

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С.Гулого
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту

_____ Блаженко С.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2022 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Петренко В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 142 Енергетичне машинобудування

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми _____

Холодильні техніка та технологія

на тему: Аналіз способів розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ХМ-2-9М

Мельник Іван Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник Масліков Максим Михайлович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультант _____

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Рецензент _____

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Я як здобувач Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

(підпис та прізвище здобувача)

Київ – 2022 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім.акад. І.С.Гулого
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 142 Енергетичне машинобудування
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Холодильні техніка та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЕХТ

проф. Петренко В.П.

“05” листопада 2021 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Мельник Іван Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз способів розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів

керівник роботи доц. к.т.н., Масліков М.М.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 02.11.2021 року № 869-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 01.02.2022 року

3. Вихідні дані до роботи заморозка харчових продуктів різної форми різної форми (циліндр, куля, пластина)

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

Вступ

1. Аналітичний огляд літератури

2. Розрахунок теплонадходжень до охолоджуваних приміщень

3. Розрахунок усушки

4. Розрахунок капітальних та експлуатаційних затрат

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ_____	<u>5</u>
ВСТУП_____	<u>7</u>
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ З ТЕМАТИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ_____	<u>9</u>
РОЗДІЛ 2. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ЗАМОРОЖУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ_____	<u>19</u>
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТРИВАЛОСТІ ЗАМОРОЖУВАННЯ_____	<u>53</u>
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ_____	<u>66</u>
ВИСНОВКИ_____	<u>75</u>
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ_____	<u>76</u>

АНОТАЦІЯ

В даному дипломному проекті проведений аналіз способів розрахунків тривалості заморожування харчових продуктів, на прикладі харчових продуктів різної геометричної форми: пластина (скибка хліба), циліндр (молочна сосиска), куля (полуниця).

Проведено аналіз літературних даних з тематики дипломного проекту.

Розглянуто особливості сучасних способів заморожування харчових продуктів. Визначено одини із найбільш перспективніших способів заморожування харчових продуктів.

Актуальність даної роботи полягає у тому, що вона спрямована на вивчення та аналіз способів розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів. Аналіз способів розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів різної форми дасть змогу визначити яким методом краще користуватися та розробити методику оптимального розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів.

Метою роботи є аналіз існуючих способів розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів та розроблення рекомендацій щодо вибору оптимального способу.

Об'єктом дослідження є процес заморожування харчових продуктів різної форми.

Предметом дослідження є способи розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів та визначення ефективнішого методу для розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів.

Наукова новизна роботи полягає у проведенні аналізу різних способів розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів різної форми (циліндр, куля, пластина). Проведені розрахунки тривалості заморожування різних харчових продуктів. Проаналізовано результати.

Розроблені рекомендації можуть бути використані для вибору методу розрахунку під час проектування систем заморожування.

Інформативною базою роботи виступили праці вітчизняних та зарубіжних науковців, статті в наукових та періодичних виданнях.

Ключові слова: розрахунок тривалості заморожування харчових продуктів, розрахунок тривалості заморожування харчових продуктів, процес заморожування харчових продуктів різної форми.

ВСТУП

Питання заморожування харчових продуктів має важливе значення для довгострокового збереження харчових продуктів.

Замороження-найбільш сучасний і якісний метод консервації продуктів харчування.

Заморожування являє собою відведення теплоти від харчових продуктів з перетворенням у лід більшої частини рідини, що міститься в них.

До заморожування вдаються звичайно для досягнення таких основних цілей:

- 1) забезпечення стійкості продуктів під час тривалого зберігання за низької температури (до них належать м'ясо, птиця, риба, тісто, випечені хлібобулочні вироби, торти, сир, пельмені, ягоди, плоди, овочі та ін.);
- 2) відділення вологи під час концентрування пива, фруктових соків та інших рідких харчових продуктів або під час сублімаційного сушіння продуктів;
- 3) виробництво продуктів зі своєрідним смаком (морозиво, креми, морожені плоди та ягоди);
- 4) виробництво харчового льоду.

Продукти заморожують при різних температурах. Овочі та фрукти заморожують при температурі близько -30 до -40 °C, тоді як м'ясо від -20 °C і навіть до -40 °C. Отримані заморожені продукти зберігають більшість своїх дієтичних, харчових та органолептичних якостей. Завдяки методу заморожування продукти зберігають найбільшу кількість поживних речовин, серед яких такі важливі для нашого організму вітаміни та мінеральні солі, а також білки та жири. Слід пам'ятати, що один раз заморожені продукти не можна заморожувати знову.

Швидкоморозильні апарати мають ряд переваг в порівнянні з традиційною технологією заморожування в холодильних камерах. Так при збільшенні швидкості замороження кристали льоду формуються значно менших розмірів і практично одночасно в клітині і в міжклітинних перегородках. В результаті краще, ніж при інших способах консервації,

зберігається структура тканин продукту. Коли застосовується шокове заморожування, скорочується і період активності бактеріологічного середовища. Бактерії різних типів мають неоднакові температурні зони життєдіяльності. При повільному заморожуванні в продукті з'являються, і залишаються, сліди життєдіяльності кожного з типів бактерій, у той час коли застосовується шокове заморожування, багато хто з них просто не встигає розвинути. Ще один аргумент на користь шокowego заморожування - зменшення в 2-3 рази втрати маси продукту в результаті усихання.

Мета і завдання.

Метою цієї роботи є знаходження оптимального методу розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів.

Відповідно до поставленої мети і з урахуванням аналізу літературних даних, робота направлена на вирішення таких завдань:

- з літературних джерел проаналізувати різноманітні методи заморожування та способи розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів;
- розрахувати тривалість заморожування харчових продуктів різної форми різними методами;
- знайти найбільш ефективний метод розрахунків тривалості заморожування харчових продуктів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ З ТЕМАТИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сучасні технології холодильного оброблення харчових продуктів передбачають створення так званого холодильного ланцюга, щоб забезпечувати безперервний вплив холоду на продукт від вироблення до зберігання у споживача. Під час проектування такого ланцюга необхідно для кожної його ланки (заготівельні, виробничі, розподільчі, транспортні, торгівельні, побутові холодильники, а також холодильний транспорт) передбачити умови зберігання, які б забезпечили прийнятну якість продукту з мінімальними втратами за мінімальних затрат коштів. Найважливішим регульованим параметром під час зберігання заморожених харчових продуктів є температура зберігання ($t_{зб}$). Відомо, що її зниження приводить до зростання терміну зберігання ($\tau_{зб}$), але знижувати $t_{зб}$ до евтектичної ($-70...-80$ °C), коли невимороженою лишається лише найміцніше зв'язана з білками вода, недоцільно через занадто великі енерговитрати на заморожування, подальше зберігання та розморожування продукту. Залежності між температурою та можливим терміном зберігання складні і різні для різних харчових продуктів через різні процеси, що у них відбуваються. Питання про залежність терміну зберігання від температури за збереження прийнятної якості продукту у світовій практиці називають проблемою трьох T: Time – Temperature Tolerance. У статті проаналізовано існуючі способи визначення термінів та температур зберігання харчових продуктів, запропоновано спрощені формули для наближеного оцінювання термінів зберігання заморожених харчових продуктів, визначення співвідношення цих термінів при різних температурах зберігання, вибору оптимальної температури зберігання за заданого його терміну. Ці формули можуть бути використані під час експлуатації холодильників та проектування холодильного ланцюга для харчових продуктів. Наведено приклади зазначених розрахунків.

Ключові слова: заморожені продукти, температура зберігання, термін зберігання, співвідношення термінів.

Холодильне зберігання є найпоширенішим способом зберігання харчових продуктів. Зараз крім продуктів тваринництва широко заморожують овочеві суміші, плоди і ягоди, напівфабрикати і кулінарні вироби. Швидкозаморожені продукти та напівфабрикати скорочують втрати найважливіших біологічно цінних компонентів та суттєво зменшують витрати домашньої праці. Сучасні технології холодильного оброблення харчових продуктів передбачають створення холодильного ланцюга – забезпечувати безперервний вплив холоду на продукт від вироблення до зберігання у споживача. Під час проектування такого ланцюга необхідно для кожної його ланки (заготівельні, виробничі, транспортні, торгівельні, побутові холодильники, а також холодильний транспорт) передбачати умови зберігання, які б забезпечили прийнятну якість продукту з мінімальними втратами за мінімальних вкладень коштів.

Можливий термін зберігання продукту ($\tau_{зб}$) залежить від індивідуальних властивостей продукту та умов його зберігання. Серед численних параметрів, що визначають умови зберігання, найчастіше розглядають лише температуру зберігання ($t_{зб}$), відносну вологість повітря ($\varphi_{пов}$) і швидкість його руху ($w_{пов}$). Регульованим параметром є насамперед $t_{зб}$ [1].

За сталого температурного коефіцієнта швидкість реакцій, що спричиняють небажані зміни продуктів, наближено може бути представлена у вигляді експоненціальної функції [2]. Ще у 1949 р. Д. Г. Рютов запропонував формулу для терміну зберігання:

$$\tau_{зб} = a \cdot 10^{-ct_{зб}} \quad (1)$$

де $\tau_{зб}$ – термін зберігання, міс., $t_{зб}$ – температура зберігання, °С, a та c – коефіцієнти, що залежать від властивостей харчових продуктів. Для всіх видів м'яса і риби $c = 0,05$, а для вершкового масла $c = 0,036$. Для яловичини і баранини $a = 2,15$, для свинини і нежирної риби – 1,78, для курей – 1,58, для гусей, кролів і жирної риби – 1,26, а для вершкового масла – 2,85 [2].

З часом діапазон використовуваних температур зберігання змінився від $-6...-20$ °C до $-12...-30$ °C, у зв'язку з чим змінилися і значення рекомендованих термінів зберігання при різних температурах для конкретних продуктів.

Суттєвий вплив на стійкість заморожених продуктів має льодоутворення [3]. При більш низьких t_{36} зростає частка вимороженої води (ω) у продуктах (табл. 1). Вважається, що повністю вільна вода у продуктах вимерзає при температурі, близькій до евтектичної температури розчинених у ній речовин. Проте можливе вивільнення зв'язаної води. Так під час заморожування сиру «Голандський» до -20 °C залишається невимороженою 18% води (17,7% від загального вологовмісту становить зв'язана вода у структурі білків), тобто вільна вода практично повністю вимерзає. За подальшого зниження температури частина зв'язаної води переходить до вільного стану і кристалізується. Слабковиражений евтектичний стан продукту спостерігається при температурі близько -70 °C. У точці евтектики залишається невимороженою близько 7% найбільш міцно зв'язаної з білками води. При температурах $-70...-80$ °C у продукті некристалізованою залишається лише найбільш міцно хімічно зв'язана волога білків [6], проте заморожування до такої температури та холодильне зберігання при ній не проводять через занадто великі енерговитрати на заморожування, подальше зберігання та розморожування продукту.

Таблиця 1. Частка вимороженої води при різних температурах [3].

Продукт	Температура продукту, °C				
	-10	-15	-20	-25	-30
Яловичина 1-ї категорії	0,866	0,901	0,919	0,931	0,938
Сир кисломолочний	0,868	0,902	0,920	0,931	0,939

У літературних джерелах дані про залежність терміну зберігання від температури можуть відрізнятися, тому зіставлюваних дослідних даних поки що недостатньо. Через невелику точність дані про терміни зберігання зазвичай

подаються як ціле число місяців. Крім того, режими і терміни зберігання завжди встановлюють виходячи з того, що на зберігання закладаються продукти високої якості [4, 5], а в умовах холодильного ланцюга це не завжди так.

Крім терміну та температури зберігання важливим є питання збереження якості продукту після закінчення зберігання. Якість може бути відмінною, дуже доброю і задовільною. Зрозуміло, що краща якість за однакової $t_{зб}$ спостерігається для меншого $\tau_{зб}$. Питання про залежність терміну зберігання від температури за збереження прийнятної якості продукту у світовій практиці називають проблемою трьох Т [2]: «Time – Temperature Tolerance». Ця проблема є важливою у проектуванні холодильного ланцюга для продуктів, а також у визначенні оптимальних (з мінімальними затратами коштів) параметрів холодильного зберігання. Також під час вибору температури зберігання слід пам'ятати, що її зниження сприяє збільшенню терміну зберігання, проте водночас призводить до збільшення витрат електроенергії холодильною установкою.

Найчастіше для зберігання заморожених продуктів і напівфабрикатів використовується температура зберігання $t_{зб} = -18$ °C, саме для цієї температури опубліковано найбільше даних про терміни зберігання. Слід зазначити, що індивідуальні властивості заморожених продуктів менше впливають на процес зберігання ніж для охолоджених.

Математичне моделювання процесів зберігання поряд з експериментальними методами широко застосовується у світовій практиці, проте харчові продукти є досить складним об'єктом моделювання через велику кількість взаємопов'язаних процесів, що протікають у них під час зберігання (хімічних, фізичних, мікробіологічних та ін.), причому для різних продуктів вирішальний вплив на якість чинять різні процеси [7]. Складність об'єкта моделювання, спричиняє складність та громіздкість моделі, велику кількість наближень, дослідних коефіцієнтів та пов'язані з цим похибки. Тому виникає

практична потреба у простіших наближених методах оцінювання термінів зберігання.

Сформулювати прості залежності, що можуть бути використані для розв'язання практичних завдань холодильної технології, насамперед визначення терміну зберігання замороженого продукту при певній температурі за збереження прийнятної якості продукту (у тому числі за змінної температури зберігання) та вибору оптимальної температури зберігання при потрібному терміні зберігання.

Експоненціальні функції є частиною більш загальних показникових функцій. Тому рівняння (1) можна записати, як:

$$\tau_{36} = ab^{-t_{36}}, \quad (2)$$

де $b = 10^{-c}$. Значення коефіцієнтів a та b залежить від виду продукту.

В напівлогарифмічних координатах $\lg \tau_{36} - t_{36}$ залежність (2) виглядає як пряма лінія. Тангенс кута нахилу цієї прямої до осі температур:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\lg \frac{\tau_{362}}{\tau_{361}}}{t_{362} - t_{361}} = \lg b \quad (3)$$

Чим більше нахил прямої до осі температур тим більша величина b . З формули (2):

$$a = \frac{\tau_{36}}{b^{-t_{36}}} \quad (4)$$

Чим більше відстань прямої від осі температур за даної температури зберігання, тим більше значення a . Значення коефіцієнтів a та b для деяких заморожених продуктів наведені у табл. 2. Також у ній наведені значення термінів зберігання при різних температурах [1, 2, 4, 5]. У дужках наведені значення, розраховані за формулою (2).

Таблиця 2. Терміни зберігання деяких продуктів при різних температурах

№	Продукт	a	b	Термін зберігання, міс, при температурі
---	---------	-----	-----	---

пор.				зберігання, °С				
				-12	-15	-18	-20	-25
1	Яловичина в напівтушах і четвертинах	3,784	1,06437	8 (8,00)	– (9,65)	12 (11,63)	14 (13,18)	18 (18,00)
2	Свинина в напівтушах, нежирна риба	0,8344	1,11253	3 (3,00)	– (4,13)	6 (5,69)	7 (7,04)	12 (12,00)
3	Зелений горошок, полуниці	0,6637	1,16147	4 (4,00)	– (6,27)	11 (9,72)	16 (13,25)	28 (28,00)
4	Гуси, качки	1,572	1,08092	4 (4,00)	5 (5,05)	7 (6,38)	– (7,54)	11 (11,00)
5	Солодковершкове несолене масло в монолітах	5,062	1,04912	9 (9,00)	10 (10,39)	12 (12,00)	– (13,21)	– (16,79)

Наприклад, для свинини при температурі зберігання -12 °С термін зберігання становить 3 міс., а при температурі зберігання -25 °С – 12 міс. Тоді:

$$tg\varphi = lgb = \frac{\lg(12/3)}{25 - 12} = 0,04631,$$

$$b = 10^{0,04631} = 1,11253$$

$$a = \frac{3}{1,11253^{-(-12)}} = \frac{12}{1,11253^{-(-25)}} = 0,8344$$

Можливий запис показникової функції у вигляді

$$\tau_{36} = \exp(\ln a - t_{36} \cdot \ln b) \quad (5)$$

Наприклад, для $t_{36} = -18$ °С одержимо $\tau_{36} = 5,69$ міс.

Лінія залежності $\lg\tau_{36}=f(t_{36})$ іноді відхиляється від прямої, утворюючи невелику опуклість, спрямовану вгору. Тоді розрахункове значення τ_{36} буде трохи меншим ніж рекомендоване (в запас).

Для визначення коефіцієнта b потрібні значення τ_{36} хоча б для двох t_{36} . Якщо значення τ_{36} є лише для однієї t_{36} , то можна взяти середнє арифметичне значення b декількох близьких за складом та властивостями продуктів (це суб'єктивно і наближено), а потім визначити a за формулою (4).

