

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



Кафедра ОПХВ імені
професора Ф.Ю. Ялпачика

ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСУ ЗАМОРОЖУВАННЯ

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи
з дисципліни „Основи холодильних технологій“
для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр»
з напрямку підготовки 6.050503 «Машинобудування»

Мелітополь, 2019

Тепловий розрахунок процесу заморожування. Методичні вказівки для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» з напрямку підготовки 6.050503 «Машинобудування» - Таврійський державний агротехнологічний університет, 2019. – 12 с.

Розробники: к.т.н., доцент Загорко Н.П.,
к.т.н., доцент Тарасенко В.Г.

Рецензент: доц. кафедри
електротехнології та теплових процесів _____ М.І. Стручаєв

Розглянуто і затверджено на засіданні кафедри ОПХВ імені професора Ф.Ю. Ялпачика

«___» «_____» 2019 р., протокол № ____.

Розглянуто та рекомендовано до друку методичною Радою факультету інженерії та комп'ютерних технологій

«___» «_____» 2019 р., протокол № ____

Лабораторна робота

Тепловий розрахунок процесу заморожування

Мета роботи: Визначити основні задачі теплового розрахунку заморожування. Навчитися розраховувати тривалість заморожування.

В результаті виконання даної роботи студент повинен знати: розрахунки процесу заморожування
вміти: визначати тривалість заморожування

Самостійна підготовка до заняття: За підручниками та лекційним курсом ознайомитися з теоретичним матеріалом по темі лабораторної роботи.

Питання для самоперевірки

1. Чому необхідно визначати тривалість заморожування?
2. Як визначити тривалість процесу заморожування ?
3. Що таке формула Планка ?
4. Яке значення має упаковка при заморожуванні ?
5. До чого приводить скорочення тривалості заморожування ?
6. Як впливає коефіцієнт тепловіддачі на заморожування ?
7. Як визначити кількість теплоти, що відводиться при заморожуванні продуктів?

Теоретичне обґрунтування

Задачею розрахунку є визначення тривалості заморожування харчових продуктів і витрати холоду при заморожуванні.

Тривалість однофазного заморожування м'яса в тушах або півтушах визначають за емпіричними залежностями:

для камер із природною циркуляцією повітря

$$\tau = \frac{0,031}{\alpha} c_0 \rho \delta \left(\frac{t_H - t_C}{t_{KP} - t_C} \right)^{1,07} + \frac{0,058 \cdot 10^{-4}}{\alpha} c_\omega \rho \delta \cdot \frac{c_\omega}{c_M} \left(\frac{t_{KP} - t_C}{t_K - t_C} \right)^{4,65} \quad (1)$$

для камер із примусовою циркуляцією повітря

$$\tau = \frac{0,027}{\alpha} c_0 \rho \delta \left(\frac{t_H - t_C}{t_{KP} - t_C} \right)^{1,5} + \frac{0,025}{\alpha} c_\omega \rho \delta \frac{c_\omega}{c_M} \left(\frac{t_{KP} - t_C}{t_K - t_C} \right)^{1,09}, \quad (2)$$

де τ – тривалість заморожування, години;

t_n – початкова температура парного м'яса в центрі стегна при завантаженні, °С;

$t_{кр}$ – початкова кріоскопічна температура, °С;

t_k – кінцева температура заморожування в центрі стегна, °С;

t_c – середня температура повітря в камері за цикл заморожування, °С;

α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні м'яса до повітря (враховує конвективне, радіаційне теплоперенесення і тепло перенесення при поверхневому випаровуванні), Вт/(м²·К);

ρ – щільність м'яса, кг/м³;

δ – товщина стегна, м;

c_0 – питома теплоємність м'яса в охолодженому стані, кДж/(кг·К);

c_m – питома теплоємність м'яса в замороженому стані, кДж/(кг·К);

c_ω – повна питома теплоємність м'яса при заморожуванні, кДж/(кг·К).

