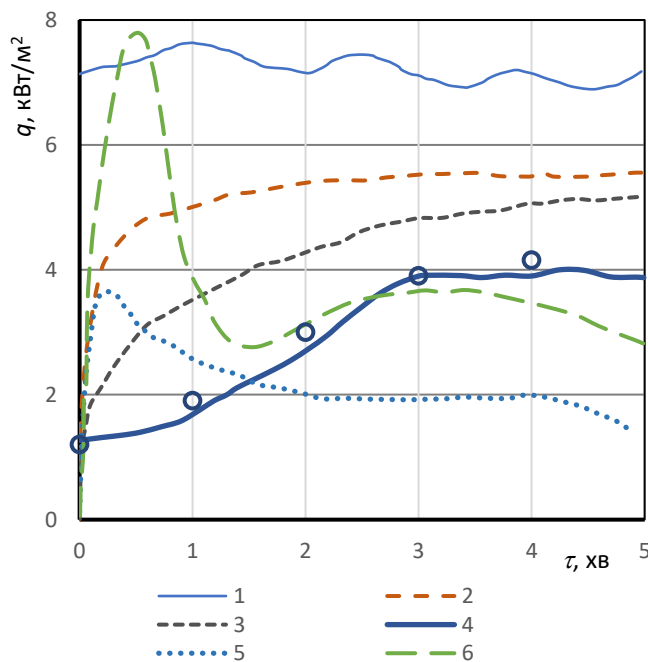


Рис. 86. Зміна температури та теплових навантажень з обох боків коржика обі-нон під час випікання у тандирі

Під час дослідження використовувалися методики органолептичних, фізико-хімічних, функціонально-технологічних та структурно-механічних досліджень [23].

Усереднені статистичною обробкою дані з випікання шести коржиків обі-нон масою 0,2 кг при температурі середовища 175...185 °С (рис. 86, крива 1) дають прості кінетичні залежності для температур нижньої t_n (що

контактує з «черіням») 2, верхньої t_v 3 поверхонь та центру t_c 4, а також для теплових навантажень – від контактного q_1 5 та радіаційно-конвективного q_2 6.

Балансові розрахунки дали позитивні результати: теплота підводилась (на

1 кг продукції) – від «черення» теплопровідністю 72 кДж/кг, променисто-конвективно 233 кДж/кг. Розрахунок за рівнянням теоретичної витрати теплоти з врахуванням витрати на убуток маси дав 293 кДж/кг.

Оскільки різниця в сумарній витраті теплоти склала менше 4,1 %, зроблена спроба перевірки розв’язання прямої задачі теплопровідності одномірного тіла (пластини) з відомим змінним тепловим потоком по одній поверхні та, для однозначності, з відомою змінною температурою на другій поверхні.

Найбільш прості апроксимуючі рівняння були одержані для q_1 та t_6 :

$$q_1(\tau) = 2000 + 2300 \cdot e^{-1,52\tau} \quad (9.1)$$

$$t_6(\tau) = 130 - 96 \cdot e^{-0,83\tau} \quad (9.2)$$

де τ – час, хв; q_1 – густина теплового потоку на поверхні коржика збоку, Вт/м²; t_6 – температура зовнішньої поверхні.

Підстановка коефіцієнтів із (9.1) та (9.2), а також теплофізичних характеристик тіста коржика з довідника [1] – теплопровідності $\lambda(\tau)$ – 0,29...0,26 Вт/(м·К) і температуропровідності $\alpha(\tau)$ – $(1...2) \cdot 10^{-7}$ м²/с, дала можливість співставити дослідні та розрахункові дані по температурі в центрі коржика. Під час розрахунку $t_6(\tau)$ враховували зміни товщини коржика h під час випікання за найпростішою лінійною залежністю (оскільки вимірювали λ лише на початку та наприкінці випікання), а також зміну ефективної α за рахунок теплоти випаровування води. Розрахунок вели для $\tau = 0; 1; 2; 3; 4$ хв. На рис. 86 результати нанесені кружками.

Непоганий збіг даних дає підстави сподіватись, що за результатами теплометрично-термометричних досліджень різних технологічних процесів можна одержати нову «інверсну» інформацію, як під час дослідження залежності теплопровідності вершків від жирності одержано майже функціональну зворотну залежність [21], що може суттєво скоротити час визначення жирності вершків у процесі їх обробки. Цього разу можна буде з’ясувати, в якому стані – у вигляді рідкої води або пари переміщується волога в середині тіста коржика у

будь-який момент часу.

Для порівняння кінетики теплопідведення до коржиків у різних печах використовували параметричні числа $\pi_\tau = \tau/\tau_k$ та $\pi_a = q_n/q$, де τ – поточний час випікання, τ_k – кінцевий час випікання, q_n та q – поточна і кінцева інтенсивність підведення теплоти з боку пода.

Результати розрахунку залежності π_a від π_τ показали, що вона найбільш стабільна для тандиру: в початковий період (до $\pi_o = 0,5$) π_q коливається від 0,3 до 0,43, а в подальшому підтримується на рівні 0,3 (рис. 87). Для печі БН–50 π_q коливається дуже сильно (від 0,1 до 0,5), для двох інших – спочатку 0,6–0,7 та плавно знижується до 0,3. На рис. 87 нанесена також зміна сумарних теплоприпливів $q(\pi_\tau)$ для тандира та печі Брувера – Саліхова.

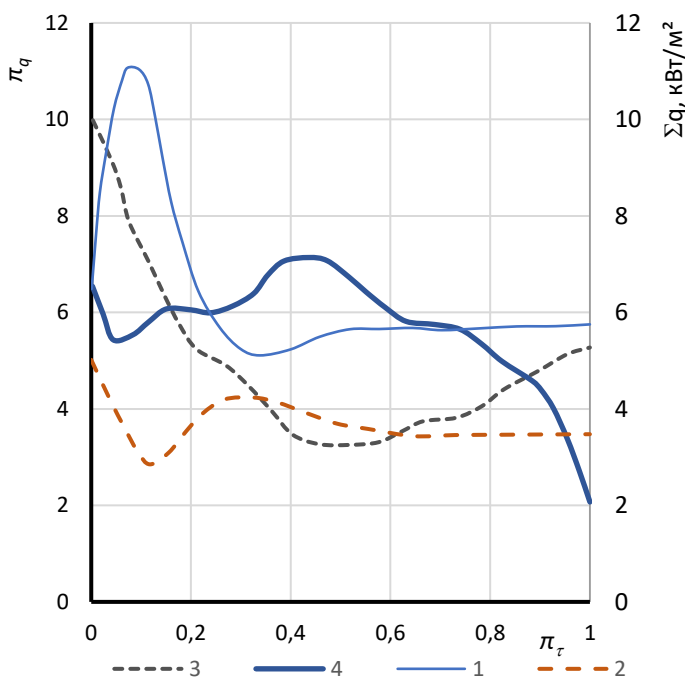


Рис. 87. Порівняння сумарного тепловиділення Σq і частки енергії, що підводиться знизу π_q , для тандира (1, 3) і печі Брувера – Саліхова (2, 4)

Із рис. 87 видно, що підведення теплоти у тандирі є більш рівномірним, а її витрата на випікання – найменша. Убуток маси в цій печі також найменший (це пов'язано з рівномірним зволоженням коржиків). Органолептичні показники готової продукції для тандира є також найбільш високими.

Під час конструювання і налагодження печей для східних коржиків слід користуватися кінетикою теплопідведення кривих 5 та 6 рисунка 1, кривих 1 та 3 рисунка 2. Поди (черені) слід робити масивними, із матеріалу з високою теплоємністю. Необхідно слідкувати за рівномірним зволоженням заготовок.

9.3. Залежність товарних і теплофізичних показників кексів від матеріалу форм для їх випікання

Згідно зі статистичними даними стабільно високим попитом у населення України користуються борошняні кондитерські вироби, зокрема кекси, що робить їх перспективним об'єктом для модифікації. Форми для випікання кексів можуть бути різних конфігурацій і розмірів, а також виготовлятись із різних матеріалів. Правильно підібрана форма підвищує товарні властивості кексів та зменшує енерговитрати.

Органолептичні дослідження кексів, що випікаються у формах, з метою вибору матеріалу форм, та в яких готові вироби можуть надходити до торгівельної мережі, показали, що між матеріалом форм та тепловим режимом випікання є певний зв'язок. Так, випікалися кекси в масивних металевих формах (традиційний спосіб), в формах із антиадгезіонного паперу (для запобігання прилипання тіста папір просочувався розчином полівінілового спирту в суміші з органічною рідиною та невеликою кількістю каталізатора отвердіння), а також у формах із алюмінієвої фольги.

Результати дослідів показали значну різницю у товарному вигляді готових виробів, однак, верхня поверхня кексів у всіх формах змінювалась однаково: підйом тіста відбувається в основному в її центрі, поверхня спочатку стає опуклою, потім на ній утворюються глибокі, характерні для кексів тріщини рівномірного забарвлення, з боків і знизу забарвлення кексів з масивної металеві форми є рівномірно золотавим, з паперової та фольгової форми – знизу коричнювате, а на боковій поверхні – більш бліде. За результатами органолептичних досліджень виявлено, що усі дослідні зразки кексів були добре пропечені, без закалу та слідів неперемішування, характеризувалися приємним зовнішнім виглядом. Отже, малоінерційні форми разового використання змінюють рівномірність підведення теплоти до виробів.

Для оцінки цієї нерівномірності було проведено безпосереднє

вимірювання теплоприпливів з боків та знизу тіста кексу. Для цього використовували малогабаритні (10x10x1,2мм) малоінерційні тепломіри [9]. Їх змочували у тісті та щільно прикладали на половині висоти та в центрі денця форми. Випікали кекси (166 г тіста) в однакових прямокутних формах із листового алюмінію, фольги і паперу із антиадгезійним просочуванням. Моделлю промислової печі слугувала лабораторна піч з нижнім та верхнім обігрівом. Вироби випікали по черзі в різних формах, із суворим додержанням теплового режиму.