Співвідношення між термінами зберігання при двох різних температурах:

$$n = \frac{\tau_{362}}{\tau_{361}} = b^{t_{361} - t_{362}} \quad (6)$$

Наприклад, для свинини:

$$n = \frac{\tau_{36}^{-25^{\circ}C}}{\tau_{36}^{-12^{\circ}C}} = 1,11253^{-12 - (-25)} = 4,0$$

Співвідношення (6) може бути корисним для наближеної оцінки можливого терміну зберігання продукту у разі зберігання при температурі, що відрізняється від наведеної у довідниках та інструкціях.

На різних стадіях холодильного ланцюга (заготівельні, виробничі, розподільчі, транспортні, торгівельні, побутові холодильники, а також холодильний транспорт) температура зберігання продукту може змінюватись. У таких випадках має виконуватись співвідношення:

$$\sum_i \frac{\tau_i}{\tau_{36,i}} \leq 1 \quad (7)$$

де τ_i – тривалість перебування продукту при температурі t_i ; $\tau_{36,i}$ – термін зберігання продукту при температурі t_i .

Наприклад, коли свинина зберігалася при $t_{36,1} = -25^{\circ}C$ ($\tau_{36,1} = 12$ міс.) впродовж 8 місяців, потім при температурі $t_{36,2} = -18^{\circ}C$ ($\tau_{36,2} = 6$ міс.) впродовж 1 місяця, а потім потрапляє до камери з $t_{36,3} = -12^{\circ}C$ ($\tau_{36,3} = 6$ міс.), то вона може зберігатись у ній не більше ніж 0,5 міс, бо

$$1 - \frac{8}{12} - \frac{1}{6} = \frac{1}{6} \quad \text{звідки } \tau_{36,3} = \frac{1}{6} \cdot 3 = 0,5 \text{ міс.}$$

Слід пам'ятати, що харчові продукти не можна заморожувати повторно, а значні коливання температури продукту впродовж зберігання та транспортування можуть призвести до перекристалізації вологи, пошкодження тканин продукту та значного погіршення його якості після зберігання.

Коли для конкретного продукту відомий потрібний термін зберігання τ_{36} (з вимог логістики, ситуації на ринку тощо), з рівняння (2) можна визначити максимальну температуру зберігання, що може підтримуватись у холодильній камері:

$$t_{36}^{\max} = \frac{(\lg a - \lg \tau_{36})}{\lg b}. \quad (8)$$

Наприклад, якщо потрібно зберігати свинину впродовж 7 місяців, то

$$t_{36}^{\max} = \frac{(\lg 0,8344 - \lg 7)}{\lg 1,11253} = -20^\circ\text{C}.$$

Слід враховувати, що термін зберігання для отримання продукту задовільної якості значно довший ніж для продукту відмінної якості. Наприклад, за даними [2] для нежирної риби при $t_{36} = -18^\circ\text{C}$ співвідношення цих термінів становить близько 3.

Ми детально розглянули приклади, що стосуються зберігання свинини. Але аналогічні закономірності зберігання спостерігаються і для інших заморожених продуктів рослинного та тваринного походження.

Запропоновані спрощені формули, що можуть бути використані під час експлуатації холодильників та проектування холодильного ланцюга для харчових продуктів, зокрема для:

- спрощеної оцінки можливого терміну зберігання заморожених продуктів рослинного та тваринного походження в інтервалі температур – 10... –25 °C;
- розрахунку співвідношення термінів холодильного зберігання та транспортування при різних температурах продукту;

- вибору оптимальної температури зберігання при потрібному терміні зберігання продукту.

2. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ЗАМОРОЖУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Пропонована класифікація забезпечує уніфікацію розрахунків морозильних апаратів модульного ряду по асортименту продуктів. Класифікація визначає для кожного класу, підкласу і групи штучних об'єктів заморожування умовно-розрахунковий продукт (УРП), характеристики якого використовуються в розрахунках процесу заморожування.

Пропонована класифікація базується на відмінностях в теплофізичних характеристиках реальних харчових продуктів. При цьому використовується двохкритерійний класифікаційний метод.

Перший критерій - фізична природа об'єкту заморожування. За цією ознакою усі об'єкти, призначені для обробки в морозильних апаратах розділені на п'ять класів (таблиця 2.1): A_1 , - м'ясопродукти; A_2 - птиця; A_3 , - риба; A_4 - ягоди і фрукти; A_5 , - овочі.

Другий критерій - вологість продукту. Від вологості харчового продукту головним чином залежать його теплофізичні характеристики, а також процесно-технологічний критерій, що визначає реакцію вологовмістних продуктів на холодильну дію.

Представлена трьохрангова класифікаційна модель харчових об'єктів швидкого заморожування.

У перший ранг моделі входять класи $A_1...A_5$, що визначаються за першою ознакою (критерієм) фізичній природі об'єктів заморожування.

У другий і третій ранги включені, відповідно, підкласи і групи об'єктів, диференційовані за другою класифікаційною ознакою - вологістю продукту. При цьому підкласи, що містяться в другому ранзі, квантуються на інтервали, рівні 10% вологості, а групи продуктів, що знаходяться в третьому ранзі - на інтервали, рівні 5% вологості. Нульовий ранг моделі охоплює увесь асортимент вологовмістних продуктів, призначених для заморожування в морозильних апаратах. У таблиці. 2.1 представлені також інтервали

вологості, відповідні класам (перший ранг), підкласам (другий ранг) і групам (третій ранг) продуктів.

У клас першого рангу не включені молочні продукти, які також можуть бути піддані холодильній обробці в апаратах модульного ряду. Включити їх в пропоновану класифікацію не представляється можливим, оскільки для молочних продуктів вологість вже не буде єдиним визначальним класифікаційним критерієм

Таблиця 2.1

Класифікація харчових об'єктів заморожування і інтервали вологості (W), % по рангах

Інтервал вологості по рангах, %				Зразковий асортимент харчових продуктів	
Нульовий	Перший	Другий	Третій	Найменування	Волог., %
1	2	3	4	5	6
A ₀ – харчові об'єкти штучного заморожування (50,0...99,9)	A ₁ – м'ясо, м'ясо-продукти, ЕФС (70...80)		A ₁₁₁ (70...75,0)	Підлопаткова яловича вирізка	74,7
				Котлетне м'ясо яловиче	71,3
				Свиняча вирізка	70,8
			A ₁₁₂ (75,1...80,0)	Вирізка яловича	75,0
				Спинна частина яловича	75,5
				Поперекова частина яловича	75,7
				Тазостегнова частина яловича	76,0
				Підшлункова залоза	76,0
				Частина лопатки яловича	75,9
				Рубаний п/ф яловичий	76,6
Легені баранячі	79,3				
Легені яловичі	77,5				
Легені свинячі	78,6				
Нирки свинячі	77,5				
Нирки яловичі	79,0				
Нирки баранячі	79,7				
Рубець	80,0				
A ₂ - птиця (50...75)	A ₂₁ (50...60,0)	A ₂₂₁ (50...55,5)		Гуси 1-ої категорії	53,4
				Гуси 2-ої категорії	54,0

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
А ₀ – харчові об'єкти швидко заморожування (50,0...99,9)			A ₂₁₂ (55,1... 60,0)	Індички 1-ої категорії Качки 2-ої категорії Качки 1-ої категорії	57,3 56,7 56,0
		A ₂₂ (60,1... 70,0)	A ₂₂₁ (60,1... 65,0)	Бройлери 1-ої категорії Індички 2-ої категорії Кури 1-ої категорії	63,8 64,5 61,9
			A ₂₂₂ (65,1... 70,0)	Качата 2-ої категорії Бройлери 2-ої категорії Індички	60,3 67,6 68,0
		A ₂₃	A ₂₃₁ (70,1... 75,0)	Кури 2 категорії	72,0
	A ₃ риба (75,0... 85,0)		A ₃₁₁ (75,0... 80,0)	Сазан азовський Сазан каспійський Судак Сом	75,3 78,0 79,2 76,7
А ₀ – харчові об'єкти швидко заморожування (50,0...99,9)	A ₄ ягоди фрукти (80,0... 90,0)		A ₃₁₂ (80,1... 85,0)	Осетер	81,5
		A ₄₁₁ (80,0... 85,0)	A ₄₁₁ (80,0... 85,0)	Чорноплідна горобина Суниця (садова)	80,5 84,5
			A ₄₁₂ (85,1... 90,0)	Слива Черешня Журавлина Смородина чорна Смородина червона Вишня	87,0 86,0 89,5 85,0 85,0 85,0
	A ₅ - овочі (85,0... 99,9)	A ₅₁ (85,0... 95,0)	A ₅₁₁ (85,0... 90,0)	Капуста брюссельська Капуста кольрабі Морква червона Морква жовта Буряк Перець солодкий Капуста білокачанна	86,0 85,0 88,0 89,0 86,0 90,0 90,0
				A ₅₁₂ (90,1... 95,0)	Баклажани Кабачки Капуста червона Огірки ґрунтові Патисони Редис Томати
			A ₅₂₁ (95,1... 99,9)	Огірки парникові	96,0

У таблиці. 2.2 представлені інтервали вологості, що відповідають класам (перший ранг), підкласам (другий ранг) і групам (третій ранг) продуктів.

Таблиця 2.2

Інтервал вологості (W), % по рангах класифікаційної моделі продуктів

Перший ранг	Другий ранг	Третій ранг
A ₁ (70.. 80)		A ₁₁₁ (70,0...75,0) A ₁₁₂ (75,1...80,0)
A ₂ (50,0.. 75,0)	A ₂₁ (50,0.. 60,0) A ₂₂ (60,1.. 70,0)	A ₂₁₁ (50,0...55,0) A ₂₁₂ (55,1...60,0) A ₂₂₁ (60,1...65,0) A ₂₂₂ (65,1.. 70,0) A ₂₂₃ (70,1.. 75,0)
A ₃ (75,0.. 82,0)		A ₃₁₁ (75,0.. 85,0) A ₃₁₂ (80,1.. 82,0)
A ₄ (80,0.. 90,0)		A ₄₁₁ (80,0.. 85,0) A ₄₁₂ (85,1.. 90,0)
A ₅ (85,0.. 99,9)	A ₅₁ (85,0.. 95,0) A ₅₂ (95,0.. 99,9)	A ₅₁₁ (85,0.. 90,0) A ₅₁₂ (90,1.. 95,0) A ₅₂₁ (95,1.. 99,9)

Класифікаційна модель несиметрична, оскільки в кожному класі знаходиться нерівна кількість підкласів і груп продуктів, а деякі класи (A₁ A₃, A₄) взагалі не мають підкласів. Асиметричність моделі свідчить про об'єктивні природні властивості реальних продуктів, вологість яких розподілена нерівномірно по прийнятих інтервалах класифікації.

Пропонована класифікація передбачає розширення асортименту об'єктів заморожування по структурних її складових.

Для практичного використання пропонованої класифікації необхідно мати в розпорядженні характеристики умовно-розрахункового продукту (УРП) окремо для кожної групи, підкласу, класу, а також для усього асортименту (нульовий ранг моделі) продуктів. УРП є деяким усередненим показником, який із заданою точністю представляє певну сукупність продуктів. За допомогою УРП розраховується тривалість процесу заморожування, необхідна надалі при проектуванні швидкоморозильних апаратів модульного ряду, а також при рішенні завдань оптимізації.

Теплофізичні характеристики (ТФХ) умовно-розрахункового продукту визначені розрахунковим методом, запропонованим А. М. Бражниковим і М. Є. Каухчешвілі.

ТФХ продукту (питома теплоємність - c , теплопровідність - λ , густина - ρ) визначалися по рівняннях, запропонованими авторами (індекс "1" відноситься до замороженого продукту з температурою нижче криоскопічної, індекс "2" - до незамороженого продукту):

$$\begin{aligned} c_1 &= c_1^h + (W - W^h) \cdot K_{c_1}; \\ c_2 &= c_2^h + (W - W^h) \cdot K_{c_2}; \\ \lambda_1 &= \lambda_1^h + (W - W^h) \cdot K_{\lambda_1}; \quad (2.2) \\ \lambda_2 &= \lambda_2^h + (W - W^h) \cdot K_{\lambda_2}; \\ \rho &= \rho_1 = \rho_2 = \rho^h + (W - W^h) \cdot K_{\rho_1}, \end{aligned}$$

де c, λ, ρ - відповідно, питома масова теплоємність, кДж/(кгК), питома теплопровідність, (Вт/м К) і густина (кг/м³) продукту;

W^h - початковий відносний вологовміст продукту ($W^h = 0,5$).

При цьому:

$$\begin{aligned} c_1^h &= 1465,4 \text{ Дж}/(\text{кг К}); & K_{c_1} &= 1482,7 \text{ Дж}/(\text{кг К}); \\ c_2^h &= 2093,4 \text{ Дж}/(\text{кг К}); & K_{c_{12}} &= 4186,4 \text{ Дж}/(\text{кг К}); \\ \lambda_1^h &= 0,58 \text{ Вт}/(\text{м К}); & K_{\lambda_1} &= 1,917 \text{ Вт}/(\text{м К}); \\ \lambda_2^h &= 0,39 \text{ Вт}/(\text{м К}); & K_{\lambda_2} &= 0,604 \text{ Вт}/(\text{м К}); \\ \rho^h &= 1000 \text{ кг}/\text{м}^3; & K_{\rho_1} &= 208,3 \text{ кг}/\text{м}^3. \end{aligned}$$

Значення теплопровідності продукту:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \text{ (м}^2/\text{с)}$$

Результати розрахунків теплофізичних характеристик УРП для усіх класів, підкласів і груп продуктів класифікаційної моделі представлені в таблиці. 2.3. Тут же дані значення ТФХ дистильованої води, вибраної як база ($A_{\text{баз}}$), еталон порівняння для об'єктів заморожування.

У таблиці. 2.3 значень вологості (W) прийняті середні для кожного підрозділу класифікації. При цьому даний довірчий інтервал (ΔW) цього підрозділу. Також дані усереднені значення кріоскопічної ($t_{кр}$) температури.

З метою перевірки адекватності використовуваного розрахункового методу визначення теплофізичних характеристик продукту фахівцями МГУПБ з використанням методу диференціальної скануючої калориметрії експериментально визначенні значення питомої теплоємності (C_1 , C_2) для деяких продуктів класифікаційної моделі, які представлені в таблиці. 2.4. Тут же дані розрахункові значення теплоємності і величина погрішності для кожного класифікаційного підрозділу, позначеного досліджуваним продуктом.

Значення погрішності знаходяться в допустимих для інженерної практики межах, що свідчить про можливість практичного застосування розрахункового методу оцінки теплофізичних характеристик продукту.

Пропонована класифікація представляє практичний інтерес, який полягає в тому, що вона універсальна при різних рівнях кількісних оцінок процесу і обладнання швидкого заморожування харчових продуктів:

- нульовий ранг можна використовувати для орієнтовних і оцінних розрахунків усього асортименту об'єктів швидкого заморожування;
- перший і другий ранги - для визначення основних конструктивних параметрів апаратів модульного ряду і для розрахунків по оптимізації процесу і устаткування;
- третій ранг - для розрахунків і розробки конкретної конструкції апарату для заморожування заданого асортименту продукту.

