

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет



**В. М. КОЗИН, С. О. ШАРАПОВ**

# **ХОЛОДИЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСНОВИ ТЕОРІЇ, ПРИКЛАДИ І ЗАВДАННЯ**

Навчальний посібник

Рекомендовано вченою радою Сумського державного університету



Суми  
Сумський державний університет  
2021

УДК 621.56(075.8)  
К 59

Рецензенти:

*М. Г. Хмельнюк* – доктор технічних наук, професор, академік Міжнародної академії холоду, завідувач кафедри холодильних машин, установок і кондиціонування повітря Одеської національної академії харчових технологій;

*О. О. Ляпощенко* – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник кафедри хімічної інженерії Сумського державного університету

*Рекомендовано до видання  
вченою радою Сумського державного університету  
як навчальний посібник  
(протокол № 6 від 24 грудня 2020 року)*

**Козін В. М.**

К 59 Холодильні технології: основи теорії, приклади і завдання : навчальний посібник / В. М. Козін, С. О. Шарапов. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 140 с.  
ISBN 978-966-657-856-6

У навчальному посібнику подано основні теоретичні відомості з технологічних процесів оброблення холодом, наведено основні розрахункові залежності та довідкові дані. У прикладній частині посібника розглянуто алгоритми розрахунку основних процесів холодильного оброблення, а також подано докладні приклади розрахунку. Особливу увагу приділено холодильній технології харчових продуктів.

Навчальний посібник може бути корисним для студентів енергетичних, харчових, сільськогосподарських спеціальностей, а також для всіх, кого цікавлять процеси холодильного оброблення з позицій технології та розрахунку основних параметрів і процесів, що відбуваються під час оброблення холодом.

**УДК 621.56(075.8)**

© Козін В. М., Шарапов С. О., 2021  
ISBN 978-966-657-856-6 © Сумський державний університет, 2021

## ЗМІСТ

	С.
Передмова.....	4
Вступ.....	6
1 Розрахунок температури охолодження для створення пресової посадки.....	8
2 Штучне заморожування ґрунтів.....	12
3 Волога в біологічних матеріалах та її властивості.....	34
4 Фізичні властивості харчових продуктів.....	44
5 Охолодження.....	58
6 Підморожування.....	73
7 Заморожування.....	84
8 Холодильне зберігання.....	99
9 Розморожування.....	116
Список рекомендованої літератури.....	126
Додатки.....	129

## ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Холодильні технології» є базовою для вивчення спеціальних дисциплін, пов'язаних із використанням холоду, методами його отримання тощо.

Цей навчальний посібник є продовженням навчального посібника В. М. Козіна, Ю. М. Вертепова, В. М. Арсен'єва «Холодильні технології», його зміст якнайкраще відповідає навчальній програмі з однойменної дисципліни для здобувачів вищої освіти, які навчаються за освітніми програмами «Холодильні машини і установки», «Опалення, вентиляція, кондиціювання повітря та штучний холод» спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування».

Для покращання розуміння навчального матеріалу зміст навчального посібника повністю відповідає змісту навчальної програми з відповідної дисципліни. У навчальному посібнику розглядаються такі питання:

1. Створення нерухомих посадок у технології машинобудування.
2. Заморожування ґрунтів у будівництві.
3. Холодильні технології харчових продуктів, включаючи основні технологічні процеси: охолодження, підморожування, заморожування, холодильне зберігання, розморожування.

Навчальний посібник має таку послідовність викладення матеріалу: на початку кожного розділу коротко викладені основні теоретичні відомості, необхідні для розв'язання завдань, потім поданий зміст завдань для проведення розрахунку, вихідні дані для самостійного розв'язання за стоваріантною схемою, основні пояснення і рекомендації, а в кінці кожного розділу пропонуються приклади розв'язування типового завдання. Варіант для розв'язування обирають за двома останніми цифрами

залікового шифру здобувача.

Використання навчального посібника не потребує додаткової літератури. Усі необхідні для розв'язування задач дані наведені в тексті задач або додатках.

Навчальний посібник може використовуватися на практичних заняттях із дисципліни «Холодильні технології» і для самопідготовки здобувачів вищої освіти до складання атестаційних іспитів.

Автори висловлюють щиру вдячність і подяку рецензентам за зауваження і поради, висловлені ними під час підготовки матеріалу до видання, а також співробітникам кафедри технічної теплофізики Сумського державного університету за допомогу в оформленні.

## ВСТУП

З давніх часів людство намагалось покращувати якість власного життя. Насамперед це стосувалося підтримання комфортних кліматичних умов проживання, що реалізовувалося за рахунок випарного ефекту. Також цей ефект застосовували за необхідності швидшого охолодження гарячих рідин і напоїв.

З розвитком технологій прагнення людства до покращання умов життя продовжилось в тривалішому збереженні харчових продуктів. Це було дуже необхідним, адже кількість населення збільшувалася, зростав ареал проживання людини, який почав охоплювати не лише території з помірним кліматом, а й значно суворіші, екстремальні місця.

Значне зростання використання холоду пов'язане з промисловою революцією. Зростання промислового виробництва вимагало нових технологічних підходів і принципів. Водночас новостворена промисловість вимагала цілорічного використання людської праці. Як наслідок, підвищилася необхідність у значному споживанні біологічно цінних різноманітних харчових продуктів, які могли вирощуватися на різних континентах, упродовж усього року. Спричинений цими факторами розвиток торгівлі зумовив подальше збільшення використання холоду, включаючи появу холодильного транспорту.

Істотне поширення використання холоду в харчових галузях та сільському господарстві передусім пов'язане з мінімальними втратами біологічної цінності харчових продуктів при холодильному зберіганні порівняно з іншими способами консервації, а також воно характеризувалося порівняно невеликими витратами енергії на забезпечення холодильних процесів.

З розвитком технологій за останні сто років холод набував поширення в багатьох галузях: машинобудуванні, наприклад, під час створення нерухомих посадок, у будівництві, наприклад, при заморожуванні ґрунтів, коли будівництво відбувається біля або безпосередньо на заводнених територіях. Хімічна промисловість, яка з'явилася трохи більше ніж сотню років тому, також потребує значних потужностей холодильних установок.

Останнім часом холод став широко використовуватися в медицині, електроніці, енергетиці, ракетобудуванні та ще в багатьох інших галузях. Безперечно, надалі цей перелік буде лише розширюватися з розвитком існуючих та появою нових технологій. Саме тому спеціалісти з холодильної техніки і систем кондиціонування завжди були, є та будуть затребуваними, адже логічно, що праця, яка покращує якість життя, є престижною та високо ціниться, адже вона має дуже велике практичне значення.

Цей навчальний посібник дозволить усім зацікавленим із питань холоду покращити власні практичні навички з розрахунку базових холодильних технологій та одержати необхідні для цього теоретичні знання.

# 1 РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРЕСОВОЇ ПОСАДКИ

## ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для створення нерухомих насадок здебільшого застосовують запресовування охоплюваних деталей у холодному стані або нагрівання охоплювальних деталей.

Посадки за допомогою пресів не забезпечують достатньої міцності та надійності сполучення через залишкову деформацію, тому що змінюються контактні поверхні. Посадки, утворені нагріванням, призводять до появи великого напруження і деформацій у з'єднаних деталях, порушення структури металу під час нагрівання, погіршення його міцнісних характеристик, порушення покриття всіх видів.

Під час виконання нерухомих посадок із використанням низькотемпературного оброблення удосконалюється технологія посадок, ліквідовується тяжка фізична праця складальників, підвищуються якість і продуктивність робіт, знижується їх собівартість.

Охолодженню піддають охоплювану деталь: вона зменшується в розмірах і може бути вільно вставлена в отвір охоплювальної деталі. Якщо охоплювана деталь нагрівається до  $t_{н.с}$ , виникають розрахунковий натяг і розрахунковий контактний тиск, що забезпечують необхідну міцність з'єднання.

Таку технологію застосовують не лише для перехідних, глухих, тугих, напружених і пресових посадок, а й для спеціальних посадок зі збільшеним натягом.

Температура, до якої необхідно охолодити охоплювану поверхню,  $t_{ох}$ , °C, за відомої робочої температури  $t_{роб}$  визначається за формулою:



$$\Delta t_{\min} = t_{\text{роб}} - t_{\text{ох}} = \frac{\Delta d}{\alpha \cdot d \cdot 10^3}, \quad (1.1)$$

де  $\alpha$  – відносний температурний коефіцієнт лінійного розширення (стискування) матеріалу охоплюваної поверхні  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$d$  – номінальний розмір з'єднання, *мм*;

$\Delta d$  – мінімальне необхідне лінійне стиснення охоплюваної деталі, що забезпечує її вільну посадку при збиранні, *мкм* (табл. А.1).

### ЗМІСТ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ

Виконання завдання полягає в розв'язуванні задачі, умова якої наведена нижче.

Розрахувати температуру, до якої потрібно охолодити втулку (матеріал 1), для з'єднання з деталлю (матеріал 2) за допомогою пресової посадки відповідно до вихідних даних та нижченаведеного рисунка схеми.

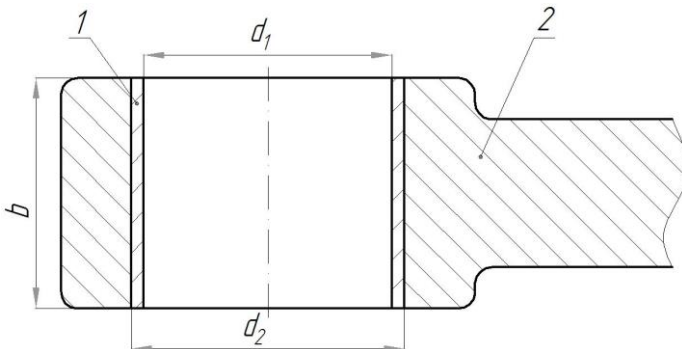


Рисунок 1.1 – З'єднання деталей:

1 – втулка (матеріал 1); 2 – деталь (матеріал 2)

За вихідні дані беруть:

- зовнішній діаметр втулки  $d_2$ , мм;
- матеріал втулки – матеріал 1;
- матеріал деталі – матеріал 2;
- посадка деталі 1 у деталі 2 – посадка;
- робоча температура з'єднання  $t_{роб}$ , °С.

У разі відсутності додаткових рекомендацій викладача вихідні дані для виконання практичного завдання беруть згідно з даними, наведеними в таблиці 1.2.

Відносні температурні коефіцієнти лінійного розширення (стискування)  $\alpha$  матеріалів охоплюваної поверхні (матеріал 2) беруть із таблиці А.2.

Таблиця 1.2 – Вихідні дані

Перед-остання цифра шифру	$d_2$ , мм	Матеріал 1	Остання цифра шифру	Матеріал 2	Посадка	$t_{роб}$ , °С
1	40	Мідь	1	Сталь загартована	H7/u8	20
2	70	Бронза (олов'яниста)	2	Фасонне сталеве литво	H7/x8	25
3	90	Латунь	3	Ковкий чавун	H7/z8	30
4	140	Алюмінієвий сплав	4	Сталь загартована	H7/u8	35
5	220	Магнієвий сплав	5	Мідь	H7/x8	40
6	300	Мідь	6	Алюмінієвий сплав	H7/z8	35
7	420	Бронза (олов'яниста)	7	Ковкий чавун	H7/u8	30
8	270	Латунь	8	Бронза (олов'яниста)	H7/x8	25
9	130	Алюмінієвий сплав	9	Латунь	H7/z8	20
0	80	Магнієвий сплав	0	Сталь загартована	H7/u8	15

## ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Розрахувати температуру, до якої потрібно охолодити бронзову втулку для з'єднання зі сталеву деталлю за допомогою пресової посадки Н7/у8 (рис. 1.2).

Вихідні дані:  $d = 330 \text{ мм}$ ;  $\alpha = 15 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  
 $t_{\text{роб}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

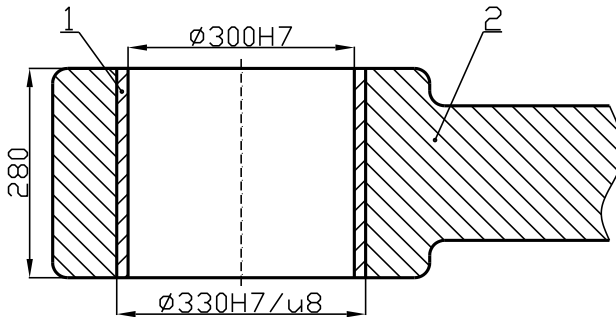


Рисунок 1.2 – З'єднання деталей

## РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Із таблиці 1.1 для необхідної посадки і діаметра деталі знаходимо величину  $\Delta d = 345 \text{ мкм}$ . Тоді

$$\Delta t_{\min} = \frac{\Delta d}{\alpha \cdot d \cdot 10^3} = \frac{345}{15 \cdot 10^{-6} \cdot 330 \cdot 10^3} = 69,7 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{ох}} = t_{\text{роб}} - \Delta t_{\min} = 20 - 69,7 = -49,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

## 2 ШТУЧНЕ ЗАМОРОЖУВАННЯ ҐРУНТІВ

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Штучне заморожування ґрунтів за допомогою холодильних машин набуло великого поширення під час будівництва різних об'єктів вугледобувної, гірничорудної, гірничохімічної промисловості, транспортного будівництва та створення підземних споруд водопостачання і каналізації. Заморожування разом з іншими спеціальними способами проходження (водозниження, цементация та ін.) застосовують для захисту споруд від потрапляння підземних вод із водоносних шарів ґрунту.

Спосіб штучного заморожування ґрунтів полягає в тому, що у водоносних ґрунтах біля місця будівництва майбутньої споруди (шахтний ствол, тунель тощо) утворюють тимчасове або постійне льодогрунтове огороження, що захищає від потрапляння до них води або пливуна.

Льодогрунтове огороження може мати подвійне призначення: бути водонепроникною перемичкою – завісою, що не сприймає на себе тиск ґрунту і води, або підпірною стінкою, що витримує тиск ґрунту й води, тобто мати відповідну механічну міцність. Для першого випадку, як засвідчив досвід, достатня товщина завіси становить 10–15 см, у другому випадку необхідна товщина стінки визначається відповідним міцнісним розрахунком.

Під час заморожування ґрунтів вода, що міститься в них, переходить у твердий стан і скріплює тверді частинки ґрунту так само, як цемент скріплює складові бетону в разі його затвердіння. Заморожені ґрунти не фільтрують підземні води і мають на багато більшу міцність, ніж талі.

Порівняно з іншими спеціальними способами

проходження заморожування доцільно застосовувати за потужності водоносних шарів, що перевищує 10 м, якщо ж потужність водоносних шарів перевищує 200 м, то заморожування є єдиним можливим способом захисту споруд від підземних вод.

Найбільш поширеною схемою заморожування є така: біля ймовірного вироблення через товщину ґрунтів, включно з водоносними, бурять свердловини на деякій відстані  $l$  одна від одної; у свердловини занурюють *заморожувальні колонки* – теплообмінники типу «труба в трубі», по яких насосом прокачують холодоносій із від'ємною температурою. Біля кожної колонки намерзає льодогрунтовий циліндр, радіус якого  $r_3$  поступово збільшується, і за  $r_3 = l/2$  льодогрунтові циліндри замикаються, утворюючи суцільну льодогрунтову стінку.

Колонка найпростішої конструкції наведена на рисунку 2.1. Холодоносій доцільно подавати у внутрішню трубу 1, яку називають живильною. Відкритий нижній кінець живильної труби не доходить до дна колонки на 400–500 мм. Холодоносій охолоджує ґрунт через стінку зовнішньої труби 2, підіймаючись по кільцевому зазору між внутрішньою і зовнішньою трубами.

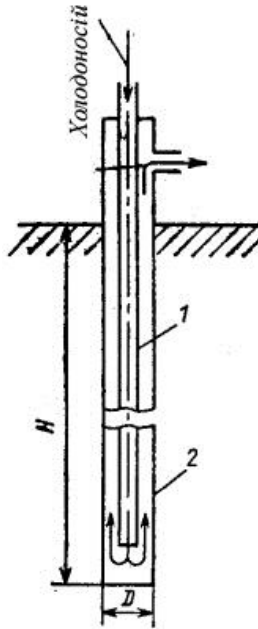


Рисунок 2.1 – Найпростіша конструкція заморозувальної колонки

Як холодоносій найчастіше під час штучного заморозування застосовують водний розчин  $\text{CaCl}_2$  – розсіл.

Системи колонок можуть бути *лінійними* (для утворення плоских льодогрунтових стінок) і *коловими* (для утворення льодогрунтових огорожень біля циліндричних вироблень). Діаметр кола, по якому розміщуються колонки, в останньому випадку повинен бути таким, що дорівнює діаметру вироблення плюс товщина льодогрунтового огороження: віддалення заморозувальних свердловин на більшу відстань від центра вироблення недоцільне, тому що призводить до збільшення їх кількості і відповідно додаткових витрат на бурові та монтажні роботи. Наближення свердловин також

недоцільне, тому що в цьому разі під час проходження ствола буде піддаватися виробленню частина замороженої породи, що ускладнить роботу і зменшить товщину льодогрунтового огородження.

Для утворення льодогрунтового огородження біля стволів шахт глибиною до 400 м зазвичай достатньо одного ряду свердловин. За більшої глибини свердловини розміщують у два ряди.

Зазвичай водоносні шари перекривають льодогрунтовим огородженням, занурюючи нижні кінці колонок на 2–3 м у водовідштовхувальний ґрунт. Якщо ж біля основи ствола шахти водовідштовхувальний ґрунт відсутній, то заморожувальні свердловини доводиться розміщувати і в межах ствола шахти, перекриваючи доступ води знизу через створення льодогрунтового прошарку.

Характерна форма льодогрунтової стінки, утворюваної після замикання циліндрів, показана на рисунку 2.2. Як впливає з рисунка 2.2, товщина стінки змінна: максимальна товщина  $\delta_{г.л}$  спостерігається в перерізі I–I, який називають головним, мінімальна  $\delta_{зmk}$  – у замковому перерізі II–II (переріз III–III називають осьовим).

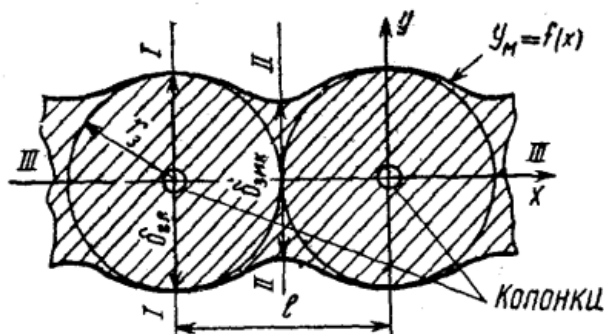


Рисунок 2.2 – Характерна форма льодогрунтової стінки, утворювана після замикання циліндрів:  $y_m = f(x)$  – межа мерзлої зони

Товщина стінки в замковому перерізі – основний параметр, що визначає надійність огородження, – визначається з умови міцності. Так, для циліндричного льодогрунтового огородження повинно бути  $\delta_{зМК} = E$ , де  $E$  – необхідна товщина огородження, що визначається за формулою Ляме:

$$E = R_{ств} \cdot \left( \sqrt{\frac{[\sigma_{cm}]}{[\sigma_{cm}] - 2p}} - 1 \right), \quad (2.1)$$

де  $R_{ств}$  – радіус ствола шахти у проходці, м;

$[\sigma_{cm}]$  – допустиме напруження стиснення для мерзлих ґрунтів, Па;

$p$  – максимальний тиск на льодогрунтове огородження, Па.

Основне завдання теплового розрахунку системи заморожування – визначення тривалості  $\tau$  для утворення стінки необхідної товщини за заданого кроку між колонками  $l$  (пряма задача) або визначення кроку за заданого часу (обернена задача). В обох випадках повинні бути відомі конструкція колонки (довжина, діаметри труб і т. ін.), витрата холодоносія, його теплофізичні параметри і температура на вході в колонку, а також вологість, теплофізичні параметри ґрунту в талому та мерзлому станах, його початкова температура.

Для приблизного розв'язування задачі можна застосовувати відомі розв'язання про затвердіння необмеженого масиву, що охолоджується одиничним циліндричним джерелом відведення тепла. Так, тривалість заморожування льодогрунтового циліндра заданого радіуса  $r_3$  на одиничній колонці, в якій довжина набагато більше



від діаметра за сталої (в часі та за довжиною) температури холодоносія, має вигляд

$$\tau = \frac{Q_{\phi}}{\lambda_m \cdot (t_{\phi} - t_x)} \left[ \frac{r_3^2}{2} \ln \left( \frac{r_3}{r_0} \right) + \left( \frac{\lambda_m}{2\alpha_x r_0} - \frac{1}{4} \right) (r_3^2 - r_0^2) \right], \quad (2.2)$$

де  $Q_{\phi} = r_l W \rho_{ск}$  – теплота фазового перетворення води, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  ґрунту,  $\text{кДж} / \text{м}^3$ ;

$r_l$  – теплота плавлення льоду,  $r_l = 335 \text{ кДж} / \text{кг}$ ;

$W$  – масова вологість ґрунту;

$\lambda_m$  – коефіцієнт теплопровідності мерзлого ґрунту,  $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$t_{\phi}$  і  $t_x$  – температура фазового перетворення і температура холодоносія в колонці,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$r_3$  і  $r_0$  – радіуси відповідно льодогрунтового циліндра і колонки;

$\alpha_x$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінки колонки до холодоносія, що рухається в кільцевому каналі,  $\alpha_x$ ,  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , визначають за відомими закономірностями конвективного теплообміну.