Густина теплового потоку до виробів, що випікалися в масивній алюмінієвій формі, майже однакова та однаково змінюється в часі для бокової та нижньої поверхні виробу (рис. 88, крива 1 та 2) у зв'язку із значним перетіканням теплоти, що приходить знизу, по бокових стінках форми.

Для паперової форми теплоприпливи через денце майже вдвічі інтенсивніші ніж через бокові поверхні протягом усього процесу випікання – теплопровідність паперу є дуже малою (рис. 88, крива 3 та 4). Майже таку саму картину маємо для виробів, що випікалися в формах із тонкої фольги (рис. 88, криві 5 та 6).

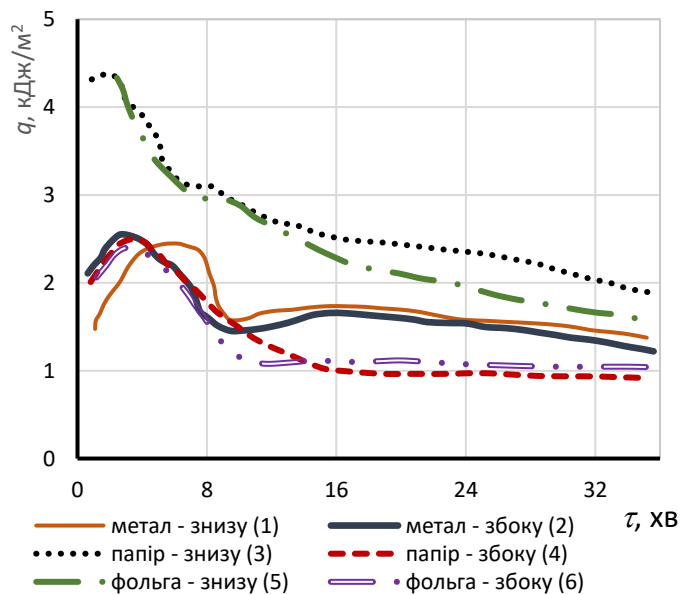


Рис. 88. Розподіл теплоприпливів до кексу, що випікається в формах із різних матеріалів

Кількісні дані щодо припливів теплоти знизу та збоку кексів під час їх випікання підтвердили органолептичні дослідження цих виробів і є основою для створення теплового режиму і технологічного регламенту випікання кексів в разових формах, а витрати на зміну режимів теплопідведення (наприклад, збільшення швидкості підведення тепла) швидко компенсується заощадженням мастильних продуктів та покращенням санітарних умов випікання і реалізації кексів.

9.4. Теплопоглинання тістовою заготовкою в процесі випікання в конвективних хлібопекарських печах

При випіканні в конвективних печах на зміну величини теплового потоку, що сприймається тістом-хлібом, що випікається, по ходу конвеєра, впливають: зона зволоження; поперечні балки, що підтримують верхню поверхню, що гріє; радіаторні коробки; природна вентиляція робочої камери через завантажувальне та розвантажувальне гирла печі. В результаті крива зміни інтенсивності теплового потоку виходить ламаною, зберігаючи при цьому загальний характер закономірності – різкий підйом спочатку з поступовим зниженням наприкінці випічки.

При випіканні в печі зі стаціонарним подом перераховані причини відсутні або їх вплив незначний, тому крива теплопоглинання буде більш плавною, неламанною.

Були використані елементи теорії променевої теплопередачі та теорії огинаючих параметричних сімейств функцій, а також теорії апроксимації кривих та комп'ютерної графіки в середовищі Excel. Застосовуються положення прикладної геометрії та чисельних методів.

Теплопоглинання верхньою поверхнею тістової заготовки для булочки «Дніпровська» масою 0,06 кг при випіканні у конвективній печі наведено на рис. 89. При цьому середня температура пекарної камери $t_{n,k} = 200^{\circ}\text{C}$ та швидкість повітряного потоку $v = 5 \text{ м/с}$.

При обробці експериментальних даних виявилось, що теплопоглинання тістовою заготовкою апроксимується степеневою залежністю.

$$y = C \cdot X^n \quad (9.3)$$

$$q_1 = C \cdot t^n \quad (9.4)$$

де q_1 – кількість тепла, що передається верхній поверхні тістової заготовки

конвекцією та випромінюванням, Вт/м^2 ; t – тривалість випічки, с;
 C, n – коефіцієнти, величину яких потрібно визначити.

З рис. 89 видно, що теплопоглинання в ході випічки має різний характер у I та II періодах процесу випічки, від аналітичної залежності (9.3) при цьому зберігається.

Графічним методом визначаємо величину коефіцієнта для I та II періодів процесу випічки:

$$n_I = 0,10; n_{II} = - 0,45.$$

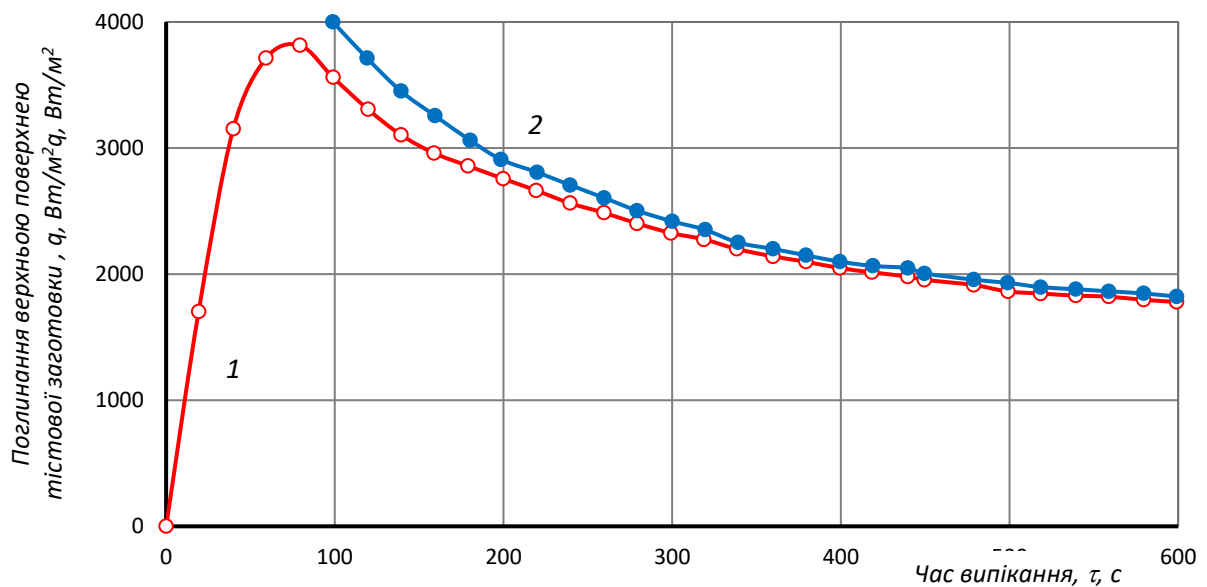


Рис. 89. Графік теплопоглинання верхньою поверхнею тістової заготовки булочки «Дніпровська»:

1 – зміна теплового потоку на поверхні верхньої кірки за експериментальними даними, Вт/м^2 ; 2 – теоретична величина теплового потоку на поверхні верхньої кірки Вт/м^2 .

Коефіцієнт C (відповідно для I та II періодів дорівнює 2480 та 30200) визначено методом середніх значень, після логарифмування рівняння (9.4):

$$\lg q_1 = \lg C + n \cdot \lg t \quad (9.5)$$

Підставивши значення коефіцієнтів n_I, n_{II}, C_I, C_{II} до рівняння (9.5), отримаємо остаточний вид аналітичної залежності для поглинання тепла верхньою поверхнею тістової заготовки:

у I періоді

$$q_I^1 = 2480^{0,10}, \text{ Вт / м}^2 \quad (9.6)$$

у II періоді

$$q_I^2 = 30200^{0,10}, \text{ Вт} / \text{ м}^2 \quad (9.7)$$

Сумарну кількість теплоти, поглиненої верхньою поверхнею тістової заготовки булочки «Дніпровська» при рециркуляції середовища робочої камери, отримаємо, проінтегрувавши залежність (9.4):

$$\int_a^b C t^n dt = C \frac{t^{n+1}}{n+1} \Big|_a^b \quad (9.8)$$

З рисунка видно, що I період випічки триває до $t = 90$ с, тоді:

$$q_I^1 \int_{t=0}^{t=90} dt = 248_{t=0}^{t=90} \frac{t^{0,1+1}}{0,1+1} dt \quad (9.9)$$

$$q_I^2 \int_{t=90}^{t=600} dt = 30200_{t=90}^{t=600} \frac{t^{-0,45+1}}{-0,45+1} dt \quad (9.10)$$

що практично збігається з розрахунком за експериментальними даними, відхилення величини теплового потоку – q_{lcp} , розрахованого за виведеним рівнянням, від експериментальних даних не перевищує 2,6%.

На початку випікання теплопоглинання тістовою заготовкою уповільнене. Якщо припустити, що теплопоглинання протягом усього часу апроксимується рівнянням (9.7) – див. пунктирну криву на рисунку, – фактичне зменшення поглинання теплоти складе:

$$\Delta q_I = \frac{30200 \int_{t=0}^{t=90} \frac{t^{0,55}}{0,55} dt - 2480 \int_{t=0}^{t=90} \frac{t^{1,1}}{1,1} dt}{30200 \int_{t=0}^{t=600} \frac{t^{0,55}}{0,55} dt} \cdot 100\%; \quad \Delta q_I = 19,3\%$$

З наведених розрахунків видно, що при рециркуляції середовища пекарної камери тістова заготовка повинна отримати тепло відповідно до рівнянь (9.6) і (9.7), але приблизно 19% теплоти тістова заготовка недоотримує через

інтенсивне випаровування вологи з її поверхні на початку випічки.