Теплофізичні характеристики умовно-розрахункових продуктів (УРП)

Клас під-клас, група продукту	Початкові			Розрахункові						
	W, %	ΔW , %	$t_{кр}$, °C	ρ , кг/м ³	C_1 , кДж/кг К	C_2 , кДж/кг К	λ_1 , Вт/(м К)	λ_2 , Вт/(м К)	$\alpha_1 \cdot 10^7$ м ² /с	$\alpha_2 \cdot 10^7$ м ² /с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A ₀	79,1	20,0	-1,9	1066	1,898	3,311	1,138	0,456	5,63	1,29
A ₁ ,	76,6	6,9	-2,0	1060	1,859	3,206	1,090	0,441	5,53	1,30
A	72,8	2,6	-2,0	1052	1,803	3,047	1,017	0,418	5,36	1,30
A ₁₁₂	77,5	3,2	-2,0	1052	1,873	3,244	1,107	0,446	6,62	1,31
A ₂	62,56	15,0	-2,5	1031	1,651	2,619	0,821	0,356	4,82	1,32
A ₂₁	55,2	3,8	-2,5	1016	1,542	2,311	0,680	0,311	4,34	1,33
A ₂₁₁	53,7	7,0	-2,5	1013	1,580	2,248	0,651	0,302	4,23	1,33
A ₂₁₂	56,7	1,2	-2,5	1019	1,564	2,373	0,708	0,321	4,44	1,33
A ₂₂	65,0	7,2	-2,5	1036	1,687	2,721	0,868	0,371	4,96	1,32
A ₂₂₁	62,6	3,7	-2,5	1031	1,652	2,622	0,822	0,356	4,86	1,32
A ₂₂₂	68,3	0,8	-2,5	1043	1,736	2,859	0,931	0,391	5,14	1,31
A ₂₃₁	71,6	0,6	-2,5	1050	1,785	2,997	0,994	0,410	5,30	1,30
A ₃	78,14	4,3	-2,0	1064	1,882	3,271	1,120	0,450	5,59	1,29
A ₃₃₁	77,3	2,6	-2,0	1062	1,870	3,236	1,103	0,445	5,56	1,30
A ₃₁₂	81,5	0	-2,0	1071	1,932	3,412	1,184	0,470	5,72	1,29
A ₄	85,3	5,4	-1,8	1079	1,988	3,571	1,257	0,493	5,86	1,28
A ₄₁₁	82,5	2,4	-1,8	1073	1,947	3,453	1,203	0,476	5,76	1,29
A ₄₁₂	86,5	2,9	-1,8	1081	2,006	3,621	1,280	0,501	5,90	1,28
A ₅	93,1	8,6	-1,0	1095	2,104	3,897	1,407	0,540	6,11	1,27
A ₅₁₁	86,8	2,5	-1,0	1082	2,010	3,633	1,285	0,502	5,91	1,28
A ₅₁₂	92,4	2,8	-1,0	1093	2,093	3,868	1,393	0,563	6,09	1,27
A ₅₂₁	96,0	0	-1,0	1101	2,147	4,019	1,462	0,558	6,19	1,26
A _{БА3}	100	0	0	1000	2,12	4,19	2,12	0,61	11,42	1,46

Розрахункові і експериментальні значення теплофізичних характеристик об'єктів заморожування

Вид продукту	Клас, Підклас, група продукту	C ₁ , кДж/(кг К)			C ₂ , кДж/(кг К)		
		C _{1екс}	C _{1розр}	$\frac{C_{1екс} - C_{1розр}}{C_{1екс}}$ 100%	C _{2екс}	C _{2розр}	$\frac{C_{2екс} - C_{2розр}}{C_{2екс}}$ 100%
1	2	3	4	5	6	7	8
1. М'ясні рубані напівфабрикати	A ₀	1,901	1,898	0,15	3,708	3,311	10,70
	A ₁	1,901	1,859	2,2	3,708	3,206	13,53
	A ₁₁₁	1,901	1,803	5,12	3,708	3,047	17,80
2. Підшлункова залоза	A ₀	1,910	1,898	0,6	3,690	3,311	10,27
	A ₁	1,910	1,859	2,6	3,690	3,206	13,11
	A ₁₁₂	1,910	1,873	1,9	3,690	3,244	12,08
3. Кури II категорії угодованій	A ₀	1,653	1,898	-14,8	3,051	3,311	-8,52
	A ₂	1,651	1,651	0,12	3,051	2,619	14,15
	A ₂₃₁	1,653	1,785	-7,9	3,051	2,997	1,76
4. Риба (осетер)	A ₀	1,970	1,898	3,6	3,813	3,311	13,16
	A ₃	1,970	1,882	4,46	3,813	3,271	14,2
	A ₃₁₂	1,970	1,932	1,92	3,813	3,412	10,5

2.2 Фізична модель об'єктів заморожування

Об'єкти заморожування у своїй більшості мають складну форму. Тому для розрахунку тривалості процесу заморожування потрібний перехід до деякого середньостатистичного еквівалентного тіла правильної геометричної форми (пластина, циліндр, куля), для якого можуть бути отримані порівняно прості рішення. Здійснити такий перехід можливо на основі використання методу, розробленого А. И. Вейником і успішно ним застосовуваний для металургійних процесів.

Основу методу А. І. Вейніков складає, так названий, принцип стабільності теплового потоку. Відповідно до цього принципу зміна характеру розподілу умов теплообміну на якійсь окремій ділянці поверхні тіла без зміни загального теплового потоку, що проходить через поверхню, досить слабо відбивається на розподіленні температури далеко від даної ділянки.

Що ж до інтегральних характеристик процесу, таких, наприклад, як середня об'ємна температура, то ці зміни практично не позначаються.

Основне завдання полягає в раціональному виборі класичного аналога, відповідного тілу, що розглядалося, складної форми.

Згідно з принципом стабільності теплового потоку зіставлення температурних полів внутрішніх областей тіла складної конфігурації і його класичного аналога повинне здійснюватися при рівності теплових потоків, тобто:

$$Q_0 = Q$$

$$\text{або } a_0 \theta_{cm0} \cdot F_0 \cdot d \cdot \tau_0 = \alpha \theta_{cm} \cdot F \cdot d \cdot \tau \quad (2.4),$$

де Q - тепловий потік, Вт;

α - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до довкілля, Вт/ (м²К);

$$\theta_{cm} = \tau_{cm} - \tau_s$$

τ_{cm} - температура поверхні стінки, °С;

τ_s - температура довкілля, °С;

F - площа поверхні теплообміну, м²;

τ - час, год.

Усі величини без індексів відповідають тим, що розглядається, складної форми, а з індексом "0" - його класичному аналогу. Якщо прийняти, що в обох тілах процеси повинні протікати синхронно, тобто $d\tau = d\tau_0$, а також, що $\theta_{cm} = \theta_{cm0}$, то для забезпечення еквівалентності температурних полів обох тіл необхідно:

$$\alpha_0 = \alpha \frac{F}{F_0} = \alpha \cdot A, \quad (2.5)$$

де A - критерій форми. Тоді:

$$Bi = \frac{A \cdot \alpha \cdot l_0}{\lambda},$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК).

Розмір l_0 . визначається з умови рівності об'ємів обох тіл.

Величина критерію форми A завжди більше одиниці, тому швидкість протікання процесу охолодження тіла складної форми у будь-якому випадку вище, ніж відповідного класичного аналога.

Процес заморожування харчових продуктів зазвичай розподіляють на три характерні періоди: охолодження поверхні об'єкту до криоскопічної температури; власне заморожування і доморожування. Якщо обмежитися "фронтальною" моделлю процесу заморожування, відповідно до якої нескінченно тонка зона кристалізації рухається від поверхні углиб об'єкту, то цей процес і процес затвердіння металевих зливків, даний А. І. Вейніком, виявляються майже тотожними.

Отже, можна констатувати, що на будь-якій стадії процесу заморожування виявляється можливою наближена заміна температурного розподілу тіла складної форми відповідним розподілом еквівалентного тіла.

З урахуванням вищесказаного, в розробленій класифікації об'єктів заморожування для продуктів першого класу A , (м'ясопродукти) як еквівалентний класичного аналог використовується необмежена пластина.

Об'єкти заморожування другого класу A , (птиця) мають складну форму. В цьому випадку була визначена та зона об'єкту, яка лімітує процес заморожування і визначає його інтегральні характеристики. Такою зоною виявився грудний м'яз тушки птиці.

Слід зазначити, що згідно з технологічними вимогами за контрольну величину при холодильній обробці птиці береться центр її грудного м'яза. Фахівцями МГУПБ проведені спеціальні дослідження, що доводять, що термічний центр тушки курки знаходиться на глибині, рівного максимального (Про товщину грудного м'яза. Аналіз показав, що цей вивід можна розповсюдити на усі інші види птиці. Грудний м'яз тушки птиці має достатньо складну конфігурацію, тому вибір еквівалентного тіла визначається не лише її формою, але і співвідношенням характерних розмірів по різних напрямках. Щоб оцінити вплив останнього чинника, авторами була вирішена наступне модельне завдання. Розглянутий паралелепіпед з різними

співвідношеннями сторін і була зіставлена їх середня об'ємна температура, одна з основних інтегральних характеристик процесу, з граничними варіантами геометрії тіл цього типу (необмежений прямокутний стержень і необмежена пластина).

Відомо, що рішення двовимірного рівняння Фур'є для необмеженого прямокутного стержня може бути представлене як добуток двох безрозмірних розподілень, відповідних пластинам завтовшки $2l_1$ та $2l_2$;

$$\bar{\theta}(x, y, \tau) = \bar{\theta}_1(x, \tau) \cdot \bar{\theta}_2(y, \tau) \quad (2.7)$$

Аналогічно для тривимірного рівняння Фур'є (паралелепіпед) - добуток трьох безрозмірних розподілів:

$$\bar{\theta}(x, y, z, \tau) = \bar{\theta}_1(x, \tau) \cdot \bar{\theta}_2(y, \tau) \cdot \bar{\theta}_3(z, \tau) \quad (2.8)$$

останнє з яких відповідає необмеженій пластині завтовшки $2l_3$

Середня об'ємна температура для одновимірного, двохвірного і тривимірного температурних полів, відповідно визначалася на основі наступних співвідношень:

$$\theta_x = \frac{1}{l_1} \int_0^{l_1} \theta_1(x, \tau) dx;$$

$$\theta_{x,y} = \frac{1}{l_1 \cdot l_2} \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \theta_1(x, \tau) \cdot \theta_2(y, \tau) \cdot dx \cdot dy;$$

$$\theta_{x,y,z} = \frac{1}{l_1 \cdot l_2 \cdot l_3} \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \theta_1(x, \tau) \cdot \theta_2(y, \tau) \cdot \theta_3(z, \tau) \cdot dx \cdot dy \cdot d\tau;$$

На рис. 2.1. дані отримані графічні залежності безрозмірної середньої об'ємної температури від числа Фур'є при $Bi=1$ для необмеженої пластини і необмеженого прямокутного стержня при різних співвідношеннях сторін ($\delta_1/\delta_2=1; 2; 5$), а на рис. 2.2 - для необмеженої пластини і паралелепіпеду (при ($\delta_2/\delta_1=\delta_3/\delta_1=1; 2; 5; 10$)).

Аналіз показав, що безрозмірна середня об'ємна температура необмеженого прямокутного стержня мало відрізняється від свого аналога

для необмеженої пластини вже при $\delta_2/\delta_1=5$. Той же висновок можна зробити і для паралелепіпеда, але тут - при $\delta_2/\delta_1=\delta_3/\delta_1=10$.

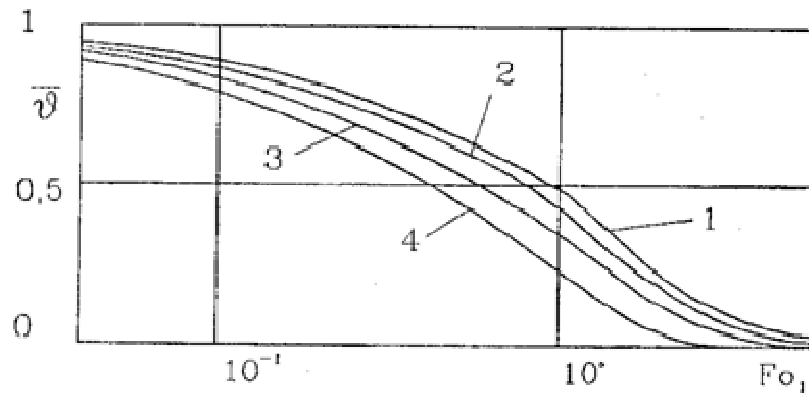


Рис. 2.1. Залежність безрозмірної середньої об'ємної температури від числа Фур'є при $Bi=1$: 1 - необмежена пластинка; 2 - необмежений прямокутний стержень при $\delta_2/\delta_1=5$; 3 - те ж при $\delta_2/\delta_1=2$; 4 - те ж при $\delta_2/\delta_1=1$.

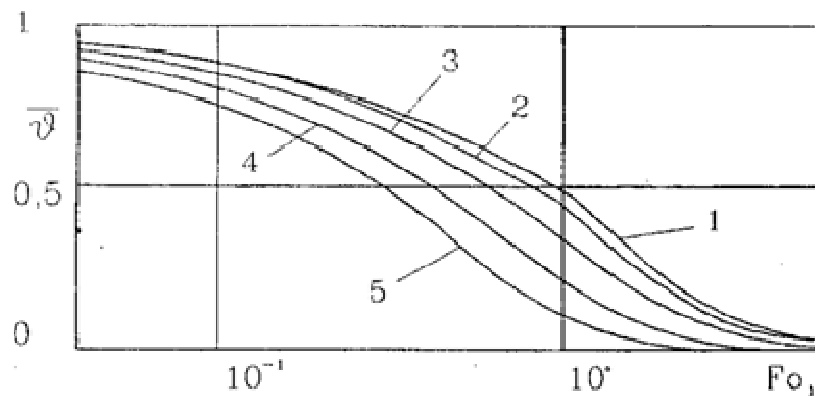


Рис. 2.2. Залежність безрозмірної середньої об'ємної температури від числа Фур'є при $Bi=1$: 1 - необмежена пластинка; 2 - паралелепіпед при $\delta_2/\delta_1=\delta_3/\delta_1=10$; 3 - те ж при $\delta_2/\delta_1=\delta_3/\delta_1=5$; 4 - те ж при $\delta_2/\delta_1=\delta_3/\delta_1=2$; 5 - те ж при $\delta_2/\delta_1=\delta_3/\delta_1=1$.

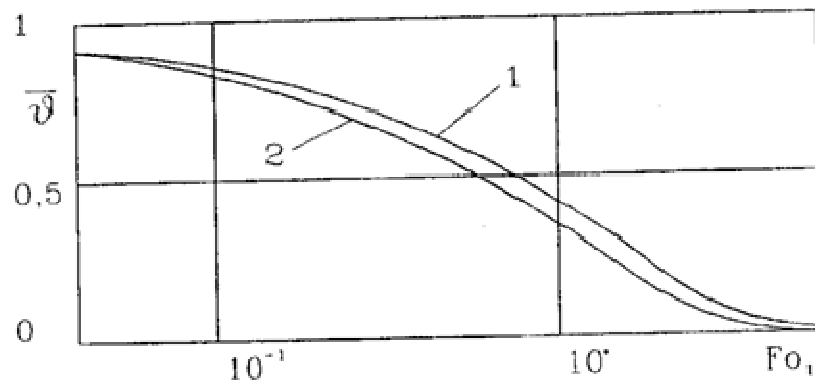


Рис. 2.3. Скоректована залежність безрозмірної середньої об'ємної температури від числа Фур'є: 1 - необмежена пластинка; 2 - необмежений прямокутний стержень при $\delta_2/\delta_1=1$.

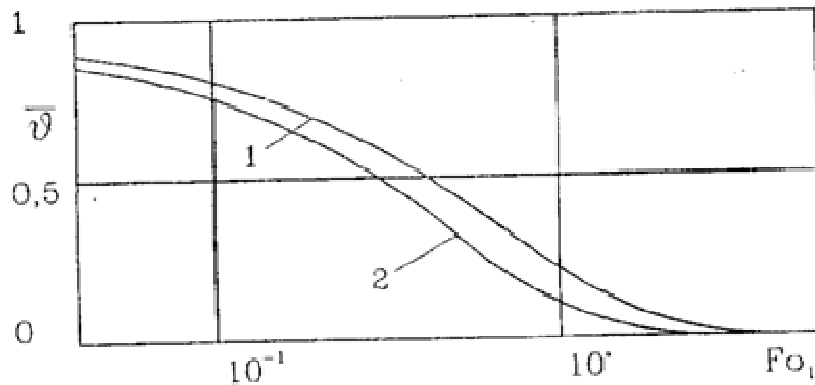


Рис. 2.4. Скоректована залежність безрозмірної середньої об'ємної температури від числа Фур'є : 1 - необмежена пластина; 2 - паралелепіпед при $\delta_2/\delta_1=\delta_3/\delta_1=1$.

Положення можна істотно поліпшити, якщо внести корективи до розрахунків для необмеженої пластини на основі рівняння (2.5). Такі скоректовані залежності приведені на рис. 2.3. і 2.4. Хоча тут розглядаються самі несприятливі випадки, які відповідають $\delta_2/\delta_1=1$ в першому випадку і $\delta_2/\delta_1=\delta_3/\delta_1=1$ - в другому, відхилення кривих порівняно невеликі.

Отже, можна вважати, що при співвідношенні сторін, рівному 2.. 3, допустима приближена заміна необмеженою пластинною і прямокутного стержня і паралелепіпеда. Цей вивід виявляється справедливим не лише при $Bi=1$, але і при будь-яких значеннях цього критерію ($Bi<1$).

Розглянуті приклади ілюструють достоїнства метода А. І. Вейніка і можливість його застосування для процесу заморожування. Вони також

відмічають, що при рішенні задачі заморожування тіл складної форми, наприклад грудного м'яза тушки курки, можливо як еквівалентне тіло приймати необмежену пластину, при цьому необхідно вважати основною інтегральною характеристикою процесу середню об'ємну температуру.

Розглядаючи процес холодильної обробки зазвичай приймається, що уся поверхня даного тіла або, принаймні, її велика частина бере участь в теплообміні з навколишнім середовищем. Але так буває далеко не завжди. У цьому розумінні характерним прикладом є заморожування ягід в

полімерному пакеті. Тут в зовнішньому теплообміні бере участь лише порівняно невелика частина поверхні ягід. Тому, для обґрунтування вибору еквівалентного тіла, необхідна попередня оцінка інтенсивності теплообміну в порожнинах, які утворюються із-за нещільного прилягання ягід один до одного. Для цього розглядається наступна ідеалізована модель: шар циліндричних часток довільного поперечного перерізу і відстані між ними. Модель відповідає одновимірному наближенню, що, як відомо, спостерігається в необмеженій пластині. Тому, незважаючи на зовнішню несхожість, розрахунок може вестися саме для необмеженої пластини. При цьому дійсне значення щільності теплового потоку може бути визначене з співвідношення:

$$q_{\text{дійсн}} = q_{\text{пл.}} (1 - P), \quad (2.10)$$

де $q_{\text{пл.}}$ - щільність теплового потоку для суцільної необмеженої пластини, Вт/м²;

P – пористість.