Рівняння (2.2) виведене в припущенні квазістаціонарного режиму заморожування, тобто вважають, що теплота відводиться лише за рахунок фазового перетворення і не враховується теплота для охолодження замороженого ґрунту від початкової температури  $t_{сп} > t_{\phi}$  і для переохолодження замороженого шару від  $t_{\phi}$  до середньооб'ємної температури мерзлого шару  $t_{ср.м} < t_{\phi}$ . Цю неточність можна наближено

врахувати, якщо замість теплоти фазового перетворення  $Q_\phi$ ,  $\text{кДж} / \text{м}^3$ , використовувати формулу,

$$Q'_\phi = c_T \rho_T (t_{ep} - t_\phi) + r_l W \rho_{ск} + c_M \rho_M (t_\phi - t_{сер.м}), \quad (2.3)$$

де  $c_T \rho_T$  – об'ємна теплоємність талого ґрунту,  $\text{кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;

$c_M \rho_M$  – те саме для мерзлого ґрунту,  $\text{кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{К})$ .

Середньооб'ємну температуру  $t_{сер.м}$ ,  $^\circ\text{C}$ , льодогрунтового циліндра можна визначити

$$\frac{t_\phi - t_{сер.м}}{t_\phi - t_{cm}} = \frac{\ln r_3 - (r_3^2 \cdot \ln r_3 - r_0^2 \cdot \ln r_0) / (r_3^2 - r_0^2) + 0,5}{\ln(r_3 / r_0)}, \quad (2.4)$$

де  $t_{cm} \approx t_X + (2-3)^\circ\text{C}$  – температура стінки свердловини.

Формула (2.4) справедлива для льодогрунтових циліндрів, що замикаються.

Наближене значення теплового потоку від талого ґрунту можна знайти як теплоту, що знаходить від нескінченного масиву до поверхні межі поділу фаз, що має температуру  $t_\phi$ . Вважаючи умовно цю поверхню плоскою, тепловий потік,  $\text{кВт}$ , від талого ґрунту до однієї колонки та момент часу  $\tau$  можна визначити за рівнянням

$$Q_T(\tau) \approx 2IH(t_{ep} - t_\phi) \sqrt{\frac{\lambda_T c_T \rho_T}{\pi \tau}}. \quad (2.5)$$

Тепловий потік,  $\kappa Bm$ , до колонки від мерзлого ґрунту в такий самий момент часу

$$Q_M(\tau) = \frac{2\pi H(t_\phi - t_X)}{\frac{1}{\alpha_X r_0} + \frac{1}{\lambda_M} \ln\left(\frac{r_3(\tau)}{r_0}\right)}, \quad (2.6)$$

де  $r_3(\tau)$  – радіус льодогрунтового циліндра,  $m$ , на момент часу  $\tau$  відповідно до рівняння (2.2).

Порівнюючи величини  $Q_T(\tau)$  і  $Q_M(\tau)$ , можна зробити висновки про величину похибки за рахунок неврахування теплонадходження від талої зони.

Товщина шару талого ґрунту (від межі поділу фаз),  $m$ , у якому температура знижена порівняно з початковою температурою  $t_{ep}$ , залежить від часу і може бути визначена з виразу

$$\xi \cong 3,46 \sqrt{\frac{\lambda_T \tau}{c_T \rho_T}}. \quad (2.7)$$

Середня температура ґрунту,  $^{\circ}C$ , в цій зоні

$$t_{сep.T} \cong t_{ep} - \frac{1}{3} \cdot (t_{ep} - t_\phi). \quad (2.8)$$

Для ненавантажених льодогрунтових огорожень тривалість заморожування практично можна обмежити часом, необхідним для замикання льодогрунтових циліндрів, тобто знаходять  $\tau_{кин}$  як час, за якого  $r_3 = l/2$ .

Для підірних стінок заморожування триває до

одержання необхідного значення  $\delta_{зМК}$ . Однак рівнянням (2.2) час заморожування  $\tau$  пов'язаний не з шуканою величиною  $\delta_{зМК}$ , а з товщиною льодогрунтової стінки в головному перерізі, оскільки можна вважати, що  $\delta_{зл} \approx 2r_3$ . Для визначення  $\delta_{зМК}$  за відомого  $\delta_{зл}$  та заданого кроку  $l$  можна застосовувати рівняння, що дає координату  $y_m$  межі поділу фаз залежно від  $x$ ,  $m$ ,

$$y_m = \frac{l}{2\pi} \operatorname{arcch} \left( \operatorname{ch} \left( \frac{\pi \delta_{зМК}}{l} \right) + \cos \left( \frac{2\pi x}{l} \right) + 1 \right). \quad (2.9)$$

За  $x=0$   $y_m = \delta_{зл} / 2 = r_3$ , тобто

$$r_3 = \frac{l}{2\pi} \operatorname{arcch} \left( \operatorname{ch} \left( \frac{\pi \delta_{зМК}}{l} \right) + 2 \right), \quad (2.10)$$

звідси, знаючи  $\delta_{зМК}$ , можна знайти відповідне значення  $r_3$ , а потім і тривалість заморожування  $\tau$ , використовуючи рівняння (2.2) (з урахуванням виразів (2.3)–(2.6). Водночас після замикання льодогрунтових циліндрів  $\delta_{зМК}$  збільшується швидше, ніж  $\delta_{зл}$ , тобто з плином часу льодогрунтова стінка вирівнюється і за  $\delta_{зМК} = 2l$  товщина стінки практично стала за довжиною  $\delta_{зл} = \delta_{зМК}$ .

Об'єм ґрунту,  $m^3$ , замороженого однією колонкою, в період до замикання льодогрунтових циліндрів визначається як об'єм циліндра, а після замикання може бути розрахований за формулою

$$V_m = (0,405\delta_{зМК}^2 + 0,516l^2)H. \quad (2.11)$$

Середнє навантаження на холодильну машину,  $\kappa Вт$ , можна визначити двома способами:

$$а) Q_0 = (\bar{Q}_M + \bar{Q}_T) \frac{L}{l} k_1 k_2, \quad (2.12)$$

де  $L/l$  – загальне число свердловин в огороженні довжиною  $L$ ;

$k_1 = 1,1-1,2$  – коефіцієнт, що враховує втрати холоду в надземних трубопроводах та арматурі;

$k_2$  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність навантаження з часом;

$$б) Q_0 = \frac{1}{\tau_{кон}} \left[ r_l W \rho_{ск} V_M + \frac{1}{3} c_T \rho_T (t_{zp} - t_\phi) V_T \right] \frac{L}{l} k_1 k_2, \quad (2.13)$$

де  $V_M$  – об'єм мерзлого ґрунту за виразом (2.11);

$V_T$  – об'єм охолодженого талого ґрунту, що припадає на одну колонку та визначається з урахуванням форми огороження за виразом (2.7).

Температуру фазового перетворення  $t_\phi$  незасолених ґрунтів для практичних розрахунків беруть такою, що дорівнює  $t_\phi = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Однак у дійсності це наближено справедливо лише для піщаного ґрунту. Для ґрунтів, що містять тверді частинки більш дрібних фракцій, ніж у піску,  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  потрібно вважати температурою початку замерзання. За цієї температури замерзає лише вільна волога, що заповнює великі пори між частинками. Інша частина води, що міститься в ґрунті, є зв'язаною і замерзає

за від'ємних температур. Водночас форми зв'язку окремих молекул води з твердими частинками різні і залежать від природи сил, що діють на них. Відповідно неоднакова й температура фазового перетворення зв'язаної води. Розрізняють *пухкозв'язану воду*, що перебуває під впливом капілярних сил, та *міцнозв'язану воду*, що на яку діють електромолекулярні (абсорбційні) сили. Пухкозв'язана вода замерзає в інтервалі від'ємних температур  $\Delta t_\phi$ , величина яких залежить від дисперсного складу ґрунту: чим дрібніший розмір частинок ґрунту, тим ширший інтервал  $\Delta t_\phi$ . Міцнозв'язана вода не замерзає навіть за температури  $-70^\circ\text{C}$ . Її кількість тим більша, чим більша дисперсність ґрунту.

У зв'язку з цією особливістю стан ґрунтів за  $t < 0^\circ\text{C}$  поділяють на *твердомерзлий* та *пластично-мерзлий*. У пластично-мерзлому стані не вся пухкозв'язана вода перейшла у твердий стан, і ґрунт через це не має достатньої твердості. Приблизні межі твердомерзлого стану (відповідно до СНіП II-Б.6-66) такі: пілуваті піски  $t \leq -0,3^\circ\text{C}$ , супіски  $t \leq -0,6^\circ\text{C}$ , суглинки  $t \leq -1^\circ\text{C}$ , глини  $t \leq -1,5^\circ\text{C}$ .

Теплофізичні характеристики ґрунту залежать від його стану (талий або мерзлий), мінералогічного складу, дисперсності, вологості й температури.

Густина вологого ґрунту,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , залежно від вологості визначається за формулою

$$\rho = \rho_{\text{ск}}(1+W). \quad (2.14)$$

Теплоємність ґрунтів підлягає закону адитивності і може бути обчислена за даними про масовий склад і значеннями теплоємності твердих частинок:

$c_{me} = (0,84 \pm 0,13) \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ , води:

$c_w = 4,19 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$  і льоду:  $c_l = 2,12 - 0,008t$ ,  $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Коефіцієнти теплопровідності  $\lambda$ , температуропровідності  $a = \lambda / (\rho c)$  істотно залежать від природи ґрунту, його стану (талий або мерзлий), вологості, температури, а також густини і структури (природна або порушена).

Теплопровідність більшості ґрунтів у разі замерзання збільшується (для піщаних ґрунтів у середньому можна вважати  $\lambda_m / \lambda_T \approx 1,25$ ). Однак установлено, що для глинистих ґрунтів малої вологості  $\lambda_m / \lambda_T < 1$ .

Зі збільшенням вологості коефіцієнти теплопровідності талого та мерзлого ґрунтів збільшуються (за винятком  $\lambda_m$  для глини, який має мінімум за вологості 5–10 %; коефіцієнт температуропровідності зі збільшенням вологості збільшується, але за деякого значення  $W$  може бути слабковиражений максимум).

Впливом температури на величини  $\lambda$  і  $c$  зазвичай нехтують і вважають їх сталими: за  $t \geq 0^\circ\text{C}$   $\lambda = \lambda_T$  і  $c = c_T$ , а в твердомерзлому стані  $\lambda = \lambda_m$  і  $c = c_m$ . В інтервалі температур  $\Delta t_\phi$  (пластично-мерзлий стан) вплив  $t$  на  $\lambda$  і  $c$  ураховують шляхом застосування інтерполяційних залежностей.

Міцність мерзлих ґрунтів залежить від температури, мінералогічного і гранулометричного складів, вологості й засоленості. Зі зменшенням температури нижче ніж  $0^\circ\text{C}$  міцність мерзлих ґрунтів зростає. У цьому разі для піщаних ґрунтів збільшення міцності залежно від величини від'ємної температури відбувається швидше, ніж для глинистих, що пояснюється різним характером залежності кількості незамерзлої води від температури. Але й у

твердомерзлому стані за однієї й тієї самої температури більшу міцність мають ґрунти з більшими за розміром частинками. Піщаний ґрунт в основному має частинки від 0,05 до 1 мм, глинистий ґрунт має частинки дрібніші за 0,005 мм; за температури  $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  і вологості  $W \approx 17\%$  межа міцності стиснення піщаного ґрунту  $[\sigma_{cm}] \approx 1,2\text{ МПа}$ , за такої самої температури й вологості  $W \approx 33\%$  для глинистого ґрунту  $[\sigma_{cm}] \approx 0,8\text{ МПа}$ .

Зі збільшенням вологості міцність мерзлих ґрунтів зростає, оскільки лід є цементуючою речовиною, однак це справедливо лише до повного вологонасичення, тобто до повного заповнення водою пор між твердими частинками при збереженні їх контакту одна з одною. Якщо ж води так багато, що тверді частинки втрачають контакт одна з одною, то міцність мерзлого ґрунту зменшується. Це відбувається через те, що міцність чистого льоду менша, ніж будь-якого з мерзлих ґрунтів.

Включення льоду в мерзлому ґрунті можуть мати різний характер, тобто мерзлі ґрунти мають різну текстуру. Розрізняють три основні види текстури: *суцільну*, *шарову* та *комірчасту*. Найбільшу міцність має суцільна, яка характеризується рівномірним розподілом кристалів льоду; така текстура характерна для швидкого проморожування. Для шарової текстури характерні прошарки чистого льоду (льодяні лінзи), що знаходяться паралельно межі поділу фаз при повільному проморожуванні дрібнодисперсних ґрунтів. Льодяні лінзи виникають за рахунок міграції вологи до фронту кристалізації і призводять до здимання мерзлого ґрунту. Ґрунти шарової структури мають неоднорідні теплофізичні та міцнісні властивості в різних напрямках. У мерзлих ґрунтах комірчастої текстури льодяні прожилки мають різні напрямки, вони мають найменшу міцність.



У разі заморожування об'єм ґрунту збільшується. Це викликано тим, що лід має приблизно на 11 % меншу густину, ніж вода. Якщо геометрія заморожуваних зон така, що не відбувається промерзання талого ґрунту в замкнених порожнинах, то ця особливість процесу не спричиняє ускладнень. У протилежному разі можливе виникнення зон напруженого стану, що може призвести до утворення тріщин у льодогрунтового огороженні.

Заморожені ґрунти, як і лід, мають властивість *повзучості*. Під повзучістю розуміють властивість матеріалу збільшувати деформацію під дією тривалого навантаження. Чим триваліше навантаження, тим менша міцність мерзлих ґрунтів. Дослідження засвідчують, що міцність мерзлих ґрунтів після навантаження впродовж одного місяця становить лише 30–50 % від миттєвої міцності.

Ураховуючи різноманітність факторів, що впливають на міцнісні й теплофізичні властивості мерзлих ґрунтів, рекомендується для відповідальних будівельних об'єктів визначати властивості ґрунтів експериментально на зразках непорушеної структури, причому тривалість досліджень зразків на міцність повинна відповідати тривалості роботи даного льодогрунтового огороження. Якщо спеціальні дослідження не виконуються, то властивості мерзлих ґрунтів рекомендується брати відповідно до додатка А (СНіП II-Б.6-66 «Основи і фундаменти будівель і споруд на вічномерзлих ґрунтах. Норми проектування») або СП 25.13330.2012 «Основи і фундаменти на вічномерзлих ґрунтах». У цьому разі коефіцієнт запасу міцності щодо миттєвої міцності потрібно брати таким, що дорівнює  $n = 3-5$ .

## ЗМІСТ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ

Виконання завдання полягає в розв'язуванні задачі, умова якої наведена нижче.

Розрахувати тривалість утворення суцільної льодогрунтової стінки  $\tau$ , середньооб'ємну температуру  $t_{\text{сер. м}}$  льодогрунтового циліндра, а також середнє навантаження на холодильну машину  $Q_0$ , якщо відомо, що його товщина  $\delta$ , мм, ґрунт – відповідно до вихідних даних (тип ґрунту, сумарна вологість ґрунту  $W_c$ , густина ґрунту  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, число пластичності  $W_n$ ), довжина стінки  $L = 20$  м, висота льодогрунтової стінки  $h = 5$  м. Зовнішній діаметр колонки  $D = 50$  мм. Початкова температура ґрунту  $t_{2p}$ , °С. Середня температура холодоносія в колонці  $t_x$ , °С.

Середній коефіцієнт тепловіддачі від стінки колонки до холодоносія, що рухається в кільцевому каналі,  $\alpha_x = 200$  Вт/(м<sup>2</sup> · К), теплота плавлення льоду  $r_{\text{л}} = 335$  кДж/кг, розміщення колонок рівномірне.

За вихідні дані беруть:

- тип ґрунту;
- сумарну вологість ґрунту  $W_c$ ;
- густину ґрунту  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>;
- число пластичності ґрунту  $W_n$ ;
- товщину льодогрунтового циліндра  $\delta$ , мм;
- початкову температуру ґрунту  $t_{2p}$ , °С.
- середню температуру холодоносія в колонці  $t_x$ , °С.

У результаті виконання практичного завдання необхідно розрахувати:

- тривалість утворення суцільної льодогрунтової стінки  $\tau$ , год;
- середньооб'ємну температуру льодогрунтового циліндра  $t_{сер.м}, ^\circ C$ ;
- середнє навантаження на холодильну машину  $Q_0$ , Вт.

У разі відсутності додаткових рекомендацій викладача вихідні дані для виконання практичного завдання беруть згідно з даними, наведеними в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

Перед-остання цифра шифру	Тип ґрунту	$W_c$	$\rho, \frac{кг}{м^3}$	$W_n$	Остання цифра шифру	$\delta, мм$	$t_{сп}, ^\circ C$	$t_x, ^\circ C$
1	Пісок	0,15	1 400	0,008	1	200	15	-18
2	Супісок	0,25	1 600	0,016	2	250	12	-20
3	Суглинок	0,35	1 600	0,11	3	300	10	-22
4	Глина	0,15	1 800	0,23	4	350	8	-24
5	Пісок	0,25	1 800	0,006	5	400	5	-26
6	Супісок	0,20	2 000	0,03	6	450	3	-28
7	Суглинок	0,25	2 000	0,07	7	500	17	-30
8	Глина	0,15	1 600	0,18	8	550	20	-32
9	Пісок	0,20	1 800	0,009	9	600	23	-25
0	Суглинок	0,30	1 800	0,15	0	650	26	-20

### ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Розрахувати тривалість утворення суцільної льодогрунтової стінки  $\tau$ , середньооб'ємну температуру  $t_{сер.м}$  льодогрунтового циліндра, а також середнє навантаження на холодильну машину  $Q_0$ , якщо відомо, що його товщина  $\delta = 200$  мм, ґрунт – відповідно до вихідних

даних (тип ґрунту – супісок, сумарна вологість ґрунту  $W_c = 0,25$ , густина ґрунту  $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ , число пластичності  $W_n = 0,015$ ), довжина стінки  $L = 20 \text{ м}$ , висота льодогрунтової стінки  $h = 5 \text{ м}$ . Зовнішній діаметр колонки  $D = 50 \text{ мм}$ . Початкова температура ґрунту  $t_{zp} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Середня температура холодоносія в колонці  $t_X = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Середній коефіцієнт тепловіддачі від стінки колонки до холодоносія, що рухається в кільцевому каналі,  $\alpha_x = 200 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , теплота плавлення льоду  $r_{л} = 335 \text{ кДж/кг}$ , розміщення колонок рівномірне.

## РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Розрахункова схема утворення льодогрунтової стінки показана на рисунках 2.1 і 2.2.

У разі рівномірного розміщення колонок задаємося, що відстань між ними дорівнює товщині льодогрунтової стінки  $l = \delta = 200 \text{ мм} = 0,2 \text{ м}$ , тоді загальна кількість колонок у стінці становитиме

$$n = \frac{L}{l} = \frac{20}{0,2} = 100 \text{ шт.}$$

Висота колонки з урахуванням глибини додаткового занурення у водовідштовхувальний ґрунт

$$H = h + (2 \dots 3) \text{ м} = 5 + 2 = 7 \text{ м.}$$

Густина скелета ґрунту відповідно до формули (2.14)

$$\rho_{ск} = \frac{\rho}{1 + W_c} = \frac{1600}{1 + 0,25} = 1280 \text{ кг/м}^3.$$

Температуру фазового переходу в ґрунті визначаємо з рекомендацій додатка В для заданого типу ґрунту (супісок) і числа пластичності ( $W_n = 0,015$ ):

$$t_{\phi} \cong t_{зам}^{поч} = -0,15 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Відповідно до додатка Б для заданих характеристик ґрунту (супісок,  $W_c = 0,25$ ,  $\rho = 1\ 600 \text{ кг/м}^3$ ) визначаємо його теплофізичні параметри в талому і мерзлому станах:

- коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_T = 1,35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ,
- $\lambda_M = 1,676 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;
- об'ємна теплоємність  $c_T = 2367 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$ ,
- $c_M = 1718 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$ .

Відповідно до показаної розрахункової схеми (рис. 2.1) суцільна льодогрунтова стінка утвориться, якщо теоретично буде виконуватись умова  $\delta_{зmk} = \delta_{zl} = 2r_3$ . Однак на практиці її виконання можливе лише в частині перерізу II–II, де обов'язково буде виконання  $\delta_{зmk} = \delta = 0,2 \text{ м}$ . Використовуючи формулу (2.10), визначимо радіус льодогрунтового циліндра:

$$r_3 = \frac{l}{2 \cdot \pi} \cdot \operatorname{arcch} \left( \operatorname{ch} \left( \frac{\pi \cdot \delta_{зmk}}{l} \right) + 2 \right) = \frac{0,2}{2 \cdot \pi} \cdot \operatorname{arcch} \left( \operatorname{ch} \left( \frac{\pi \cdot 0,2}{0,2} \right) + 2 \right) = 0,105 \text{ м}.$$

Тоді товщина льодогрунтової стінки в перерізі I–I (максимальна товщина стінки) становитиме

$$\delta_{zl} = 2 \cdot r_3 = 2 \cdot 0,105 = 0,21 \text{ м}.$$

Тривалість заморожування льодогрунтового циліндра до заданого радіуса  $r_3$  знаходимо за формулою (2.2):

$$\tau = \frac{Q_\Phi}{\lambda_m \cdot (t_\Phi - t_X)} \left[ \frac{r_3^2}{2} \ln \left( \frac{r_3}{r_0} \right) + \left( \frac{\lambda_m}{2\alpha_X r_0} - \frac{1}{4} \right) (r_3^2 - r_0^2) \right],$$

де  $Q_\Phi = r_l W \rho_{ck}$  – теплота фазового перетворення води, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  ґрунту;

$r_l$  – теплота плавлення льоду,  $r_l = 335 \text{ кДж} / \text{кг}$ ;

$W$  – масова вологість ґрунту;

$\lambda_m$  – коефіцієнт теплопровідності мерзлого ґрунту;

$t_\Phi$  і  $t_X$  – температура фазового перетворення й температура холодоносія в колонці;

$r_3$  і  $r_0$  – радіуси відповідно льодогрунтового циліндра і колонки;  $r_0 = D / 2$ ;

$\alpha_X$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінки колонки до холодоносія, що рухається в кільцевому каналі,  $\alpha_X$  визначають за відомими закономірностями конвективного теплообміну.