Виведемо рівняння теплопоглинання верхньою поверхнею тістової заготовки стосовно безрозмірного відносного часу. Безрозмірний час дорівнює:

$$\Theta = \frac{\tau}{\sum \tau} \quad (9.11)$$

де τ – відносна тривалість випікання на даний момент часу; $\sum \tau$ – загальна тривалість випікання виробу.

За аналогією з рівняннями (9.6) та (9.7) отримуємо рівняння теплопоглинання верхньою поверхнею тістової заготовки при рециркуляції середовища робочої камери:

у I періоді

$$q_I^1 = 4700 \cdot t^{0,10}, \text{ Bm} / \text{m}^2 \quad (9.12)$$

у II періоді

$$q_I^2 = 1700 \cdot t^{-0,45}, \text{ Bm} / \text{m}^2 \quad (9.13)$$

Формули (9.12) та (9.13) можна рекомендувати для практичного застосування при розрахунках печей з рециркуляцією середовища у пекарній камері.

9.5. Вимір теплових потоків при остиганні хліба

Щоб здійснювати теплотрію процесів охолодження хліба безпосередньо у приміщенні для остигання на хлібозаводі Б.П. Шубенко виготовив комплект шаруватих датчиків теплового потоку та проградував їх разом з комутаційними проводами та перемикачем, використовуючи як вторинний прилад гальванометр М-195/2. Оскільки за час охолодження рівень теплових потоків від хліба змінюється великою мірою градування проводилося для двох діапазонів чутливості гальванометра (x10 та x100). Ефективна теплопровідність датчиків була дещо вищою, ніж теплопровідність готового подового хліба, і становила

0,6 Вт/(м·К).

Н.С. Вологіна, Л.В. Рудак та В.Г. Федоров досліджували кінетику тепловідведення при охолодженні українського нового хліба в умовах експедиції Київського хлібозаводу №2. Одразу після розміщення хліба на етажерці в коровай закладали датчики теплового потоку за допомогою тангенційних надрізів на верхній та нижній кірках. При цьому датчики розташовувалися безпосередньо під кіркою та утримувалися в положенні, перпендикулярному напрямку теплового потоку, за рахунок пружного м'якуша. Рівень теплових втрат на початку процесу остигання становить 400–500 Вт/м², а згодом

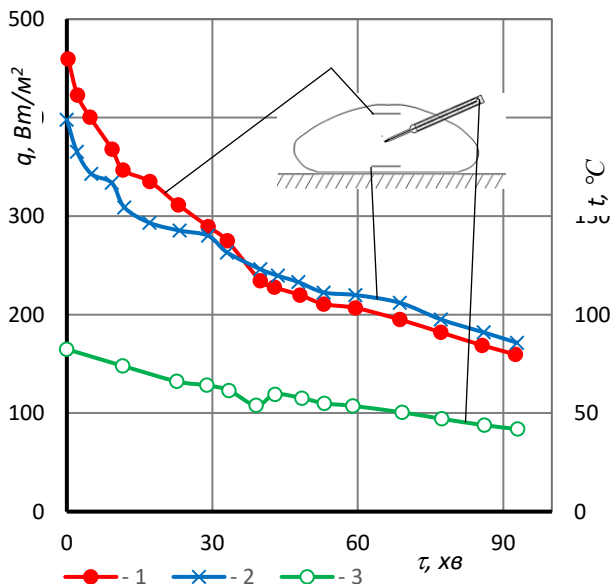


Рис. 90. Кінетика остигання хліба

перебування на етажерці падає до 150 Вт/м². Для короваю, який охолоджувався на верхній полиці етажерки, тепловтрати через верхню кірку спочатку більші (рис. 90) у зв'язку з частковим випромінюванням на стіни приміщення експедиції, оскільки температура поверхні кірки при перевищує 77°C. Випромінювання нижньої кірки є практично

рівноважним, так як знизу знаходиться суцільний ряд короваїв з такою ж температурою.

Теплопровідність і температуропровідність хліба як відомо, досить низька, тому температура верхньої кірки знижується швидше ніж нижньої, що призводить до вирівнювання тепловтрат, а в кінцевий період тепловідведення знизу може бути навіть більше, ніж зверху. Температура у центрі короваю (нижня крива рисунку) визначалася ртутним термометром із ціною поділок 0,2 К.

Досвід вимірювання питомих тепловтрат q дозволив визначити також інтенсивність цих втрат, тобто коефіцієнт тепловіддачі α . Для цього вимірювали

різницю температур кірки-повітря для верхньої кірки короваю, розміщеного на верхній полиці етажерки. Один спай мідь-константової термопари діаметром термоелектродів 0,15 мм закріплювався в кірці над тепломіром, а другий, захищений від випромінювання екраном із алюмінієвої фольги товщиною 0,06 мм, – у повітрі проти першого спаю. Вторинним приладом служив переносний потенціометр КП-59. Оскільки температурне поле повітря в умовах охолодження короваїв на етажерці при вільній конвекції дуже нерівномірне, відстань від іншого спаю до поверхні S розраховували за формулою для напрямної точки, що дозволяє оцінити товщину примежового шару.

$$S = \frac{\lambda}{\alpha} = \frac{0,25}{12} \approx 0,05 \text{ м}, \quad (9.14)$$

де λ – орієнтовне значення ефективної теплопровідності стінки, взяте як середньоарифметичне з λ м'якшу і λ кірки, Вт/(м·К); α – значення сумарного коефіцієнта тепловіддачі верхньої кірки до повітря, отримане в попередніх дослідках, Вт/(м²·К).

Для перевірки можливості застосування пропонованого методу визначення коефіцієнта тепловіддачі та його точності коефіцієнт тепловіддачі розраховували також за емпіричною формулою, Вт/(м²·К)

$$\alpha = 9,8 + 0,08\Delta t, \quad (9.15)$$

Ця формула рекомендована для ізольованих поверхонь апаратів при відводі тепла від них вільною конвекцією та випромінюванням у виробничих умовах, якщо коефіцієнт випромінювання поверхні $C = 5,25$ Вт/(м²·К⁴). Спеціальні дослідження показали, що коефіцієнт випромінювання кірки українського хліба досить близький до цієї величини.

Розрахункові значення коефіцієнта тепловіддачі нанесено на рис. 91 у вигляді хрестиків. Крива, яка узагальнює перебіг коефіцієнта тепловіддачі у часі, є загальною для дослідних розрахункових даних. Це свідчить про досить високу

точність вимірювання густини теплових потоків і перепадів температур даним методом. При падінні тепловтрат і різниці температур у 2–3 рази їхнє

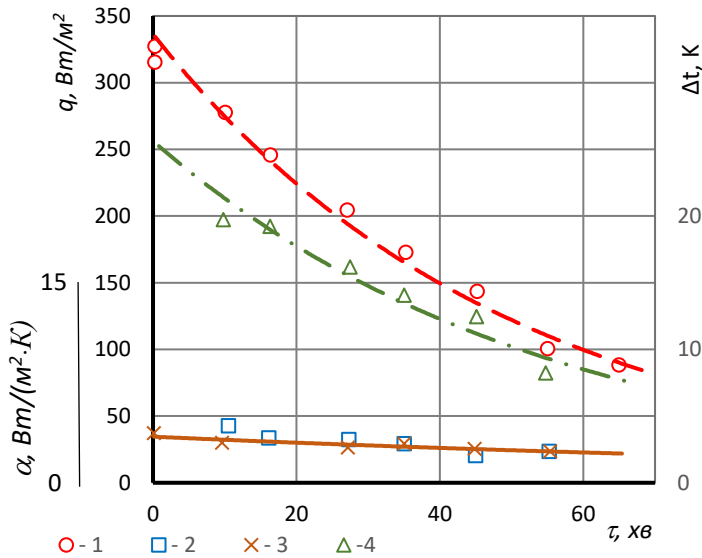


Рис. 91. Коефіцієнт тепловіддачі при остиганні хліба

відношення залишається майже незмінним і дещо знижується за рахунок зменшення температурного перепаду, що впливає на конвективну та променисту складові тепловтрат.

Для описаних вище дослідів можна оцінити тепловтрати за рахунок масообміну на основі

вимірювання усушки хліба за час його остигання (паляниці зважувалися до і після досліду), що склала в середньому $m = 0,07 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$. Приймаючи середню різницю температур під час остигання $\Delta t = 20 \text{ К}$, отримаємо з виразу для масообмінної складової коефіцієнта тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$\alpha_m = \frac{q_m}{\Delta t} = \frac{m \cdot r}{\Delta t} = \frac{0,07 \cdot 2250 \cdot 10^3}{3600 \cdot 20} = 2,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

де $t = 2250$ – середнє значення теплоти випаровування, Дж/кг.

Отримана величина $\alpha_m \approx 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ мала порівняно з інтенсивного «сухого» теплообміну, тому для теплових розрахунків цехів для остигання хлібо заводів можна користуватися орієнтовним значенням. Для проектування систем кондиціонування повітря необхідно знати кінетику масовіддачі в процесі охолодження хліба. Датчики теплового потоку, застосовані у цих дослідах, у кращому разі не реагували на масообмінну складову теплового потоку; потік вологи змушений обходити платівку тепломіра, оскільки її дифузійна проникність дорівнює нулю. Роботи зі створення перфорованих датчиків

допоможуть вивчити комплекс явищ теплообміну за час остигання хліба, що дасть можливість регулювати цей процес у різних його фазах (ізолювати або додатково охолоджувати транспортери та лотки, змінювати вологість та швидкість повітря) з метою отримання мінімальної усушки.