У реальних умовах існує ряд чинників, які можуть привести до помітного відхилення від моделі ідеалізованого процесу. До їх числа відносяться: вільна конвекція, що виникає в газових (повітрі) прошарках; променевий теплообмін в цих прошарках; термічний опір мікрошару газу в місцях контакту ягід один з одним і з плівкою пакету; вплив вимушеної конвекції за рахунок не-посереднього змикання часток.

Термічний опір мікрошару газу виявляється істотним лише при дуже малих тисках газу (повітря). Крім того, в даному випадку в місцях контакту можна чекати виділення вологи, що покращує умови теплообміну. У зв'язку з цими обставинами допустимо рахувати контактний опір так само, як і термічний опір стінки пакету досить малим.

Оскільки продукт поміщають в герметичні пакети з полімерної плівки, проникнення охолоджувального середовища в прошарки між продуктом не відбувається, тому вплив вимушеної конвекції буде повністю відсутній.

Таким чином, необхідно оцінити лише вплив вільної конвекції і променистого теплообміну в газових прошарках пакету. Для цього на першому етапі необхідно визначити еквівалентний діаметр газового прошарку.

Якщо прийняти середнє значення розміру полуниці $d=25$ мм, то при щільній упаковці циліндрів пористість складе:

$$P = \frac{V_0}{V} = \frac{(4 - \pi)d^2 H}{4d^2 H} = 0.215, \quad (2.11)$$

а еквівалентний діаметр прошарку обчислюється за формулою:

$$d_{екв,1} = \frac{4V_0}{F_0} = \frac{(4 - \pi)d^2 H}{\pi d H} = 0.274d = 6.85 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (2.12)$$

де: V_0, V - відповідно, вільний і повний об'єм з розрахунку на одну порожнину, м^3 ;

H - висота циліндра, м ;

F_0 - площа бічної поверхні порожнини, м^2 .

Відомо, що при щільній упаковці куль пористість $P=0,259$, а при довільному укладанні тіл неправильної форми $P=0,42$. Цю величину можна з деяким запасом прийняти за верхню межу в даному випадку (можна чекати, що вона буде дещо менша із-за деформації і злипання ягід).

Еквівалентний діаметр в цьому випадку визначається:

$$d_{екв,2} = \frac{4P}{S_T} = 1.2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

де $S_T = 140 \text{ м}^2/\text{м}^3$ при ($d=25$ мм - питома площа поверхні пір в одиниці об'єму).

Інтенсивність теплообміну при вільній конвекції в повітряному прошарку визначається значенням критерію Релея (Ra):

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad (2.14)$$

де: $Gr = \frac{gd_{екв}^3}{\nu^2} \Delta T$ - критерій Грасгофа;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ - критерій Прандтля;

ν - кінематична в'язкість повітря, м²/с;

$\Delta T = 5\text{K}$ - значення температурного натиску, прийняте на основі середньої оцінки для квазіціонарного наближення;

a - коефіцієнт теплопровідності повітря м²/с.

$$Gr_{\min} = \frac{9,81(6,85 \cdot 10^{-3})}{13,3^2 \cdot 10^{-12}} \cdot \frac{5}{273} = 326;$$

$$Gr_{\max} = \frac{9,81(1,2 \cdot 10^{-3})}{13,3^2 \cdot 10^{-12}} \cdot \frac{5}{273} = 1760; \quad (2.15)$$

$$Ra_{\min} = Gr_{\min} \cdot Pr = 326 \cdot 0,7 = 228;$$

$$Ra_{\max} = Gr_{\max} \cdot Pr = 1230$$

Оскільки критичне значення $Ra_{кр} \approx 10^3$, то в першому випадку $Ra_{\min} < Ra_{кр}$, і тут вплив тепловіддачі при вільній конвекції слід вважати досить слабким. У другому випадку $Ra_{\max} > Ra_{кр}$ і вільну конвекцію вимагається враховувати.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності газового прошарку визначається як:

$$\lambda_{екв} = \varepsilon_{к} \cdot \lambda, \quad (2.16)$$

де: $\varepsilon_{к} = 0,18$ $Ra_{\max} = 1,066$;

λ - теплопровідність повітря;

$\lambda = 2,44 \cdot 10^{-2} \text{Вт}/(\text{м К})$; $\lambda_{экв2} = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{Вт}/(\text{м К})$.

Променистий теплообмін через газовий прошарок можна врахувати за допомогою коефіцієнта:

$$\lambda_p = q_l \cdot d_{екв} (T_1 - T_2) \quad (2.17)$$

$$\text{де } q_l = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Тут q_l - промениста складова щільності теплового потоку, Вт/м²; T_1 T_2 - характерні температури, К;

$C_0=5,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ϵ_{np} - приведена міра чорноти системи:

$$\epsilon_{np} = \frac{\varphi_{1,2}}{\frac{2}{\epsilon} - 1}, \quad (2.18)$$

де: $\varphi_{1,2} = 1/3$ - коефіцієнт взаємного випромінювання;

$\epsilon = 0,7$ - степінь чорноти поверхні. При малих значеннях температурної різниці можна прийняти:

$$\lambda_p = 0,04 \cdot \epsilon_{np} \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_s}{100}\right)^3 \cdot d_{екв}, \quad (2.19)$$

де: $T_s = 0,5(T_1 + T_2) = 275 \text{ К}$

Тоді: $\lambda_{p1} = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

$\lambda_{p2} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$

Ефективний коефіцієнт теплопровідності рівний:

$$\lambda_{эф.1} = \lambda + \lambda_{p,1} = 3,02 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\lambda_{эф.2} = \lambda_{екв,2} + \lambda_{p,1} = 3,61 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)} \quad (2.20)$$

Тоді співвідношення теплових потоків, що проходять через незаморожені ($q_{нез}$) і заморожені ($q_{зам}$) ягоди і газові (повітря) прошарки ($q_{п}$) визначається відповідно:

$$\frac{q_{нез}}{q_{п,1}} = \frac{\lambda_{тв}^{нез} (1 - P_1)}{\lambda_{эф,1} \cdot P_1} = \frac{0,3 \cdot 0,785}{3,02 \cdot 10^{-2} \cdot 0,215} = 36,3 ;$$

$$\frac{q_{зам}}{q_{п,1}} = \frac{\lambda_{тв}^{зам} (1 - P_1)}{\lambda_{эф,1} \cdot P_1} = \frac{0,86 \cdot 0,785}{3,02 \cdot 10^{-2} \cdot 0,215} = 104 ;$$

$$\frac{q_{нез}}{q_{п,2}} = \frac{\lambda_{тв}^{нез} (1 - P_2)}{\lambda_{эф,2} \cdot P_2} = \frac{0,3 \cdot 0,58}{3,61 \cdot 10^{-2} \cdot 0,42} = 11,5 ; \quad (2.20)$$

$$\frac{q_{зам}}{q_{п,2}} = \frac{\lambda_{тв}^{зам} (1 - P_2)}{\lambda_{эф,2} \cdot P_2} = \frac{0,86 \cdot 0,58}{3,61 \cdot 10^{-2} \cdot 0,42} = 32,9 ;$$

У самому гіршому випадку тепловий потік, що проходить через продукт, значно більше потоку через повітряні прошарки. Тому можна вважати, що процес заморожування повністю визначається темпом руху фронту

кристалізації в ягодах. Іншими словами, завдання може вирішуватися в одномірному наближенні, при цьому еквівалентним тілом є необмежена пластина.

Таким чином, переважна більшість харчових продуктів, позначених класифікацією, можуть бути представлені еквівалентним тілом у вигляді необмеженої пластини.

2.3. Математична модель розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів

Розроблена математична модель і метод розрахунку тривалості заморожування необмеженої пластини в умовах організації симетричного теплообміну. Умови симетричного теплообміну забезпечуються в запропонованому модульному ряду морозильними апаратами, що використовують такі методи заморожування, як повітряний і занурювальний в не киплячій рідині, тобто апарати з машинною системою охолодження.

У основу математичної моделі покладений наближений метод інтегральних співвідношень Л.К. Лейбензона, розвинений А. Пірвердяном, В. Карпичевим, А. Бражніковим. При вирішенні зроблені наступні допущення: теплообмін з зовнішнім середовищем здійснюється згідно із законом Ньютона-Ріхмана; теплофізичні характеристики продукту постійні в межах однієї фази і змінюються стрибком при фазовому переході; температура середовища, що охолоджує, незмінна протягом усього процесу заморожування.

Процес заморожування розділений на три стадії: перша - охолодження до криоскопічної температури на поверхні продукту; друга - заморожування до криоскопічної температури в термічному центрі продукту; третя - доморожування продукту до заданої температури в термічному центрі.

Стадія охолодження. У основу рішення покладена гіпотеза А. Пірвердяна про наявність температурного фронту, що розповсюджується з кінцевою швидкістю. Процес охолодження при цьому розбивається на дві

фази: а - температурний фронт рухається від поверхні до центру пластини (температура за фронтом рівна t_s); б - температурний фронт дійшов до центру, температура пластини знижується і досягає на поверхні кріоскопічної $t_{кр}$. При цьому:

$$t_s < t_{кр} < t_{п}$$

де: $t_{п}$ - початкова температура продукту, °С.

Тривалість першої фази охолодження:

$$Fo_{1\alpha} = \frac{1}{12Bi_2} [Bi_2 + 4Bi_2 - 8\ln(1 + 0,5Bi_2)], \quad (2.22)$$

$$\text{де: } Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}; \quad Bi_2 = \frac{a \cdot l}{\lambda};$$

де: τ - час, с;

a - коефіцієнт теплопровідності, м/с²;

$2l$ - товщина продукту-пластини, м

Тривалість другої фази охолодження:

$$Fo_{1\delta} = \frac{Bi_2 + 3}{3Bi_2} \ln \frac{2}{(Bi_2 + 2)(1 - \theta_{кр})}, \quad (2.23)$$

$$\text{де: } \theta_{кр} = \frac{t_n - t_{кр}}{t_n - t_s}$$

Повна тривалість першої стадії - стадії охолодження:

$$Fo_1 = \frac{a_1}{12a_2 \cdot Bi_2} \left[(Bi_2 + 4) + 4(Bi_2 + 3) \ln \frac{t_n - t_s}{t_{кр} - t_s} - \frac{4(Bi_2 + 1,5)^2}{Bi_2} \ln \frac{Bi_2 + 2}{2} \right] \quad (2.24)$$

Стадія заморожування. У пластині розглядаються дві зони: замерзла і незамерзла. Температурні поля зон описуються наступними рівняннями:

$$\frac{dt_1}{d\tau} = a_1 \frac{d^2 t_1}{dx^2} \quad (\tau > 0; 0 \leq x \leq \xi);$$

$$\frac{dt_2}{d\tau} = a_2 \frac{d^2 t_2}{dx^2} \quad (\tau > 0; \xi \leq x \leq l) \quad (2.25)$$

де: t - температура зони продукту, °С;

ξ - товщина замерзлої зони продукту, м;

x - поточна координата.

Крайові умови:

$$t_2(x,0) = t_{kp} + \frac{\alpha}{2\lambda \cdot l} (t_s - t_{kp})(x^2 - 2l \cdot x); \quad (2.26)$$

$$\left(\frac{dt_2}{dx} \right)_{x=l} = 0; \left[\frac{dt_1}{dx} - \frac{\alpha}{\lambda_1} (t_1(x, \tau) - t_s) \right]_{x=0} \quad (2.27)$$

На межі розділу фаз має місце рівність:

$$t_{2/x=\xi} = t_{kp}; (t_1 - t_2)_{x=\xi} = 0, \quad (2.29)$$

і дотримується умова Стефана :

$$\lambda_1 \left(\frac{dt_1}{dx} \right)_{x=\xi} - \lambda_2 \left(\frac{dt_2}{dx} \right)_{x=\xi} = r \cdot \omega \cdot W \cdot \rho \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (2.29)$$

где: r - питома теплота фазового переходу води в лід, кДж/кг;

ω - відносна кількість вимороженої води в продукті, кг/кг;

W - відносний вміст води в продукті, кг/кг.

Тривалість другої стадії - стадії заморожування:

$$Fo_{II} = \frac{\rho \cdot \omega \cdot W \cdot r \cdot a_1}{\lambda_1 (t_{kp} - t_s)} \cdot \frac{Bi_1 + 2}{2Bi_1} + \frac{a_1}{3a_2} \left[\left(\frac{Bi_1 + 1}{2Bi_1} \right)^2 \ln(Bi_1 + 1) - \frac{2Bi_1 + 1}{Bi_1} \right]. \quad (2.30)$$

Стадія доморожування. Тривалість доморожування до заданої звичайно t_k температури:

$$Fo_{III} = \frac{Bi_1 + 3}{3Bi_1} \ln \frac{t_{kp} - t_s}{t_k - t_s} \quad (2.31)$$

Для досягнення середньо об'ємної температури (t_v) продукту:

$$Fo_{III} = \frac{Bi_1 + 3}{3Bi_1} \ln \frac{2(Bi_1 + 3)(t_{kp} - t_s)}{3(Bi_1 + 2)(t_v - t_s)} \quad (2.32)$$

Визначений зв'язок між температурою центру (t_k) і середньо об'ємною температурою (t_v) продукту у будь-який момент часу:

$$t_k = \frac{3(Bi_1 + 2)}{2(Bi_1 + 3)} \cdot (t_v - t_s) + t_s \quad (2.33)$$

Тривалість усього процесу заморожування продукту:

$$Fo = Fo_I + Fo_{II} + Fo_{III} \quad (2.34)$$

Для розрахунку і перевірки адекватності запропонованої математичної моделі отриманий експериментальний матеріал про процес заморожування штучних продуктів розробленої класифікації за різних умов теплообміну.

Ці дані отримані на спеціально створених на кафедрі "Холодильна техніка" МГУПБ стендах, що моделюють модульний ряд швидкокоморозильних апаратів.

У таблиці. 2.5. приведені значення коефіцієнта тепловіддачі при заморожуванні в потоці повітря, а в таблиці. 2.6 - в не киплячій рідині (розчині хлористого кальцію) штучних харчових продуктів, що представляють практично усе класи запропонованої класифікації.

Тут же приведені значення середньої швидкості процесу для оцінки режиму швидкого заморожування.

Проведений аналіз показав, що причиною розбіжності розрахункових і експериментальних даних тривалості процесу швидкого заморожування є той факт, що температура на поверхні продукту практично миттєво досягає криоскопічної і тривалість першого етапу охолодження прямує до нуля. В цьому випадку гіпотеза "теплого фронту", покладена в основу моделі, непридатна, оскільки температура на поверхні продукту опускається до криоскопічної значно раніше, ніж температурний фронт досягає термічного центру. Це призводить до того, що у формулі (2.23) Fo_{1s} стає негативним.