Наведені емпіричні залежності для визначення тривалості процесу заморожування дають тільки приблизний результат. На практиці звичайно вважають одержаний результат гарним при погрішності його до 10 %.

Тривалість процесу заморожування продуктів можна визначити, шляхом представлення їх у вигляді тіл простої стереометричної форми (пластини, циліндра, кулі, паралелепіпеду). У холодильній технології найбільш поширено використовується формула Планка. Як фундаментальна ця формула включена у рекомендації Міжнародного інституту холоду:

$$\tau = \frac{q_3 \rho \cdot l}{3,6 \cdot (t_{кр} - t_c)} \left(\frac{l}{4 \cdot \lambda_m} + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (3)$$

де τ – тривалість заморожування, години;

$-q_3$ – повна питома теплота, що відводиться від продукту при заморожуванні від заданої початкової температури продукту до середньої кінцевої, кДж/кг;

$$q_3 = i_n - i_{c \cdot k}$$

i_n – ентальпія продукту при початковій температурі, кДж/кг;

$i_{c \cdot K}$ — ентальпія продукту при середній кінцевій температурі, кДж/кг;

ρ — щільність замороженого продукту, кг/м³;

l — товщина продукту, м;

t_{KP} — початкова кріоскопічна температура продукту, °С;

t_c — температура тепловідводящого середовища, °С;

λ_m — коефіцієнт теплопровідності продукту при середній температурі його в процесі заморожування між кріоскопічною і середньою кінцевою температурами, Вт/(м·К);

α — коефіцієнт тепловіддачі до тепловідводящого середовища, Вт/(м²·К);

A — коефіцієнт, значення якого залежить від форми тіла, що заморожується: для плоскопаралельної пластини при двосторонньому заморожуванні $A = 2$, для нескінченного прямого круглого циліндра $A = 4$, для кулі $A = 6$;

l — характерний розмір, м; для плоскопаралельної пластини l — товщина пластини, для нескінченного круглого прямого циліндра l — діаметр циліндра, для кулі l — діаметр кулі.

Тіло у вигляді циліндра замерзає в 2 рази швидше, а тіло у **вигляді кулі** — у 3 рази швидше, ніж тіло у формі **пластини**.

Для тіл неправильної геометричної форми, що наближаються до кулі, можна у формулу Планка підставити середнє значення d_r замість d :

$$d_r = 1,24 \sqrt[3]{V}$$

де V — об'єм тіла неправильної геометричної форми, що наближається до кулі, м³.

Тривалість заморожування тіла у формі прямокутного паралелепіпеда розмірами $l \cdot b \cdot \delta$ розраховують за формулою

$$\tau = \frac{q_3 \rho \delta}{3,6 (t_{KP} - t_c)} \left(\frac{R \delta}{\lambda_m} + \frac{P}{\alpha} \right) \quad (4)$$

де τ — тривалість заморожування, години;

δ – товщина паралелепіпеда (найменший із трьох його розмірів), м;

R і P – допоміжні коефіцієнти, значення яких залежить від співвідношення розмірів паралелепіпеда і напрямку теплових потоків.

Позначення інших величин, що входять у формулу, ті ж, що і для залежності (3).

Для плоскопаралельної пластини (плити) товщиною δ нескінченної довжини при односторонньому відводі теплоти $P=1$ і $R=0,25$, при двосторонньому відводі теплоти $P = 0,5$ і $R = 0,125$.

Для прямокутної плити необмеженої довжини шириною b і товщиною δ при відводі теплоти від чотирьох граней значення коефіцієнтів P і R наведені в таблиці 1, 2 додатку Б.

Для паралелепіпеда довжиною l , шириною b і товщиною δ при відводі теплоти від усіх шести граней значення коефіцієнтів P і R представлені в таблиці 1,2 додатку Б.