9.6. Теплометрія обробки сипких матеріалів

Процеси теплової обробки зернистих сипких матеріалів у харчовій промисловості є, як правило, нерівномірними або в часі, або в просторі. До перших відносяться процеси, що відбуваються в періодичних апаратах для сушіння, смаження і тощо, до других – безперервно діючих апаратах. Всі ці процеси характеризуються малою інтенсивністю теплообміну між гріючою поверхнею і шаром, тому відоме широке розмаїття методів поліпшення теплообміну (механічне перемішування, фільтрація газів через шар, псевдозрідження). Особливо важливими ці питання є при обробці термолабільних продуктів, що не допускають великих перегрівів.

Застосування теплометричних засобів щодо теплообміну з різними видами шару сипких матеріалів дозволяє досліджувати кінетику процесу, отримати поля теплових потоків в апаратах зі складними гідродинамічними умовами.

Кінетику теплопідводу до шару мелкозернистого матеріалу (соняшникової м'ятки) від плоского днища жаровні досліджував Р.Ф. Скаковскій і М.І. Касякин. Вимірювання теплових потоків до шару проводили галетними датчиками, заправленими заподлице у днище, температура – хромель-копелевими термопарами, спаї яких розташовувалися в днище і в шарі.

Попередні досліді показали, що при зміні технологічних та теплотехнічних параметрів (висота шару м'ятки, тип і кількість обертів мішалки, температура стінки тощо) теплові потоки залишаються рівномірними по поверхні днища незначно (до 3,5%) збільшуючись до периферії. Тому зміна поля не вивчалася, а в основних дослідіх підраховували густина теплового потоку як

середнє арифметичне показання трьох датчиків. На рис. 92 наведено результати одного з дослідів (температура стінки 155°C , висота шару м'ятки $H = 0,08$ м, швидкість обертання мішалки $n = 27$ об/хв, кількість лопатей – 2, висота лопаті $h = 0,02$ м, нахил лопаті горизонту $\varphi = 60^{\circ}$). Щоб виключити вплив вологообміну на теплообмін, м'ятку висушили попередньо на сублімаційній установці до вологості 0,35 % і зберігали до дослідів в герметично закупорених ємкостях.

З малюнка видно, що густина теплового потоку змінюється у часі за кривою, близькою до експоненти. Середня температура шару t_m зростає, а $\Delta t = t_n - t_m$ зменшується також за експонентою. Температура контакту поверхні нагріву та матеріалу t_n (вимірювалася термопарою, сплющений спай якої закріплювався на клеї БФ-2 у лунці на поверхні нагріву), яка спочатку була на 12 К нижче температури стінки t_c , зростає до t_c протягом 0,3 год (на рис. 92 не нанесена). Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = q/\Delta t$ практично не змінюється у часі (максимальне відхилення від горизонтальної прямої 1,6%). Тому для узагальнення даних ця величина є дуже зручною.

Вибір типу мішалки, яка дає найкраще перемішування, проводили за величиною α . Досліджено три типи мішалок: дволопатевої з однаковою висотою по радіусу $h = 20$ мм 1 і з висотою, що знижується, від 20 до 5 мм 2, а також чотирилопатевої з однаковою висотою $h = 20$ мм³ в залежності від кута нахилу лопаті до горизонту φ . Найбільшу інтенсивність перемішування дає мішалка типу 1 із кутом нахилу $\varphi = 60^{\circ}$ (рис. 93). Тому подальше дослідження проводилося лише з цим типом мішалки.

Зі зростанням висоти лопаті h збільшується і α приблизно до висоти $h = 35$ мм, так як при цьому поліпшуються умови перемішування матеріалу, підведення і відведення частинок, що контактують з поверхнею, що гріє. Другим характерним розміром є висота шару H . Зі збільшенням H/h зменшується α , ця залежність слабшає, починаючи з $H/h = 6$. При малих $H/h < 2$ може відбуватися оголення поверхні нагріву, що рівноцінно зниженню α .

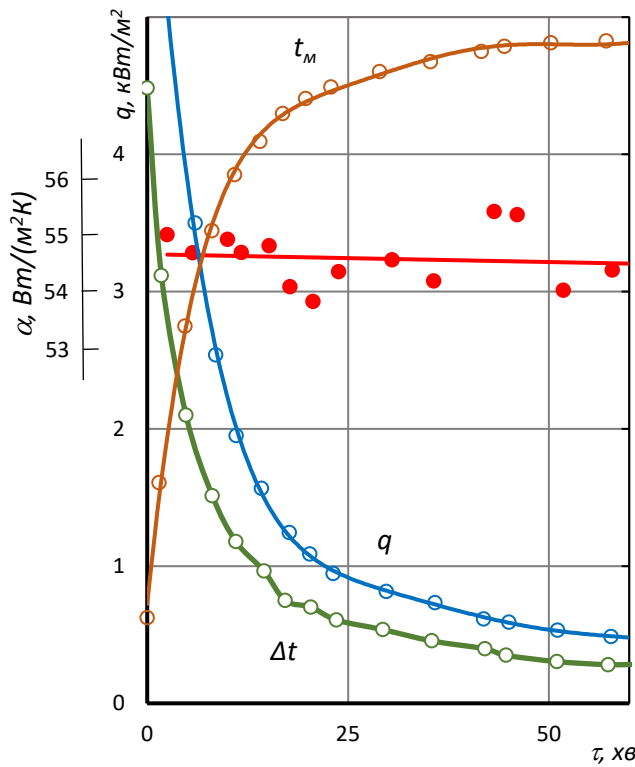


Рис. 92. Кінетика теплообміну при смаженні м'ятки

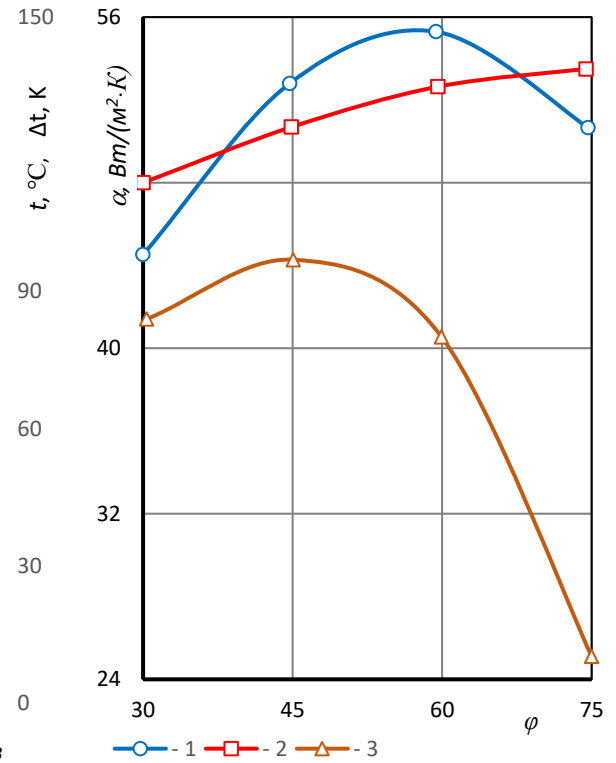


Рис. 93. Вплив кута нахилу мішалки на α

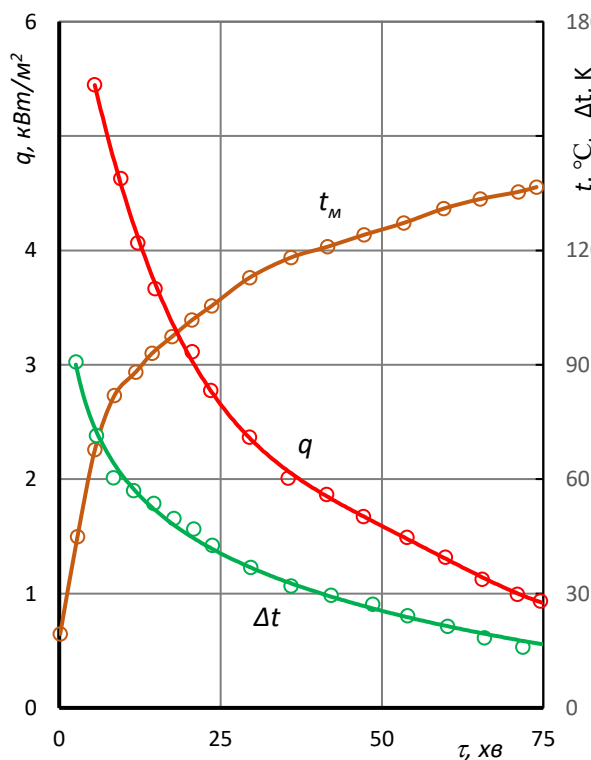


Рис. 94. Кінетичні криві при смаженні вологої м'ятки

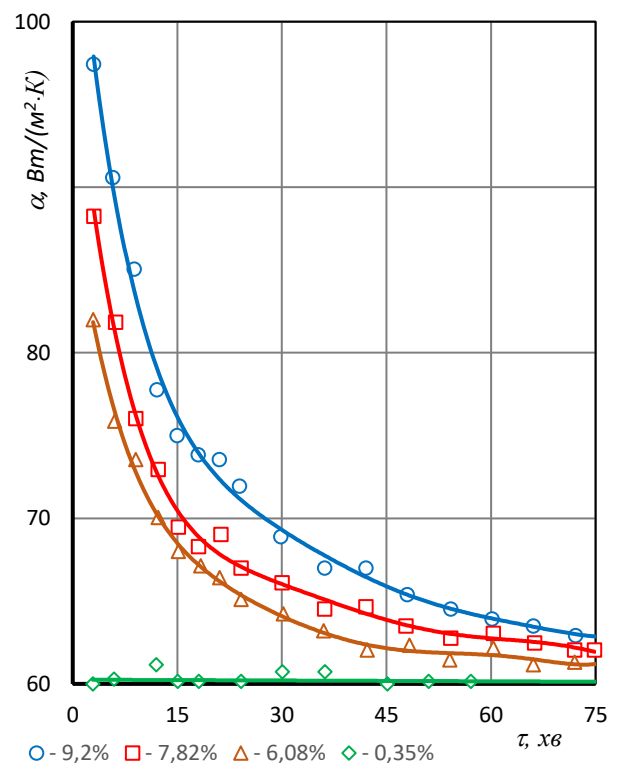


Рис. 95. Вплив на коефіцієнт тепловіддачі вологості зернистого матеріалу

Збільшення швидкості обертання мішалки n в межах $n = 10 \div 50$ об/хв

призводить до лінійного зростання α у зв'язку з покращенням умов перемішування та зменшенням часу контакту τ_k до кожної частинки з поверхнею, що гріє. Збільшення температури поверхні t_c призводить до деякого зростання α .