Умова позитивності була узята за критерій застосовності формули для розрахунку Fo_1 :

$$\frac{Bi_2 + 3}{3Bi_2} \ln \frac{2(t_n - t_s)}{(Bi_2 + 2)(t_{kp} - t_s)} > 0;$$

$$\frac{2(t_n - t_s)}{(Bi_2 + 2)(t_{kp} - t_s)} > 0; Bi_2 < \frac{2(t_n - t_s)}{t_{kp} - t_s} \quad (2.35)$$

Отже, за умови невиконання критерію (2.35) математична формула для розрахунку безрозмірної тривалості усього процесу заморожування продукту матиме вигляд:

$$Fo = Fo_{II} + Fo_{III} \quad (2.36)$$

Таблиця 2.5

Клас підклас. група продукту	Маса продукту кг	Товщина продукту, 2l, м	Умови теплообміну			Швидкість заморо- жування, $\omega_{\text{ср}} 10^6$
			Темпе- ратура повітря °С	Швид- кість цирку- ляції повітря м/с	Коефі- цієнт тепло- віддачі, α Вт/(м К)	
1	2	3	4	5	6	7
А ₁ - м'ясо А ₁₁₂ - рубані м'ясні напівфабрикати	0,125	0,028	-20	4	62,0	7,0
	0,125	0,028	-20	10	72,0	9,0
	0,125	0,028	-50	4	93,0	14,0
	0,125	0,028	-50	10	110,0	14,5
	0,125	0,028	-70	4	102,0	15,5
	0,125	0,028	-70	10	121,0	16,0
А ₂ – птиця А ₂₂₂ - бройлери 2-ї категорії угодованості	1,0	0,040	-20	3	22,7	3,3
	1,0	0,040	-30	3	25,3	3,7
	1,0	0,040	-40	3	32,2	5,5
	1,0	0,040	-50	3	36,0	6,7
	1,0	0,040	-60	3	41,0	8,3
	1,0	0,040	-40	4	48,0	7,3
	1,0	0,040	-40	5	52,0	7,9
А ₃ - риба А ₃₃₁ – сазан	2,0	0,080	-20	3	28,0	2,1
	2,0	0,080	-25	3	30,0	3,2
	2,0	0,080	-30	3	34,0	4,4
	2,0	0,080	-35	3	38,0	5,1
	2,0	0,080	-40	3	40,0	5,7
	2,0	0,080	-40	3	40,0	5,7
А ₃₃₁ – судак	0,15	0,020	-30	3	30,0	6,9
	0,21	0,030	-30	3	31,0	6,2
	0,27	0,040	-30	3	32,0	5,7
	0,60	0,055	-30	3	33,0	5,1
	1,4	0,070	-30	3	34,0	4,7
	2,0	0,080	-30	3	34,0	4,4
А ₄ – ягоди А ₄₄₁ - суниця А ₄₁₂ , - чорна смородина	0,5	0,040	-25	3	24,0	2,1
	0,5	0,040	-30	3	32,0	2,8
	0,5	0,040	-35	3	38,0	5,0
	0,5	0,040	-25	3	23,4	2,5
	0,5	0,040	-30	3	25,7	3,7
	0,5	0,040	-35	3	27,0	4,0
	0,5	0,040	-35	3	27,0	4,0
А ₄₁₂ - вишня	0,5	0,040	-25	3	21,4	1,9
	0,5	0,040	-30	3	22,5	2,3
	0,5	0,040	-35	3	24,5	4,1

Таблиця 2.6

Клас підклас група продукту	Маса продукт у кг	Товщина продукту, 2l, м	Умови теплообміну			Швидкість заморожування $\omega_{cp} 10^6$
			Температура розчину, °С	швидкість циркуляції розчину, м/с	Коефіцієнт тепло-віддачі α Вт/(м ² К)	
1	2	3	4	5	6	7
А ₂ - птиця	1,0	0,040	-20	0,1	104,0	3,7
	1,0	0,040	-25	0,1	122,8	4,5
	1,0	0,040	-30	0,1	134,1	4,9
А ₂₂₂ бройлери 2-ї категорії угодованості	0,6	0,055	-20	0,1	114	4,8
	0,6	0,055	-25	0,1	120	5,6
	0,055	-30	0,1	133	6,8	
	0,6	0,055	-35	0,1	138	7,2
	0,6	0,056	-40	0,1	142	7,5
А ₃₁₁ - сазан	2,0	0,080	-20	0,1	110	4,6
	2,0	0,080	-25	0,1	115	5,3
	2,0	0,080	-30	0,1	130	6,4
	2,0	0,080	-35	0,1	134	6,9
	2,0	0,080	-40	0,1	140	7,1
	4,1	0,100	-30	0,1	128	5,8
	6,3	0,115	-30	0,1	126	5,4
	9,2	0,125	-30	0,1	125	5,1
А ₃₁₁ - сом	30,4	0,185	-30	0,1	118	3,7
	15,2	0,160	-30	0,1	121	4,3
А ₃₁₂ осетер						
А ₄ - ягоди	0,5	0,40	-25	0,1	65,0	7,2
А ₄₁₁ - суниця -	0,5	0,40	-30	0,1	71,0	8,3
А ₄₁₂ - чорна смородина	0,5	0,40	-35	0,1	79,0	10,0
	0,5	0,40	-25	0,1	55,2	6,6
	0,5	0,40	-30	0,1	57,9	7,8
	0,5	0,40	-35	0,1	60,6	9,8
А ₄₁₂ - вишня	0,5	0,40	-30	0,1	63,8	7,8
	0,5	0,40	-25	0,1	57,8	6,8
	0,5	0,40	-35	0,1	85,3	11,2

Згідно теорії граничних помилок отримані наступні аналітичні вирази для розрахунку граничної відносної похибки визначення тривалості кожної стадії процесу заморожування:

$$\delta\tau_1 = \frac{a_1}{3a_2 \cdot Bi_2 \cdot \tau_1} \left\{ \left[\frac{4 + 3Bi_2}{Bi_2} \ln \frac{(2 + Bi_2)}{2} - 3 \ln \left(\frac{t_n - t_s}{t_{kp} - t_s} - (2 + Bi_2) \right) \right] \delta Bi + \left[\frac{(3 + Bi_2)t_{kp}}{t_k - t_s} \right] \delta t \right\} \quad (2.37)$$

$$\delta\tau_2 = \frac{a_1}{Bi_1 \cdot \tau_2} \left\{ \left[\frac{1}{3a_2} (Bi_1 + 2) - \frac{2(Bi_1 + 1)}{Bi_1} \ln(1 + Bi_1) - \frac{\rho \cdot \omega \cdot w \cdot \gamma}{\lambda_1 (t_{kp} - t_s)} \right] \delta Bi + \left[\frac{(Bi_1 + 2)t_s \cdot \rho \cdot \omega \cdot w \cdot \gamma}{2\lambda_1 (t_{kp} - t_s)^2} \right] \delta t \right\} \quad (2.38)$$

$$\delta\tau_3 = \frac{1}{3Bi_1 \cdot \tau_3} \left\{ \left[3 \ln \frac{2(Bi_1 + 3)(t_k - t_s)}{3(Bi_1 + 2)(t_v - t_s)} + \frac{Bi_1}{Bi_1 + 2} \right] \delta Bi + \left[\frac{(Bi_1 + 3)(t_v - t_s)t_{kp} - 2t_v \cdot t_s}{(t_{kp} - t_s)(t_v - t_s)} \right] \delta t \right\} \quad (2.39)$$

$$\delta\tau = \frac{\tau_1 \cdot \delta\tau_1 + \tau_2 \cdot \delta\tau_2 + \tau_3 \cdot \delta\tau_3}{\tau} \quad (2.40)$$

Максимальна величина граничної відносно похибки не перевищувала 16%, що свідчить про адекватність запропонованої математичної моделі розрахунку тривалості швидкого заморожування харчових продуктів, що апроксимуються пластиною, реальному процесу.

Формула Планка

У 1913 р. Р. Планк запропонував формулу для розрахунку тривалості заморожування, що з тих пір відома як формула Планка. Ця формула рекомендована Міжнародним інститутом холоду як фундаментальна для розрахунку тривалості заморожування, але добре відомо, що на практиці всі допущення, які входять в формулу Планка, не виконуються. Тривалість заморожування,

$$\tau_0 = \Phi \frac{R\rho q w \omega}{t_{kp} - t_{o.c}} \frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta_{yn}}{\lambda_{yn}} \quad (2.41)$$

де R- визначальний розмір шматка продукту, м;

ρ – густина охолодженого продукту, кг/м³;

q – питома теплота кристалізації води, q = 3,3 · 10⁵ Дж/кг;

w — вологовміст продукту, кг/кг;

ω — частка вимороженої води, яку визначають за залежностями;

$t_{кр}$ — криоскопічна температура продукту, °С;

$t_{o.c}$ — температура охолодного середовища, °С;

λ — коефіцієнт теплопровідності замороженого продукту, Вт/(м·К), який визначають з довідкової літератури або за залежностями ;

α — коефіцієнт тепловіддачі з поверхні тіла, Вт/(м²·К);

Φ — безрозмірний коефіцієнт, що враховує форму тіла;

$\delta_{уп}$ та $\lambda_{уп}$ — відповідно товщина та коефіцієнт теплопровідності для кожного шару пакувального матеріалу чи форми, а також повітряних прошарків між продуктом і шаром пакувального матеріалу.

Суму термічних опорів шарів пакувальних матеріалів $\delta_{уп} / \lambda_{уп}$ слід враховувати лише для упакованих продуктів. Якщо відомі питомі ентальпії продукту у початковому та замороженому станах, то замість добутку $qw\omega$ у формулу доцільно підставляти різницю цих питомих ентальпій.

Класична формула Планка справедлива лише для трьох тіл найпростішої форми — необмеженої пластини завтовшки $2R$, нескінченного циліндра радіусом R і кулі радіусом R . Проте заморожувані продукти мають форму, відмінну від найпростішої. Тому виведено подібні формули для тіл іншої форми. Так, для нескінченного прямокутного бруса (плити) з ребрами $2R_1$ та $2R_2$ (причому R_1 і R_2 і $\beta = \frac{R_1}{R_2} \geq 1$)

$$\tau_0 = \Phi \frac{R\rho qw\omega}{t_{кр} - t_{o.c}} \left(Q \frac{R}{2\lambda} + \Phi \right) \frac{1}{\alpha} ,$$

де $R = R_2$,

$$Q = \frac{\beta}{\beta + 0,7} ,$$

$$\Phi = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

Для прямокутного паралелепіпеда з ребром $2R_1, 2R_2$ та $2R_3$ (при чому $R_3 \leq R_2 \leq R_1$; $\phi_1 = \frac{R_1}{R_2} \geq \beta_2 = \frac{R_2}{R_3} \geq 1$) тривалість заморожування також визначається за формулою, але

$$Q = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_1 \beta_2 + 0,7 \beta_1 \beta_2 - 0,15},$$

$$\Phi = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2}.$$

Розроблено також модифікації формули Планка. Тривалість проморожування певної товщини Δ або певної частки об'єму тіла v (це важливо для підморожування продуктів) визначають формулами:

$$\tau_0(\Delta) = \frac{\Phi q p R^2 w \omega}{\lambda(t_{kp} - t_{oc})} \left[\left(\frac{1}{Bi} + \frac{\Phi}{2\Phi - 1} \right) \left(1 - \left(1 - \frac{\Delta}{R} \right)^{\frac{1}{\Phi}} \right) - \frac{1 - \left(\frac{\Delta}{R} \right)^2}{2(2\Phi - 1)} \right];$$

$$\tau_0(v\bar{v}) = \frac{q p R^2}{\lambda(t_{kp} - t_{oc})} \left[\left(\frac{\Phi \bar{v}}{Bi} + \frac{\Phi^2 \bar{v}}{2\Phi - 1} - \frac{\Phi(1 - (1 - v)^{2\Phi})}{2(2\Phi - 1)} \right) \right].$$

Формула Планка також дає можливість визначити тривалість заморожування двошарового тіла з різними коефіцієнтами теплопровідності шарів (наприклад пельменів або плодів з товстою шкіркою). Нехай внутрішній шар має теплофізичні характеристики $q_1, p_1, w_1, \lambda_1, t_{kp1}$ та визначити розмір R_1 , а зовнішній – відповідно $q_2, p_2, w_2, \lambda_2, t_{kp2}$ та R_2 (тоді R_2 буде визначальним розміром усього тіла). Тоді тривалість заморожування

$$\tau_0 = \frac{\Phi q_2 p_2 R_2 w_2 \omega_2}{(t_{kp2} - t_{oc})} \left[\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\Phi R_2}{\lambda_2 (2\Phi - 1)} \right) \left(1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{1}{\Phi}} \right) - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2(2\Phi - 1)\lambda_2 R_2} \right] +$$

$$+ \frac{\Phi q_1 p_1 R_1 w_1 \omega_1}{(t_{kp1} - t_{oc})} \left(\frac{R_1}{2\lambda_1} + \frac{R_1^{\frac{1}{\Phi} - 1}}{\alpha R_2^{\frac{1}{\Phi} - 1}} + \frac{\Phi R_1^{\frac{1}{\Phi} - 1} \left(R_2^{2\frac{1}{\Phi}} - R_1^{2\frac{1}{\Phi}} \right)}{\lambda_2 (2\Phi - 1)} \right) \quad (2.42)$$

Якщо умови тепловіддачі з різних боків продукту значно відрізняються (наприклад, коли продукт лежить на полиці у камері), тривалість заморожування тіла становить:

$$\tau_0 = \frac{q\rho R^2 w \omega}{\lambda(t_{кр} - t_{o.c})} \left(\frac{\overline{\Phi^2 v} - \frac{\Phi 91 - (1 - v)^{2\Phi}}{2(2\Phi - 1)}}{2\Phi - 1} + \frac{2(\overline{v}(Bi_1 + Bi_2) + 1)(\overline{v^2} Bi_1 Bi_2 + 1) - \Phi \frac{-2 + 1,5 \cdot \overline{v^2} (Bi_1 + Bi_2)^2}{(2\overline{v^2} Bi_1 Bi_2 + Bi_1 + Bi_2)^2}}{2\Phi - 1} \right).$$

За формулою Планка можна визначити також і тривалість розморожування продукту, адже ці два процеси подібні: під час заморожування теплота передається через шар замороженого продукту від теплового ядра до холодного середовища, а під час розморожування — через шар розмороженого продукту від теплового середовища до замороженого ядра. Тому для розрахунку тривалості розморожування слід у відповідну формулу підставити коефіцієнт теплопровідності охолодженого (розмороженого) продукту та густину замороженого продукту.

Під час виведення формули Планка зроблено ряд припущень, а саме:

питома теплоємність замороженої частини дорівнює нулю;

переохолодження немає, льодоутворення повністю відбувається при криоскопічній температурі;

теплофізичні властивості замороженої частини не залежать від температури;

тіло перед замороженням охолоджене до криоскопічної температури;

тіло однорідне, його густина під час заморожування не змінюється;

коефіцієнт тепловіддачі і температура охолодженого середовища сталі.

У реальних умовах жодне з цих припущень не справджується. Тому до формули Планка вводять ряд поправок.

Поправка на ненульову теплоємність замороженої частини. В ідеальному варіанті не врахована кількість теплоти, що відводиться для подальшого охолодження вже замороженого продукту. Якщо

теплоємність замороженої частини дорівнює $c_{мор}$, то до тривалості заморожування, слід додати величину

$$\tau_1 = \frac{\rho c_{мор} R^2 \left[1 + \ln\left(1 + \frac{0,65}{Bi^*}\right) \right]}{\lambda(4 + 2|k - 1|)},$$

$$\text{де } Bi^* = \begin{cases} Bi + 1 - k \\ Bi \end{cases} \quad \text{при } k < 1$$

Тут і далі $k = (1/\Phi) - 1$.

Поправка на поступове виморожування вологи. У реальних продуктах клітинний сік переохолоджується нижче криоскопічної температури на 2—5 °С, до того ж льодоутворення відбувається при змінній температурі (це пов'язано зі зростанням концентрації розчинених речовин у соку, який ще не кристалізувався). Для врахування цих факторів вводиться поправка:

$$\tau_2 = \frac{-R^2 pqw\omega}{\lambda(t_{кр} - t_{oc})} F(Bi, a, k)$$

$$a = \frac{-t_{кр}}{t_{кр} - t_{oc}},$$

де $F(Bi, a, k)$ — безрозмірна функція, величина якої залежить від умов заморожування, форми та криоскопічної температури продукту. Її значення для пластини ($k = 0$), циліндра ($k = 1$) та кулі ($k = 2$). Значення для тіл іншої форми, коли коефіцієнт k не є цілим, можна визначити за допомогою лінійної інтерполяції.

Поправка на зміну теплопровідності продукту під час заморожування. Зі зниженням температури та за рахунок льодоутворення теплопровідність продукту буде змінюватись. Для врахування цієї зміни вводиться поправка:

$$\tau_3 = \Phi \frac{R^2 pqw\omega}{(t_{кр} - t_{oc})} \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda^2} \frac{b(Bi + 2)}{2Bi} \ln \left(1 + \frac{Bi}{b(Bi + 2)} \right),$$

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності охолодженого продукту (при криоскопічній температурі),

$$b = \frac{2\lambda_0 + \lambda}{3\lambda_0} a.$$

Поправка на початкову температуру тіла. Як правило, продукт надходить на заморожування з температурою, вищою за криоскопічну. Тому спочатку він охолоджується до криоскопічної температури на поверхні (середня за об'ємом температура при цьому буде вищою). Після цього починається заморожування продукту. Таким чином, спочатку слід розрахувати тривалість охолодження продукту до криоскопічної температури на його поверхні $\tau_{ох}$ та середню за об'єм температуру наприкінці такого охолодження $t_{поч}$. Додатковий час заморожування:

$$\tau_4 = \Phi c_0 R p \frac{t_{поч} - t_{кр}}{(t_{кр} - t_{о.с})} \left[\frac{R}{\lambda} \left(2 + \frac{Ax_0}{k+1} \frac{Bt+2}{Bi} \right)^2 + \frac{1}{\alpha} \right],$$

де
$$A = \frac{\lambda_0 q w \omega}{c_0 (t_{кр} - t_{о.с}) \lambda},$$

$$x_0 = \frac{(k+1)(k+5+2\sqrt{2k+6})}{4}.$$

Отже, остаточна тривалість заморожування продукту становитиме

$$\tau = \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_{ох}. \quad (2.43)$$

Кількість відведеної теплоти.

Кількість теплоти, відведеної від продукту під час заморожування,

$$Q_M = G [c_0 (t_n - t_{кр}) + r_1 W \omega + c_M (t_{кр} - t_{ск})],$$

де G – маса заморожуваного продукту, кг.,

де G – маса заморожуваного продукту, кг;

t_n – початкова температура продукту (зазвичай вища за криоскопічну),

°C; $t_{кр}$ – кріоскопічна температура, °C;

$t_{ск}$ - середня кінцева температура продукту, °C; r_f — теплота кристалізації води, Дж/кг; W - вміст йоду в продукті;

ω — частка вимороженої води в продукті при температурі $t_{ск}$;

t_{co} — питома теплоємність охолодженого продукту, Дж/(кг·K);

c_m — питома теплоємність замороженого продукту, що визначається при середній температурі між $t_{ск}$ і $t_{кр}$ Дж/(кг·K).

На практиці кількість відведеної теплоти також визначають за формулою (3.23).