Стосовно до **заморожування харчових продуктів в упаковці** формула Планка приймає вигляд

$$\tau = \frac{q_3 \rho \delta}{3,6 \rho_{\text{кр}} - t_c} \left[\frac{R\delta}{\lambda_m} + P \left(\frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta_y}{\lambda_y} \right) \right], \quad (5)$$

де τ – тривалість заморожування, ч;

$\Sigma(\delta_y/\lambda_y)$ – сума теплових опорів шарів упаковки, $\text{м}^2\text{K/Вт}$.

Упаковка, особливо багатошарова, значно збільшує тривалість заморожування. При заморожуванні продуктів в упаковці важливо звертати увагу не тільки на тепловий опір упаковки (додаток В), але і на ступінь щільності прилягання пакувального матеріалу до продукту. У багатошарових пакувальних матеріалах відвід теплоти ускладнюється через наявність повітряних прошарків між окремими шарами упакування, тому при розрахунку необхідно враховувати тепловий опір повітряних прошарків. Цей опір можна не брати до уваги, якщо для поліпшення прилягання упаковки до продукту використовують механічний притиск (7 – 10 кПа).

Скорочення тривалості заморожування досягається зниженням температури тепловідводящего середовища t_c , зменшенням товщини продукту, що заморожується, δ і збільшенням коефіцієнта тепловіддачі біля поверхні тіла α .

Зниження температури охолодженого середовища приводить майже до пропорційного скорочення тривалості процесу, але використовувати цей спосіб можна лише в обмежених межах, тому що зі зниженням температури кипіння холодильного агента підвищуються витрати на вироблення одиниці холоду. На практиці для заморожування різних видів харчових продуктів використовують температури охолодженого середовища від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При малих значеннях коефіцієнта тепловіддачі α і товщини продукту, що заморожується, α залежність між тривалістю процесу заморожування і товщиною продукту наближається до лінійної. При великих значеннях коефіцієнта тепловіддачі біля поверхні продукту α тривалість процесу приблизно пропорційна квадратові товщини шару, що заморожується.

Вплив коефіцієнта тепловіддачі на тривалість заморожування однозначний. При малих значеннях коефіцієнта тепловіддачі $[5 - 10\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})]$ підвищення його значно скорочує тривалість процесу. Цей ефект тим більше, чим менше товщина продукту. При великих абсолютних значеннях коефіцієнта тепловіддачі ефект його збільшення послабляється.

Для морозильних пристроїв із примусовою циркуляцією повітря коефіцієнт тепловіддачі від продукту можна визначити по емпіричній формулі в залежності від швидкості руху повітря

$$\alpha = 8,73 \omega^{0,8}$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні продукту, що заморожується, (форми) до повітря, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$;

ω – швидкість руху повітря, $\text{м}/\text{с}$.

По цій залежності α будуть мати наступні значення:

ω	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α	15,1	20,9	26,4	31,0	36,5	42,4	46,1	50,5	55,0

Для різних методів заморожування приблизні значення коефіцієнта тепловіддачі α будуть лежати в наступних межах:

у камерах при природній циркуляції повітря або при слабкій вентиляції $\alpha=8\div 15\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$;

у морозильних камерах при інтенсивній циркуляції повітря ($\omega = 2 \div 8$ м/с) $\alpha = 10 \div 45$ Вт/(м²·К);

у морозильних апаратах при інтенсивній циркуляції повітря (продукт заморожується в формах з ребрами) $\alpha = 30 \div 50$ Вт/(м²·К);

в флюїдизаційних морозильних апаратах $\alpha = 60 \div 100$ Вт/(м²·К);

у плиткових морозильних апаратах $\alpha = 500 \div 1000$ Вт/(м²·К);

у іммерсійних установках для заморожування $\alpha = 1000 \div 2000$ Вт/(м²·К);

в установках для заморожування в рідкому азоті або хладоні методом зрошування $\alpha = 1000 \div 2000$ Вт/(м²·К);

в установках для заморожування в рідкому азоті методом занурення $\alpha = 5000$ Вт/(м²·К).