Отже, підставляємо числові значення

$$Q_\Phi = r_l \cdot W_c \cdot \rho_{ck} = 335 \cdot 10^3 \cdot 0,25 \cdot 1280 = 1,072 \cdot 10^8 \text{ кДж} / \text{м}^3,$$

$$r_0 = D / 2 = 0,05 / 2 = 0,025 \text{ м},$$

$$\tau = \frac{1,072 \cdot 10^8}{1,676 \cdot (-0,15 - (-20))} \times$$

$$\times \left[ \frac{0,105^2}{2} \cdot \ln \left( \frac{0,105}{0,025} \right) + \left( \frac{1,676}{2 \cdot 200 \cdot 0,025} - \frac{1}{4} \right) \cdot (0,105^2 - 0,025^2) \right] =$$

$$= 22730 \text{ c} = 6,31 \text{ год.}$$

Визначаємо середньооб'ємну температуру  $t_{\text{сеп.м}}$  льодогрунтового циліндра з виразу (2.4):

$$\frac{t_{\phi} - t_{\text{сеп.м}}}{t_{\phi} - t_{\text{см}}} = \frac{\ln r_3 - \frac{r_3^2 \cdot \ln r_3 - r_0^2 \cdot \ln r_0}{r_3^2 - r_0^2} + 0,5}{\ln \left( \frac{r_3}{r_0} \right)} =$$

$$= \frac{\ln 0,105 - \frac{0,105^2 \cdot \ln 0,105 - 0,025^2 \cdot \ln 0,025}{0,105^2 - 0,025^2} + 0,5}{\ln \left( \frac{0,105}{0,025} \right)} = 0,288,$$

звідси

$$t_{\text{сеп.м}} = t_{\phi} - 0,288 \cdot (t_{\phi} - t_{\text{см}}) =$$

$$= -0,15 - 0,288 \cdot (-0,15 - (-17,5)) = -5,15 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де  $t_{\text{см}} \approx t_X + (2 \dots 3) \text{ } ^\circ\text{C} = -20 + 2,5 = -17,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  – температура стінки свердловини.

Визначаємо середнє навантаження на холодильну машину  $Q_0$ .

Об'єм ґрунту, замороженого однією колонкою, після

замикання циліндрів може бути розрахований за формулою (2.11):

$$V_M = (0,405 \cdot \delta_{зmk}^2 + 0,516 \cdot l^2) \cdot H = \\ = (0,405 \cdot 0,2^2 + 0,516 \cdot 0,2^2) \cdot 7 = 0,258 \text{ м}^3.$$

Товщина шару талого ґрунту (від межі поділу фаз), в якому температура знижена порівняно з початковою температурою  $t_{cp}$ , залежить від часу і може бути визначена з виразу (2.7):

$$\xi \cong 3,46 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_T \cdot \tau}{c_T \cdot \rho_T}} = 3,46 \cdot \sqrt{\frac{1,35 \cdot 22730}{2367 \cdot 10^3 \cdot 1600}} = 9,85 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

де  $\rho_T = \rho = 1600 \text{ кг/м}^3$  – густина талого ґрунту.

Об'єм охолодженого талого ґрунту, що припадає на одну колонку та визначається з урахуванням форми огороження. У цьому разі наближено форма буде відповідати паралелограму з розмірами  $\xi \times H \times L = 0,311 \times 7 \times 20 \text{ м}$ , тоді

$$V_T \approx 2 \cdot \xi \cdot H \cdot L / n = 2 \cdot 9,85 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 20 / 100 = 0,028 \text{ м}^3,$$

де коефіцієнт «2» урахує симетричність процесу охолодження льодогрунтового огороження.

Середнє навантаження на холодильну машину можна визначити за формулою (2.13):



$$\begin{aligned}
Q_0 &= \frac{1}{\tau} \cdot \left[ r_n \cdot W_c \cdot \rho_{ck} \cdot V_m + \frac{1}{3} \cdot c_T \cdot \rho_T \cdot (t_{zp} - t_\phi) \cdot V_T \right] \cdot \frac{L}{l} \cdot k_1 \cdot k_2 = \\
&= \frac{1}{22730} \cdot \left[ 335 \cdot 0,25 \cdot 1280 \cdot 0,258 + \frac{1}{3} \cdot 2367 \cdot 1600 \cdot (7 - (-0,15)) \cdot 0,028 \right] \times \\
&\quad \times 100 \cdot 1,15 \cdot 1,1 = 1539 \text{ кВт}.
\end{aligned}$$

де  $n = L/l$  – загальне число свердловин в огороженні довжиною  $L$ ;

$k_1 = 1,1-1,2$  – коефіцієнт, що враховує втрати холоду в надземних трубопроводах та арматурі, задаємо  $k_1 = 1,15$ ;

$k_2$  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність навантаження з часом, задаємо  $k_2 = 1,1$ .

## 3 ВОЛОГА В БІОЛОГІЧНИХ МАТЕРІАЛАХ ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ

Перед виконанням практичного завдання необхідно ознайомитися з докладними теоретичними відомостями, викладеними в однойменному розділі навчального посібника [1].

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

До складу харчових продуктів входить вода залежно від походження продукту кількісно від декількох відсотків до 99 % і більше. Вона має деякі специфічні аномальні властивості: максимальну енергію зв'язку, значну здатність до деформації, велику в'язкість і порівняно малу теплопровідність. Вода має максимальну густину за  $t = 4 \text{ }^\circ\text{C}$  і при заморожуванні розширюється. Вода забезпечує консистенцію й структуру харчового продукту, визначає його стійкість під час зберігання.

Вода пов'язана із сухим каркасом продукту, а енергію цього зв'язку визначають за формулою П. А. Ребіндера:

$$E = -RT \ln \varphi, \quad (3.1)$$

де  $T$  – абсолютна температура продукту,  $K$ ;

$R$  – газова стала води ( $R = 461 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$ );

$\varphi = p_{\Pi} / p_s$  – відносний вологовміст матеріалу;

$p_s$  – парціальний тиск насиченої пари вільної поверхні води над плоскою поверхнею,  $\text{Па}$ ;

$p_{\Pi}$  – парціальний тиск рівноважної пари води за тієї самої температури над матеріалом,  $\text{Па}$ .

За формулою Д. Г. Рютова визначають енергію зв'язку вологи,  $\kappa\text{Дж}/\kappa\text{г}$ , що перебуває в рівновазі з концентрованим розчином продукту і льодом за температури  $t$ :

$$E = r_{\text{л}} \cdot \left( -\frac{t}{273} \right), \quad (3.2)$$

де  $r_{\text{л}}$  – питома прихована теплота плавлення льоду  $\kappa\text{Дж}/\kappa\text{г}$ ;

$t$  – температура системи,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$$r_{\text{л}} = (79,82 + 0,46t + 0,00165t^2) \cdot c_w.$$

Одними з важливих характеристик замороженого або підмороженого харчового продукту є кріоскопічна температура і частка вимороженої води.

Вологу, що міститься в харчовому продукті, поділяють на *вільну* (молекули якої мають структуру, близьку до структури звичайної води) і *зв'язану* (молекули якої з'єднуються з молекулами розчиненої речовини, іонами та іншими зарядженими частинками). Температурою, що відповідає початку льодоутворення вільної води в матеріалі за відсутності переохолодження, називають кріоскопічною температурою  $t_{\text{кр}}$ .

За деякої температури частка вимороженої води

$$\omega = G_{\text{л}} / G_w, \quad (3.3)$$

де  $G_{\text{л}}$  – маса льоду за даної температури,  $\kappa\text{г}$ ;

$G_w$  – загальна маса води у вихідному матеріалі,  $\kappa\text{г}$ .

Для визначення частки вимороженої води з урахуванням зв'язаної вологи користуються формулою Д. Г. Рютова:

$$\omega = \left(1 - b \cdot \frac{1 - W}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{t_{кр}}{t}\right), \quad (3.4)$$

де  $W$  – загальний вміст води у продукті ( $W$  кг води на 1 кг продукту);

$b$  – вміст зв'язаної води ( $b$  кг на 1 кг сухих речовин) (табл. 3.1).

У продуктах тваринного походження беруть у середньому  $b = 0,27$  кг / кг, рослинного походження –  $b = 0,12$  кг / кг.

Таблиця 3.1 – Дані для розрахунку  $\omega$  у деяких харчових продуктах

Вид продукту	$W$ , кг / кг	$t_{кр}$ , °C	$b$ , кг / кг
Дріжджі	0,720	-1,37	0,167
Зелений горошок	0,760	-1,74	0,080
Картопля	0,746	-0,50	0,341
Меланж курячих яєць	0,745	-0,47	0,225
Мойва	0,632	-1,20	0,158
Морський окунь	0,791	-0,83	0,280
Паста «Океан» із криля	0,736	-1,55	0,279
Пікша	0,836	-0,83	0,270
Тріска	0,800	-0,91	0,270
Шпинат	0,800	-0,55	0,117
Ячний білок	0,864	-0,45	0,275
Яловичина	0,74–0,77	-1,00	0,258

## ЗМІСТ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ

Виконання завдання полягає в розв'язанні задачі, умова якої наведена нижче.

Визначити взаємозв'язок та побудувати графік залежності енергії зв'язку вологи, що перебуває в рівновазі з концентрованим розчином продукту і льодом, від температури  $-1 < t < -50$  °С. Розрахунки рекомендується виконувати використовуючи формулу Д. Г. Рютова. Залежність питомої теплоти плавлення льоду від температури взяти такою, що має вигляд  $r_l = (79,82 + 0,46t + 0,00165t^2)c_w$ , кДж/кг. Взяти теплоємність води  $c_w = 4,19$  кДж/(кг · К). Результати проаналізувати. Під час виконання побудови залежності  $E = f(t)$  рекомендується брати крок  $\Delta t = 1$  °С для діапазону  $-1 < t < -8$  °С, а на частині, що залишиться,  $\Delta t = 5-10$  °С.

Знайти кількісний і процентний вміст вільної та зв'язаної води, що міститься в  $M$ , кг, незамороженого харчового продукту. Вміст зв'язаної води  $b$ , кг зв'яз. води/кг сух. реч., вологовміст  $W$ , кг вологи/кг продукту, і криоскопічну температуру  $t_{кр}$ , °С, продукту взяти з [1].

Вважаючи, що температура продукту почала дорівнювати  $t_n$ , °С, визначити частку вимороженої води для зазначеного харчового продукту, а також нові значення (кількісні й процентні) вмісту вільної та зв'язаної води.

За вихідні дані беруть:

- продукт;
- масу продукту  $M$ , кг;
- температуру продукту  $t_n$ , °С.

У результаті виконання практичного завдання

необхідно:

- побудувати графік залежності енергії зв'язку вологи від температури;
- визначити кількісний та процентний вміст вільної і зв'язаної води в продукті;
- обчислити частку вимороженої води  $\omega$ .

У разі відсутності додаткових рекомендацій викладача вихідні дані для виконання практичного завдання беруть згідно з даними, наведеними в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані

Перед-остання цифра шифру	Продукт	Остання цифра шифру	$M, \text{кг}$	$t_n, ^\circ\text{C}$
1	Яловичина (напівтуші)	1	1 500	-35
2	Баранина (напівтуші)	2	1 300	-30
3	Свинина (напівтуші)	3	1 000	-25
4	Птиця (тушка)	4	700	-20
5	Риба	5	400	-15
6	Яловичина (напівтуші)	6	2 500	-10
7	Баранина (напівтуші)	7	2 000	-5
8	Свинина (напівтуші)	8	1 800	-3
9	Птиця (тушка)	9	1 200	-8
0	Риба	0	800	-12

### ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Визначити взаємозв'язок та побудувати графік залежності енергії зв'язку вологи, що перебуває в рівновазі з концентрованим розчином продукту і льодом, від температури  $-1 < t < -50$  °С. Розрахунки рекомендується виконувати використовуючи формулу Д. Г. Рютова.

Залежність питомої теплоти плавлення льоду від температури взяти такою, що має вигляд  $r_l = (79,82 + 0,46t + 0,00165t^2)c_w$ , кДж/кг. Взяти теплоємність води  $c_w = 4,19$  кДж/(кг · К). Результати проаналізувати. Під час виконання побудови залежності  $E = f(t)$  рекомендується брати крок  $\Delta t = 1$  °С для діапазону  $-1 < t < -8$  °С, а на частині, що залишиться, –  $\Delta t = 5-10$  °С.

Знайти кількісний і процентний вміст вільної та зв'язаної води, що міститься в  $M$ , кг, не замороженого харчового продукту. Вміст зв'язаної води  $b$ , кг зв'яз. води/кг сух. реч., вологовміст  $W$ , кг вологи/кг продукту, і криоскопічну температуру  $t_{кр}$ , °С, продукту взяти з розділу «Теоретичні відомості».

Вважаючи, що температура продукту почала дорівнювати  $t_n$ , °С, визначити частку вимороженої води для зазначеного харчового продукту, а також нові значення (кількісні й процентні) вмісту вільної та зв'язаної води.

*Вихідні дані:*

- продукт – яловичина;
- маса продукту  $M = 500$  кг;
- температура продукту  $t_n = -5$  °С.

## РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Визначимо взаємозв'язок та побудуємо графік залежності енергії зв'язку вологи, що перебуває в рівновазі з концентрованим розчином продукту і льодом, від температури  $-1 < t < -50$  °С. Розрахунки виконаємо використовуючи формулу Д. Г. Рютова:

$$E = r_a \cdot \left( -\frac{t}{273} \right),$$

де питома теплота плавлення льоду від температури може бути визначена за формулою

$$r_n = (79,82 + 0,46t + 0,00165t^2) \cdot c_w,$$

де  $c_w = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – теплоємність води.

Ураховуючи значну кількість однотипних розрахунків, виконуємо їх із використанням ЕОМ, а результати заносимо до таблиці 3.3. Для прикладу подамо розрахунок для  $t = -1 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$r_n = (79,82 + 0,46 \cdot (-1) + 0,00165 \cdot (-1)^2) \cdot 4,19 = 332,5 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$E = 332,5 \cdot \left( -\frac{-1}{273} \right) = 1,218 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Таблиця 3.3 – До визначення взаємозв'язку  $E = f(t)$

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-10	-20	-30	-40	-50
$r_n,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	332,5	330,6	328,7	326,8	325,0	323,1	321,3	319,5	315,9	298,7	282,8	268,4	255,4
$E,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	1,218	2,422	3,612	4,789	5,952	7,102	8,238	9,362	11,570	21,880	31,082	39,328	46,769

Побудуємо залежність  $E = f(t)$  (див. рис. 3.1) за даними таблиці 3.2.



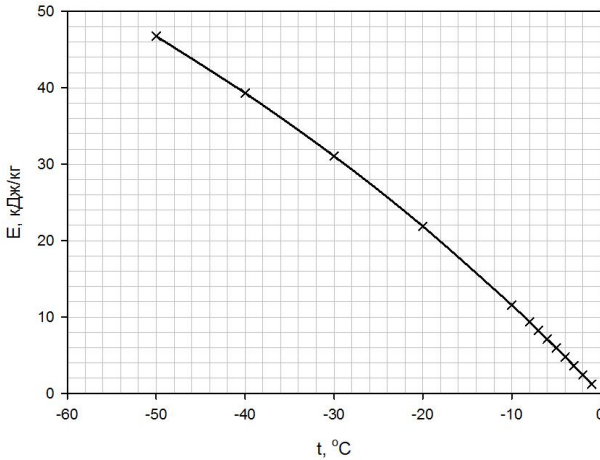


Рисунок 3.1 – Графік залежності  $E = f(t)$

Як бачимо, зниження температури  $t$  призводить до зростання енергії зв'язку води. Швидкість зростання енергії  $E$  зменшується зі зменшенням температури.

Для заданого типу продукту (яловичина), використовуючи дані, наведені в теоретичних відомостях, знаходимо:

- вміст зв'язаної води  $b = 0,258$  кг зв'яз. води/кг сух. реч.;
- вологовміст  $W = 0,75$  кг вологи/кг продукту;
- криоскопічну температуру  $t_{кр} = -1,00$  °C.

Визначимо кількісний і процентний вміст вільної та зв'язаної води, що міститься в  $M = 500$  кг незамороженого харчового продукту. Для цього знаходимо масу вологи в продукті:

$$M_w = M \cdot W = 500 \cdot 0,75 = 375 \text{ кг} .$$

Маса сухої речовини, що міститься в продукті,

$$M_{\text{сух}} = M - M_w = 500 - 375 = 125 \text{ кг} .$$

Маса зв'язаної води в продукті

$$M_{\text{зв. в}} = b \cdot M_{\text{сух}} = 0,258 \cdot 125 = 32,25 \text{ кг} .$$

Маса вільної води в продукті

$$M_{\text{віль. в}} = M_w - M_{\text{зв. в}} = 375 - 32,25 = 342,75 \text{ кг} .$$

Процентний вміст вільної та зв'язаної води

$$\delta M_{\text{віль. в}} = \frac{M_{\text{віль. в}}}{M} \cdot 100 \% = \frac{342,75}{500} \cdot 100 \% = 68,55 \% ,$$

$$\delta M_{\text{зв. в}} = \frac{M_{\text{зв. в}}}{M} \cdot 100 \% = \frac{32,25}{500} \cdot 100 \% = 6,45 \% .$$

Вважаючи, що температура продукту почала дорівнювати  $t_n = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ , визначимо частку вимороженої води для зазначеного харчового продукту (яловичина), а також нові значення (кількісні й процентні) вмісту вільної та зв'язаної води для замороженого продукту.

Частку вимороженої води визначаємо за формулою Д. Г. Рютова:

$$\omega = \left(1 - b \cdot \frac{1 - W}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{t_{kp}}{t_n}\right) = \left(1 - 0,258 \cdot \frac{1 - 0,75}{0,75}\right) \cdot \left(1 - \frac{(-1)}{(-5)}\right) = 0,731.$$

Маса незамерзлої води становитиме

$$M'_w = (1 - \omega) \cdot M_w = (1 - 0,731) \cdot 375 = 100,875 \text{ кг}.$$

Вважаючи, що насамперед замерзає вільна вода, нове значення вільної незамерзлої води в абсолютному та відносному складі дорівнюватиме

$$M'_{\text{віль. в}} = M'_w - M_{\text{зв. в}} = 100,875 - 32,25 = 68,625 \text{ кг},$$

$$\delta M'_{\text{віль. в}} = \frac{M'_{\text{віль. в}}}{M} \cdot 100 \% = \frac{68,625}{500} \cdot 100 \% = 13,72 \%.$$

Аналогічні значення для зв'язаної води залишаться незмінними:

$$M'_{\text{зв. в}} = M_{\text{зв. в}} = 32,25 \text{ кг}; \quad \delta M'_{\text{зв. в}} = \delta M_{\text{зв. в}} = 6,45 \%.$$

## 4 ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Перед виконанням практичного завдання необхідно ознайомитися з докладними теоретичними відомостями, викладеними в [1].

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Фізичні властивості харчових продуктів в основному визначаються властивостями води.

Нижче наведені основні розрахункові залежності з розрахунку основних теплофізичних властивостей харчових продуктів: теплоємності  $c$ , теплопровідності  $\lambda$ , густини  $\rho$ , коефіцієнта температуропровідності  $a$ .

Розрахункова питома теплоємність  $c$  дорівнює

$$c = c_{\text{сх.р}} \cdot (1 - W) + c_{\text{л}} \cdot \omega \cdot W + c_{\text{в}} \cdot (1 - \omega) \cdot W, \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К}), \quad (4.1)$$

де  $W$  – відносний масовий вміст води у вихідному матеріалі;

$c_{\text{сх.р}}$  – питома теплоємність сухої речовини (для харчового продукту тваринного походження  $c_{\text{сх.р}} = 1,38 - 1,68 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ , рослинного походження  $c_{\text{сх.р}} = 0,7 - 1,96 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ );

$\omega$  – частка вимороженої води за даної температури;  
 $c_{\text{л}} = 2,1 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$  – питома теплоємність льоду;  
 $c_{\text{в}} = 4,19 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$  – питома теплоємність води.

Якщо відома теплоємність незамороженого матеріалу (харчовому продукту)  $c_0$ , одержимо

$$c = c_0 - 2,1 \cdot \omega \cdot W. \quad (4.2)$$

Повна питома теплоємність ураховує питому теплоту кристалізації

$$c_{\omega} = c + (\omega_2 - \omega_1) \cdot \omega \cdot r_{\lambda}, \quad (4.3)$$

де  $(\omega_2 - \omega_1)$  – різниця частинок вимороженої води в системі за зміни її температури на  $1^{\circ}\text{C}$ ;

$r_{\lambda} = 335,2 \text{ кДж} / \text{кг}$  – питома теплота кристалізації води (плавлення льоду).

Теплоємність замороженого харчового продукту з урахуванням зміни частки вимороженої вологи може бути обчислена з емпіричної залежності

$$c_{\omega} = m - \frac{n}{t}, \quad (4.4)$$

де  $m$  і  $n$  – емпіричні коефіцієнти (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Емпіричні коефіцієнти до формули (4.4)

Продукт	$m, \text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$	$n, \text{кДж} / \text{кг}$
Боби	0,92	28,09
Броколі	0,75	38,02
Горох	0,42	36,38
Диня	0,54	46,60
Журавлина	0,33	45,64
Інжир	0,50	49,45
Капуста цвітна	0,71	37,56
Квасоля зелена	1,17	21,98

Продовження таблиці 4.1

Продукт	$m, \text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$	$n, \text{кДж} / \text{кг}$
Морква	0,17	51,88
Огірки	0,96	29,18
Овочі (середнє значення)	0,63	37,89
Персики	0,17	57,31
Помідори	0,88	35,63
Риба морська нежирна	0,75	37,22
Креветки	0,50	42,33
Свинина: $W = 0,52$	0,54	29,18
$W = 0,768$	2,80	11,51
середнє значення	1,88	17,33
Яловичина	0,67	39,32

Коефіцієнт теплопровідності матеріалу,  $Bm / (m \cdot K)$ , визначається за наближеним рівнянням:

$$\lambda = \lambda_0 + \omega \cdot \Delta\lambda, \quad (4.5)$$

де  $\lambda_0$  – коефіцієнт теплопровідності об'єкта до заморожування,  $Bm / (m \cdot K)$ ;

$\Delta\lambda$  – приріст коефіцієнта теплопровідності при виморожуванні всієї вільної води (для біологічних матеріалів  $\Delta\lambda = 0,9 - 1 Bm / (m \cdot K)$ ).