Характер зміни теплових потоків, температури шару і Δt у часі такий самий, як для випадку тепловіддачі до сухої м'ятки, але криві не такі круті (рис. 94), що пов'язано з більш повільним наростанням t_m . Коефіцієнт тепловіддачі зменшується та поступово наближається до значення α для сухого продукту. На рис. 95 показано зміну α у часі для різних W_n . Найбільші початкові значення інтенсивності теплообміну відповідають більшим значенням початкової вологості. При $W_n = 9,2\%$ коефіцієнт тепловіддачі майже в 2 рази вище, ніж для сухого матеріалу, тобто наявність абсорбційно пов'язаної води (про що свідчить відсутність першого періоду сушіння з постійною швидкістю) призводить до значної інтенсифікації теплообміну шару, що механічно перемішується.

9.7. Холодильна обробка хлібобулочних виробів

Питання відведення тепла від готового хліба стають актуальними через проектування нових механізованих хлібоохолоджувачів та експедицій на хлібозаводах. На кожному транспортері або конвеєрі охолоджувача коровай перебуває обмежений час, а для проектування систем вентиляції та кондиціювання важливо знати кінетику тепловідведення від короваю. В охолоджувальних цехах з етажерками виділення тепла на одиницю об'єму приміщення іноді перевищує санітарні норми, тому і в цьому випадку необхідні відомості про інтенсивність теплових потоків від хліба.

Кінетику тепловідведення під час остигання українського нового хліба було досліджено в умовах експедиції Київського хлібозаводу №2. Відразу після розміщення хліба на етажерці в коровай закладали базові елементи за допомогою тангенціальних надрізів у верхній та нижній кірках. При цьому датчики

розташовувалися безпосередньо під кіркою і утримувалися в положенні, перпендикулярному напрямку теплового потоку, за рахунок пружності м'якшу.

Рівень теплових втрат з часом перебування на етажерці знижується від 400–500 до 150 Вт/м². Для короваю, який охолоджувався на верхній полиці етажерки, тепловтрати через верхню кірку 1 (рис. 96) спочатку більше у зв'язку з частковим випромінюванням на стіни приміщення експедиції, оскільки температура поверхні кірки перевищує 90°C. Випромінювання нижньої кірки є критично рівноважним, так як знизу знаходиться суцільний ряд короваїв з такою ж температурою. Температура верхньої кірки знижується швидше ніж нижньої, що призводить до вирівнювання втрат а в кінцевий період тепловідведення знизу 2 може бути навіть більше ніж зверху. Температура в центрі короваю 3 визначалася ртутним термометром, з ціною поділу 0,2 К.

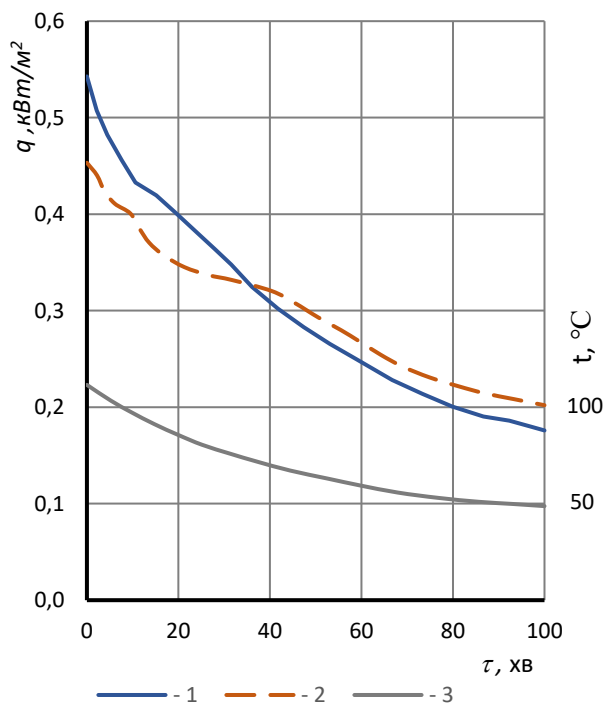


Рис. 96. Кінетика остигання українського нового хліба на етажерці

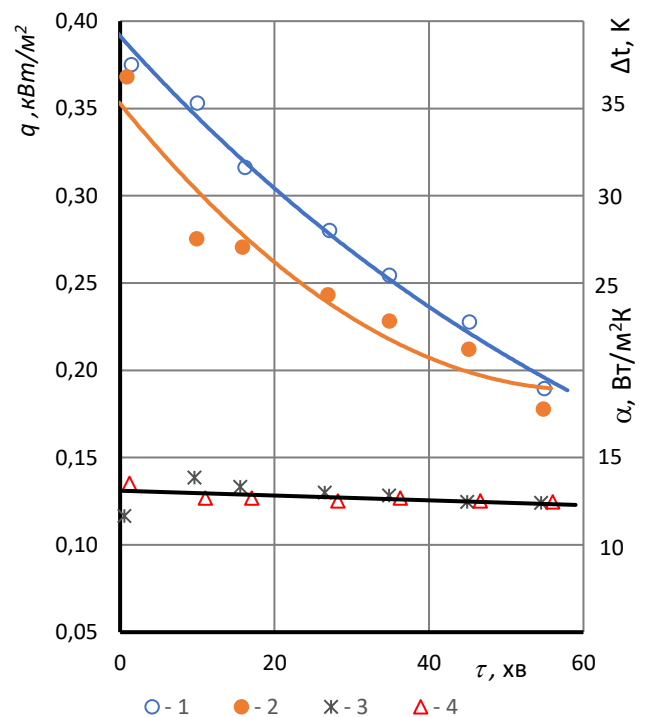


Рис. 97. Теплопередача при остиганні хліба:
1 – q ; 2 – Δt ; 3 – α .

Для визначення α вимірювали різницю температур "шкірка-повітря" для верхньої кірки короваю на верхній полиці етажерки. Один спай МК-термопар з діаметром термоелектродів 0,15 мм закріплювався на кірці над тепломіром, а

другий, захищений від випромінювання екраном з алюмінієвої фольги товщиною 0,06 мм, в точці, що навпроти першого спаю. На рис. 97 представлені результати одного з дослідів середнього, основного періоду процесу остигання хліба (температурі в центрі короваю знижувалася від 65 до 50°C). Значками * позначено значення α , отримані як відношення двох виміряних величин q і Δt в один момент часу. Дані по α звірялися за формулою Каммерера для ізольованих поверхонь апарату при відводі тепла від них вільною конвекцією та випромінюванням у виробничих умовах, якщо коефіцієнт випромінювання поверхні $C = 5,25 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$. Спеціальні досліді показали, що коефіцієнт випромінювання кірки українського нового хліба є досить близьким до цієї величини.

Розрахункові значення позначені на рис. 97 значками Δ . Лінія яка узагальнює хід α у часі, є спільною для дослідних розрахункових даних. Це свідчить про досить високу точність вимірювання методами тепломасометрії. При падінні q і Δt у 2–3 рази їхнє відношення знижується не більше ніж на 10% за рахунок зменшення температурного перепаду.

Для описаних вище дослідів тепловтрати за рахунок масообміну були оцінені на основі вимірювання усушки хліба за час його остигання (паляниці зважувалися до та після досліді), що склала в середньому $j = 0,07 \text{ кг/(м}^2\text{год)}$. Отримана з виразу для масообмінної складової коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_n = j \cdot r / \Delta t$ величина $\alpha \approx 2 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ мала в порівнянні з інтенсивністю «сухого» теплообміну, тому для теплових розрахунків охолоджувачів можна скористатися її орієнтовним значенням.

Висока вартість енергії для здійснення заморожування виробів з метою тривалого зберігання є основною причиною повільного поширення цього прогресивного способу консервування. Тому вивчення інтенсивності відведення енергії від продукту на різних етапах процесу заморожування є актуальним. Для розробки безперервної лінії заморожування хліба або булок необхідно знати кінетику тепловідведення, щоб раціонально розміщувати охолоджувальні пристрої або регулювати швидкість повітря.

Першим дослідом із заморожування пшеничних булок масою 0,2 кг передувало визначення рівномірності тепловідведення від булки за площею, необхідною для розташування двох датчиків. Для цього вибирали плоску поверхню булки, а на ній закріплювали поруч два датчики з однаковим ступенем чорноти $\varepsilon = 0,95$, а булку поміщали на кілька хвилин в холодильну камеру. Вимірювали сигнали датчиків, булку виймали з випарника і розраховували початкові ділянки кривих охолодження. Якщо вибиралися місця в центральній частині булки, то значення теплових потоків відрізнялися один від одного не більше ніж на $\pm 3 \%$.