Приклад. Визначити тривалість заморожування яловичої напівтуші від початкової температури $t_n = 35$ °С до середньої кінцевої температури $t_2 = -18$ °С при температурі повітря в камері $t_c = -35$ °С і швидкості руху повітряного середовища в поверхні продукту $w = 2$ м/с. Прийняти товщину найбільш товстої стегнової частини напівтуші $\delta = 0,2$ м.

Рішення. Тривалість заморожування напівтуші (у годинах) визначаємо за формулою Р. Планка (3)

$$\tau = \frac{q_3 \rho \cdot l}{3,6 (t_{кр} - t_c) A} \left(\frac{l}{4 \cdot \lambda_M} + \frac{1}{\alpha} \right),$$

Повна питома теплота, що відводиться від продукту при заморожуванні від заданої початкової до заданої середньої кінцевої температури м'яса, $q_3 = i_n - i_c$ (у кДж/кг).

Ентальпію м'яса при початковій і середньої кінцевої температурах визначаємо за додатком Ж при $t_1 = 35$ °С $i_n = 345$ кДж/кг; при $t_2 = -18$ °С $i_{c,к} = 4,6$ кДж/кг.

$$q_3 = i_n - i_{c,к} = 345 - 4,6 = 340,4 \text{ кДж/кг}$$

Щільність мороженого м'яса $\rho = 900$ кг/см³ (див. табл. 4, додаток А). Товщина продукту, що заморожується $l = \delta = 0,2$ м. Кріоскопічна температура для м'яса $t_{кр} = -2,0$ °С (табл.3, додаток А). Температура тепловідводящего середовища (повітря в камері) $t_c = -35$ °С.

Приймаємо, що тіло, що заморожується, за формою наближається до пластини при двосторонньому відводі теплоти. При цьому $A = 2$.

Коефіцієнт теплопровідності яловичого м'яса при середній температурі продукту в процесі заморожування $t_{cp} = -7,8^\circ\text{C}$ (див. додаток 3) визначаємо по приведеній залежності

$$\lambda_m = n + m/t_{cp} = 1,5 + 1,08/(-7,8) = 1,36 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$$

m і n - постійні значення, див. Таблиця 5, додаток А

Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні напівтуші м'яса, що заморожується, α знаходимо, використовуючи формулу (6),

$$\alpha = 8,73\omega^{0,8} = 8,73 \cdot 2^{0,8} = 15,1 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$$

Підставляючи усі визначені нами значення знайдених величин у формулу Планка, визначаємо тривалість заморожування напівтуші

$$\tau = \{340,4 \cdot 900 \cdot 0,2 / [3,6(-2+35)2]\} \cdot [0,2/(4 \cdot 1,36) + 1/15,1] = 26,6 \text{ ч}$$

(26 ч 36 хвил.)

Визначення кількості теплоти, що відводиться при заморожуванні продуктів. Кількість теплоти (у Дж), що відводиться від продуктів при заморожуванні,

$$Q = M [c_0(t_1 - t_{кр}) + r_{\lambda} W\omega + c_m(t_{кр} - t_2)] \quad (7)$$

де M — маса продукту, що заморожується, кг;

c_0 - питома теплоємність продукту при температурі вище початкової кріоскопічної, Дж/(кг·K);

t_1 - початкова температура продукту (вище кріоскопічної), C;

$t_{кр}$ - початкова кріоскопічна температура, C;

r_{λ} - схована теплота замерзання води, Дж/кг;

W - відносний вміст води в продукті;

ω - кількість замороженої води у продукті, обумовлена при середній кінцевій температурі;

c_m - теплоємність мороженого продукту, обумовлена при середній температурі t_{cp} між кріоскопічною і середній кінцевій, Дж/(кг·K);

$t_2 = t_{ск}$ — середня кінцева температура продукту, °C.