Теплопровідність замороженого харчового продукту,  $Bm / (m \cdot K)$ , з довільним вологовмістом може бути наближено визначена з емпіричної залежності:

$$\lambda_m = 1,74 \cdot W \cdot \omega + 0,23. \quad (4.6)$$

Теплофізичні характеристики харчового продукту можна обчислити на підставі припущення, що основним визначальним параметром є вологовміст, який змінюється в межах від  $W^H = 0,5$  до  $W^K = 0,96$ . Вважаючи, що  $t_{кр} = -1,45$  °С та  $r_{л} = 335,2$  кДж/кг, одержимо:

$$\text{а) за від'ємних температур } c_1 = c_1^H + k_{c1} \cdot (W - W^H);$$

$$\text{б) за додатних температур } c_2 = c_2^H + k_{c2} \cdot (W - W^H),$$

де  $c_1^H = 1465,4$ ;  $c_2^H = 2093,4$ ;  $k_{c1} = 1482,7$ ;  $k_{c2} = 4186,8$ .

$$\text{Аналогічно } \lambda_1 = \lambda_1^H + k_{\lambda1} \cdot (W - W^H), \lambda_2 = \lambda_2^H + k_{\lambda2} \cdot (W - W^H),$$

де  $\lambda_1^H = 0,58$ ;  $\lambda_2^H = 0,29$ ;  $k_{\lambda1} = 1,917$ ;  $k_{\lambda2} = 0,604$ .

Густина харчового продукту, кг/м<sup>3</sup>, може бути знайдена за емпіричною формулою:

$$\rho = \rho^H + k_{\rho} \cdot (W - W^H), \quad (4.7)$$

де  $\rho^H = 1005$ ;  $k_{\rho} = 208,3$  – емпіричні коефіцієнти.

Коефіцієнт температуропровідності  $a$ , м<sup>2</sup>/с, визначається за формулою

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}. \quad (4.8)$$

Питому ентальпію харчового продукту за температури  $t_n$ , °С, визначають різними способами:

– через питому теплоємність харчового продукту  $c$ ,  $\text{кДж} / \text{кг}$ ,

$$h = c \cdot t_n, \quad (4.9)$$

та використовуючи табличні дані  $h_{\text{табл}}$ ,  $\text{кДж} / \text{кг}$ , наприклад, додаток В.

## ЗМІСТ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ

Виконання завдання полягає в розв'язуванні задачі, умова якої наведена нижче.

Задано продукт, що має температуру  $t_n$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Обчислити розрахункову питому теплоємність продукту за температури  $t_n$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , беручи питому теплоємність сухої речовини продукту  $c_{\text{сух. р.}}$ ,  $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$ , питому теплоємність льоду  $c_l = 2,1 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$ , питому теплоємність води  $c_w = 4,19 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$ .

Обчислити розрахункову питому теплоємність продукту через теплоємність незамороженого продукту, що дорівнює  $c_0$ ,  $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$ . Порівняти результати розрахунків та зробити висновки.

Обчислити коефіцієнт теплопровідності продукту за такої самої температури  $t_n$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , беручи коефіцієнт теплопровідності незамороженого продукту  $\lambda_0$ ,  $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{K})$ ,



а приріст теплопровідності під час заморожування  $\Delta\lambda = 1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Користуючись емпіричними залежностями, наведеними у розділі «Фізичні властивості харчових продуктів при знижених температурах» [1], для обраного харчового продукту обчислити густину  $\rho$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , а також розрахункову питому теплоємність  $c$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , і теплопровідність  $\lambda$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , при додатних і від'ємних температурах. Початковий вологовміст брати таким, що дорівнює  $W^i = 0,5$ . Для одержаних значень теплофізичних параметрів за додатних ( $c_2, \lambda_2, \rho$ ) і від'ємних ( $c_1, \lambda_1, \rho$ ) температурах, розрахувати коефіцієнти температуропровідності  $a_1$  і  $a_2$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Використовуючи одержані значення питомих теплоємностей замороженого продукту, розраховані через:

а) питому теплоємність сухої речовини продукту  $c_{\text{сух. р.}}$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

б) теплоємність незамороженого продукту  $c_0$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

в) емпіричні залежності  $c_1$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , розрахувати питомі ентальпії продукту  $h$ ,  $\text{кДж}/\text{кг}$ , за формулою, яку використовують для твердих і рідких тіл,  $h = c \cdot t_n$ .

Порівняти одержані значення питомих ентальпій із табличними, взятими, наприклад, з додатка В.

Вміст зв'язаної води  $b$ ,  $\text{кг зв'яз. води}/\text{кг сух. реч.}$ , вологовміст  $W$ ,  $\text{кг вологи}/\text{кг продукту}$ , і кріоскопічну температуру  $t_{\text{кр}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , продукту взяти з розділу «Волога у біологічних матеріалах та її властивості» [1].

За вихідні дані беруть:

- продукт;
- температуру продукту  $t_n$ , °C;
- питому теплоємність сухої речовини продукту  $c_{\text{сух. р.}}$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;
- теплоємність незамороженого продукту  $c_0$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;
- коефіцієнт теплопровідності незамороженого продукту  $\lambda_0$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ .

У результаті виконання практичного завдання необхідно розрахувати:

- розрахункову питому теплоємність продукту  $c$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ , через теплоємність сухої речовини продукту;
- розрахункову питому теплоємність продукту  $c$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ , через теплоємність незамороженого продукту;
- коефіцієнт теплопровідності продукту  $\lambda$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ ;
- густину  $\rho$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , розрахункову питому теплоємність  $c$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ , і теплопровідність  $\lambda$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$  за додатних і від'ємних температур, використовуючи емпіричні залежності;
- коефіцієнти температуропровідності  $a_1$  і  $a_2$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , за додатних і від'ємних температур;
- питому ентальпію продукту  $h$ ,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

У разі відсутності додаткових рекомендацій

викладача вихідні дані для виконання практичного завдання беруть згідно з даними, наведеними в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані

Перед-остання цифра шифру	Продукт	$t_n, ^\circ\text{C}$	Остання цифра шифру	$c_{\text{сух.р}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$	$c_0, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$	$\lambda_0, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$
1	Яловичина (напівтуші)	-2	1	1,43	3,52	0,40
2	Баранина (напівтуші)	-5	2	1,44	3,56	0,42
3	Свинина (напівтуші)	-7	3	1,42	3,48	0,44
4	Птиця (тушка)	-10	4	1,41	3,46	0,39
5	Риба	-15	5	1,40	3,44	0,38
6	Яловичина (напівтуші)	-20	6	1,39	3,48	0,36
7	Баранина (напівтуші)	-25	7	1,38	3,40	0,37
8	Свинина (напівтуші)	-30	8	1,45	3,37	0,36
9	Птиця (тушка)	-35	9	1,46	3,35	0,45
0	Риба	-40	0	1,47	3,33	0,35

## ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Задано продукт, що має температуру  $t_n, ^\circ\text{C}$ .

Обчислити розрахункову питому теплоємність продукту за температури  $t_n, ^\circ\text{C}$ , беручи питому теплоємність сухої речовини продукту  $c_{\text{сух.р}}, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ , питому теплоємність льоду  $c_l = 2,1 \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ , питому теплоємність води  $c_w = 4,19 \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ .

Обчислити розрахункову питому теплоємність продукту через теплоємність не замороженого продукту, що дорівнює  $c_0, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ . Порівняти результати розрахунків та зробити висновки.

Обчислити коефіцієнт теплопровідності продукту за такої самої температури  $t_n$ , °C, беручи коефіцієнт теплопровідності незамороженого продукту  $\lambda_0$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , а приріст теплопровідності при заморожуванні  $\Delta\lambda = 1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Користуючись емпіричними залежностями, наведеними в розділі «Фізичні властивості харчових продуктів при знижених температурах» [1], для обраного харчового продукту обчислити густину  $\rho$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , а також розрахункову питому теплоємність  $c$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , і теплопровідність  $\lambda$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , за додатних і від'ємних температур. Початковий вологовміст брати таким, що дорівнює  $W^0 = 0,5$ . Для одержаних значень теплофізичних параметрів за додатних ( $c_2$ ,  $\lambda_2$ ,  $\rho$ ) і від'ємних ( $c_1$ ,  $\lambda_1$ ,  $\rho$ ) температур, розрахувати коефіцієнти температуропровідності  $a_1$  і  $a_2$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Використовуючи одержані значення питомих теплоємностей замороженого продукту, розраховані через: а) питому теплоємність сухої речовини продукту  $c_{\text{сух.р}}$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ; б) теплоємність незамороженого продукту  $c_0$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ; в) емпіричні залежності –  $c_1$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , розрахувати питомі ентальпії продукту  $h$ ,  $\text{кДж}/\text{кг}$ , за формулою, використовуюваною для твердих і рідких тіл,  $h = c \cdot t_n$ . Порівняти одержані значення питомих ентальпій із табличними, взятими, наприклад, з додатка В.

Вміст зв'язаної води  $b$ ,  $\text{кг зв'яз. води}/\text{кг сух. реч.}$ , вологовміст  $W$ ,  $\text{кг вологи}/\text{кг продукту}$ , і кріоскопічну температуру  $t_{\text{кр}}$ , °C, продукту взяти з розділу «Волога у біологічних матеріалах та її властивості» [1].

*Вихідні дані:*

- продукт – яловичина;
- температура продукту  $t_n = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- питома теплоємність сухої речовини продукту  $c_{\text{сух. р}} = 1,43 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;
- теплоємність не замороженого продукту  $c_0 = 3,55 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;
- коефіцієнт теплопровідності незамороженого продукту  $\lambda_0 = 0,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ .

## РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Для заданого типу продукту (яловичина), використовуючи дані розділу «Волога у біологічних матеріалах та її властивості» [1], визначаємо:

- вміст зв'язаної води  $b = 0,258 \text{ кг зв'яз. води}/\text{кг сух. реч.}$ ;
- вологовміст  $W = 0,75 \text{ кг вологи}/\text{кг продукту}$ ;
- криоскопічну температуру  $t_{\text{кр}} = -1,00 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Частку вимороженої води обчислюємо за формулою Д. Г. Рютова:

$$\omega = \left(1 - b \cdot \frac{1 - W}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{t_{\text{кр}}}{t_n}\right) = \left(1 - 0,258 \cdot \frac{1 - 0,75}{0,75}\right) \cdot \left(1 - \frac{(-1)}{(-5)}\right) = 0,731.$$

Обчислюємо розрахункову питому теплоємність продукту за температури  $t_n = -5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}
 c &= c_{\text{сух.р}} \cdot (1 - W) + c_{\text{л}} \cdot \omega \cdot W + c_{\text{в}} \cdot (1 - \omega) \cdot W = \\
 &= 1,43 \cdot (1 - 0,75) + 2,1 \cdot 0,731 \cdot 0,75 + 4,19 \cdot (1 - 0,731) \cdot 0,75 = \\
 &= 2,354 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K}),
 \end{aligned}$$

де  $W$  – відносний масовий вміст води у вихідному матеріалі;

$c_{\text{сух.р}}$  – питома теплоємність сухої речовини;  
 $c_{\text{л}} = 2,1 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$  – питома теплоємність льоду;  
 $c_{\text{в}} = 4,19 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$  – питома теплоємність води.

Розрахункова питома теплоємність продукту через теплоємність незамороженого продукту  $c_0$

$$c = c_0 - 2,1 \cdot \omega \cdot W = 3,55 - 2,1 \cdot 0,731 \cdot 0,75 = 2,399 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Відносне розходження результатів розрахунку теплоємності замороженого харчового продукту становитиме

$$\delta c = \frac{2,399 - 2,354}{2,399} \cdot 100 \% = 1,9 \% < 5 \% .$$

Отже, одержані значення теплоємностей є чисельно близькими.

Обчислимо коефіцієнт теплопровідності продукту за такої самої температури  $t_n$ , беручи коефіцієнт теплопровідності незамороженого продукту  $\lambda_0 = 0,4 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{K})$ , а приріст теплопровідності при заморожуванні  $\Delta\lambda = 1 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{K})$ :

$$\lambda = \lambda_0 + \omega \cdot \Delta\lambda = 0,4 + 0,731 \cdot 1 = 1,131 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}).$$

Користуючись емпіричними залежностями, наведеними в розділі «Фізичні властивості харчових продуктів при знижених температурах» [1], для обраного харчового продукту (яловичина) обчислимо за додатних (індекс «2») і від'ємних (індекс «1») температур:

– густину

$$\begin{aligned} \rho &= \rho'' + k_\rho \cdot (W - W'') = 1005 + 208,3 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 1005 + 208,3 \cdot (0,75 - 0,5) = 1057 \text{ кг} / \text{м}^3, \end{aligned}$$

– розрахункову питому теплоємність:

$$\begin{aligned} c_1 &= c_1'' + k_{c_1} \cdot (W - W'') = 1465,4 + 1482,7 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 1465,4 + 1482,7 \cdot (0,75 - 0,5) = 1836 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_2 &= c_2'' + k_{c_2} \cdot (W - W'') = 2093,4 + 4186,8 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 2093,4 + 4186,8 \cdot (0,75 - 0,5) = 3140 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}); \end{aligned}$$

– теплопровідність:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_1'' + k_{\lambda_1} \cdot (W - W'') = 0,58 + 1,917 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 0,58 + 1,917 \cdot (0,75 - 0,5) = 1,059 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}), \end{aligned}$$

$$\lambda_2 = \lambda_2'' + k_{\lambda_2} \cdot (W - W'') = 0,29 + 0,604 \cdot (W - 0,5) = \\ = 0,29 + 0,604 \cdot (0,75 - 0,5) = 0,441 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}).$$

Коефіцієнти температуропровідності:

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho \cdot c_1} = \frac{1,059}{1057 \cdot 1836} = 5,46 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с},$$

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho \cdot c_2} = \frac{0,441}{1057 \cdot 3140} = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Питомі ентальпії замороженого продукту за температури  $t_n = -5^\circ \text{C}$ :

а) через питому теплоємність сухої речовини продукту

$$h_a = c \cdot t_n = 2,354 \cdot (-5) = -11,8 \text{ кДж} / \text{кг};$$

б) через теплоємність незамороженого продукту

$$h_b = c \cdot t_n = 2,399 \cdot (-5) = -12,0 \text{ кДж} / \text{кг};$$

в) через емпіричну залежність

$$h_g = c_1 \cdot t_n = 1,836 \cdot (-5) = -9,2 \text{ кДж} / \text{кг}.$$



Табличне значення (додаток В) питомої ентальпії за  $t_n = -5 \text{ }^\circ\text{C}$  для яловичини дорівнює  $h_{\text{табл}} = 57,3 \text{ кДж / кг}$ .

Як бачимо, одержані розрахунковим шляхом і табличне значення істотно відрізняються. Отже, під час подальших розрахунків із використанням величини питомої ентальпії необхідно весь час користуватися однією з обраних величин.

## 5 ОХОЛОДЖЕННЯ

Перед виконанням практичного завдання необхідно ознайомитися з докладними теоретичними відомостями, викладеними в [1].

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Охолодження – процес зниження температури харчового продукту від початкового  $t_{поч}$  до кінцевого  $t_{кін}$  значення, яке не є нижчим від криоскопічної температури  $t_{кр}$  за температури середовища  $t_c$ . Водночас природні властивості харчового продукту змінюються незначно, причому для цього охолодження намагаються виконувати якнайшвидше.

До визначальних параметрів процесу належать середньооб'ємні температури початку  $t_{v\,поч}$  і кінця  $t_{v\,кін}$  процесу, °С, які розраховуються за формулою Г. Б. Чижова:

$$t_{v\,поч} = t_{поч} - \frac{Bi}{Bi + n} \cdot \psi \cdot (t_{поч} - t_c), \quad (5.1 \text{ а})$$

$$t_{v\,кін} = t_{кін} - \frac{Bi}{Bi + n} \cdot \psi \cdot (t_{кін} - t_c), \quad (5.1 \text{ б})$$

де  $n$  – коефіцієнт, що враховує тип середовища, в якому відбувається охолодження; для повітря  $n = 2$ , для рідини  $n = 3$ ;

$\psi$  – коефіцієнт форми; для пластини  $\psi = \frac{1}{n+1}$ , для

циліндра  $\psi = \frac{2}{n+2}$ , для кулі  $\psi = \frac{3}{n+3}$ ;

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{np}} - \text{критерій Біо,}$$

де  $\lambda_{np}$  – коефіцієнт теплопровідності продукту за додатних температур.

Визначальний розмір  $l$ , що входить до критерію Біо, вибирають залежно від форми продукту та рівномірності відведення тепла від поверхні продукту. Зазвичай тепло відводиться рівномірно, тому за визначальний розмір для пластини беруть половину її товщини  $l = \delta/2$ , для циліндра і кулі – радіус  $l = r = d/2$ . До форми пластини відносять напівтуші яловичини, свинини, баранини, – до циліндричної форми – туші птиці, рибу.

Середній коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  або задають як середню емпіричну величину, або обчислюють використовуючи теорію теплової подібності за стаціонарного режиму тепловіддачі. Докладнішу інформацію стосовно розрахунку коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  при охолодженні можна знайти в [1, підрозділ 7.6.2].

За середньооб'ємними температурами  $t_{v\text{пoch}}$  і  $t_{v\text{кін}}$  визначають питомі ентальпії харчового продукту,  $h_{\text{пoch}}$  та  $h_{\text{кін}}$ ,  $\text{кДж} / \text{кг}$ , наприклад, із додатка В.

Теплове навантаження в процесі охолодження,  $\text{кДж}$ ,

$$Q = M \cdot (h_{\text{пoch}} - h_{\text{кін}}), \quad (5.2)$$

де  $M$  – маса продукту,  $\text{кг}$ .

Під час розрахунків тривалості  $\tau$ ,  $c$ , процесу охолодження зазвичай використовують графоаналітичний метод, алгоритм якого поданий нижче:

1) визначається відносна надлишкова температура

$$\theta = \frac{t_{kin} - t_c}{t_{noc} - t_c};$$

2) визначається критерій Біо:  $Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{np}};$

3) за номограмами для певної геометричної форми тіла за  $Bi$  і  $\theta$  визначається критерій Фур'є  $Fo$  (див. додаток Г);

4) тривалість охолодження від  $t_{noc}$  до  $t_{kin}$  дорівнює

$$\tau = 1,2 \cdot \frac{Fo \cdot l^2}{a},$$

де 1,2 – коефіцієнт, що враховує тривалість нерегулярного режиму теплообміну;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності харчового продукту.

Під час розрахунку величини всихання вважають, що на поверхні харчового продукту водяна пара перебуває в стані насичення.

Відносно величину всихання під час охолодження знаходять використовуючи формулу

$$\Delta M = \frac{\alpha_6}{M \cdot r_n} \cdot \left[ \frac{h_{np} - h_c}{c_p} - (t_{np} - t_c) \right] \cdot F \cdot \tau, \quad (5.3)$$

де  $r_n$  – питома теплота пароутворення води, для заданого тиску  $r_n = 2260 \text{ кДж} / \text{кг}$ ;

$c_p$  – питома теплоємність повітря за температури  $t_c$  (див. додаток Д); для приблизних розрахунків задають  $c_p = 1 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$F$  – площа поверхні охолоджуваного тіла,  $\text{м}^2$ ;

$(h_{np} - h_c)$  – різниця питомих ентальпій повітря на поверхні продукту й в оточуючому середовищі;

$\alpha_e$  – середній коефіцієнт тепловіддачі від поверхні харчового продукту до охолоджувального середовища, який для незапакованих продуктів при осереднених режимних параметрах процесу допускається задавати таким, що дорівнює  $\alpha_e = 1,5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Величину всихання розраховують виключно для незапакованих продуктів.

Площу поверхні  $F$ ,  $\text{м}^2$ , для різних харчових продуктів знаходять, використовують залежності:

- яловичина в напівтушах  $F = 0,017 \cdot M_1 + 2,15$ ;
- свиняча напівтуша  $F = 0,0125 \cdot M_1$ ;
- напівтуша вівці  $F = 0,035 \cdot M_1 + 0,65$ ;
- тушка птиці  $F = 0,0016 \cdot M_1 + 0,004$ ;
- риба  $F = 0,005 \cdot M_1^{0,667}$ ,

де  $M_1$  – маса одиниці продукту (напівтуша, туша), яку знаходять через загальну кількість продуктів  $n$ :  $M_1 = M/n$ .

Питомі ентальпії вологого повітря за температури на поверхні продукту  $h_{np}$  і в оточуючому середовищі  $h_c$  визначають за формулами для двофазного середовища за

тепловій рівновазі фаз (наведені нижче) або використовуючи  $h, d$ -діаграму вологого продукту (див. додаток Ж). Останній спосіб є значно менш точним і може бути використаний виключно для оцінних розрахунків.