Якщо продукт доморожується, тобто його початкова температура нижча за кріоскопічну, то кількість відведеної теплоти

$$Q_d = [r_f W (\omega_2 - \omega_1) c_m (t_n - t_{ск})],$$

де t_n — початкова температура продукту (середня за об'ємом), °C;

$t_{ск}$ - середня кінцева температура продукту, °C;

ω_1 і ω_2 — частки вимороженої води при температурах відповідно t_n і $t_{ск}$

c_m — середня питома теплоємність замороженого продукту, Дж/(кг·K).

Повного заморожування багатьох продуктів не вдається досягнути навіть при дуже низьких температурах, і процес заморожування призупиняється на проміжній стадії. В цей момент температурне поле розподілене в продукті нерівномірно: в центрі продукту температура вища, ніж на поверхні.

Середній кінцевій температурі продукту називають середню інтегральну температуру продукту, тобто такою температурою, котру заморожений продукт прийняв би адіабатних умовах при досягненні теплової рівноваги.

Середньою кінцевою температурою $t_{с.к}$ – можливо визначити за формулою Д.Г. Рютова, якщо відомі температури в центрі продукту $t_{ц}$ та охолоджуючої середі $t_{с}$:

$$t_{с.к} = 0,5 \frac{t_{ц}(B_i+2) + t_{с} B_i}{B_i+1},$$

де Bi – критерій Біо $\left[Bi = \frac{ab}{\lambda} \right]$, де a -коефіцієнт тепловіддачі від поверхні продукту до зовнішньої середовища в процесі заморожування, Вт ($m^2 \cdot K$); b - найкоротша відстань від поверхні продукту до центру, м; λ - коефіцієнт теплопровідності замороженого продукту при середній температурі процесу заморожування, Вт/(м·К).

Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні продукту до зовнішньої середовища залежить від умов заморожування і дорівнює наступним значенням:

Таблиця 2.7.

Умови заморожування	$a, \text{ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
У повітрі при конвективному русі – природної циркуляції	5-10
У повітрі при циркуляції зі швидкістю до 1 м/сек	15-20
У повітрі при циркуляції зі швидкістю більше 1 м/сек	25-30
В розсолі при ламінарному русі	200-250
В розсолі при турбулентному русі (-1-2 м/сек)	300-500
У рідкому азоті	500-1000
На металевих плитках з кип'ячим всередині них холодильним агентом чи циркулюючим розсолом	250-300

Примітка: $1 \text{ ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} = 1,163 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Теплопровідність заморожених продуктів має середнє значення між теплопровідністю води ($\lambda = 0,52 \text{ ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) і льоду ($\lambda = 2 \text{ ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) і в залежності від кінцевої температури $t_{\text{к}}$ складають:

Таблиця 2.8.

$t_{кр}$, °C	-1	-5	-10	-20
λ , ккал/ч ·м·°C	0,6	1,0	1,2	1,4

Примітка: 1 ккал/ч·м·°C = 1,163 Вт/м·К.

Середньою температурою процесу заморожування в інтервалі від криоскопічної $t_{кр}$ до середньої кінцевої $t_{с.к}$ розраховують за формулою

$$t_{ср} = (t_{с.к} - t_{кр}) / \ln(t_{с.к}/t_{кр})$$

Кількість вимороженої вологі при температурі продукту t можна приблизно знайти з рівняння

$$\omega = 1 - t_{кр}/t$$

Кількість вимороженої вологі ω_1 при середній температурі процесу замороження можна розрахувати за формулою

$$\omega_1 = 1 - t_{кр}/t_{ср}$$

Кількість вимороженої вологі при середній кінцевій температурі процесу замороження можна знайти за формулою

$$\omega_2 = 1 - t_{кр}/t_{с.к}$$

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Рівень розробок під час моделювання процесів заморожування є нижчим, ніж для процесів охолодження, що пов'язано зі складністю фізичних процесів, які супроводжують це явище. Кожний із запропонованих у літературі методів обчислення тривалості заморожування специфічно пов'язаний із початковою фізичною схемою процесу, його початковими та граничними умовами, а в вирішення звичайно вводяться допущення, які його спрощують. Найчастіше таке завдання називають завданням про

теплопровідність у системах із рухомою межею поділу, яка полягає в уявленні про переміщення межі поділу між твердою і рідкою фазами від периферії в глиб тіла.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ще в минулому столітті були запропоновані відповідні вирішення цього завдання, одержані Г. Ляме і Б. Клапейрон, Д. Непманом, а потім Г. Стефаном. У холодильній технології найчастіше користуються вирішенням завдання про заморожування, розробленим Р. Планком у 1913р. й істотно розвиненим ним та іншими дослідниками в подальші роки. Формула Планка як фундаментальна включена в рекомендації Міжнародного інституту холоду, але добре відомо, що на практиці всі допущення, які входять у формулу Планка, не виконуються.

Професором В.П. Оніщенко показано, що модернізацію формул указанного типу слід вважати недоцільною, і альтернативною є моделювання процесу заморожування в рамках кураєвої задачі теплопровідності. При цьому слід відмовитися від використання відомої граничної умови Г.Стефана, яка підтверджувала наявність джерела теплоти на рухомій межі контакту охолодженого й замороженого шару продукту, тому що реально такої межі під час заморожування не існує. Не існує й експериментальних значень дійсної теплоємності продуктів, у якій би не враховувалася теплота фазового переходу.

У той же час такий метод розв'язання краєвої нелінійної задачі теплопровідності з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик харчової сировини потребує використання спеціальних комп'ютерних програм, що для інженерних розрахунків, безумовно, не є доцільним.

Відповідно до розробок В.А. Потапова та Д.П. Семенюк отримано інженерні формули розрахунку тривалості заморожування, яка враховує температуру залежності теплофізичних властивостей харчової сировини.

З урахуванням температурної залежності для теплофізичних характеристик розв'язуємо рівняння при початковій умові $t(0) = t_{кр}$, де $t_{кр}$ - криоскопічна температура продукту, має наступний вигляд:

$$t_{зам} = \frac{pRv}{2\alpha} \left[B_1 \ln\left(\frac{t}{t_{кр}}\right) + B_2 \ln\left(\frac{t-t_{\infty}}{t_{кр}-t_{\infty}}\right) + B_3 \ln\left(\frac{\lambda_m t_{кр} - \lambda_t}{\lambda_m t - \lambda_t}\right) + 273 C_t \frac{t_{кр} - t}{t_{\infty} t_{кр} t} \right] \quad (2.44)$$

$$B_1 = 273 C_t \frac{\left(\frac{t_{\infty} \alpha R_X}{2\Gamma}\right) - \lambda_t}{\lambda_t t_{\infty}^2},$$

$$B_2 = \left(\lambda_m t_{\infty} - \lambda_t + t_{\infty} \frac{\alpha R_X}{2\Gamma} \right) \frac{t_{\infty}^2 C_m - 273 C_t}{t_{\infty}^2 \lambda_t - \lambda_m t_{\infty}},$$

$$B_3 = \frac{\alpha R_X}{2\Gamma} \frac{\lambda_t^2 C_m - 273 \lambda_m^2 C_t}{\lambda_t \lambda_m \lambda_t - \lambda_m t_{\infty}}.$$

Ця формула визначає тривалість заморожування $\tau_{зам}$ від криоскопічної $t_{кр}$ до кінцевої середньооб'ємної температури t .

Якщо попередню формулу покласти постійними ТФХ ($C_m = C_0$; $C_t = 0$; $\lambda_m = 0$; $\lambda_t = 0$), то одержуємо тривалість охолодження від початкової t_0 до криоскопічної температури

$$\tau_{охл} = \frac{1}{2} R_v C_0 p \frac{\lambda_0 + \alpha R_X / 2\Gamma}{\alpha \lambda_0} \ln\left(\frac{t_{\infty} - t_0}{t_{\infty} - t_{кр}}\right).$$

Повна тривалість процесу охолодження та заморожування від початкової температури продукту до кінцевої визначається сумою одержаних величин

$$\tau_{проц} = \tau_{охл} + \tau_{зам}.$$

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ТРИВАЛОСТІ ЗАМОРОЖУВАННЯ

Проводиться порівняльний аналіз способів розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів. Розраховуються три продукти різної геометричної форми: скибка хліба (пластина), сосиска молочна (циліндр), полуниця (куля). Розрахунок проводиться по трьох формулах, розглянутих у розділі 2, на кожен продукт. Завдяки проведеним розрахункам буде визначено яким методом найкраще користуватися для розрахунків тривалості заморожування харчових продуктів.

3.1 Розрахунок заморожування скибки хліба (пластина)

Візьмемо наступні показники для розрахунку заморожування скибки хліба:

Кріоскопічна температура продукту $t_{кр} = -2^{\circ}\text{C}$;

Температура охолодного середовища $t_{oc} = -30^{\circ}\text{C}$;

Температура продукту $t = 5^{\circ}\text{C}$;

Безрозмірна температура $t_{\infty} = 1^{\circ}\text{C}$;

Температура середовища $t_c = -30^{\circ}\text{C}$;

Визначальний розмір $r = 1(\text{м})$;

Питома теплота кристалізації води $q = 3,3 \cdot 10^5 \text{Дж/кг}$;

Температуропровідність повітря $\alpha = 4,07 \text{ м}^2/\text{с}$;

Коефіцієнт тепловіддачі $a_1 = 5,76 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

Коефіцієнт тепловіддачі $a_2 = 1,29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

Густина охолодженого продукту $\rho = 1073 \text{ кг}/\text{м}^3$;

Питома масова теплоємність $c = 3140 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$

Відносний вміст води в продукті $w = 0,825 \text{ кг}/\text{кг}$;

Відносна кількість вимороженої води в продукті $\omega = 0,5 \text{ кг}/\text{кг}$;

Питома теплопровідність $\lambda = 1,373 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

$\lambda_1 = 1,203 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

Емпіричні коефіцієнти температурної залежності для ТФХ:

$$\lambda_m = 0.45 \text{ Вт/(м·К)};$$

$$\lambda_t = 0.46 \text{ Вт/(м·К)};$$

$$C_t = 0.1;$$

$$\text{Критерій Біо } Bi_1 = 3;$$

$$\text{Критерій Біо } Bi_0 = 2;$$

Безрозмірний коефіцієнт, що враховує форму тіла $\Phi_0 = 1 \cdot 10^5$;

Тривалість заморожування:

$$B_1 = 10 \text{ с};$$

$$B_2 = 20 \text{ с};$$

$$B_3 = 30 \text{ с};$$

Кінематична в'язкість повітря $\nu = 15.6 \text{ мкПа·с}$;

Значення теплопровідності продукту розраховуємо за формулою:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, (\text{м}^2/\text{с}) \quad (3.1)$$

Визначимо теплопровідність продукту для скибки хліба:

$$a = \frac{1.373}{3140 \cdot 1073} = 4.07, (\text{м}^2/\text{с})$$

Продукти умовно вважають двокомпонентними системами, що містять воду та сухі речовини, тому їх питому теплоємність визначають за формулою:

$$c = c_w W + c_c (1 - W), \quad (3.2)$$

W – вологовміст продукту, кг/кг; c_w , c_c – питомі теплоємності відповідно води та сухих речовин, Дж/(кгК). Питома теплоємність води становить - 4,19 кДж/(кгК). Питома теплоємність сухих речовин більшості продуктів тваринного походження лежить у межах 1,34 – 1,68 кДж/(кгК), рослинного – близько 0,91 кДж/(кгК).

Коефіцієнт теплопровідності харчових продуктів можна приблизно визначити за формулою :

$$\lambda = \lambda_w + \lambda_c(1 - W), \quad (3.3)$$

де λ_w – коефіцієнт теплопровідності води, що дорівнює 0,60 Вт/(мК);

λ_c - коефіцієнт теплопровідності сухих речовин, що дорівнює 0,26 Вт/(мК);

Перший розрахунок для скибки хліба (пластини) проведемо за **методом інтегральних співвідношень Л. Лейбензона.**

Розрахунок проводиться за формулою (2.30) у розділі 2

$$Fo_{II} = \frac{\rho \cdot \omega \cdot W \cdot r \cdot a_1}{\lambda_1(t_{kp} - t_s)} \cdot \frac{Bi_1 + 2}{2Bi_1} + \frac{a_1}{3a_2} \left[\left(\frac{Bi_1 + 1}{2Bi} \right)^2 \ln(Bi_1 + 1) - \frac{2Bi_1 + 1}{Bi_1} \right] =$$

$$= \frac{1073 \cdot 0,5 \cdot 0,825 \cdot 1 \cdot 5,76}{1,203(-2 - (-30))} \cdot \frac{3+2}{2 \cdot 3} + \frac{5,76}{3 \cdot 1,29} \left[\left(\frac{3+1}{2 \cdot 2} \right)^2 \ln(3 + 1) - \frac{2 \cdot 3 + 1}{3} \right] = 61,663, \text{ c}$$

Із отриманого результату можна зробити висновок, що метод інтегрального співвідношень підходить для розрахунку заморожування харчового продукту маючого форму пластини.

Другий розрахунок для заморожування скибки хліба проводимо за **формулою Планка**

Розрахунок заморожування скибки хліба проводиться за загальною формулою Планка (2.41).

$$\tau_0 = \Phi \frac{R \rho q w \omega}{t_{kp} - t_{o.c}} \left[\frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta_{yn}}{\lambda_{yn}} \right] =$$

$$= 1 \cdot 10^{-5} \frac{1 \cdot 1073 \cdot 3,3 \cdot 10^5 \cdot 0,825 \cdot 0,5}{-2 - (-30)} \left[\frac{1}{2 \cdot 1,373} + \frac{1}{4,07} \right] = 108,936, \text{ c}$$

Суму термічних опорів шарів пакувальних матеріалів $\delta_{уп}/\lambda_{уп}$ слід враховувати лише для упакованих продуктів. Тому я їх не враховую для розрахунку тривалості заморожування скибки хліба.

Із отриманого результату можна зробити висновок, що формула Планка не підходить для розрахунку заморожування харчового продукту маючого форму пластини.

Формула Планка також дає можливість визначити тривалість заморожування двошарового тіла з різними коефіцієнтами теплопровідності шарів (наприклад пельменів або плодів з товстою шкіркою). Нехай внутрішній шар має теплофізичні характеристики $q^1, p^1, w^1, \lambda_1, t^{kp1}$ та визначити розмір R^1 , а зовнішній – відповідно $q^2, p^2, w^2, \lambda_2, t^{kp2}$ та R^2 (тоді R^2 буде визначальним розміром усього тіла). Тоді тривалість заморожування

$$\tau_0 = \frac{\Phi q_2 p_2 R_2 w_2 \omega_2}{(t_{kp2} - t_{oc})} \left[\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\Phi R_2}{\lambda_2 (2\Phi - 1)} \right) \left(1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{1}{\Phi}} \right) - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2(2\Phi - 1)\lambda_2 R_2} \right] +$$

$$+ \frac{\Phi q_1 p_1 R_1 w_1 \omega_1}{(t_{kp1} - t_{oc})} \left(\frac{R_1}{2\lambda_1} + \frac{R_1^{\frac{1}{\Phi}-1}}{\alpha R_2^{\frac{1}{\Phi}-1}} + \frac{\Phi R_1^{\frac{1}{\Phi}-1} \left(R_2^{2\frac{1}{\Phi}} - R_1^{2\frac{1}{\Phi}} \right)}{\lambda_2 (2\Phi - 1)} \right) \quad (2.42)$$

Так як скибка хліба не являє собою двошарове тіло, то використовувати формулу 2.42 не має необхідності.

Третій розрахунок для скибки хліба проводимо за **формулою**

В.А. Потапова та Д.П. Семенюк

Розрахунок був проведений за формулою (2.44) у розділі 2

$$t_{\text{зам}} = \frac{pRv}{2a} \left[B_1 \ln \left(\frac{t}{t_{\text{кр}}} \right) + B_2 \ln \left(\frac{t-t_{\infty}}{t_{\text{кр}}-t_{\infty}} \right) + B_3 \ln \left(\frac{\lambda_m t_{\text{кр}} - \lambda_t}{\lambda_m t - \lambda_t} \right) + 273 C_t \frac{t_{\text{кр}} - t}{t_{\infty} t_{\text{кр}} t} \right] =$$

$$\frac{11 \cdot 0,02 \cdot 15,6}{2 \cdot 24,4 \cdot 10^{-8}} \left[10 \ln \left(\frac{5}{-2} \right) + 20 \ln \left(\frac{5-1}{(-2)-1} \right) + 30 \ln \left(\frac{0,45 \cdot (-2) - 0,46}{0,45 \cdot 5 - 0,46} \right) + 273 \cdot \right.$$

$$\left. 0,1 \frac{(-2)-5}{1 \cdot (-2) \cdot 5} \right] = 55,345, \text{ с}$$

Як бачимо формула В.А. Потапова та Д.П. Семенюка приблизно підходить для розрахунку заморожування скибки хліба (пластини).

Таблиця 3.1.