Перший додток у прямих дужках формули (6.7) виражає теплоту охолодження, що віднімається від продукту при пониженні його температури від початкової t_1 до кріоскопічної $t_{кр}$.

Другий додток у цій формулі найбільший, тому що більше чисельне значення має питома теплота льодоутворення r_l (335 кДж/кг).

Третій додток визначає кількість теплоти, що відводиться від замороженого продукту в інтервалі температур від кріоскопічної до середньої кінцевої $t_{ск}$.

Кількість теплоти, яку потрібно відвести від продукту при його доморожуванні від початкової температури $t'_{кр}$, що лежить нижче початкової кріоскопічної, до кінцевої $t_{ск}$, можна визначити в такий спосіб:

$$Q = M[r_{\Lambda} W (\omega_2 - \omega') + c_m (t'_{кр} - t_{ск})] \quad (8)$$

де ω_2 і ω' — кількість вимороженої води при температурах t_2 і $t'_{кр}$

відповідно;

$t'_{кр}$ - початкова температура продукту, що надходить на доморожування (визначається як середньоб'ємна), °С;

$t_{ск}$ — середня кінцева температура продукту, °С;

c_m — питома теплоємність продукту, її знаходять при середній температурі по формулі для інтервалу температур від $t'_{кр}$ до $t_{ск}$, Дж/(кг·К).

При розрахунку холодильного устаткування для заморожування продуктів кількість теплоти, що відводиться від них, визначають по наступній залежності:

$$Q = M(i_1 - i_2)$$

де Q — кількість теплоти, що відводиться від продуктів, що заморожуються, Дж;

M - маса продуктів, що знаходяться одноразово в заморожуючому пристрої, кг;

i_1 — ентальпія продуктів, що надходять на заморожування при початковій температурі, кДж/кг;

i_2 — ентальпія продуктів, що вивантажуються з морозильного пристрою при середній кінцевій температурі, кДж/кг.

Приклад. Визначити кількість теплоти, що відводиться при заморожуванні 10 т жирної свинини від початкової температури $t_n = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ до середньої кінцевої $t_{ck} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рішення. Визначаємо кількість теплоти, що відводиться при заморожуванні продуктів, по формулі (6.7)

$$Q = M [c_0(t_n - t_{kp}) + r_{\Lambda} W\omega + c_m (t_{kp} - t_{ck})]$$

Маса продукту, що заморожується, $M = 10\text{ т} = 10000\text{ кг}$.

Знаходимо по табл. додатка питому теплоємність охолодженого м'яса при температурі вище початкової кріоскопічної: $c_0 = 2,14\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

Початкову кріоскопічну температуру продукту визначаємо по табл. 3, додаток А: $t_{kp} = -2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Схована теплота замерзання води складає $130,0\text{ кДж}/\text{кг}$.

Відносний вміст води в жирній свинині (див. табл. 3, додаток А)
 $W = 0,380$.

Кількість вимороженої води в продукті розраховуємо при середній кінцевій температурі:

$$\omega = 1 - t_{kp} / t_{c\cdot k} = 1 - (-2) / (-20) = 0,9.$$

Теплоємність мороженого продукту обчислюємо по вираженню

$$C_m = c_0 - 2,12W\omega = 2,14 - 2,12 \cdot 0,380 \cdot 0,9 = 1,415\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$$

Підставляючи усі відомі і знайдені нами величини у формулу (7), визначаємо кількість теплоти, що відводиться від продукту, що заморожується

$$Q = 10000 [2,14(12 + 2) + 130 \cdot 0,380 \cdot 0,9 + 1,415 \cdot (-2 + 20)] = 998900\text{ кДж}.$$

Зміст роботи

1. Вивчити теоретичне обґрунтування і зробити короткі записи.
2. Виконати розрахунки.
3. Про виконану роботу зробити висновки.

Оформлення звіту

1. Тема та ціль роботи.

2. Коротке теоретичне обґрунтування.
3. Висновки.