Питома ентальпія вологого повітря,  $\text{кДж/кг}$ ,

$$h = (1,01 + 1,97 \cdot d) \cdot t + 2493 \cdot d. \quad (5.4)$$

Парціальний тиск водяної пари в стані насичення,  $\text{кПа}$ ,

$$p_s = 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot t). \quad (5.5)$$

Остання формула справедлива за  $-20,3 \leq t \leq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Вологовміст повітря,  $\text{кг/кг}$ ,

$$d = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{p_{\text{атм}} - \varphi \cdot p_s}, \quad (5.6)$$

де  $p_{\text{атм}}$ ,  $\text{кПа}$  – атмосферний тиск;  $\varphi$  – відносна вологість повітря.

Необхідну питому холодопродуктивність,  $\text{кВт}$ , холодильної машини визначають за формулою

$$\dot{Q}_0 = \frac{Q}{\tau}. \quad (5.7)$$

## ЗМІСТ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ

Виконання завдання полягає в розв'язуванні задачі, умова якої наведена нижче.

Для процесу охолодження харчового продукту в середовищі визначити середньооб'ємну початкову  $t_{v\text{ поч}}, ^\circ\text{C}$ , і кінцеву  $t_{v\text{ кін}}, ^\circ\text{C}$ , температуру продукту, тривалість процесу  $\tau$ , год, і необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0$ , Вт. Загальна маса продукту  $M$ , кг, загальна кількість продуктів  $n = 10$  шт., середня температура охолоджувального середовища  $t_c, ^\circ\text{C}$ , початкова температура продукту  $t_{\text{поч}}, ^\circ\text{C}$ , кінцева –  $t_{\text{кін}}, ^\circ\text{C}$ . Визначити також величину всихання під час охолодження і кількість вологи, яку відбирають від продукту в процесі.

Атмосферний тиск у камері охолодження  $p_{\text{атм}} = 750$  мм рт. ст.

Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні продукту до охолоджувального середовища (повітря)  $\alpha = 40$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Умовний коефіцієнт тепловіддачі випаровуванням від поверхні неупакованого продукту брати  $\alpha_{\text{в}} = 1,5$  Вт/(м<sup>2</sup> · К), теплоємність повітря  $c_p = 1$  кДж/(кг · К).

За вихідні дані беруть:

- продукт;
- охолоджувальне середовище;
- загальну масу продукту  $M$ , кг;
- середню температуру охолоджувального середовища  $t_c, ^\circ\text{C}$ ;

- відносну вологість повітря в холодильній камері  $\varphi_c$ ;
  - початкову температуру продукту  $t_{поч}$ , °C,
  - кінцеву температуру продукту  $t_{кін}$ , °C.
  - розмір продукту  $\delta$ , м.
- У результаті виконання практичного завдання необхідно розрахувати:
- середньооб'ємну початкову температуру продукту  $t_{vпоч}$ , °C;
  - середньооб'ємну кінцеву температуру продукту  $t_{vкін}$ , °C;
  - тривалість процесу  $\tau$ , год;
  - необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0$ , Вт;
  - всихання під час охолодження  $\Delta M$ ;
  - кількість вологи, яку відбирають від продукту в процесі  $M_{всих}$ , кг.

У разі відсутності додаткових рекомендацій викладача вихідні дані для виконання практичного завдання беруть згідно з даними, наведеними в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані

Перед-остання цифра шифру	Продукт	$M$ , кг	Охолоджувальне середовище	Остання цифра шифру	$t_c$ , °C	$\varphi_c$	$t_{кін}$ , °C	$t_{поч}$ , °C	$\delta$ , м
1	Яловичина (напівтуші)	1 500	Повітря	1	-5	0,98	1	33	0,2
2	Баранина (напівтуші)	1 300	Вода	2	-7	0,97	2	30	0,1



### Продовження таблиці 5.1

Перед-остання цифра шифру	Продукт	$M$ , кг	Охолоджувальне середовище	Остання цифра шифру	$t_c$ , °C	$\varphi_c$	$t_{кін}$ , °C	$t_{поч}$ , °C	$\delta$ , м
3	Свинина (напівтуші)	1 000	Повітря	3	-9	0,96	3	35	0,15
4	Птиця (тушка)	700	Вода	4	-10	0,95	4	25	0,12
5	Риба	400	Повітря	5	-12	0,94	5	20	0,03
6	Яловичина (напівтуші)	2 500	Вода	6	-11	0,93	4	15	0,2
7	Баранина (напівтуші)	2 000	Повітря	7	-8	0,92	3	32	0,1
8	Свинина (напівтуші)	1 800	Вода	8	-6	0,91	2	28	0,15
9	Птиця (тушка)	1 200	Повітря	9	-4	0,9	1	22	0,12
0	Риба	800	Вода	0	0	0,89	6	35	0,03

### ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Для процесу охолодження харчового продукту (яловичина) у середовищі (повітря) визначити середньооб'ємну початкову  $t_{v\text{ поч}}$ , °C, і кінцеву  $t_{v\text{ кін}}$ , °C, температуру продукту, тривалість процесу  $\tau$ , год, і необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0$ , Вт. Загальна маса продукту  $M = 500$  кг, загальна кількість продуктів  $n = 10$  шт., середня температура охолоджуючого середовища  $t_c = -5$  °C, початкова температура продукту  $t_{\text{поч}} = 30$  °C, кінцева –  $t_{\text{кін}} = 3$  °C. Визначити також величину всихання під час охолодження і кількість вологи, яку відбирають від продукту в процесі.

Атмосферний тиск у камері охолодження  $p_{\text{атм}} = 750$  мм рт. ст.

Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні продукту до охолоджувального середовища (повітря)  $\alpha = 40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Умовний коефіцієнт тепловіддачі випаровуванням від поверхні неупакованого продукту брати  $\alpha_{\text{в}} = 1,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , теплоємність повітря  $c_p = 1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Для яловичини у напівтушах вважати форму за пластину з характерним розміром  $l = \delta/2 = 0,1 \text{ м}$ .

Питомі ентальпії вологого повітря за температури на поверхні продукту  $h_{\text{пр}}$  і в оточуючому середовищі  $h_c$  визначають за формулами для двофазного середовища за теплової рівноваги фаз. Відносна вологість повітря в холодильній камері  $\varphi_c = 0,93$ .

Під час розрахунку величини всихання вважати, що на поверхні харчового продукту водяна пара перебуває у стані насичення, адже вологість повітря в холодильній камері забезпечується форсунками, які розпиляють вологу.

Площу поверхні харчового продукту (яловичина у напівтушах) визначають за емпіричною формулою:  $F = 0,017 \cdot M_1 + 2,15, \text{ м}^2$ , де  $M_1$  – маса одиниці продукту (напівтуша), яку обчислюють через загальну кількість продуктів  $n$ :  $M_1 = M/n$ .

## РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Користуючись емпіричними залежностями для вибраного харчового продукту (яловичина) обчислимо за додатних температур:

– густину

$$\begin{aligned}\rho &= \rho'' + k_{\rho} \cdot (W - W'') = 1005 + 208,3 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 1005 + 208,3 \cdot (0,75 - 0,5) = 1057 \text{ кг} / \text{м}^3;\end{aligned}$$

– розрахункову питому теплоємність

$$\begin{aligned}c &= c_2 = c_2'' + k_{c_2} \cdot (W - W'') = 2093,4 + 4186,8 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 2093,4 + 4186,8 \cdot (0,75 - 0,5) = 3140 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К});\end{aligned}$$

– теплопровідність

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_2 = \lambda_2'' + k_{\lambda_2} \cdot (W - W'') = 0,29 + 0,604 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 0,29 + 0,604 \cdot (0,75 - 0,5) = 0,441 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}).\end{aligned}$$

Коефіцієнти температуропровідності продукту за додатної температури

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{0,441}{1057 \cdot 3140} = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Критерій Біо

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \frac{40 \cdot 0,1}{0,441} = 9,07.$$

Початкову і кінцеву середньооб'ємні температури можна визначити за формулою Г. Б. Чижова:

$$t_{v\text{ноч}} = t_{\text{ноч}} - \frac{\text{Bi}}{\text{Bi} + n} \cdot \psi \cdot (t_{\text{ноч}} - t_c) =$$

$$= 30 - \frac{9,07}{9,07 + 2} \cdot \frac{1}{3} \cdot (30 - (-5)) = 20,4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t_{v\text{кин}} = t_{\text{кин}} - \frac{\text{Bi}}{\text{Bi} + n} \cdot \psi \cdot (t_{\text{кин}} - t_c) = 3 - \frac{9,07}{9,07 + 2} \cdot \frac{1}{3} \cdot (3 - (-5)) = 0,8 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де  $n$  – коефіцієнт, що враховує тип середовища, в якому відбувається охолодження, для повітря  $n = 2$ ;

$\psi$  – коефіцієнт форми, для пластини

$$\psi = \frac{1}{n+1} = \frac{1}{2+1} = \frac{1}{3}.$$

Тривалість процесу  $\tau$  охолодження визначаємо використовуючи номограму для центра плоскої пластини (рис. Г.1).

Спочатку визначаємо відносну надлишкову температуру продукту в процесі:

$$\theta = \frac{t_{\text{кин}} - t_c}{t_{\text{ноч}} - t_c} = \frac{3 - (-5)}{30 - (-5)} = 0,23.$$

За відомими значеннями  $\theta = 0,23$  і  $\text{Bi} = 9,07$  знаходимо критерій Фур'є:

$$\text{Fo} = 0,8.$$

Тривалість процесу охолодження з урахуванням нерегулярної його частини становитиме

$$\tau = 1,2 \cdot \frac{Fo \cdot l^2}{a} = 1,2 \cdot \frac{0,8 \cdot 0,1^2}{1,33 \cdot 10^{-7}} = 72180 \text{ с} = 20,05 \text{ год}.$$

Визначаємо табличні значення питомих теплоємностей продукту (яловичина) для розрахованих значень початкової і кінцевої середньооб'ємних температур (додаток В):

- а) за  $t_{\text{поч}} = 20,4 \text{ }^\circ\text{C}$   $h_{\text{поч}} = 298,0 \text{ кДж/кг}$ ;  
б) за  $t_{\text{кін}} = 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$   $h_{\text{кін}} = 234,8 \text{ кДж/кг}$ .

Теплове навантаження в процесі охолодження

$$Q = M \cdot (h_{\text{поч}} - h_{\text{кін}}) = 500 \cdot (298 - 234,8) = 31600 \text{ кДж}.$$

Необхідна питома холодопродуктивність холодильної машини

$$\dot{Q}_0 = \frac{Q}{\tau} = \frac{31600}{72180} = 0,438 \text{ кВт}.$$

Визначаємо величину всихання під час охолодження, використовуючи формулу

$$\Delta M = \frac{\alpha_s}{M \cdot r_n} \cdot \left[ \frac{h_{np} - h_c}{c_p} - (t_{np} - t_c) \right] \cdot F \cdot \tau,$$

де  $r_n$  – питома теплота пароутворення води, для заданого тиску  $r_n = 2260 \text{ кДж} / \text{кг}$  ;

$c_p$  – теплоємність повітря;

$F$  – площа поверхні охолоджуваного тіла,  $\text{м}^2$  ;

$(h_{np} - h_c)$  – різниця питомих ентальпій повітря на поверхні продукту та в оточуючому середовищі;

$\alpha_6$  – середній коефіцієнт тепловіддачі від поверхні харчового продукту до охолоджувального середовища.

Розраховуємо невідомі величини:

– площу поверхні охолоджуваного тіла

$$F = [0,017 \cdot M_1 + 2,15] \cdot n = \left[ 0,017 \cdot \frac{M}{n} + 2,15 \right] \cdot n = \\ = 0,017 \cdot M + 2,15 \cdot n = 0,017 \cdot 500 + 2,15 \cdot 10 = 30 \text{ м}^2;$$

– температуру повітря на поверхні продукту

$$t_{np} = t_{kin} = 3 \text{ }^\circ\text{C} ;$$

– питоми ентальпії вологого повітря визначаємо аналітично; для цього обчислюємо парціальний тиск водяної пари в стані насичення, використовуючи апроксимаційну залежність  $p_s = 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot t)$

(формула справедлива за  $-20,3 \leq t \leq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ ) за температури  
 $t_{np} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$$p_{snp} = 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot t_{np}) = 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot 3) = 0,728 \text{ кПа} ;$$

– вологовміст повітря становитиме

$$d_{np} = 0,622 \cdot \frac{\varphi_{np} \cdot p_{snp}}{p_{атм} - \varphi_{np} \cdot p_{snp}} = 0,622 \cdot \frac{1 \cdot 0,728}{99,99 - 1 \cdot 0,728} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг / кг} ,$$

де  $p_{атм} = 750 \cdot 133,32 / 1000 = 99,99 \text{ кПа}$  – атмосферний тиск;

$$\begin{aligned} h_{np} &= (1,01 + 1,97 \cdot d_{np}) \cdot t_{np} + 2493 \cdot d_{np} = \\ &= (1,01 + 1,97 \cdot 4,6 \cdot 10^{-3}) \cdot 3 + 2493 \cdot 4,6 \cdot 10^{-3} = 14,5 \text{ кДж / кг} . \end{aligned}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки для визначення питомої ентальпії вологого повітря за параметрів у камері:

$$p_{sc} = 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot t_c) = 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot (-5)) = 0,382 \text{ кПа} ;$$

$$\begin{aligned} d_c &= 0,622 \cdot \frac{\varphi_c \cdot p_{sc}}{p_{атм} - \varphi_c \cdot p_{sc}} = \\ &= 0,622 \cdot \frac{0,93 \cdot 0,382}{99,99 - 0,93 \cdot 0,382} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг / кг} , \end{aligned}$$

$$h_c = (1,01 + 1,97 \cdot d_c) \cdot t_c + 2493 \cdot d_c =$$

$$= (1,01 + 1,97 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3}) \cdot (-5) + 2493 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} = 0,5 \text{ кДж / кг.}$$

Тоді

$$\Delta M = \frac{1,5}{500 \cdot 2260 \cdot 10^3} \cdot \left[ \frac{14,5 - 0,5}{1,0} - (3 - (-5)) \right] \cdot 30 \cdot 72180 = 0,0172,$$

або 1,72 %.

Кількість вологи, яку відбирають від продукту в процесі усихання,

$$M_{\text{всих}} = M \cdot \Delta M = 500 \cdot 0,0172 = 8,6 \text{ кг.}$$



## 6 ПІДМОРОЖУВАННЯ

Перед виконанням практичного завдання необхідно ознайомитися з докладними теоретичними відомостями, викладеними в [1].

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Підморожування (переохолодження) – процес зниження температури харчового продукту від початкового до кінцевого значення, яке не нижче ніж  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  на глибині  $1\text{ см}$  від поверхні та  $0-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  у товщі харчового продукту, а товщина підмороженого шару не повинна перевищувати  $25\text{ мм}$ . Цей процес застосовують для холодильного оброблення м'яса, лосося, готових м'ясних страв тощо. Він дозволяє збільшити тривалість зберігання харчового продукту порівняно з охолодженням (м'яса – вдвічі), збільшити щільність укладання харчового продукту під час зберігання і транспортування.

Основним завданням розрахунку процесу підморожування є визначення товщини замороженого та неза замороженого шарів продукту, необхідних для розрахунку тривалості процесу.

Отже, алгоритм розрахунку такий:

1) припускають, що завершенням процесу підморожування є досягнення продуктом середньооб'ємної температури  $t_{\text{в}},\text{ }^{\circ}\text{C}$ , та визначають температуру в термічному центрі тіла:

$$t_u = \frac{t_{vl} - \frac{Bi \cdot \psi}{Bi + n} \cdot t_c}{1 - \frac{Bi \cdot \psi}{Bi + n}},$$

де  $Bi$  – критерій Біо, який обчислюють аналогічно до алгоритму, наведеному в розділі 5;

$n$  – коефіцієнт, що враховує тип середовища, в якому відбувається охолодження, для повітря  $n=2$ , для рідини  $n=3$ ;

$\psi$  – коефіцієнт форми, для пластини  $\psi = \frac{1}{n+1}$ , для циліндра  $\psi = \frac{2}{n+2}$ , для кулі  $\psi = \frac{3}{n+3}$ ;

$t_c$  – середня температура середовища;

2) розраховують температуру повітря біля поверхні продукту,  $^{\circ}C$ :

$$t_n = \frac{t_{vl} - t_u \cdot (1 - \psi)}{\psi};$$

3) обчислюють кінцеву температуру підморожування,  $^{\circ}C$ :

$$t_{кин} \cong t_n + 1 \text{ } ^{\circ}C;$$

4) визначають початкову середньооб'ємну температуру продукту,  $^{\circ}C$ :

$$t_{v \text{ поч}} = t_{поч} - \frac{Bi}{Bi + n} \cdot \psi \cdot (t_{поч} - t_c);$$

5) визначають кінцеву середньооб'ємну температуру продукту, °C :

$$t_{v\text{кін}} = t_{\text{кін}} - \frac{B_i}{B_i + n} \cdot \psi \cdot (t_{\text{кін}} - t_c);$$

б) розраховують середньооб'ємну температуру незамороженого шару продукту, °C :

$$t_{vy} = t_u - \psi \cdot (t_u - t_{kp});$$

7) визначають середньооб'ємну температуру замороженого шару продукту, °C :

$$t_{vx} = t_{kp} - \psi \cdot (t_{kp} - t_n),$$

де  $t_{kp}$  – кріоскопічна температура продукту (див. табл. 3.1);

8) використовуючи довідкові табличні дані з ентальпій продуктів (додаток В), обчислюють для заданого харчового продукту за відповідних температур, розрахованих вище, значення питомих ентальпій:

а) за  $t_{vy}$ , °C,  $h_y$ , кДж / кг ;

б) за  $t_{vx}$ , °C,  $h_x$ , кДж / кг ;

в) за  $t_{v\text{поч}}$ , °C,  $h_{\text{поч}}$ , кДж / кг ;

г) за  $t_{v\text{кін}}$ , °C,  $h_{\text{кін}}$ , кДж / кг ;

д) за  $t_{vl}$ , °C,  $h_l$ , кДж / кг ;

9) визначають товщину незамороженого шару, м :

$$y = \frac{h_l - h_x}{h_y - h_x} \cdot l;$$

10) визначають товщину замороженого шару,  $m$ :

$$x = l - y.$$

Тривалість процесу підморожування,  $s$ , розраховують за формулою

$$\tau = \frac{(h_{ноч} - h_l) \cdot \rho}{t_{кр} - t_c} \cdot x \cdot \left( \frac{x}{2 \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha} \right). \quad (6.1)$$

Кількість тепла,  $кДж$ , що відводиться в процесі підморожування, обчислюють за формулою

$$Q = M \cdot (h_{ноч} - h_{кин}). \quad (6.2)$$

Необхідна холодопродуктивність,  $кВт$ , для реалізації процесу може бути визначена з виразу

$$\dot{Q}_0 = \frac{Q}{\tau}. \quad (6.3)$$

## ЗМІСТ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ

Виконання завдання полягає в розв'язуванні задачі, умова якої наведена нижче.

Для процесу підморожування харчового продукту в повітряному середовищі обчислити середньооб'ємну початкову  $t_{v\text{ поч}}, ^\circ\text{C}$ , і кінцеву  $t_{v\text{ кін}}, ^\circ\text{C}$ , температури продукту, глибину не замороженого у і замороженого х шару, тривалість процесу  $\tau$ , год, і необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0$ , Вт. Загальна маса продукту  $M$ , кг, середня температура охолоджувального середовища  $t_c$ ,  $^\circ\text{C}$ , початкова температура продукту  $t_{\text{поч}}$ ,  $^\circ\text{C}$ , кінцева температура  $t_{\text{кін}}$ ,  $^\circ\text{C}$ , вища на  $1\text{ }^\circ\text{C}$  від температури повітря біля поверхні продукту, коефіцієнт тепловіддачі від охолоджувального середовища до поверхні продукту  $\alpha$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , розмір продукту,  $\delta$ , м.

Середньооб'ємна температура продукту в кінці процесу підморожування  $t_{vl}$ ,  $^\circ\text{C}$ .

За вихідні дані беруть:

- продукт;
- загальну масу продукту,  $M$ , кг;
- середню температуру охолоджувального середовища,  $t_c$ ,  $^\circ\text{C}$ ;
- початкову температуру продукту,  $t_{\text{поч}}$ ,  $^\circ\text{C}$ ;
- розмір продукту,  $\delta$ , м;
- коефіцієнт тепловіддачі від охолоджувального середовища до поверхні продукту  $\alpha$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
- середньооб'ємну температуру продукту у кінці процесу підморожування  $t_{vl}$ ,  $^\circ\text{C}$ .

У результаті виконання практичного завдання необхідно розрахувати:

- середньооб'ємну початкову температуру продукту  $t_{v\text{ поч}}, ^\circ\text{C}$ ;

- середньооб’ємну кінцеву температуру продукту  $t_{v \text{ кін}}, \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- глибину незамороженого шару  $y, \text{ м}$ ;
- глибину замороженого шару  $x, \text{ м}$ ;
- тривалість процесу  $\tau, \text{ год}$ ;
- необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0, \text{ Вт}$ .