Не таку поверхню, яку можна назвати ізофлюксою, накладалися та закріплювалися за допомогою тонких пружних стрічок елементи з різним ступенем чорноти. Кінематичні криві охолодження 1 (q_1) та 2 (q_2) на рис. 98 можна розбити на три ділянки. Перший період – інтенсивне відведення тепла при охолодженні булки до кріоскопічної точки на поверхні булки. Другий період (починаючи з $\tau \approx 35$ хв) характерний меншим нахилом кривих за рахунок додаткового виділення теплоти фазового перетворення при заморожуванні. Нарешті при досягненні кріоскопічної температури в центрі булки падіння густини теплових потоків q_1 і q_2 знову збільшується. Кількісні дані щодо кінематики тепловідведення при заморожуванні можуть виявитися необхідними для проектування пристроїв безперервного заморожування хлібобулочних виробів.

Розрахунок q_l і q_k показав (рис. 98), що частка променистої енергії при заморожуванні хлібобулочних виробів може бути отримана такою самою, як і відведення тепла конвекцією. Якщо врахувати, що відведення тепла випромінюванням не супроводжується усиханням продукту, ця інформація може бути корисною при пошуках засобів інтенсифікації заморожування продуктів.

Кінетичні криві q для інших хлібобулочних виробів аналогічні наведеним на рис. 98. Для перевірки меж ділянок кінетичної кривої вимірювали температуру у центрі булочки за допомогою МК-термопар. На рис. 99 наведені

криві q та t для дніпровської булочки масою 0,06 кг. Теплові потоки вимірювалися за допомогою двох однакових датчиків. Середня крива 1 є загальною для їх показань. На рис. 99 видно, що другий період настає при досягненні температури мінус 8°C (крива 2).

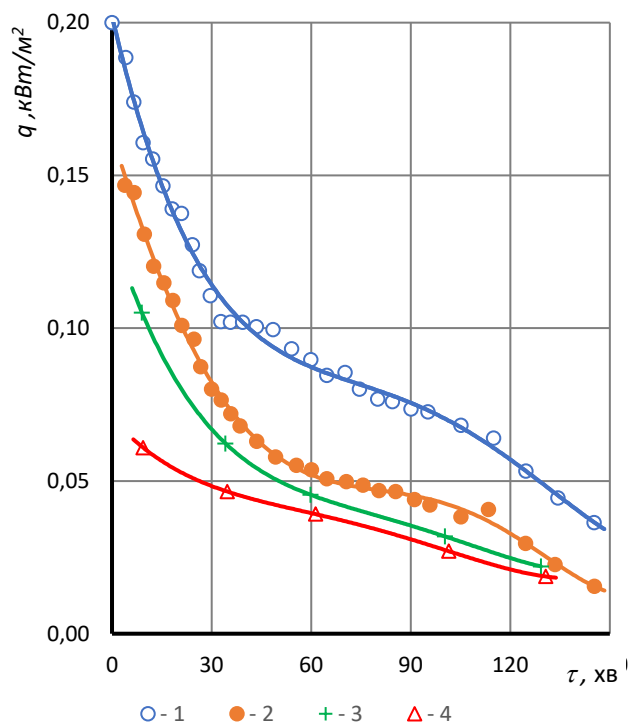


Рис. 98. Кінетика сумарного тепловідведення та його компонентів при заморожуванні пшеничної булки масою 0,2 кг

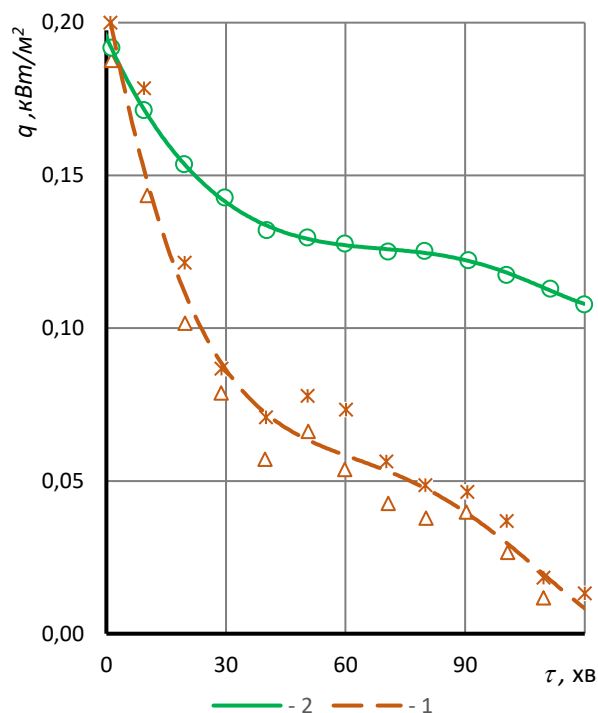


Рис. 99. Заморожування пшеничної булки масою 0,06 кг

РОЗДІЛ 10. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ ПІД ЧАС СТЕРИЛІЗАЦІЇ КОНСЕРВІВ

10.1. Інтенсифікація теплоперенесення під час стерилізації овочевих консервів

Для обґрунтування нових, менш енерго- та ресурсоемних формул стерилізації консервів треба шукати шляхи інтенсифікації перенесення теплоти від гріючого середовища до центра продукту чи точки в ньому з найповільнішим прогріванням. Зрозуміло, що для консервів із густою консистенцією (томатні пасти, пюре та соуси, паштет і т. ін.), в яких конвекція під час стерилізації є практично відсутньою, майже єдиний шлях – у оптимізації розмірів банки щодо відносних витрат пакувального матеріалу та енергії на стерилізацію, продуктивності автоклава, із врахуванням попиту споживачів.

Вважається, що консерви із рідкою консистенцією прогриваються швидше за рахунок активної конвекції всередині банки. Для консервів з "проміжною" консистенцією (зелений горошок, компоти, фрукти у соку і т. ін.) інтенсивність прогрівання залежить від співвідношення "тверда – рідка фаза" та від розмірів плодів чи шматків. Рекомендація з приводу інтенсифікації теплоперенесення для консервів двох останніх груп є досі єдиною: стерилізувати в ротоматах, де ефект здобувається за рахунок перемішування продукту під час обертання банок навколо горизонтальної осі ротомата.

Більшість консервних заводів України працюють на вертикальних автоклавах з нерухомими в них банками, тому треба шукати інші шляхи, наприклад, серед дослідних робіт, які виконувались в часи, коли питання енергозбереження не було таким гострим. Під час теплометричного дослідження стерилізації консервів рідкої консистенції крім локальної густини теплопритоків до стінок та кришки банки СКО-83-1, вимірювали температуру гріючого середовища t_c (води) та в центрі продукту t_n . За модельну рідину брали розчин цукру у воді від 0 до 30% сухих речовин (СР). Відставання в часі t_n від t_c слабо залежить від СР та сягало 3 К/хв при СР = 30% під час нагрівання води від

кімнатної t до 100°C за 20 та охолодження теж за 20 хвилин (рис. 100).

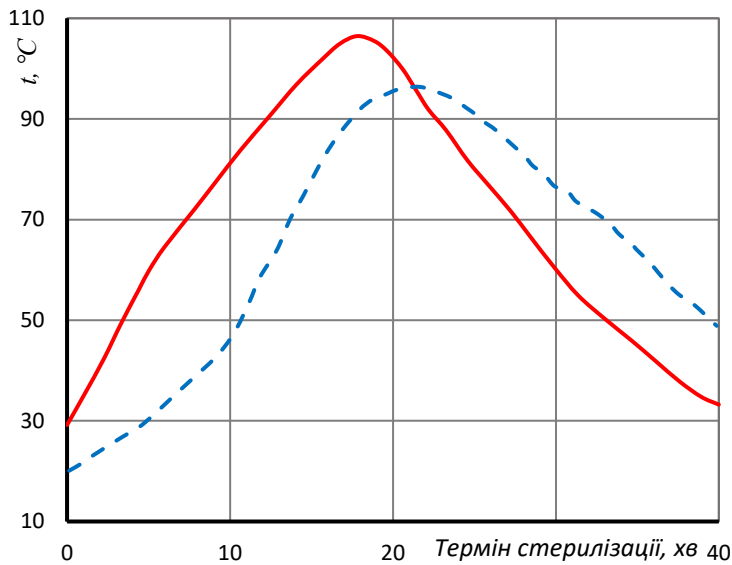


Рис. 100. Динаміка температур під час нагрівання і охолодження консервів рідкої консистенції: суцільна крива – гріючого середовища; штрихова лінія – середня температура продукту

Відставання в цих дослідках є порівнюваним з відставанням при консервуванні густих речовин, наприклад, "Салата июльского", де його величина не перевищувала 4 К/хв , отже є потреба в інтенсифікації теплоперенесення для всіх видів консервів. Аналіз розподілу густини теплових потоків по поверхні скляної

банки в дослідках показує, що вертикальне її розташування не сприяє конвекції всередині банки під час термообробки. Тому було поставлено порівняльні дослід з пастеризації вишневого компоту за умов вертикального та горизонтального розташування банки. Була реалізована формула стерилізації: $\frac{15-30-15}{85}$ (підвищення температури гріючої води від кімнатної до 85°C за 15 хвилин, витримка 30 хвилин та охолодження 15 хвилин). На рис. 101 видно, що в горизонтальній банці конвекція є значно кращою, оскільки згадане вище відставання температури для неї не перевищує $1,1\text{ К/хв}$, а в вертикальній сягає 2 К/хв . Переобладнати сітки автоклавів під горизонтальне розташування банок не складе труднощів, ємність сіток від цього не зменшується, тому для скорочення часу прогрівання та охолодження консервів треба впевнитись, що скло банок витримає підвищені термічні навантаження.