Аналіз отриманих значень для скибки хліба

Задача	Спосіб розрахунку	Результат(с)
скибки хліба	Формула (2.30)	61,663
скибки хліба	Формула (2.41)	108,936
скибки хліба	Формула (2.44)	55,345

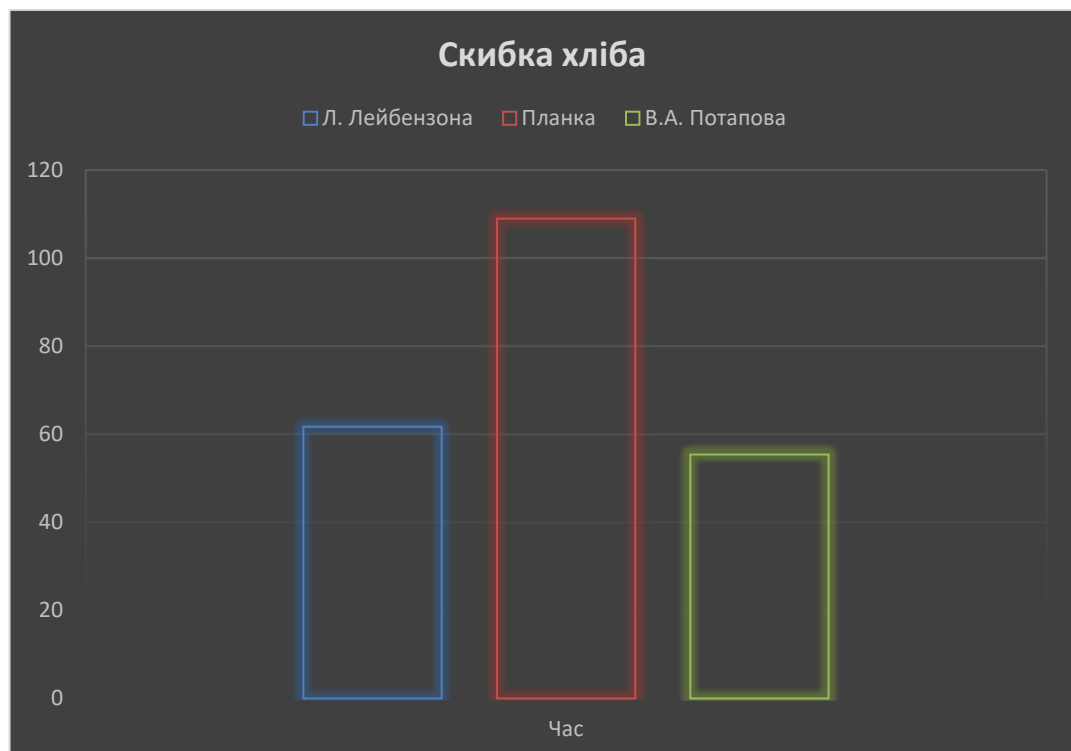


Рис. 3.1. На малюнку зображений наглядний приклад розрахунку тривалості заморожування скибки хліба (пластини).

Для розрахунку тривалості заморожування скибки хліба найбільш підходяща формула **Л. Лейбензона** (2.30).

3.2 Розрахунок заморожування молочної сосиски (циліндр)

Візьмемо наступні показники для розрахунку заморожування молочної сосиски:

Кріоскопічна температура продукту $t_{кр} = -1,3^{\circ}\text{C}$;

Температура охолодного середовища $t_{oc} = -30^{\circ}\text{C}$;

Температура продукту $t = 5^{\circ}\text{C}$;

Безрозмірна температура $t_{\infty} = 1^{\circ}\text{C}$;

Температура середовища $t_c = -30^{\circ}\text{C}$;

Визначальний розмір $r = 1,5(\text{м})$;

Питома теплота кристалізації води $q = 3,3 \cdot 10^5 \text{Дж/кг}$;

Температуропровідність повітря $\alpha = 4,07 \text{ м}^2/\text{с}$;

Коефіцієнт тепловіддачі $a_1 = 6,62 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

Коефіцієнт тепловіддачі $a_2 = 1,31 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

Густина охолодженого продукту $\rho = 1073 \text{ кг}/\text{м}^3$;

Питома масова теплоємність $c = 3140 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

Відносний вміст води в продукті $w = 0,775 \text{ кг}/\text{кг}$;

Відносна кількість вимороженої води в продукті $\omega = 0,5 \text{ кг}/\text{кг}$;

Питома теплопровідність $\lambda = 1,373 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

$\lambda_1 = 1,203 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

Емпіричні коефіцієнти температурної залежності для ТФХ:

$\lambda_m = 0,45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

$\lambda_t = 0,46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

$C_t = 0,1$;

Критерій Біо $Bi_1 = 3$;

Критерій Біо $Bi_0 = 2$;

Безрозмірний коефіцієнт, що враховує форму тіла $\Phi_0 = 1 \cdot 10^5$;

Тривалість заморожування:

$B_1 = 10$ с;

$B_2 = 20$ с;

$B_3 = 30$ с;

Кінематична в'язкість повітря $\nu = 15.6$ мкПа·с;

Визначимо теплопровідність продукту для молочної сосиски за формулою 3.1:

$$a = \frac{1,373}{3140 \cdot 1073} = 4,07, (\text{м}^2/\text{с})$$

Перший розрахунок для молочної сосиски проводимо методом інтегральних співвідношень Л. Лейбензона.

Розрахунок був проведений за формулою (2.30) у розділі 2

$$\begin{aligned} Fo_{II} &= \frac{\rho \cdot \omega \cdot W \cdot r \cdot a_1}{\lambda_1 (t_{kp} - t_s)} \cdot \frac{Bi_1 + 2}{2Bi_1} + \frac{a_1}{3a_2} \left[\left(\frac{Bi_1 + 1}{2Bi_1} \right)^2 \ln(Bi_1 + 1) - \frac{2Bi_1 + 1}{Bi_1} \right] = \\ &= \frac{1073 \cdot 0,5 \cdot 0,775 \cdot 1,5 \cdot 6,62}{1,203(-1,3 - (-30))} \cdot \frac{3+2}{2 \cdot 3} + \frac{6,62}{3 \cdot 1,31} \left[\left(\frac{3+1}{2 \cdot 2} \right)^2 \ln(3 + 1) - \frac{2 \cdot 3 + 1}{3} \right] = 104,487, \text{ с} \end{aligned}$$

Як бачимо із отриманого результату формула 2.30 приблизно підходить для розрахунку заморожування молочної сосиски.

Другий розрахунок для молочної сосиски проводимо за формулою Планка

Формула 2.41 у розділі 2

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \Phi \frac{R \rho q w \omega}{t_{kp} - t_{o.c}} \left[\frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta_{yn}}{\lambda_{yn}} \right] \\ &= 1 \cdot 10^{-5} \frac{1,5 \cdot 1073 \cdot 3,3 \cdot 10^5 \cdot 0,775 \cdot 0,5}{(-1,3) - (-30)} \left[\frac{1,5}{2 \cdot 1,373} + \frac{1}{4,07} \right] = 162,815, \text{ с} \end{aligned}$$

Із отриманих результатів робимо висновок, формула не підходить для розрахунку заморозки харчового продукту маючого форму циліндра.

Суму термічних опорів не враховуємо, відсутня упаковка.

Третій розрахунок проводимо за формулою В.А. Потапова та Д.П. Семенюк

Формулою 2.44 у розділі 2

$$t_{\text{зам}} = \frac{pRv}{2a} \left[B_1 \ln \left(\frac{t}{t_{\text{кр}}} \right) + B_2 \ln \left(\frac{t-t_{\infty}}{t_{\text{кр}}-t_{\infty}} \right) + B_3 \ln \left(\frac{\lambda_m t_{\text{кр}} - \lambda_t}{\lambda_m t - \lambda_t} \right) + 273 C_t \frac{t_{\text{кр}} - t}{t_{\infty} t_{\text{кр}} t} \right] =$$

$$= \frac{1073 \cdot 1,5 \cdot 15,6}{2 \cdot 4,07} \left[10 \ln \left(\frac{5}{-1,3} \right) + 20 \ln \left(\frac{5-1}{(-1,3)-100} \right) + 30 \ln \left(\frac{0,45 \cdot (-1,3) - 0,46}{0,45 \cdot 5 - 0,46} \right) + \right.$$

$$\left. 273 \cdot 0,1 \frac{(-1,3)-5}{1 \cdot (-1,3) \cdot 5} \right] = 112,213, \text{ с}$$

Отримані результати підтверджують, що формулу доречно використовувати для розрахунку тривалості заморожування циліндра.

Таблиця 3.2.

Аналіз отриманих значень для молочної сосиски

Задача	Спосіб розрахунку	Результат(с)
молочної сосиски	Формула (2.30)	104,487
молочної сосиски	Формула (2.41)	162,815
молочної сосиски	Формула (2.44)	112,213



Рис. 3.2 На малюнку зображений наглядний приклад розрахунку тривалості заморожування молочної сосиски (циліндра).

3.3 Розрахунок заморожування полуниці (куля)

Візьмемо наступні показники для розрахунку заморожування полуниці:

Кріоскопічна температура продукту $t_{кр} = -1,7^{\circ}\text{C}$;

Температура охолодного середовища $t_{oc} = -30^{\circ}\text{C}$;

Температура продукту $t = 5^{\circ}\text{C}$;

Безрозмірна температура $t_{\infty} = 1^{\circ}\text{C}$;

Температура середовища $t_c = -30^{\circ}\text{C}$;

Визначальний розмір $r = 1,3(\text{м})$;

Питома теплота кристалізації води $q = 3,3 \cdot 10^5 \text{Дж/кг}$;

Температуропровідність повітря $\alpha = 4,07 \text{ м}^2/\text{с}$;

Коефіцієнт тепловіддачі $a_1 = 5,76 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

Коефіцієнт тепловіддачі $a_2 = 1,29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

Густина охолодженого продукту $\rho = 1073 \text{ кг}/\text{м}^3$;

Питома масова теплоємність $c = 3140 \text{ кДж}/(\text{кгК})$

Відносний вміст води в продукті $w = 0,825 \text{ кг}/\text{кг}$;

Відносна кількість вимороженої води в продукті $\omega = 0,5 \text{ кг/кг}$;

Питома теплопровідність $\lambda = 1,373 \text{ Вт/(м·К)}$;

$\lambda_1 = 1,203 \text{ Вт/(м·К)}$;

Емпіричні коефіцієнти температурної залежності для ТФХ:

$\lambda_m = 0,45 \text{ Вт/(м·К)}$;

$\lambda_t = 0,46 \text{ Вт/(м·К)}$;

$C_t = 0,1$;

Критерій Біо $Bi_1 = 3$;

Критерій Біо $Bi_0 = 2$;

Безрозмірний коефіцієнт, що враховує форму тіла $\Phi_0 = 1 \cdot 10^{-5}$;

Тривалість заморожування:

$B_1 = 10 \text{ с}$;

$B_2 = 20 \text{ с}$;

$B_3 = 30 \text{ с}$;

Кінематична в'язкість повітря $\nu = 15,6 \text{ мкПа·с}$;

Визначимо теплопровідність продукту для полуниці за формулою

3.1:

$$a = \frac{1,373}{3140 \cdot 1073} = 4,07, (\text{м}^2/\text{с})$$

Перший розрахунок проводиться методом інтегральних співвідношень Л. Лейбензона.

Розрахунок був проведений за формулою 2.30 у розділі 2

$$Fo_{II} = \frac{\rho \cdot \omega \cdot W \cdot r \cdot a_1}{\lambda_1 (t_{kp} - t_s)} \cdot \frac{Bi_1 + 2}{2Bi_1} + \frac{a_1}{3a_2} \left[\left(\frac{Bi_1 + 1}{2Bi} \right)^2 \ln(Bi_1 + 1) - \frac{2Bi_1 + 1}{Bi_1} \right] =$$
$$= \frac{1073 \cdot 0,5 \cdot 0,825 \cdot 1,3 \cdot 4,07}{1,203((-1,7) - (-30))} \cdot \frac{3+2}{2 \cdot 3} + \frac{5,76}{3 \cdot 1,29} \left[\left(\frac{3+1}{2 \cdot 2} \right)^2 \ln(3 + 1) - \frac{2 \cdot 3 + 1}{3} \right] = 79,716, \text{ с}$$

Запропонована формула дозволяє розраховувати заморожування полуниці, але дає приблизний результат.

Другий розрахунок для заморожування полуниці проводимо за формулою Планка

$$\tau_0 = \Phi \frac{R\rho q w \omega}{t_{kp} - t_{o,c}} \frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta_{yn}}{\lambda_{yn}} =$$

$$= 1 \cdot 10^{-5} \frac{1,3 \cdot 1073 \cdot 3,3 \cdot 10^5 \cdot 0,825 \cdot 0,5}{(-1,7) - (-30)} \left[\frac{1,3}{2 \cdot 1373} + \frac{1}{4,07} \right] = 147,446, \text{ с}$$

Із отриманого значення бачимо, що формулу Планка не підходить для розрахунку заморожування харчового продукту маючого форму кулі (полуниці).

Третій розрахунок - формула В.А. Потапова та Д.П. Семенюк

Розрахунок був проведений за формулою (2.44) у розділі 2

$$t_{зам} = \frac{pRv}{2a} \left[B_1 \ln \left(\frac{t}{t_{kp}} \right) + B_2 \ln \left(\frac{t-t_{\infty}}{t_{kp}-t_{\infty}} \right) + B_3 \ln \left(\frac{\lambda_m t_{kp} - \lambda_t}{\lambda_m t - \lambda_t} \right) + 273 C_t \frac{t_{kp}-t}{t_{\infty} t_{kp} t} \right] =$$

$$= \frac{1073 \cdot 1,3 \cdot 15,6}{2 \cdot 4,07} \left[10 \ln \left(\frac{5}{(-1,7)} \right) + 20 \ln \left(\frac{5-1}{(-1,7)-1} \right) + 30 \ln \left(\frac{0,45 \cdot (-1,7) - 0,46}{0,45 \cdot 5 - 0,46} \right) + \right.$$

$$\left. 273 \cdot 0,1 \frac{(-1,7)-5}{1 \cdot (-1,7) \cdot 5} \right] = 80,333, \text{ с}$$

Результат відповідає показникам для розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів маючих форму кулі.

Таблиці 3.3

Аналіз отриманих значень для полуниці (кулі)

Задача	Спосіб розрахунку	Результат(с)
полуниця	Формула (2.30)	79,716
полуниця	Формула (2.41)	147,446
полуниця	Формула (2.44)	80,333

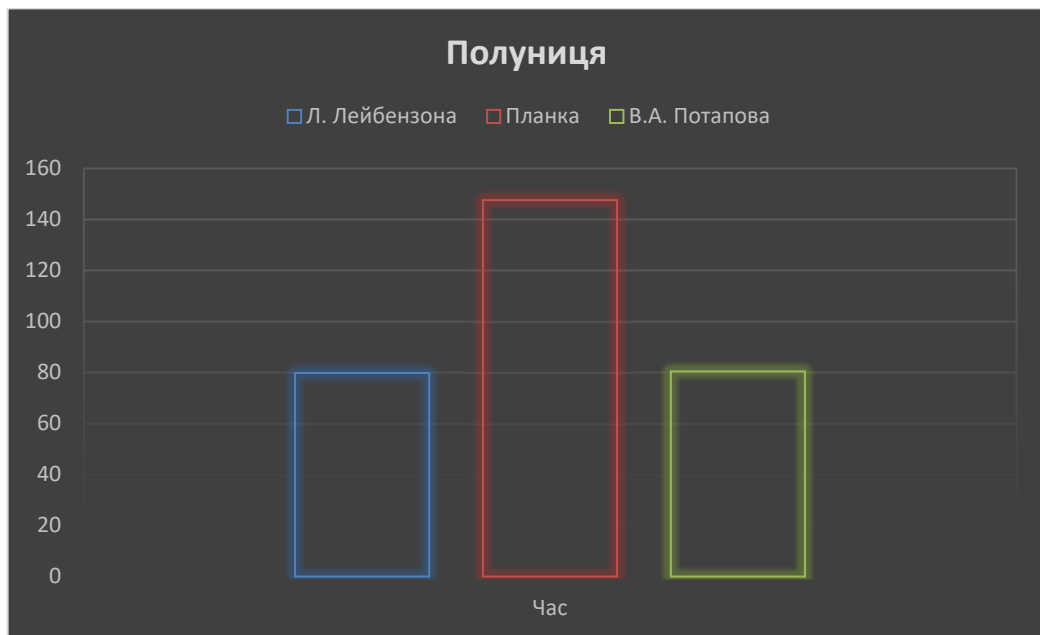


Рис. 3.3 На гістограмі зображений наглядний приклад розрахунку тривалості заморожування полуниці (кулі).

3.4 Аналіз результатів розрахунку

Таблиця 3.4

Продукт	Формула (2.30)	Формула (2.41)	Формула (2.44)
Скибка хлібу	61,663	108,936	55,345
Сосиска молочна	104,487	162,815	112,213
Полуниця	79,716	147,446	80,333

Із співставлення розрахунків тривалості заморожування обраних харчових продуктів, видно, що для різної геометричної форми продукту, підходять всі запропоновані формули. Задовільні результати отримані після всіх розрахунків. Варто відзначити, що формула Планка відрізняється за значеннями у більшу сторону від інших формул.