У разі відсутності додаткових рекомендацій викладача вихідні дані для виконання практичного завдання беруть згідно з даними, наведеними в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані

Перед-остання цифра шифру	Продукт	$M, \text{ кг}$	$t_c, \text{ }^\circ\text{C}$	Остання цифра шифру	$t_{\text{поч}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\delta, \text{ м}$	$\frac{\alpha, \text{ Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$t_{\text{в}}, \text{ }^\circ\text{C}$
1	Яловичина (напівтуші)	1500	-10	1	3	0,2	10	-2,0
2	Баранина (напівтуші)	1300	-12	2	2	0,1	15	-2,5
3	Свинина (напівтуші)	1000	-14	3	4	0,15	20	-3,0
4	Птиця (тушка)	700	-16	4	5	0,12	25	-3,5
5	Риба	400	-18	5	6	0,03	30	-1,5
6	Яловичина (напівтуші)	2500	-20	6	7	0,2	25	-2,0
7	Баранина (напівтуші)	2000	-15	7	8	0,1	20	-2,5
8	Свинина (напівтуші)	1800	-10	8	9	0,15	15	-3,0
9	Птиця (тушка)	1200	-8	9	10	0,12	10	-3,5
0	Риба	800	-6	0	12	0,03	5	-1,0

## ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Для процесу підморожування харчового продукту (яловичина) в повітряному середовищі обчислити середньооб'ємну початкову  $t_{v\text{ поч}}, \text{ }^\circ\text{C}$ , і кінцеву  $t_{v\text{ кін}}, \text{ }^\circ\text{C}$ , температури продукту, глибину незамороженого у та замороженого  $x$  шару, тривалість процесу  $\tau$ , год, і необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0$ , Вт. Загальна маса продукту  $M = 500 \text{ кг}$ , середня температура охолоджувального середовища  $t_c = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ , початкова температура продукту  $t_{\text{поч}} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ , кінцева температура  $t_{\text{кін}}, \text{ }^\circ\text{C}$ , вища на  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  від температури повітря біля поверхні продукту. Коефіцієнт тепловіддачі від охолоджувального середовища до поверхні продукту  $\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Розмір продукту для пластини (яловичина в напівтушах) – товщина  $\delta = 0,2 \text{ м}$ .

Середньооб'ємна температура продукту в кінці процесу підморожування  $t_{vl} = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Для яловичини в напівтушах вважаємо її форму за пластину з характерним розміром  $l = \delta/2 = 0,1 \text{ м}$ .

Користуючись емпіричними залежностями, наведеними у [1], для обраного харчового продукту (яловичина) обчислимо за додатних температур:

– густину:

$$\begin{aligned}\rho &= \rho^n + k_\rho \cdot (W - W^n) = 1005 + 208,3 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 1005 + 208,3 \cdot (0,75 - 0,5) = 1057 \text{ кг} / \text{м}^3;\end{aligned}$$

– розрахункову питому теплоємність:

$$\begin{aligned}c &= c_2 = c_2^H + k_{c_2} \cdot (W - W^H) = 2093,4 + 4186,8 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 2093,4 + 4186,8 \cdot (0,75 - 0,5) = 3140 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K});\end{aligned}$$

– теплопровідність:

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_2 = \lambda_2^H + k_{\lambda_2} \cdot (W - W^H) = 0,29 + 0,604 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 0,29 + 0,604 \cdot (0,75 - 0,5) = 0,441 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{K}).\end{aligned}$$

Коефіцієнт температуропровідності продукту за додатної температури

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{0,441}{1057 \cdot 3140} = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Критерій Біо

$$\text{Bi} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \frac{25 \cdot 0,1}{0,441} = 5,67.$$

Початкову середньооб'ємну температуру можна визначити за формулою Г. Б. Чижова:

$$t_{v \text{ ноч}} = t_{\text{ноч}} - \frac{\text{Bi}}{\text{Bi} + n} \cdot \psi \cdot (t_{\text{ноч}} - t_c) = 3 - \frac{5,67}{5,67 + 2} \cdot \frac{1}{3} \cdot (3 - (-10)) = -0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$



де  $n$  – коефіцієнт, що враховує тип середовища, в якому відбувається охолодження, для повітря  $n = 2$ ;

$\psi$  – коефіцієнт форми, для пластини

$$\psi = \frac{1}{n+1} = \frac{1}{2+1} = \frac{1}{3}.$$

Задаючись, що завершенням процесу підморожування є досягнення продуктом середньооб'ємної температури  $t_{vl} = -3^\circ\text{C}$ , визначаємо температуру в термічному центрі тіла:

$$t_u = \frac{t_{vl} - \frac{Bi \cdot \psi}{Bi+n} \cdot t_c}{1 - \frac{Bi \cdot \psi}{Bi+n}} = \frac{-3 - \frac{5,67 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)}{5,67+2} \cdot (-10)}{1 - \frac{5,67 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)}{5,67+2}} = -0,71^\circ\text{C}.$$

Температура повітря біля поверхні продукту

$$t_n = \frac{t_{vl} - t_u \cdot (1-\psi)}{\psi} = \frac{-3 - (-0,71) \cdot \left(1 - \frac{1}{3}\right)}{\left(\frac{1}{3}\right)} = -7,6^\circ\text{C}.$$

Кінцева температура підморожування

$$t_{кин} = t_n + 1^\circ\text{C} = -7,6 + 1 = -6,6^\circ\text{C}.$$

Кінцева середньооб'ємна температура продукту

$$t_{vkin} = t_{kin} - \frac{Bi}{Bi + n} \cdot \psi \cdot (t_{kin} - t_c) =$$

$$= -6,6 - \frac{5,67}{5,67 + 2} \cdot \frac{1}{3} \cdot (-6,6 - (-10)) = -7,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середньооб'ємна температура незамороженого шару продукту

$$t_{vy} = t_u - \psi \cdot (t_u - t_{kp}) = -0,71 - \frac{1}{3} \cdot (-0,71 - (-1,0)) = -0,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середньооб'ємна температура замороженого шару продукту

$$t_{vx} = t_{kp} - \psi \cdot (t_{kp} - t_n) = -1 - \frac{1}{3} \cdot (-1 - (-7,6)) = -3,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де  $t_{kp}$  – криоскопічна температура продукту, для яловичини  $t_{kp} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Використовуючи довідкові табличні дані з ентальпій продуктів (додаток В), визначаємо для яловичини:

- а) за  $t_{vy} = -0,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $h_y = 194,8 \text{ кДж / кг}$ ;
- б) за  $t_{vx} = -3,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $h_x = 73,5 \text{ кДж / кг}$ ;
- в) за  $t_{vnoch} = -0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $h_{noch} = 222,9 \text{ кДж / кг}$ ;
- г) за  $t_{vkin} = -7,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $h_{kin} = 43,0 \text{ кДж / кг}$ ;
- д) при  $t_{vl} = -3 \text{ } ^\circ\text{C}$   $h_l = 75,3 \text{ кДж / кг}$ .

Товщина незамороженого шару

$$y = \frac{h_l - h_x}{h_y - h_x} \cdot l = \frac{75,3 - 73,5}{194,8 - 73,5} \cdot 0,1 = 0,0015 \text{ м} = 1,5 \text{ мм}.$$

Товщина замороженого шару

$$x = l - y = 0,1 - 0,0015 = 0,0985 \text{ м}.$$

Тривалість процесу підморожування

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{(h_{\text{ноч}} - h_l) \cdot \rho}{t_{\text{кр}} - t_c} \cdot x \cdot \left( \frac{x}{2 \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) = \\ &= \frac{(222,9 - 75,3) \cdot 10^3 \cdot 1057}{-1 - (-10)} \cdot 0,0985 \cdot \left( \frac{0,0985}{2 \cdot 0,441} + \frac{1}{25} \right) = \\ &= 258987 \text{ с} = 71,9 \text{ год}. \end{aligned}$$

Кількість тепла, що відводиться у процесі підморожування

$$Q = M \cdot (h_{\text{ноч}} - h_{\text{кін}}) = 500 \cdot (222,9 - 43) = 89950 \text{ кДж}.$$

Необхідна холодопродуктивність для реалізації процесу

$$\dot{Q}_0 = \frac{Q}{\tau} = \frac{89950}{258987} = 0,347 \text{ кВт}.$$

## 7 ЗАМОРОЖУВАННЯ

Перед виконанням практичного завдання необхідно ознайомитися з докладними теоретичними відомостями, викладеними в [1].

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Заморожування – процес зменшення температури харчового продукту від початкового до кінцевого значення, яке нижче за криоскопічну температуру ( $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  і нижче). Термін зберігання замороженого харчового продукту зростає до багатьох місяців (інколи 1 рік і більше), але властивості харчового продукту помітно погіршуються.

Для розрахунку початкової і кінцевої середньооб'ємних температур використовують формулу Г. Б. Чижова (див. формули (1.1 а) та (1.1 б)).

До складу формули Г. Б. Чижова входить критерій Біо  $B_i$ , який знаходять за формулою

$$B_i = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{np}}, \quad (7.1)$$

де  $\lambda_{np}$  – коефіцієнт теплопровідності продукту,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , за від'ємних температур, який можна обчислити за емпіричною залежністю виду

$$\lambda_{np} = 0,58 + 1,917 \cdot (W - 0,5), \quad (7.2)$$

де  $W$  – вологовміст продукту, що визначається з таблиці 3.1.

До складу критерію Біо входить визначальний розмір  $l$ ,  $m$ , який обирають залежно від форми продукту та рівномірності відведення тепла від поверхні продукту. Зазвичай тепло відводиться рівномірно, тому як визначальний розмір для пластини беруть половину її товщини  $l = \delta / 2$ , для циліндра і кулі – радіус  $l = r = d / 2$ . До форми пластини відносять напівтуші яловичини, свинини, баранини, до циліндричної форми відносять – туші птиці, рибу.

Середній коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  або задають як середню емпіричну величину, або знаходять, використовуючи теорію теплової подібності за стаціонарного режиму тепловіддачі. Докладнішу інформацію стосовно розрахунку коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  та режими руху охолоджувального середовища під час заморожування можна знайти у [1, розділ 7.6.3].

Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі за відомою температурою навколишнього середовища та його складом визначають теплофізичні властивості, наприклад, із додатка Д для повітря або додатка Е для води, а саме:

- коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu_c$ ,  $m^2 / c$ ;
- коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_c$ ,  $Вт / (м \cdot К)$ ;
- критерій Прандтля  $Pr_c$ .

У разі використання довідкових даних теплофізичних властивостей харчових продуктів, складених у табличній формі, їх визначають за величиною середньологарифмічної температури продукту:

$$t_{сеп} = \frac{t_{вкін} - t_{кр}}{\ln \left( \frac{t_{вкін}}{t_{кр}} \right)}. \quad (7.3)$$

За відсутності значень критерію Прандтля або в разі використання газоподібних середовищ із тиском, що значно відрізняється від атмосферного, його можна розрахувати за формулою

$$Pr_c = \frac{v_c}{a_c} = \frac{\mu_c \cdot c_c}{\lambda_c} \quad (7.4)$$

де  $\mu_c$  – коефіцієнт динамічної в'язкості,  $Па \cdot с$ ;

$c_c$  – питома теплоємність,  $Дж / (кг \cdot К)$ ;

$a_c$  – коефіцієнт температуропровідності середовища,  $м^2 / с$ .

Далі, задаючись величиною середньої швидкості руху середовища біля поверхні харчового продукту, визначають режим руху. Для цього знаходять критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_c \cdot l}{v_c}. \quad (7.5 \text{ а})$$

У разі використання газоподібних середовищ із тиском, що значно відрізняється від атмосферного, або модифікованих середовищ [1], критерій Рейнольдса обчислюють за формулою

$$\text{Re} = \frac{w_c \cdot l \cdot \rho_c}{\mu_c}, \quad (7.5 \text{ б})$$

де густину середовища  $\rho_c$ ,  $\text{кг} / \text{м}^3$ , знаходять за рівнянням стану ідеального газу:

$$\rho_c = \frac{p_c}{R_c \cdot T_c}. \quad (7.6)$$

Тут  $p_c$  – абсолютний тиск середовища,  $\text{Па}$ ;  $R_c$  – газова стала середовища,  $\text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $T_c$  – абсолютна температура середовища,  $\text{К}$ .

Залежно від одержаної величини  $\text{Re}$  вибирають критеріальне рівняння для ламінарного або турбулентного режиму руху. Однак на практиці зазвичай реалізується виключно турбулентний режим руху через великі швидкості руху середовища. Тоді вибір виду критеріального рівняння визначається виключно формою продукту. Найчастіше на практиці заморожують продукти, форма поверхні яких наближається до плоскої. Для цього випадку може бути використане критеріальне рівняння

$$\text{Nu} = 0,037 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}_c^{0,43} \cdot \left( \frac{\text{Pr}_c}{\text{Pr}_n} \right)^{0,25}, \quad (7.7)$$

де  $\text{Pr}_n$  – критерій Прандтля охолоджувального середовища за температури поверхні продукту, яку задають як

$$t_n \cong t_{kin} + 1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

У разі використання як середовища повітря можна використовувати спрощене критеріальне рівняння

$$\text{Nu} = 0,032 \cdot \text{Re}^{0,8}. \quad (7.8)$$

Середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі  $\alpha_\kappa$ ,  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , обчислюють за формулою

$$\alpha_\kappa = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_c}{l}. \quad (7.9)$$

У разі використання для інтенсифікації тепловіддачі радіаційних батарей визначають радіаційно-конвективний коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{p-\kappa}$ ,  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ :

$$\alpha_{p-\kappa} \cong \alpha_\kappa + \alpha_p, \quad (7.10)$$

де  $\alpha_p$  – умовний коефіцієнт тепловіддачі за рахунок радіаційної складової тепловіддачі, який зазвичай задають  $\alpha_p = 1 - 1,5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Тоді

$$\alpha = \alpha_{p-\kappa}. \quad (7.11 \text{ a})$$

За відсутності радіаційних батарей вважають



$$\alpha = \alpha_{\kappa}. \quad (7.11 \text{ б})$$

За середньооб'ємними температурами  $t_{v \text{noch}}$  і  $t_{v \text{кин}}$  визначають питомі ентальпії харчового продукту  $h_{\text{noch}}$  і  $h_{\text{кин}}$ ,  $\kappa\text{Дж} / \text{кг}$ , наприклад, із додатка В.

Теплове навантаження,  $\kappa\text{Дж}$ , в процесі заморожування обчислюють за формулою

$$Q = M \cdot (h_{\text{noch}} - h_{\text{кин}}), \quad (7.12)$$

де  $M$  – маса продукту.

Тривалість процесу заморожування,  $s$ , з умов симетричної тепловіддачі розраховують за формулою

$$\tau = \frac{q \cdot \rho \cdot l}{\theta \cdot k'_{\phi}} \cdot \left( \frac{l}{2 \cdot \lambda_{np}} + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (7.13)$$

де  $k'_{\phi}$  – коефіцієнт форми, для пластини  $k'_{\phi} = 1$ ; для циліндра  $k'_{\phi} = 2$ ; для кулі  $k'_{\phi} = 3$ ;

$\theta = t_{\text{кр}} - t_c$  – надлишкова температура продукту;

$\rho$  – густина продукту,  $\text{кг} / \text{м}^3$ , що може бути розрахована за емпіричною формулою  $\rho = 1005 + 208,3 \cdot (W - 0,5)$ ;

$q$  – питома кількість тепла, що відводиться від продукту в процесі заморожування,  $q = h_{\text{noch}} - h_{\text{кин}}$ ,  $\kappa\text{Дж} / \text{кг}$ .

Докладнішу інформацію щодо розрахунку тривалості

процесу  $\tau$  під час заморожування можна знайти у [1, розділ 7.6.3].

Тривалість заморожування за умови несиметричного теплообміну можна розрахувати за [1, формула (7.44)].

Необхідну холодопродуктивність для заморожування харчового продукту,  $\kappaВт$ , визначають за формулою

$$\dot{Q}_0 = \frac{Q}{\tau}. \quad (7.14)$$

Зазвичай під час підбору приладів охолодження одержане значення збільшують на величину коефіцієнта запасу, що дорівнює 1,05 та враховує втрати холоду за рахунок теплообміну з'єднувальних трубопроводів із навколишнім середовищем.

Під час визначення загальної холодопродуктивності приладів охолодження також необхідно враховувати тепловтрати через огорожувальні конструкції холодильної камери та інші технологічні теплонадходження.

Середню лінійну швидкість процесу заморожування,  $м/с$ , визначають за формулою

$$v = \frac{l}{\tau}. \quad (7.15)$$

## **ЗМІСТ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ**

Виконання завдання полягає в розв'язуванні задачі, умова якої наведена нижче.

Для процесу заморожування харчового продукту у середовищі повітря знайти середньооб'ємну початкову

$t_{v\text{ поч}}, ^\circ\text{C}$ , і кінцеву  $t_{v\text{ кін}}, ^\circ\text{C}$ , температури продукту, тривалість процесу  $\tau$ , год, і середню лінійну швидкість процесу заморожування  $v$ , м/с, а також необхідну холодопродуктивність обладнання

$Q_0$ , Вт. Загальна маса продукту  $M$ , кг, середня температура охолоджувального середовища  $t_c$ ,  $^\circ\text{C}$ , початкова температура продукту  $t_{\text{поч}}$ ,  $^\circ\text{C}$ , кінцева температура  $t_{\text{кін}}$ ,  $^\circ\text{C}$ . Розмір продукту для пластини (яловичина в напівтушах) – товщина  $\delta$ , м.

Під час розрахунку середнього коефіцієнта тепловіддачі від охолоджувального середовища до поверхні продукту  $\alpha$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ , середню швидкість руху середовищ беремо для газоподібного (повітря)  $w_c = 5$  м/с. Визначальна температура – середня температура охолоджувального середовища  $t_c$ ,  $^\circ\text{C}$ . Визначальний розмір – характерний розмір продукту.

Як вихідні дані беруть:

- продукт;
- загальну масу продукту  $M$ , кг;
- середню температуру охолоджувального середовища  $t_c$ ,  $^\circ\text{C}$ ;
- початкову температуру продукту  $t_{\text{поч}}$ ,  $^\circ\text{C}$ ,
- кінцеву температуру продукту  $t_{\text{кін}}$ ,  $^\circ\text{C}$ .
- розмір продукту  $\delta$ , м.

У результаті виконання практичного завдання необхідно розрахувати:

- середньооб’ємну початкову температуру продукту  $t_{v\text{ поч}}, \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- середньооб’ємну кінцеву температуру продукту  $t_{v\text{ кін}}, \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- тривалість процесу  $\tau, \text{ год}$ ;
- необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0, \text{ Вт}$ ;
- середню лінійну швидкість процесу заморожування  $v, \text{ м/с}$ .

У разі відсутності додаткових рекомендацій викладача вихідні дані для виконання практичного завдання беруть згідно з даними, наведеними в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Вихідні дані

Перед-остання цифра шифру	Продукт	$M, \text{ кг}$	$t_c, \text{ }^\circ\text{C}$	Остання цифра шифру	$t_{\text{кін}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{поч}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\delta, \text{ м}$
1	Яловичина (напівтуші)	1500	– 35	1	–14	–1	0,2
2	Баранина (напівтуші)	1300	– 34	2	–15	–2	0,1
3	Свинина (напівтуші)	1000	– 33	3	–16	–3	0,15
4	Птиця (тушка)	700	– 32	4	–17	–4	0,12
5	Риба	400	– 31	5	–18	–5	0,03
6	Яловичина (напівтуші)	2500	– 30	6	–19	–6	0,2

Продовження таблиці 7.1

Перед- остання цифра шифру	Продукт	$M$ , кг	$t_c$ , °C	Остання цифра шифру	$t_{кін}$ , °C	$t_{поч}$ , °C	$\delta$ , м
7	Баранина (напівтуші)	2000	– 29	7	–20	–7	0,1
8	Свинина (напівтуші)	1800	– 28	8	–21	–8	0,15
9	Птиця (тушка)	1200	– 27	9	–22	–9	0,12
0	Риба	800	– 26	0	–23	–10	0,03

### ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Для процесу заморожування харчового продукту (яловичина) в середовищі повітря обчислити середньооб'ємну початкову  $t_{v\text{ поч}}$ , °C, та кінцеву  $t_{v\text{ кін}}$ , °C, температуру продукту, тривалість процесу  $\tau$ , год, і середню лінійну швидкість процесу заморожування  $v$ , м/с, а також необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0$ , Вт. Загальна маса продукту  $M = 500$  кг, середня температура охолоджувального середовища  $t_c = -30$  °C, початкова температура продукту  $t_{поч} = -3$  °C, кінцева температура –  $t_{кін} = -16$  °C. Розмір продукту для пластини (яловичина в напівтушах) – товщина  $\delta = 0,2$  м.

Під час розрахунку середнього коефіцієнта тепловіддачі від охолоджувального середовища до поверхні продукту  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·K), середню швидкість руху середовищ беремо для газоподібного (повітря)  $w_c = 5$  м/с.

Визначальна температура – середня температура охолоджувального середовища  $t_c$ , °С. Визначальний розмір – характерний розмір продукту.

## РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Для яловичини в напівтушах вважаємо її форму за пластину з характерним розміром  $l = \delta/2 = 0,1$  м.

Користуючись емпіричними залежностями для обраного харчового продукту (яловичина), обчислимо за від'ємних температур:

– густину:

$$\begin{aligned}\rho &= \rho^n + k_\rho \cdot (W - W^n) = 1005 + 208,3 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 1005 + 208,3 \cdot (0,75 - 0,5) = 1057 \text{ кг} / \text{м}^3;\end{aligned}$$

– розрахункову питому теплоємність:

$$\begin{aligned}c &= c_1 = c_1^n + k_{c1} \cdot (W - W^n) = 1465,4 + 1482,7 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 1465,4 + 1482,7 \cdot (0,75 - 0,5) = 1836 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К});\end{aligned}$$

– теплопровідність:

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_1 = \lambda_1^n + k_{\lambda 1} \cdot (W - W^n) = 0,58 + 1,917 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 0,58 + 1,917 \cdot (0,75 - 0,5) = 1,059 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}).\end{aligned}$$

Коефіцієнт температуропровідності продукту за від'ємної температури

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{1,059}{1057 \cdot 1836} = 5,46 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі від поверхні напівтуші до охолоджувального середовища, використовуючи теорію теплової подібності.

Визначаємо режим руху середовища (повітря) за критерієм Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{w_c \cdot l}{\nu_c} = \frac{5 \cdot 0,1}{10,8 \cdot 10^{-6}} = 46296 > 10^4,$$

де  $\nu_c$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря за  $t_c$ .

Отже, режим руху повітря турбулентний.