В існуючих формулах стерилізації середня швидкість підвищення температури гріючого середовища в автоклавах $3,5\text{ К/хв}$ та $2,3\text{ К/хв}$ під час охолодження. Для обґрунтування можливості збільшення цих швидкостей було проведено експериментально-графічне дослідження термостійкості скляних банок. Задача була розв'язана методом скінчених різниць, а крайові умови для

неї визначали вимірюванням температур та густини теплового потоку на обох поверхнях центра донця банки, оскільки в цій точці під час натурних випробувань здійснюється найбільше термонапруження [24].

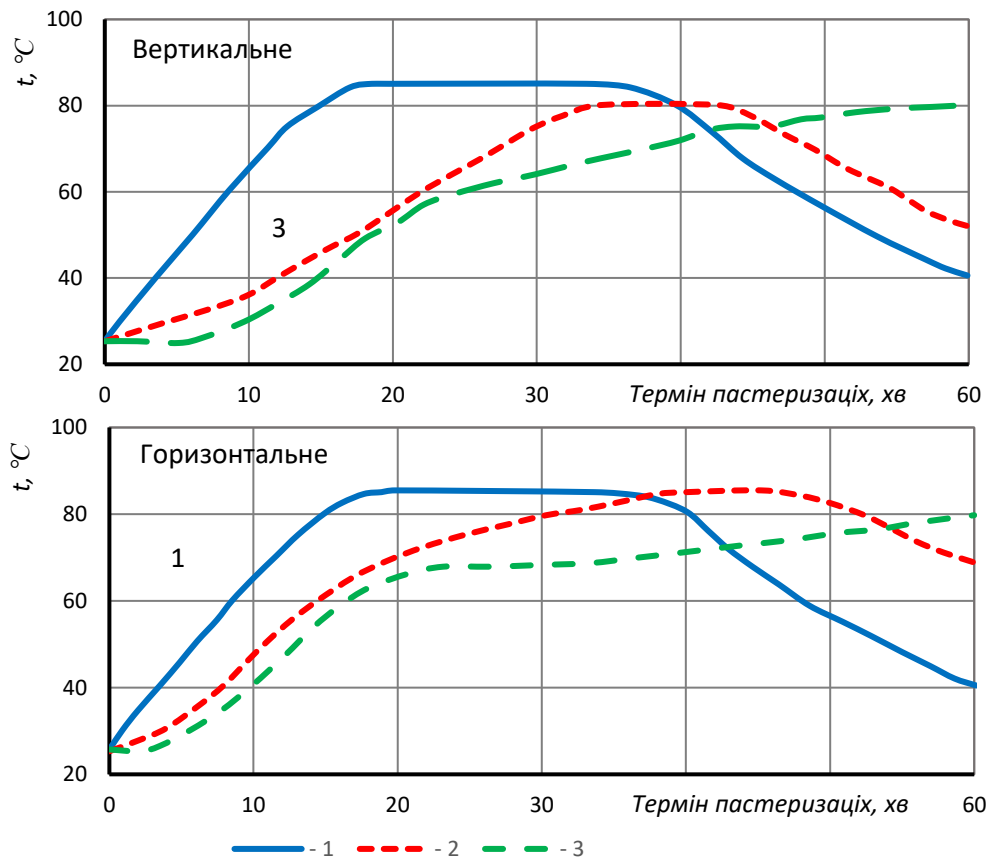


Рис. 101. Динаміка температур під час пастеризації компоту в банках з вертикальним і горизонтальним їх розташуванням в автоклаві:
1 – гріючого середовища; 2 – на поверхні плодів; 3 – в центрі банки.

Загальну задачу інтенсифікації теплоперенесення під час стерилізації консервів, таким чином, можна ставити як суттєве скорочення періодів нагрівання та охолодження за рахунок незначного збільшення періоду витримки максимальної температури з метою гарантії летальності мікроорганізмів в консервах. Для консервів густої консистенції доцільно поєднувати методи аналітичного дослідження розподілу температур в продукті та натуральних випробувань. Для будь-яких консервів треба, по-перше, мати автоклави, в яких можна реалізувати прискорені режими нагрівання – охолодження продукції, а по-друге – розробити, захистити у відповідних інстанціях та впровадити нові формули стерилізації.

З метою виконання першої умови можна брати для початку такий автоклав,

в якому змінено системи підведення пари та охолодної води. Стандартні барботери змінені інжекторними установками в тих самих габаритах. Водяна пара подається в сопла, розташовані біля дна автоклава, її потенціальна енергія перетворюється на кінетичну, за рахунок великої швидкості пара тягне за собою воду, рівномірно її перемішує та нагріває. Коефіцієнт тепловіддачі до банок зростає, а створюване рівномірне температурне поле гріючої води дозволяє в значній мірі знизити термічний бій склотарі. Змонтовані на кришці водяні інжектори виконують такі ж функції під час охолодження консервів.

10.2.Інтенсифікація стерилізації фруктових консервів

Досліджували найпростішу можливість інтенсифікації підведення та відведення під час стерилізації фруктових консервів в скляних банках СКО-83-1. Виходили із припущення, що сироп та ягоди чи плоди будуть швидше прогріватися та охолоджуватися, якщо банки в автоклаві розташовувати не вертикально, а горизонтально. В новому положенні вміст банки буде стикатися не тільки з скляними стінками, але й з металевою кришкою, що має покращити теплообмін. Крім того, циркуляція сиропу в горизонтальній банці може покращитися за рахунок зменшення вертикального розміру, а це призведе до вирівнювання теплоперенесення в банці.

Дослідження проводили із полуничним, вишневим та сливовим компотами в лабораторних умовах із дотриманням формули стерилізації. Використовували мініатюрні датчики густини теплового потоку і температури [9], [21].

Мікротепломір – це платівка товщиною 0,5-0,7 мм. та діаметром 5-7 мм. з не електропровідного матеріалу із вбудованій в ній великій кількості диференціальних термопар, спаї яких виведено на протилежні сторони платівки. Електричний сигнал тепломіра є пропорційним густині теплового потоку у Вт/м², що проходить через платівку. В одну з поверхонь тепломіра вмонтовано гарячий спай термопари для вимірювання температури в цьому місці.

Мікротепломір з термопарою закріплювали до ягоди полуниці тонкими гумовими кільцями, до центру ягоди закладали окремий спай термопари. Ягоду розміщували у нижньому шарі по центру банки, тепломір був розташований біля дна банки. Під'єднувальні дроти виводили через гумове кільце кришки до герметизації банки. Формула стерилізації складала $(20-15-25)/85$.

Під час підйому температури гріючої води густина теплового потоку до ягоди зросла при вертикальному розташуванням банки майже до 900 Вт/м^2 , далі у зв'язку з прогріванням внутрішніх частин компоту плавно знижувалась до нуля. При горизонтальному розташуванні банки із новими ягодами та сиропом пік теплоприпливу складав 1000 Вт/м^2 , а на шостій хвилині охолодження помінявся знак, тепловідведення від ягоди зростало поступово до 500 Вт/м^2 . В першому випадку теплота продовжує поступати до ягоди протягом нагрівання, пастеризації та охолодження.

Проходження теплоти до внутрішніх прошарків вишневого компоту досліджували за допомогою двох комплектів тепломірів. Один із них розташовували у дна банки, інший в центрі банки. Над цим плодом в сиропі розташовували гарячий спай термопари.

При вертикальному положенні банки густина теплового потоку до плода, розташованого у дна банки, сягала 1500 Вт/м^2 , а в центрі – лише 600 Вт/м^2 , при горизонтальному – до обох плодів майже одночасно на рівні 1200 Вт/м^2 .

Розподіл теплоприпливів через стінку банки під час нагрівання, пастеризації і охолодження досліджували на соках та сиропах. При вертикальному розташуванні теплоприпливи через кришку банки на порядок нижче із-за повітряного прошарку, при горизонтальному – вони є найвищими. Елюр теплових потоків по висоті циліндричної частини банки змінюється з початком охолодження, що свідчить про інверсію конвективних течій в продукті. При горизонтальному розташуванні знижується нерівномірність теплопідведення та зростає його інтенсивність.

Змінення положення банки не потребує істотних змін в конструкціях сучасних автоклавів безперервної дії.

Глосарій

Абсорбційна волога – волога, яка утримується у харчовому продукті завдяки фізико-хімічній взаємодії з його речовинами, не випаровується легко при незначному нагріванні.

Аналогія переносу – подібність між процесами теплопередачі, масообміну та електропровідності, що дозволяє застосовувати однакові математичні підходи.

Балансові розрахунки – метод обчислення теплових або масових потоків, що базується на законі збереження енергії чи маси.

Бародифузія – перенесення речовини під дією градієнта тиску.

Випарна здатність – показник інтенсивності випаровування вологи з продукту під час термічної обробки.

В'язкість (динамічна, кінематична) – опір рідини до течії, що впливає на характер конвекції та переносу теплоти.

Градiєнт температури – зміна температури в просторі; рушійна сила теплоперенесення.

Густина масового потоку (j) – кількість речовини, що проходить через одиницю площі за одиницю часу, $[\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})]$.

Густина теплового потоку (q) – кількість теплоти, що передається через одиницю площі за одиницю часу, $[\text{Вт}/\text{м}^2]$.

Дифузійний опір – характеристика, що визначає протидію перенесенню маси через матеріал.

Дифузія – перенесення молекул речовини з області високої концентрації в область низької.

Закон Фіка – основний закон дифузії, який встановлює пропорційність між потоком речовини та градієнтом концентрації.