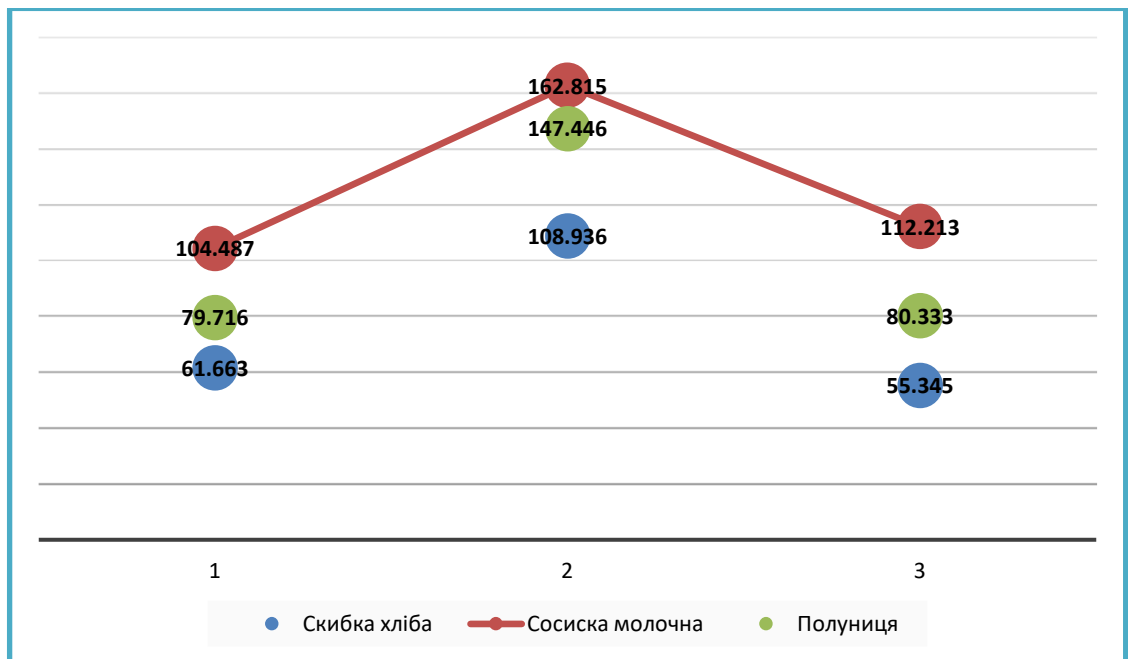


Рис. 3.4. На малюнку зображені розраховані продукти за різними формулами. Таким чином ми маємо змогу наглядно побачити які розрахунки краще підходять для одного чи іншого продукту.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Вступ

В даному дипломному проєкті проводиться аналіз розрахунків тривалості заморожування харчових продуктів. Обробка отриманих даних здійснюється за допомогою ПЕОМ. Тому основна увага в цьому розділі сконцентрована на організації здорових і безпечних умов праці в науково – дослідній лабораторії з використанням ПЕОМ.

4.1.Умови праці

Умови праці в науково – дослідній лабораторії з використанням ПЕОМ характеризуються наступними шкідливими і небезпечними факторами:

- коливання параметрів мікроклімату;
- вірогідність забруднення повітря;
- шум та вібрація;
- рівень освітлення;
- електромагнітні випромінювання;
- небезпека при експлуатації ПК;
- електронезбезпека;
- пожежонебезпека.

4.2.Санітарно-гігієнічні вимоги до виробничого приміщення та розташування обладнання робочих місць

Приміщення науково – дослідної лабораторії та розташування обладнання, відповідає вимогам [71] та наведено на рис 4.1

Вибраний стандартний комп'ютерний стіл дозволяє регулювати висоту робочої площини в межах 680...800 мм, а ширина і глибина - забезпечує можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (1200x800 мм). Передбачено робоче крісло - підйомно- поворотне, з плоскою

поверхнею сидіння та закругленим переднім краєм. Висота поверхні

розташовується на оптимальній відстані від очей користувача 850 мм.

Розташування екрана ВДТ забезпечує зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом 30° , до нормальної лінії погляду працюючого. Клавіатура розташовується на відстані 200 мм від краю столу.

4.3. Мікроклімат, чистота та іонізація повітря

Параметри мікроклімату, іонний склад повітря, вміст шкідливих речовин на робочих місцях повинен відповідати вимогам [71,72].

У приміщенні підтримуються наступні параметри.

В холодний період року:

- температура 22—24 °С;
- відносна вологість - 40-60%;
- швидкість руху повітря до 0,1 м/с.

В теплий період року:

- температура 23—25 °С;
- відносна вологість - 40-60%;
- швидкість руху повітря до 0,1 м/с.

Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на з ПЕОМ визначені в табл.4.1

Таблиця 4.1

Рівні іонізації повітря

Рівні іонізації повітря	Кількість іонів в 1см повітря	
	n+	n-
Мін. необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Макс. допустимі	50000	50000

Для підтримки оптимальних параметрів мікроклімату, концентрації позитивних і негативних іонів та чистоти повітря, передбачено кондиціонування повітря, зволожувач повітря та систему опалення у холодний період року.

8.4. Виробничі випромінювання

Візуальний дисплейний термінал на основі TFT-LCD матриці є джерелом декількох видів випромінювань: оптичних (ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного діапазонів), високочастотних і низькочастотних електромагнітних полів.

Реальна інтенсивність кожного виду випромінювання визначається технічною конструкцією конкретного терміналу.

Біологічна дія на оператора електромагнітних випромінювань, та електромагнітних полів залежить від того, наскільки їх рівні та параметри відповідають нормованим значенням наведеним у табл.4.2

Таблиця 4.2.

Нормовані випромінювання та параметри полів від ВДТ

Найменування	Діапазохвиль (частот)	Гранично допустимий рівень
<i>Оптичні випромінювання</i>		
Ультрафіолетовий діапазон	315 - 400 нм	10 Вт/м ²
Видиме випромінювання	400 - 700 нм	1000 кд/м ²
Інфрачервоний діапазон	700 нм - 1мм	100 Вт/м ²
<i>Електромагнітні випромінювання</i>		
Напруженість електромагнітного поля (на відстані 0,5 м - за електричною складовою	2кГц-400 кГц 5Гц-2КГц	2,5 В/м 25В/м
- щільність магнітного потоку	2кГц-400 кГц 5Гц -2 кГц	25 нТл 250 нТл

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори останніх років випуску, а також дотримуватись регламентованих режимів праці і відпочинку (п'ятиденний робочий тиждень з двома вихідними днями, тривалість робочого часу працівника не може перевищувати 40 год. на тиждень, через кожні 2 години роботи – 15 хвилинні перерви).

4.5.Виробниче освітлення

Правильно спроектоване і виконане виробниче освітлення покращує умови зорової роботи, знижує стомлюваність, сприяє підвищенню продуктивності праці.

Рівень природного та штучного освітлення у науково – дослідній лабораторії відповідає вимогам СНиП 23-05-95. «Естественное и искусственное освещение».

Природне світло до приміщення проникає через два односторонніх вікна, які забезпечують коефіцієнт природної освітленості $e_{\min} - 1,65 \%$.

Рекомендовані рівні освітленості у приміщеннях з багатоколірними ВДТ: рівень загальної освітленості — 75-100 лк, рівень комбінованої освітленості — 400 лк.(настільна лампа розжарювання).

Обмеження прямого осліплення регламентується яскравістю джерела природного(штори на вікнах) і штучного освітлення. Як джерела світла при штучному освітленні застосовуються переважно люмінесцентні лампи типу ЛБ. Для загального освітлення використовують світильники з екрануючими решітками серії ЛПО 3б, укомплектовані високочастотними пускорегулювальними апаратами (ВЧ ПРА).

Обмеження відбитого світла здійснюється правильним вибором типу світильників, розміщенням робочих місць відносно джерел природного і штучного освітлення, раціональним підбором поверхонь відбиття приладів, інтер'єру приміщення, меблів тощо.

Для забезпечення нормованих значень освітленості у приміщеннях з ПК слід чистити світильники принаймні двічі на рік і вчасно замінювати лампи, що перегоріли.

4.6. Шум та вібрація

Джерелом шуму та вібрації у науково – дослідній лабораторії, є таке обладнання:

- ПК;
- обладнання для друку та копіюванням документів;
- мережеве обладнання;
- кондиціонер;
- шум з вулиці;
- шум від роботи дослідної установки.

Під час виконання робіт з ПЕОМ загальний рівень шуму в приміщенні не повинен перевищувати 55-65 дБА, а рівень загальної вібрації – 70-72 дБ, що відповідає вимогам [70].

Для зниження шуму та вібрації у лабораторії використовують такі методи:

- архітектурно – будівельні рішення, в адміністративній будівлі;
- встановлення звукоізолюючого кожуха на дослідну установку і гумових прокладок під компресор;
- винесення кондиціонера за межі приміщення та встановлення на гумові прокладки;
- використання звукоізолюючих віконних рам.

4.7. Вимоги техніки безпеки при експлуатації ПЕОМ

Безпечна експлуатація ПЕОМ повинна відповідати вимогам [70, 71]. Користувач ПК слідкує за тим, щоб ВДТ, периферійні пристрої ПК, мережеве обладнання були справними і випробуваними відповідно до чинних нормативних документів. Після закінчення роботи ВДТ та ПК відключаються від електричної мережі. У разі виникнення аварійної ситуації необхідно

негайно відключити ВДТ та ПК від електричної мережі. При появі попереджувальних сигналів на екрані ВДТ необхідно терміново виключити ПК. Приміщення з ВДТ мають бути оснащені аптечками першої медичної допомоги.

Забороняється робота на ПЕОМ особам, які не пройшли навчання та інструктаж з техніки безпеки.

Неприпустимими є такі дії:

- виконання обслуговування, ремонту та налагодження ПК безпосередньо на робочому місці користувача ПК;
- зберігання біля монітору та ПК паперу, дискет, інших носіїв інформації, запасних блоків, деталей тощо, якщо вони не використовуються для поточної роботи;
- відключення захисних пристроїв, самочинне проведення змін у конструкції та складі ПК, устаткування або їх технічне налагодження;
- робота з ВДТ, в яких під час роботи з'являються нехарактерні сигнали, нестабільне зображення на екрані тощо.

4.8. Електробезпека

Під час експлуатації дослідної установки та ПЕОМ, необхідно дотримуватись вимог [71], розділів СНиП і ПУЕ, що стосуються штучного освітлення та електротехнічних пристроїв, а також вимог нормативно-технічної і експлуатаційної документації заводу-виробника ПЕОМ.

Основні заходи та засоби електробезпеки:

- Електричне устаткування лабораторії і ПЕОМ мають пристрої захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів (автоматичні вимикачі);
- недоступність струмопровідних частин (прокладення кабелю, проводок в сталевих трубах, в гнучких металевих рукавах, в спеціальних закритих каналах під підлогою);
- заземленні конструкції в приміщенні (батарея опалення) захищена

- з'ємними щитками від випадкового дотику;
- всі струмоведучі частини ПЕОМ надійно ізольовані (R_{i3} не менше 1 МОм), а силового (R_{i3} не менше 0.5 МОм);
- всі та периферійні пристрої ПЕОМ, металеві труби для прокладання проводки заземлені, а штепсельні з'єднання та розетки підключення ПЕОМ — мають спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника.

Заземлення ПЕОМ та іншого електроустаткування здійснюється різними контурами: для ПЕОМ контур заземлення R_3 не більше 1 Ом, для іншого електроустаткування R_3 , не більше 4 Ом;

- проведення ряду організаційних заходів (навчання, інструктаж, атестація і переатестація працюючого персоналу).

Захист від вторинного прояву атмосферної електрики забезпечується стержньовим блискавковідводом, який захищає адміністративну будівлю де розташована науково – дослідна лабораторія. Виконана конструкція відповідає вимогам РД 34. 21. 122 – 87. «Инструкция по защите от молнии зданий и сооружений».

4.9. Пожежна безпека

Відповідно до ОНТП 24 - 86 «Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности» приміщення науково – дослідної лабораторії відноситься до пожежонебезпечної категорії В.

Пожежна безпека у приміщенні здійснюється згідно вимог ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. «Пожарная безопасность. Общие требования», ДНАОП 0.01-1.01-95. «Правила пожежної безпеки в Україні».

Найбільш ймовірною і основною причиною виникнення пожежі в лабораторії є займання електропроводки внаслідок короткого замикання або з інших причин. Тому система запобігання пожежі передбачає наступні заходи:

- виконання правил пожежної безпеки при роботі на дослідній установці

та з комп'ютером;

- періодичний контроль цілісності і надійності електроізоляції;
- експлуатація електрообладнання без перевантаження;
- наявність протипожежних інструкцій;
- навчання, атестація і переатестація персоналу з пожежної безпеки;
- наявність системи захисту від атмосферної електрики;
- не захарашення робочого місця горючими матеріалами;
- заборона куріння в приміщенні.

Система пожежного захисту включає наступні заходи і засоби:

- застосування будівельних конструкцій науково – дослідної лабораторії не нижче II ступеня вогнестійкості;
- наявність пристроїв автоматичного вимкнення електроустаткування та ПЕОМ;
- оснащення лабораторії системою автоматичної пожежної сигналізації з димовими оповіщувачами;
- наявність первинних засобів пожежогасіння – 2 газових вогнегасника типу ОУ-3.

ВИСНОВКИ

1. При перегляді наявної літератури розглянуто особливості сучасних способів заморожування харчових продуктів. Визначено, що одним із найбільш перспективніших способів заморожування харчових продуктів є заморожування у скрапленому азоті. Перевагою способу заморожування продуктів у скрапленому газі є в кілька разів вища швидкість заморожування порівняно з іншими способами. Основним недоліком цього способу заморожування є потреба у дорогих кріорідинах і потужній теплоізоляції, що тягне за собою порівняно великі виробничі видатки.

2. На підставі проведеного аналітичного огляду літературних даних визначено формули способів розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів.

3. Для розрахунку тривалості заморожування харчових продуктів використовувались харчові продукти різної геометричної форми. Розрахунки свідчать про різницю у одержаних розрахункових даних.

4. Із співставлення розрахунків тривалості заморожування обраних харчових продуктів, видно, що для різної геометричної форми продукту, підходять всі запропоновані формули. Задовільні результати отримані після всіх розрахунків. Варто відзначити, що формула Планка відрізняється за значеннями у більшу сторону від інших формул.

5. Розроблені рекомендації можуть бути використані для вибору методу розрахунку під час проектування систем заморожування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Масліков М. М. Холодильна технологія харчових продуктів. Навч. посіб. / М. М. Масліков.– К.: НУХТ, 2007.– 335 с.
2. Сінат-Радченко Д. Є. Оцінка вмісту вимороженої води в продуктах м'ясо-молочної промисловості / Д. Є.Сінат-Радченко, М. М. Масліков, М. О. Масліков.– Наукові праці НУХТ.– 2015.– т. 21, №5.– с. 208–210.
3. Венгер К. П. Модульный ряд скороморозильных аппаратов для штучных продуктов. Холодильная техника, 1989.
4. Венгер К.П. Научные основы создания техники быстрого замораживания пищевых продуктов: Дис. док. техн. наук. – М.: МГУПБ, 1992. – 415 с.
5. Эрлихман В.Н. Фатыхов Ю.А. Консервирование и переработка пищевых продуктов при отрицательных температурах. – Калининград: КГТУ, 2004.– 248 с.
6. Выгодин В. А., Каспрович В. Л., Зинюхин Г. Б. и др. Экструзионная техника и технология: состояние и перспективы. - Пищевая промышленность. .1995
7. Б.К. Явнель. Курсовое и дипломное проектирование холодильных установок и систем кондиционирования воздуха. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1989. – 223 с., ил. – (Учебники и учеб. пособия для техникумов).
8. Выгодин В. А., Кладий А. Г., Колодязная В. С. Быстрозамороженные пищевые продукты растительного и животного происхождения. М.: Галактика-ИГМ, 1995, 96 с.
9. Данилова Г.Н., Богданов С.Н. и др.; под общей ред. Д-ра техн. Наук Г.Н. Даниловой «Теплообменные аппараты холодильных установок – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отделение, 1986 – 303 с.

10. Масліков М.М. Холодильна технологія харчових продуктів: Навч. посіб. — К.: НУХТ, 2007. — 335 с.
11. И.Г. Чумак, Д.Г. Никульшина. Холодильные установки. — Проектирование: Учеб. Пособие для вузов. — К.: Выща шк.. Головное изд-во, 1988. — 280 с., 97 ил. — Библиогр.: 44 назв.
12. Консервирование пищевых продуктов холодом (Теплофизические основы) / И.А. Рогов и др. — М. : Колос, 1999. — 176 с.
13. Холодильні установки : підручник / І.Г. Чумак (та ін.) ; за ред. І.Г. Чумака. — Одеса : Пальміра, 2006. — 522с.
14. Потапов В.О. Удосконалена методика розрахунку тривалості заморожування / В.О. Потапов, Д.П. Семенюк // Наукові праці — Одеса : ОНАХТ, 2011. — Вип. 40, Т. 2. — С. 395-399.
15. Кондратьев К.П., Лузан В.Н. Расчет продолжительности замораживания пищевых продуктов. Методические указания к практическим занятиям по курсам «Холодильная технология пищевых продуктов» и «Основы хранения продовольственного сырья» - Улан-Уде, 2000
16. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин : ДН АОП. — К.: Основа, 1999. — 109 с.