Критеріальне рівняння для турбулентного режиму руху повітря

$$\text{Nu} = 0,032 \cdot \text{Re}^{0,8} = 0,032 \cdot 46296^{0,8} = 172,8.$$

Середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_c}{l} = \frac{172,8 \cdot 2,2 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 38 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

де  $\lambda_c$  – коефіцієнт теплопровідності охолоджувального середовища (повітря) за температури  $t_c$ .

Критерій Біо

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \frac{38 \cdot 0,1}{1,059} = 3,59.$$

Початкова і кінцева середньооб'ємні температури можуть бути обчислені за формулою Г. Б. Чижова:

$$\begin{aligned} t_{v\text{ноч}} &= t_{\text{ноч}} - \frac{Bi}{Bi + n} \cdot \psi \cdot (t_{\text{ноч}} - t_c) = \\ &= -3 - \frac{3,59}{3,59 + 2} \cdot \frac{1}{3} \cdot (-3 - (-30)) = -8,8 \text{ } ^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{v\text{кін}} &= t_{\text{кін}} - \frac{Bi}{Bi + n} \cdot \psi \cdot (t_{\text{кін}} - t_c) = \\ &= -16 - \frac{3,59}{3,59 + 2} \cdot \frac{1}{3} \cdot (-16 - (-30)) = -19,0 \text{ } ^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

де  $n$  – коефіцієнт, що враховує тип середовища, в якому відбувається охолодження, для повітря  $n = 2$ ;

$\psi$  – коефіцієнт форми, для пластини

$$\psi = \frac{1}{n+1} = \frac{1}{2+1} = \frac{1}{3}.$$

Використовуючи довідкові табличні дані (додаток В) з ентальпій продуктів, визначаємо для яловичини:

а) за  $t_{v\text{ноч}} = -8,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $h_{\text{ноч}} = 35,7 \text{ кДж} / \text{кг}$ ;



б) за  $t_{\text{вкін}} = -19 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_{\text{кін}} = 2,3 \text{ кДж / кг}$ .

Кількість тепла, що відводиться в процесі заморожування,

$$Q = M \cdot (h_{\text{ноч}} - h_{\text{кін}}) = 500 \cdot (35,7 - 2,3) = 16700 \text{ кДж}.$$

Питома кількість тепла в процесі

$$q = \frac{Q}{M} = \frac{16700}{500} = 33,4 \text{ кДж / кг}.$$

Надлишкова температура

$$\theta = t_{\text{кр}} - t_c = -1 - (-30) = 29 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Тривалість процесу заморожування

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{q \cdot \rho \cdot l}{\theta \cdot k'_\phi} \cdot \left( \frac{l}{2 \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) = \\ &= \frac{33,4 \cdot 10^3 \cdot 1057 \cdot 0,1}{29 \cdot 1} \cdot \left( \frac{0,1}{2 \cdot 1,059} + \frac{1}{38} \right) = \\ &= 8950 \text{ с} = 2,49 \text{ год}, \end{aligned}$$

де  $k'_\phi$  – коефіцієнт форми, для пластини  $k'_\phi = 1$ .

Необхідна холодопродуктивність для заморожування

$$\dot{Q}_0 = \frac{Q}{\tau} = \frac{16700}{8950} = 1,87 \text{ кВт}.$$

Середня лінійна швидкість процесу заморожування

$$v = \frac{l}{\tau} = \frac{0,1}{8950} = 1,12 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}.$$

## 8 ХОЛОДИЛЬНЕ ЗБЕРІГАННЯ

Перед виконанням практичного завдання необхідно ознайомитися з докладними теоретичними відомостями, викладеними в [1].

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Холодильне зберігання охолодженого, переохолодженого і замороженого харчового продукту – процес його витримування за сталої температури.

Холодильне зберігання належить до квазістаціонарних режимів із позиції теплообміну через значну тривалість процесу. Тому теплове навантаження,  $кДж$ , що відводиться в процесі зберігання, розраховується через питомі ентальпії, знайдені за середніми (не середньооб'ємними!) температурами на початку та в кінці процесу

$$Q = M \cdot (h_{поч} - h_{кін}), \quad (8.1)$$

де  $h_{поч}$  і  $h_{кін}$  – питомі ентальпії харчового продукту відповідно за температури  $t_{поч}$  і  $t_{кін}$ ,  $кДж / кг$ ;

$M$  – маса продукту,  $кг$ .

Величини температур  $t_{поч}$  і  $t_{кін}$  при розрахунках процесу холодильного зберігання зазвичай задають. Однак на практиці температура  $t_{поч}$  залежить від попереднього до

зберігання процесу (наприклад, охолодження, заморожування або підморожування) та її визначають за кінцевим значенням температури цього процесу. Кінцева температура  $t_{кін}$  харчового продукту залежить від багатьох факторів, серед яких можна виділити насамперед середню температуру середовища в камері зберігання  $t_c$ , середню швидкість руху охолоджувального середовища біля поверхні продукту та рівномірність розподілу температури в камері, що визначається рівномірністю розміщення приладів охолодження. У камерах зберігання останній фактор отримує більшу вагу порівняно з камерами холодильного оброблення завдяки значній тривалості процесу зберігання.

Тривалість зберігання, *місяці*, у незапакованого харчового продукту в повітряному середовищі за атмосферного тиску можна визначити за емпіричною формулою Д. Г. Рютова (табл. 8.1)

$$\tau = A \cdot 10^{-b \cdot t_{зб}}, \quad (8.2)$$

де  $t_{зб}$  – температура повітря в камері зберігання, °С.

Формулу (8.2) застосовують при  $-20 \leq t \leq -6$  °С, тобто для процесу холодильного зберігання заморожених продуктів.

Таблиця 8.1 – Коефіцієнти до формули (8.2)

Продукт	<i>A</i>	<i>b</i>
Яловичина, баранина	2,15	0,05
Свинина, нежирна риба	1,78	
Курятина	1,58	
Гусятина, кролятина	1,26	0,036
Вершкове масло	2,85	
Жирна риба	1,58	

Тривалість зберігання охолоджених продуктів є значно меншою порівняно зі зберіганням заморожених харчових продуктів та визначається режимними параметрами в камері холодильного зберігання (температура, відносна вологість, швидкість руху), а також багатьма іншими факторами, наприклад, наявністю упаковки, ступенем визрівання продукту, якістю передхолодильного оброблення тощо. Допустимі терміни зберігання деяких охолоджених харчових продуктів можна знайти в [1, табл. 7.20].

Приблизні значення тривалості зберігання охолоджених харчових продуктів можна отримати, використовуючи формулу Д. Г. Рютова (формула (8.2)), якщо одержуваний результат вимірювати добами.

На тривалість зберігання харчового продукту значно впливає тиск довкілля. Наприклад, термін зберігання м'яса під тиском 0,15 МПа збільшується в 1,5 раза.

Докладніше про методи збільшення тривалості зберігання харчових продуктів можна ознайомитися в [1].

Для зберігання харчових рекомендують такі режими вологості залежно від температури зберігання (табл. 8.2).

Таблиця 8.2 – Рекомендовані значення відносної

вологості у камері холодильного зберігання залежно від температури

$t_{зб}, ^\circ C$	4	3	2	1	0	-1 і нижче
$\varphi, \%$	70	76	82	87	92	96

Це пов'язано зі зменшенням усихання харчового продукту в процесі зберігання. Це дуже важливий показник, адже він визначає масу, на яку зменшиться продукт, що зберігається. Ця маса відкладеться на охолоджувальних приладах у вигляді снігової шуби або інею.

Ураховуючи теплоту, що підводиться до продукту конвекцією і випромінюванням від теплішої стінки камери, теплоту, що відводиться від продукту випромінюванням до поверхні приладів охолодження, і теплоту сублімації вологи, величину усихання,  $\kappa_2$ , під час зберігання можна обчислити за формулою

$$M_{усих} = \frac{d_{np} - d_c}{c_{\bar{\sigma}}} \cdot \frac{F_{\bar{\sigma}}}{\frac{1}{\alpha_{\bar{\sigma}}} + \frac{1}{\alpha_{np}}} \cdot \tau, \quad (8.3)$$

де  $d_{np}$  і  $d_n$  – вологовміст насиченого повітря за температури продукту і повітря в камері,  $\kappa_2 / \kappa_2$ ;

$c_{\bar{\sigma}}$  – питома теплоємність вологого повітря при температурі поверхні приладів охолодження,  $Дж / (\kappa_2 \cdot K)$ ;

$F_{\bar{\sigma}}$  – площа поверхні охолоджувальних приладів,  $m^2$ ;

$\alpha_{\bar{\sigma}}$  – конвективний коефіцієнт тепловіддачі від повітря до приладів охолодження,  $Вт / (m^2 \cdot K)$ ;

$\alpha_{np}$  – конвективний коефіцієнт тепловіддачі від поверхні продукту до повітря,  $Bm / (m^2 \cdot K)$ .

Необхідну холодопродуктивність холодильної машини,  $Bm$ , обчислюють за формулою

$$\dot{Q}_0 = \frac{Q}{\tau}. \quad (8.4)$$

Площу поверхні охолоджувальних батарей,  $m^2$ , у камері зберігання визначають з основного рівняння теплопередачі:

$$F_{\sigma} = \frac{\dot{Q}_0}{k_{\sigma} \cdot \Delta t}, \quad (8.5)$$

де  $k_{\sigma}$  – коефіцієнт теплопередачі камерних охолоджувальних батарей,  $Bm / (m^2 \cdot K)$ ; цю величину або задають, або беруть із паспортних даних до батарей;

$\Delta t$  – перепад температур між середньою температурою охолоджувального середовища і температурою поверхні приладів охолодження,  $^{\circ}C$ .

Конвективні коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha_{\sigma}$  і  $\alpha_{np}$  або задають, або розраховують, використовуючи теорію теплової подібності. Важливим моментом, що визначає методику розрахунку коефіцієнта тепловіддачі, є напрямок обдування харчового продукту та фактична наявність обдування, тобто наявність пристроїв, що створюють потік

охладжувального середовища (наявність вентиляторів). Зазвичай у камерах холодильного зберігання використовують пристінні або стельові охолоджувальні батареї. У разі використання батарей як приладів охолодження такі пристрої відсутні, а отже, домінуючим механізмом тепловіддачі є вільна конвекція, а визначальним критерієм – критерій Релея  $Ra$  :

$$Ra = \frac{g \cdot b^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot (t_{np} - t_c) \cdot Pr, \quad (8.6)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення середовища,  $K^{-1}$ , для ідеальних газів (повітря)  $\beta = 1/T_c = 1/(t_c + 273)$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості середовища,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$Pr$  – критерій Прандтля середовища;

$b$  – визначальний розмір; для харчового продукту, що зберігається у підвішеному стані (туші, напівтуші) ця величина відповідає висоті продукту, а під час зберігання продуктів у штабелях (ящиках, контейнерах) – це висота штабеля.

Визначальна температура для визначення теплофізичних властивостей (для повітря див. Додаток Д) – середня температура охолоджувального середовища  $t_c$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Критеріальне рівняння для вільної конвекції на вертикальних поверхнях залежить від режиму руху середовища для повітря:

– за ламінарного режиму ( $Ra = 10^3 - 10^9$ ) визначають за формулою:



$$\text{Nu} = 0,75 \cdot \text{Ra}^{0,25}; \quad (8.7 \text{ а})$$

– при турбулентному режимі ( $\text{Ra} > 10^9$ ) визначають за формулою:

$$\text{Nu} = 0,15 \cdot \text{Ra}^{0,33}. \quad (8.7 \text{ б})$$

Середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі  $\alpha_k$ ,  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , обчислюють за формулою

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{h}. \quad (8.8)$$

Більш точним є розрахунок середнього за висотою коефіцієнта тепловіддачі за наявності ламінарної та турбулентної ділянок прилежового шару на вертикальній поверхні:

$$\alpha = \left[ \alpha_l \cdot h_{кр} + \alpha_t \cdot (h - h_{кр}) \right] / h, \quad (8.9)$$

де  $\alpha_l$  та  $\alpha_t$  – середні коефіцієнти тепловіддачі на ламінарній та турбулентній ділянках прилежового шару, розраховані за формулами (8.7 а) та (8.7 б);

$h_{кр}$  – висота межі між ламінарним та турбулентним шарами, яку розраховують за формулою

$$h_{кр} = 10^3 \cdot \left[ \nu \cdot a / (g \cdot \beta \cdot \Delta t) \right]^{1/3}. \quad (8.10)$$

У разі використання у камері холодильного зберігання повітроохолоджувачів створюється примусовий

потік повітря. Це призводить до зміни механізму тепловіддачі, а саме виникає вимушена конвекція. У цьому разі важливим є напрямок руху охолоджувального повітря щодо харчового продукту. Фактично він є довільним, але переважати може або вертикальне обдування, що реалізується під час застосування повітряного душування, або горизонтальне за відсутності використання систем розподілення повітря. Докладнішу інформацію з визначення коефіцієнта тепловіддачі вимушеної конвекції можна знайти у [21].

Основні залежності для розрахунку параметрів вологого повітря, враховуючи вологовміст  $d$ ,  $\text{кг}/\text{кг}$ , подано в розділі 5.

Допускається також використовувати  $h$ ,  $d$ -діаграму вологого повітря (додаток Ж).

Температуру поверхні батарей (приладів охолодження),  $t_{\sigma}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , необхідну для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{\sigma}$ , та питомої теплоємності повітря камери  $c_{\sigma}$ ,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ , обчислюють за формулою

$$t_{\sigma} = t_c - \Delta t. \quad (8.11)$$

## ЗМІСТ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ

Виконання завдання полягає в розв'язуванні задачі, умова якої наведена нижче.

Для процесу холодильного зберігання харчового продукту в повітряному середовищі розрахувати кількість теплоти

$Q$ , кДж, що відводиться від продукту, тривалість процесу  $\tau$ , год, а також необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0$ , Вт, і площу поверхні охолоджувальних батарей  $F_b$ , м<sup>2</sup>. Загальна маса продукту  $M = 500$  кг, середня температура охолоджувального середовища  $t_c$ , °С, початкова температура продукту  $t_{поч}$ , °С, кінцева температура –  $t_{кін}$ , °С. Відносна вологість повітря в холодильній камері  $\varphi_c$ . Розмір продукту для пластини (яловичина в напівтушах) – товщина  $\delta$ , м.

Визначити також величину всихання під час зберігання і кількість вологи, яку відбирають від продукту в процесі.

Середній коефіцієнт тепловіддачі від повітря до приладів охолодження  $\alpha_b = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Під час розрахунку середнього коефіцієнта тепловіддачі від охолоджувального середовища до поверхні продукту  $\alpha_{пр}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) вважати, що охолодження відбувається за рахунок вільної конвекції. Визначальна температура – середня температура охолоджувального середовища  $t_c$ , °С. Визначальний розмір – характерний розмір продукту.

Атмосферний тиск у камері холодильного зберігання дорівнює  $p_{атм} = 750$  мм рт. ст.

Перепад температур між середньою температурою охолоджувального середовища і температурою поверхні приладів охолодження  $\Delta t = 5$  °С.

Коефіцієнт теплопередачі камерних охолоджувальних батарей  $k_b = 8$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

За вихідні дані беруть:

- продукт;
- загальну масу продукту  $M$ , кг;
- середню температуру охолоджувального середовища  $t_c$ , °C;
- відносну вологість повітря в холодильній камері  $\varphi_c$ ;
- початкову температуру продукту  $t_{поч}$ , °C,
- кінцеву температуру продукту  $t_{кін}$ , °C.
- розмір продукту  $\delta$ , м.

У результаті виконання практичного завдання необхідно розрахувати:

- кількість теплоти, що відводиться від продукту,  $Q$ , кДж;
- тривалість процесу  $\tau$ , год;
- необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0$ , Вт;
- площу поверхні охолоджувальних батарей  $F_b$ , м<sup>2</sup>;
- кількість вологи, яку відбирають від продукту в процесі,  $M_{всих}$ , кг;
- всихання під час зберігання  $\Delta M$ , % .

У разі відсутності додаткових рекомендацій викладача вихідні дані для виконання практичного завдання беруть згідно з даними, наведеними в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Вихідні дані

Перед-остання цифра шифру	Продукт	$M$ , кг	$t_c$ , °C	$b$ , м	Остання цифра шифру	$\varphi_c$	$t_{поч}$ , °C	$t_{кін}$ , °C
1	Яловичина (напівтуші)	1 500	-20	0,8	1	0,75	-14	-17
2	Баранина (напівтуші)	1 300	-21	0,6	2	0,8	-13	-18
3	Свинина (напівтуші)	1 000	-22	0,5	3	0,85	-12	-19
4	Птиця (тушка)	700	-23	0,2	4	0,9	-17	-20
5	Риба	400	-24	0,15	5	0,95	-18	-21
6	Яловичина (напівтуші)	2 500	-25	1,0	6	0,70	-19	-22
7	Баранина (напівтуші)	2 000	-18	0,7	7	0,82	-11	-15
8	Свинина (напівтуші)	1 800	-19	0,6	8	0,88	-10	-14
9	Птиця (тушка)	1 200	-17	0,3	9	0,92	-9	-13
0	Риба	800	-16	0,25	0	0,97	-7	-12

### ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Для процесу холодильного зберігання харчового продукту (яловичина) в повітряному середовищі розрахувати кількість теплоти  $Q$ , кДж, що відводиться від продукту, тривалість процесу  $\tau$ , год, а також необхідну холодопродуктивність обладнання  $Q_0$ , Вт, і площу поверхні охолоджувальних батарей  $F_б$ , м<sup>2</sup>. Загальна маса продукту  $M = 500$  кг, середня температура охолоджувального середовища  $t_c = -20$  °C, початкова температура продукту  $t_{поч} = -16$  °C, кінцева температура  $t_{кін} = -18$  °C. Відносна вологість повітря в холодильній

камері  $\varphi_c = 0,9$ . Розмір продукту для пластини (яловичина в напівтушах) – товщина  $b = 1,3$  м.

Визначити також величину всихання під час зберігання і кількість вологи, яку відбирають від продукту в процесі.

Середній коефіцієнт тепловіддачі від повітря до приладів охолодження  $\alpha_b = 10$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Під час розрахунку середнього коефіцієнта тепловіддачі від охолоджувального середовища до поверхні продукту  $\alpha_{np}$ , Вт/(м<sup>2</sup> · К) вважати, що охолодження відбувається за рахунок вільної конвекції. Визначальна температура – середня температура охолоджувального середовища  $t_c$ , °С. Визначальний розмір – характерний розмір продукту.

Атмосферний тиск у камері холодильного зберігання  $p_{атм} = 750$  мм рт. ст.

Перепад температур між середньою температурою охолоджувального середовища і температурою поверхні приладів охолодження  $\Delta t = 5$  °С.

Коефіцієнт теплопередачі камерних охолоджувальних батарей  $k_b = 8$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

## РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Визначаємо табличні значення (додаток В) питомих теплоємностей продукту (яловичина) для розрахованих значень початкової і кінцевої середньооб'ємних температур:

а) за  $t_{поч} = -16$  °С,  $h_{поч} = 10,2$  кДж / кг ;

б) за  $t_{кин} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_{кин} = 4,6 \text{ кДж / кг}$ .

Теплове навантаження, що відводиться в процесі зберігання,

$$Q = M \cdot (h_{поч} - h_{кин}) = 500 \cdot (10,2 - 4,6) = 2800 \text{ кДж}.$$

Тривалість процесу зберігання визначаємо за формулою Д. Г. Рютова:

$$\tau = A \cdot 10^{-b \cdot t_c},$$

де  $t_{зб}$  – температура повітря в камері зберігання,  $^\circ\text{C}$ .

Відповідно до даних таблиці 9.1 для яловичини  $A = 2,15$  і  $b = 0,05$ , тоді

$$\begin{aligned} \tau &= A \cdot 10^{-b \cdot t_c} = 2,15 \cdot 10^{-0,05 \cdot t_c} = \\ &= 2,15 \cdot 10^{-0,05 \cdot (-20)} = 21,5 \text{ міс} = 5,57 \cdot 10^7 \text{ с} = 15480 \text{ год}. \end{aligned}$$

Необхідна холодопродуктивність холодильної машини

$$\dot{Q}_0 = \frac{Q}{\tau} = \frac{2800 \cdot 10^3}{5,57 \cdot 10^7} = 0,05 \text{ Вт}.$$

Площа поверхні охолоджувальних батарей

$$F_{\bar{o}} = \frac{\dot{Q}_0}{k_{\bar{o}} \cdot \Delta t} = \frac{0,05}{8 \cdot 5} = 0,001 \text{ м}^2.$$

Температура поверхні батарей (приладів охолодження)

$$t_{\bar{o}} = t_c - \Delta t = -20 - 8 = -28 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Питома теплоємність повітря камери за  $t_{\bar{o}} = -28 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $c_{\bar{o}} = 1,013 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$  (додаток Д).

Вологовміст вологого повітря визначаємо аналітично, як показано нижче.

Обчислюємо парціальний тиск водяної пари в стані насичення, використовуючи апроксимаційну залежність  $p_s = 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot t)$  (формула справедлива за  $-20,3 \leq t \leq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ ) за температури  $t_{np} = t_{кин} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} p_{snp} &= 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot t_{np}) = \\ &= 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot (-18)) = 0,134 \text{ кПа}, \end{aligned}$$

тоді вологовміст повітря становитиме

$$d_{np} = 0,622 \cdot \frac{\varphi_{np} \cdot p_{snp}}{p_{атм} - \varphi_{np} \cdot p_{snp}} = 0,622 \cdot \frac{1 \cdot 0,134}{99,99 - 1 \cdot 0,134} = 0,83 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{кг},$$



де  $p_{атм} = 750 \cdot 133,32 / 1000 = 99,99 \text{ кПа}$  – атмосферний тиск.