Закон Фур'є – основний закон теплопровідності, згідно з яким тепловий потік пропорційний градієнту температури.

Ізотерма – лінія або поверхня, на якій температура є сталою.

Інтегральна густина випаровування – сумарна кількість випарованої вологи з одиниці площі поверхні за час процесу.

Кваліметрія – наука про вимірювання і оцінку якості продукції.

Коефіцієнт тепловіддачі (α) – кількість теплоти, яка передана в одиницю часу через одиницю площі поверхні за різниці температур 1 K між поверхнею та середовищем-теплоносієм; характеризує інтенсивність тепловіддачі.

Коефіцієнт теплопередачі (k) – характеристика інтенсивності теплопередачі між двома середовищами через стінку, $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})]$.

Критерій Грасгофа (Gr) – визначає процес теплообміну під час вільногравітаційного руху і є мірою співвідношення архімедової (підйимальної) сили, спричиненої нерівномірним розподілом густини в неоднорідному полі температур і силами міжмолекулярного тертя.

Критерій Нуссельта (Nu) – Характеризує інтенсивність переходу теплоти (теплопередачі) на границі потік-стінка для стаціонарних процесів конвекційного теплообміну в однофазній нестисливій рідині з постійними (окрім густини) фізичними властивостями.

Критерій Прандтля (Pr) – характеризує подібність полів швидкості та температури в потоці і є мірою співвідношення інтенсивності перенесення імпульсу внутрішнім тертям та інтенсивності перенесення енергії теплопровідністю в потоці

рідини.

Критерій Рейнольдса (Re) – є мірою співвідношення між силами в'язкості та інерції в потоці рідини, що рухається.

Ламінарна течія – упорядкований рух рідини шарами без перемішування.

Масообмін – перенесення речовини (найчастіше вологи) внаслідок різниці концентрацій.

Масопередача – перенесення речовини від однієї фази до іншої.

Межові умови – додаткові умови, необхідні для розв'язання рівнянь переносу.

Неусталений режим – процес, параметри якого змінюються з часом.

Осмоз – перехід розчинника крізь напівпроникну мембрану до зони з вищою концентрацією речовини.

Перехресна дифузія (термодифузія) – перенесення речовини під дією градієнта температури.

Продуктивність апарату – кількість речовини або теплоти, що передається чи обробляється за одиницю часу.

Променистий теплообмін – передача енергії у вигляді електромагнітного випромінювання.

Рециркуляція – повторне використання теплоносія або повітряного середовища у технологічному процесі.

Рушійна сила процесу – градієнт температури, концентрації або тиску, що забезпечує перенесення.

Середній температурний напір – різниця температур між теплоносіями, усереднена певним чином для забезпечення правильного розрахунку теплопередачі.

Стаціонарний режим – процес, параметри якого не змінюються з часом.

Температурне поле – розподіл температур у просторі.

Температурний напір (Δt) – різниця температур між теплоносіями, що спричиняє теплопередачу.

Тепловий баланс – рівняння, що відображає рівність між підведеною та витраченою теплотою у системі.

Теплоємність (C) – фізична величина, яка визначається кількістю тепла, яке потрібно надати тілу для зміни його температури на один кельвін.

Тепломасообмін – одночасне перенесення теплоти і маси (напр., вологи) внаслідок градієнтів температури і концентрації.

Теплообмінник – апарат для передачі теплоти між двома середовищами.

Теплопередача – перенесення теплоти від одного середовища до іншого через стінку або контактну поверхню.

Теплопровідність (λ) – здатність матеріалу проводити тепло, [Вт/(м·К)].

Теплотехнологічні характеристики – властивості продукту, що впливають на ефективність його термічної обробки.

Теплофізичні характеристики (ТФХ) – фізичні властивості продуктів, що визначають їхню здатність до теплопровідності, теплоємності та дифузії.

Термічний опір (R) – величина, яка характеризує опір перенесенню теплоти через матеріал або систему, [м²·К/Вт].

Турбулентна течія – хаотичний рух рідини з перемішуванням і вихровими структурами.

Тургор – напружений стан клітинної оболонки внаслідок осмотичного тиску.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Федоров В.Г., Скарбовійчук О.М., Кепко О.І., Кравчук П.О. Теплофізичні характеристики продуктів і матеріалів АПК : довідник. Умань : Редакційно-видавничий відділ Уманського НУС, 2014. 352 с.
2. Черевко О.І., Поперечний А.М. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник. 2-ге вид., допов. та випр. Харків : Світ Книг, 2014. 495 с.
3. Федоров В. Г. Основи тепломасометрії. Київ : Вища школа, 1987. 184 с.
4. Цюцюра С.В., Цюцюра В.Д. Метрологія, основи вимірювань, стандартизація та сертифікація : навч. посіб. Київ : Знання, 2005. 242 с.
5. Eckert E. R. G., Drake Jr R. M. Analysis of heat and mass transfer. 1987.
6. Fedorov V.G., Il'inskiy D.N., Gerashchenko O.A., Andreyeva L.D. Heat transfer accompanying the cooling and freezing of meat carcasses // *Heat Transfer*. 1972. Vol. 4, No. 4. P. 55–59.
7. Plank R. Über die Gefrierzeit von eis-und wasserhaltigen Lebensmitteln // *Zeitschrift für die gesamte Kälte-Industrie*. 1913. Bd. 20.
8. Федоров В.Г., Ільїнський Д.М., Андрєєва Л.В. Теплометрія процесу охолодження м'ясної напівтуші // *Харчова промисловість*. 1972. № 14. С. 32–36.
9. Драганов Б.Х., Сажина С.О., Сергієнко Ю.М., Федоров В.Г. Теплометрія у сільському господарстві. Київ : Вид-во УСГА, 1993. 280 с.
10. Виноградов-Салтиков В.О., Пахомов В.М., Федорів В.Г. Комплексне визначення теплофізичних характеристик вологих матеріалів // *Тепломасообмін*. Київ : УДУХТ, 1997. С. 13–20.
11. Чернюшок О.А., Федоров В.Г., Кепко О.І. Компоненти теплообміну під час вільноконвективного охолодження моделі напівтуші // *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького*. 2017. С. 85–88.
12. Чернюшок О.А., Федоров В. Г., Кепко О. І. Інтенсифікація холодильного оброблення дрібношматкових м'ясопродуктів // *Науковий вісник ЛНУВМБТ. Сер. Харчові технології*. 2016. Т. 18, № 1(65). С. 161–165.
13. Moskalyuk O., Chernyushok O., Fedorov V., Kerpko O., Zhurilo S. Investigation of thermal and technological characteristics of new meat pastes production // *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 6, No. 3(44). P. 36–41.
14. Fedorov V.G. Kinetik des Gefrierens von Nahrungsmitteln in Blöcken // *Lebensmittel-Industrie*. 1975. No. 4. P. 147–150.
15. Федоров В.Г., Яушева Е.Ф., Камовников Б.П. Вимірювання теплових потоків при сублімаційному сушінні яєчного білка // *Харчова промисловість*. 1976. № 20. С. 58–60.

- 16.Белінська С.О., Кепко В.М., Бубенко М.М. Споживні властивості сиру та сирних продуктів // *Молодий вчений*. 2021. № 1(89). С. 115–121.
- 17.Гуляєв-Зайцев С., Тищенко Л. Методики визначення немолочних жирів у маслі // *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2003. № 6. С. 28.
- 18.Тищенко Л.М. До методики ідентифікації молочного жиру // *Вісник аграрної науки*. 2002. № 3. С. 67–69.
- 19.Федорова О. В., Пахомов В. М. Дослідження зв'язку між технологічними та теплофізичними характеристиками лабільних продуктів // *Шляхи збереження якості та зниження втрат товарів у торгівлі*. 1993. С. 85-91.
- 20.Скарбовійчук О.М., Кочубей-Литвиненко О.В., Чернюшок О.А., Федоров В.Г. Хімічний склад і фізичні характеристики молочних продуктів : довідник. Київ : НУХТ, 2012. 311 с.
- 21.Кепко В.М., Федоров В.Г., Кепко О.І., Пушка О.С. Використання кореляції товарознавчих і теплофізичних характеристик вершків для їх експертизи // *International Multidisciplinary Conference «Science and Technology of the Present Time: Priority Development Directions of Ukraine and Poland»*, 19–20 жовтня 2018 р., Воломін, Республіка Польща.
- 22.Сатир Л.М., Кепко В.М., Стаднік Л.І. Товарознавча експертиза при організації торгівлі борошняними кондитерськими виробами: аналіз та перспективи // *Інтелект ХХІ*. 2020. № 4. С. 41–47.
- 23.Дудко С., Малиновський В., Оболкіна В. Термообробка борошняних кондитерських виробів // *Продовольча індустрія АПК*. 2017. Т. 5. С. 22–24.
- 24.Скарбовійчук О.М., Кепко О.І., Федоров В.Г. Інтенсифікація теплоперенесення під час стерилізації консервів // *Наукові праці НУХТ*. 2019. № 32. С. 30–31.

Навчальне видання

**В.Г. Федоров, О.І. Кепко, Л.М. Сатир,
В.О. Виноградов-Салтиков, В.М. Кепко**

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ТА ТЕПЛОМАСООБМІН ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Видається в авторській редакції

Підписано до друку 21.07.2025. Формат 60х84/16.
Папір офсет. Друк цифров. Ум. друк. арк. 10,46.
Тираж 300 пр. Зам. № 862 (1241)

Видавець і виробник «Сочінський М.М.»
20300, м. Умань, вул. Тищика, 18/19
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2521 від 08.06.2006.
тел. (093) 117-08-86, (067) 104-64-88
vizavi-print.jimbo.com
e-mail: vizavi008@gmail.com