Аналогічно виконуємо розрахунки для визначення питомої ентальпії вологого повітря за параметрів у камері зберігання:

$$\begin{aligned} p_{sc} &= 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot t_c) = \\ &= 0,5717 \cdot \exp(0,0805 \cdot (-20)) = 0,114 \text{ кПа}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_c &= 0,622 \cdot \frac{\varphi_c \cdot p_{sc}}{p_{атм} - \varphi_c \cdot p_{sc}} = \\ &= 0,622 \cdot \frac{0,9 \cdot 0,114}{99,99 - 0,9 \cdot 0,114} = 0,64 \cdot 10^{-3} \text{ кг / кг}. \end{aligned}$$

Визначаємо середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі від охолоджувального середовища до поверхні продукту, використовуючи теорію теплової подібності.

Для яловичини в напівтушах вважаємо її форму за пластину з характерним розміром  $b = 1,3 \text{ м}$  (висота продукту).

Теплофізичні властивості середовища знаходимо з додатка Д.

Визначаємо критерій Релея  $Ra$  :

$$Ra = \frac{g \cdot b^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot (t_{np} - t_c) \cdot Pr,$$

де  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення середовища,  $K^{-1}$ ; для ідеальних газів (повітря)  $\beta = 1/T_c = 1/(t_c + 273)$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості середовища,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$Pr$  – критерій Прандтля середовища;

$b$  – визначальний розмір.

$$Ra = \frac{9,81 \cdot 1,3^3}{(11,79 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1}{253} \cdot (-18 - (-20)) \cdot 0,716 = 8,77 \cdot 10^8.$$

$Ra < 10^9$ , отже, режим руху повітря ламінарний.

Критеріальне рівняння для ламінарного режиму руху повітря

$$Nu = 0,75 \cdot Ra^{0,25} = 0,75 \cdot (8,77 \cdot 10^8)^{0,25} = 129,1.$$

Середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі

$$\alpha_{np} = \frac{Nu \cdot \lambda_c}{b} = \frac{129,1 \cdot 2,28 \cdot 10^{-2}}{1,3} = 2,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

де  $\lambda_c$  – коефіцієнт теплопровідності охолоджувального середовища (повітря) за температури  $t_c$ .

Кількість вологи, яку відбирають від продукту в процесі зберігання,

$$M_{\text{всих}} = \frac{d_{np} - d_c}{c_{\bar{\sigma}}} \cdot \frac{F_{\bar{\sigma}}}{\frac{1}{\alpha_{\bar{\sigma}}} + \frac{1}{\alpha_{np}}} \cdot \tau =$$

$$= \frac{(0,83 - 0,64) \cdot 10^{-3}}{1,013 \cdot 10^3} \cdot \frac{0,001}{\frac{1}{10} + \frac{1}{2,3}} \cdot 5,57 \cdot 10^7 = 0,019 \text{ кг.}$$

Визначаємо відносну величину всихання під час зберігання, використовуючи формулу

$$\Delta M = \frac{M_{\text{всих}}}{M} \cdot 100 \% = \frac{0,019}{500} \cdot 100 \% = 0,004 \% .$$

## 9 РОЗМОРОЖУВАННЯ

Перед виконанням практичного завдання необхідно ознайомитися з докладними теоретичними відомостями, викладеними в [1].

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Розморожування – процес збільшення температури замороженого харчового продукту до необхідної додатної температури. У цьому разі прагнуть відновити рівномірність розподілу вологи у харчовому продукті та розчинених у ній речовинах, а також зменшити втрати соку.

Зазвичай верхньою температурною межею процесу розморожування є криоскопічна температура продукту  $t_{кр}$ . Вищі значення кінцевої температури розморожування повинні бути економічно обґрунтованими.

Під час розрахунку початкової і кінцевої середньооб'ємних температур використовують формулу Г. Б. Чижова (див. формули (1.1 а) та (1.1 б)).

Критерій Біо Ві, що входить до цих формул, розраховують за рекомендаціями, аналогічними до процесу заморожування (див. формулу (7.1)). Основною відмінністю від процесу заморожування є паралельний розрахунок теплофізичних властивостей харчового продукту для додатних і від'ємних температур (див. рекомендації до розділу 4). Це необхідно для більш точного розрахунку середньооб'ємних температур:

початкової  $t_{v\text{ноч}}$ , до якої підставляють параметри, одержані для від'ємних температур, та кінцевої  $t_{v\text{кін}}$  з параметрами для додатних температур.

За одержаними значеннями середньооб'ємних температур  $t_{v\text{ноч}}$  і  $t_{v\text{кін}}$  визначають питомі ентальпії харчового продукту  $h_{\text{ноч}}$  і  $h_{\text{кін}}$  відповідно. Значення питомих ентальпій беруть із додатка В для заданого харчового продукту.

Рекомендації з розрахунку визначального розміру  $l$ ,  $m$ ,  $\epsilon$  також аналогічними до наведених у розділі 7.

Середній коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  також розраховують згідно з рекомендаціями розділу 7 (див. формули (7.7)–(7.9)).

Під час розрахунку режиму руху середовища за критерієм Рейнольдса для вимушеної конвекції задають рекомендовані значеннями середньої швидкості руху гріючого середовища: для води –  $w_c = 0,2\text{--}0,5$  м/с, для повітря  $w_c = 5\text{--}10$  м/с.

Тривалість процесу розморожування,  $s$ , визначають за формулою

$$\tau = \frac{q \cdot \rho \cdot l}{\theta \cdot k'_\phi} \cdot \left( \frac{l}{2 \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) \cdot m. \quad (9.1)$$

Фактично ця формула є аналогічною до формули (7.13) для розрахунку тривалості процесу заморожування, за винятком параметра  $m$ , який ураховує тривалість нерегулярного процесу теплообміну. Для процесу розморожування  $m = 1,3$ .

Необхідну теплопродуктивність,  $\text{кВт}$ , для

розморожування знаходять із виразу

$$\dot{Q}_T = \frac{Q}{\tau}, \quad (9.2)$$

де  $Q$  – повне теплове навантаження,  $\text{кДж}$ , підведене в процесі, яке розраховують за формулою

$$Q = M \cdot (h_{\text{кін}} - h_{\text{поч}}). \quad (9.3)$$

### ЗМІСТ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ

Виконання завдання полягає в розв'язуванні задачі, умова якої наведена нижче.

Для процесу розморожування харчового продукту в заданому середовищі визначити середньооб'ємну початкову  $t_{v \text{ поч}}, ^\circ\text{C}$ , і кінцеву  $t_{v \text{ кін}}, ^\circ\text{C}$ , температури продукту, тривалість процесу  $\tau$ , год, а також необхідну теплопродуктивність обладнання  $Q_T$ ,  $\text{Вт}$ . Загальна маса продукту  $M$ ,  $\text{кг}$ , середня температура нагрівального середовища  $t_c, ^\circ\text{C}$ , початкова температура продукту  $t_{\text{поч}}, ^\circ\text{C}$ , кінцева температура  $t_{\text{кін}}, ^\circ\text{C}$ . Розмір продукту – товщина  $\delta$ ,  $\text{м}$ .

Тривалість першої стадії розморожування (нерегулярний режим) врахувати коефіцієнтом  $m$ , що дорівнює  $m = 1,3$ , у формулі для тривалості розморожування.

За вихідні дані беруть:

- продукт;
- розморожувальне середовище;
- загальну масу продукту  $M$ , кг;
- середню температуру нагрівального середовища  $t_c$ , °C;
- початкову температуру продукту  $t_{поч}$ , °C,
- кінцеву температуру продукту  $t_{кін}$ , °C.
- розмір продукту,  $\delta$ , м.

У результаті виконання практичного завдання необхідно розрахувати:

- середньооб'ємну початкову температуру продукту  $t_{v\text{ поч}}$ , °C;
- середньооб'ємну кінцеву температуру продукту  $t_{v\text{ кін}}$ , °C;
- тривалість процесу  $\tau$ , год;
- необхідну теплопродуктивність обладнання  $Q_T$ , Вт.

У разі відсутності додаткових рекомендацій викладача вихідні дані для виконання практичного завдання беруть згідно з даними, наведеними в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – Вихідні дані

Перед-остання цифра шифру	Продукт	Розморожувальне середовище	$M$ , кг	Остання цифра шифру	$t_c$ , °C	$t_{поч}$ , °C	$t_{кін}$ , °C	$\delta$ , м
1	Яловичина (напівтуші)	Повітря	1 500	1	10	-14	2	0,2
2	Баранина (напівтуші)	Вода	1 300	2	9	-15	3	0,1
3	Свинина (напівтуші)	Повітря	1 000	3	8	-16	4	0,15

### Продовження таблиці 9.1

Перед-остання цифра шифру	Продукт	Розморожувальне середовище	$M$ , кг	Остання цифра шифру	$t_c$ , °C	$t_{поч}$ , °C	$t_{кін}$ , °C	$\delta$ , м
4	Птиця (тушка)	Вода	700	4	7	-17	5	0,12
5	Риба	Повітря	400	5	6	-18	6	0,03
6	Яловичина (напівтуші)	Вода	2 500	6	11	-19	7	0,2
7	Баранина (напівтуші)	Повітря	2 000	7	12	-20	8	0,1
8	Свинина (напівтуші)	Вода	1 800	8	13	-21	9	0,15
9	Птиця (тушка)	Повітря	1 200	9	14	-22	10	0,12
0	Риба	Вода	800	0	15	-23	11	0,03

### ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Для процесу розморожування харчового продукту (яловичина в напівтушах) в середовищі (вода) визначити середньооб'ємну початкову  $t_{v\text{поч}}$ , °C, і кінцеву  $t_{v\text{кін}}$ , °C, температури продукту, тривалість процесу  $\tau$ , год, а також необхідну теплопродуктивність обладнання  $Q_T$ , Вт. Загальна маса продукту  $M = 500$  кг, середня температура нагрівального середовища  $t_c = 8$  °C, початкова температура продукту  $t_{поч} = -18$  °C, кінцева температура  $t_{кін} = 4$  °C. Розмір продукту – товщина  $\delta = 0,2$  м.

Тривалість першої стадії розморожування (нерегулярний режим) врахувати коефіцієнтом  $m$ , що дорівнює  $m = 1,3$ , у формулі для тривалості розморожування.



## РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Для яловичини в напівтушах вважаємо її форму за пластину з характерним розміром  $l = \delta/2 = 0,2/2 = 0,1$  м.

Користуючись емпіричними залежностями для обраного харчового продукту (яловичина), обчислимо за додатних і від'ємних температур:

– густину:

$$\begin{aligned}\rho &= \rho'' + k_\rho \cdot (W - W'') = 1005 + 208,3 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 1005 + 208,3 \cdot (0,75 - 0,5) = 1057 \text{ кг} / \text{м}^3;\end{aligned}$$

– розрахункову питому теплоємність:

$$\begin{aligned}c_2 &= c_2'' + k_{c_2} \cdot (W - W'') = 2093,4 + 4186,8 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 2093,4 + 4186,8 \cdot (0,75 - 0,5) = 3140 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K}),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}c_1 &= c_1'' + k_{c_1} \cdot (W - W'') = 1465,4 + 1482,7 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 1465,4 + 1482,7 \cdot (0,75 - 0,5) = 1836 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K});\end{aligned}$$

– теплопровідність:

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= \lambda_2'' + k_{\lambda_2} \cdot (W - W'') = 0,29 + 0,604 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 0,29 + 0,604 \cdot (0,75 - 0,5) = 0,441 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{K}),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \lambda_1'' + k_{\lambda_1} \cdot (W - W'') = 0,58 + 1,917 \cdot (W - 0,5) = \\ &= 0,58 + 1,917 \cdot (0,75 - 0,5) = 1,059 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{K}).\end{aligned}$$

Коефіцієнти температуропровідності продукту за додатних  $a_2$  і від'ємних  $a_1$  температур:

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho \cdot c_2} = \frac{0,441}{1057 \cdot 3140} = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с},$$

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho \cdot c_1} = \frac{1,059}{1057 \cdot 1836} = 5,46 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Розрахуємо середній коефіцієнт тепловіддачі від нагрівального середовища до поверхні продукту  $\alpha$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Задаємо середню швидкість руху води  $w_c = 0,5 \text{ м}/\text{с}$ . Визначальна температура – середня температура гріючого середовища  $t_c = 8^\circ\text{C}$ . Визначальний розмір – характерний розмір продукту.

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі від поверхні напівтуші до нагрівального середовища, використовуючи теорію теплової подібності.

Теплофізичні властивості розморожувального середовища знаходимо з додатка Е.

Визначимо режим руху середовища (вода) за критерієм Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{w_c \cdot l}{\nu_c} = \frac{0,5 \cdot 0,1}{1,403 \cdot 10^{-6}} = 35638 > 10^4,$$

де  $\nu_c$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості води за  $t_c$ .

Отже, режим руху води турбулентний.

Критеріальне рівняння для турбулентного режиму руху води

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_n} \right)^{0,25},$$

де  $Pr_n$  – критерій Прандтля нагрівального середовища за температури поверхні продукту, яку задамо як  $t_n \cong t_{кин} - 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

$Pr_n$  – критерій Прандтля нагрівального середовища за температури середовища  $t_c$ .

$$Nu = 0,037 \cdot 35638^{0,8} \cdot 10,35^{0,43} \cdot \left( \frac{10,35}{12,42} \right)^{0,25} = 423.$$

Середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_c}{l} = \frac{423 \cdot 0,569}{0,1} = 2409 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

де  $\lambda_c$  – коефіцієнт теплопровідності нагрівального середовища (вода) за температури  $t_c$ .

Критерій Біо за додатних  $Bi_2$  і від’ємних  $Bi_1$  температур:

$$Bi_2 = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_2} = \frac{2409 \cdot 0,1}{0,441} = 546,2,$$

$$Bi_1 = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_1} = \frac{2409 \cdot 0,1}{1,059} = 227,5.$$

Початкова і кінцева середньооб'ємні температури можуть бути визначені за формулою Г. Б. Чижова:

$$\begin{aligned} t_{v \text{ поч}} &= t_{\text{поч}} - \frac{Bi_1}{Bi_1 + n} \cdot \psi \cdot (t_{\text{поч}} - t_c) = \\ &= -18 - \frac{227,5}{227,5 + 3} \cdot \frac{1}{4} \cdot (-18 - 8) = -11,6 \text{ }^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{v \text{ кін}} &= t_{\text{кін}} - \frac{Bi_2}{Bi_2 + n} \cdot \psi \cdot (t_{\text{кін}} - t_c) = \\ &= 4 - \frac{546,2}{546,2 + 3} \cdot \frac{1}{4} \cdot (4 - 8) = 5,0 \text{ }^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

де  $n$  – коефіцієнт, що враховує тип середовища, в якому відбувається нагрівання, для води  $n = 3$ ;

$\psi$  – коефіцієнт форми, для пластини

$$\psi = \frac{1}{n+1} = \frac{1}{3+1} = \frac{1}{4}.$$

Використовуючи довідкові табличні дані (додаток В) з ентальпій продуктів, знаходимо для яловичини:

а) за  $t_{v \text{ поч}} = -11,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_{\text{поч}} = 23,8 \text{ кДж/кг}$ ;

б) за  $t_{v \text{ кін}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_{\text{кін}} = 246,2 \text{ кДж/кг}$ .

Питоме теплове навантаження

$$q = h_{кин} - h_{ноч} = 246,2 - 23,8 = 222,4 \text{ кДж/кг}.$$

Повне теплове навантаження, підведене в процесі,

$$Q = M \cdot q = 500 \cdot 222,4 = 111200 \text{ кДж}.$$

Надлишкова температура

$$\theta = t_c - t_{кр} = 8 - (-1) = 9 \text{ }^\circ\text{C},$$

де  $t_{кр}$  – криоскопічна температура, для яловичини  
 $t_{кр} = -1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Тривалість процесу розморожування

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{q \cdot \rho \cdot l}{\theta \cdot k'_\phi} \cdot \left( \frac{l}{2 \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) \cdot m = \\ &= \frac{222,4 \cdot 10^3 \cdot 1057 \cdot 0,1}{9 \cdot 1} \cdot \left( \frac{0,1}{2 \cdot 1,059} + \frac{1}{2409} \right) \cdot 1,3 = \\ &= 161728 \text{ с} = 44,9 \text{ год}, \end{aligned}$$

де  $k'_\phi$  – коефіцієнт форми, для пластини (напівтуша)  
 $k'_\phi = 1$ .

Необхідна теплопродуктивність для розморожування

$$\dot{Q}_T = \frac{Q}{\tau} = \frac{111200}{161728} = 0,69 \text{ кВт}.$$

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Козін В. М. Холодильні технології : навч. посіб. / В. М. Козін, Ю. М. Вертепов. – Суми : Сумський державний університет, 2014. – 189 с.

2. Бараненко А. В. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов (Часть III. Теплофизические основы) / А. В. Бараненко, В. Е. Куцакова, Е. И. Борзенко, С. В. Фролов. – Москва : Колосс, 2004. – 255 с.

3. Румянцев Ю. Д. Холодильная техника / Ю. Д. Румянцев, В. С. Калюнов. – Санкт-Петербург : Изд-во «Профессия», 2005. – 360 с.

4. Шавра В. М. Основы холодильной техники и технологии / В. М. Шавра. – Москва : Дели принт, 2004. – 272 с.

5. Холод в машиностроении / А. П. Клименко, Н. В. Новиков, Б. Л. Смоленский и др. – Москва : Машиностроение, 1977. – 192 с.

6. Физико-технические основы холодильной обработки пищевых продуктов / Г. Д. Аверин и др. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 255 с.

7. Технология хранения растительного сырья. Физиологические, теплофизические и транспортные свойства : учебное пособие / Ф. П. Бедин, Е. Ф. Балан и др. – Одесса : Астропринт, 2002. – 306 с.

8. Холодильные технологии рыбных продуктов / Л. И. Константинов, Л. Г. Мельниченко и др. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 184 с.

9. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов (Часть I. Теоретические основы консервирования) / В. Е. Куцакова, И. А. Рогов, С. В. Фролов, В. И. Филиппов. – Москва : Колосс, 2001. – 134 с.

10. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. Часть II. Общая технология отрасли: учеб. пособие / В. Е. Куцакова, Н. А. Уварова, С. В. Мурашев, А. Л. Ишевский. – Санкт-Петербург : СПбГУНиПТ, 2002. – 289 с.

11. Различные области применения холода / под ред. А. В. Быкова. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 272 с.

12. Консервирование пищевых продуктов холодом (теплофизические основы) / И. А. Рогов, В. Е. Куцакова, В. И. Филиппов, С. В. Фролов. – Москва : Колосс, 2002. – 184 с.

13. Румянцев Ю. Д. Холодильная техника : учеб. для вузов / Ю. Д. Румянцев, В. С. Калюнов. – Санкт-Петербург : Изд-во «Профессия», 2005. – 360 с. : ил.

14. Степанов Д. В. Холодильна техніка та технологія : навчальний посібник / Д. В. Степанов, Н. Д. Степанова. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 95 с.

15. Фролов С. В. Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов / С. В. Фролов, В. Е. Куцакова, В. Л. Кипнис. – Москва : Колос-Пресс, 2001. – 144 с.

16. Холодильная технология пищевых продуктов: учебник для вузов : в 3 ч. Часть I. Теплофизические основы / А. Н. Баненко и др. – Санкт-Петербург : ГИОРД, 2007. – 224 с. : ил.

17. Холодильная технология пищевых продуктов: учебник для вузов : в 3 ч. Часть II. Технологические основы / В. И. Филиппов, М. И. Кременевская, В. Е. Куцакова. – Санкт-Петербург : ГИОРД, 2008. – 576 с. : ил.

18. Холодильные установки. Проектирование: учеб. пособие / И. Г. Чумак, А. Ю. Лагутин, В. П. Чепурненко, С. Ю. Ларьяновский и др. ; под ред. д-ра техн. наук,

проф. И. Г. Чумака. – 3-е изд., перераб. и доп. – Одесса : Друк, 2007. – 480 с.

19. Цуранов О. А. Холодильная техника и технология / О. А. Цуранов, А. Г. Крысин ; под ред. проф. В. А. Гуляева. – Санкт-Петербург : Лидер, 2004. – 448 с. : ил.

20. Шавра В. М. Основы холодильной техники и технологии (для учащихся и практических работников) / В. М. Шавра. – Москва : ДеЛи Принт, 2004. – 272 с.

21. Методичні вказівки до практичних занять «Теорія подібності теплових процесів», «Конвекція» з дисципліни «Тепломасообмін» / укладачі: В. М. Козін, С. С. Мелейчук. – Суми : Сумський державний університет, 2011. – Ч. 2. – 73 с.



## ДОДАТОК А

(обов'язковий)

Таблиця А.1 – Мінімальне необхідне лінійне стиснення охоплюваної деталі

<i>d, мм</i>	<i>Δd у мкм для посадки</i>									
	<i>n6</i>	<i>m6</i>	<i>k6</i>	<i>js6</i>	<i>u7</i>	<i>s6</i>	<i>r6</i>	<i>u8, s8</i>	<i>x8, a8</i>	<i>z8, x8</i>
	<i>Г</i>	<i>Т</i>	<i>Н</i>	<i>П</i>	<i>Гр</i>	<i>Пр</i>	<i>Пл</i>	<i>Пр1з</i>	<i>Пр2з</i>	<i>Пр3з</i>
30–50	47	39	32	20	99	64	59	122	137	187
50–80	55	45	38	25	135	80	70	150	180	240
80–120	65	55	46	32	180	115	90	180	230	300
120–180	77	65	55	39	245	150	110	225	300	380
180–260	90	75	65	46	330	195	135	280	395	480
260–360	110	90	80	58	440	260	175	345	510	605
360–500	130	110	95	70	595	350	220	445	670	790

Таблиця А.2 – Відносні температурні коефіцієнти лінійного розширення (стискування) матеріалів

Матеріал	$\alpha \cdot 10^6, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Сталь загартована	14
Фасонне сталеве литво	12
Ковкий чавун	12
Сталь загартована	14
Мідь	17
Алюмінієвий сплав	23
Бронза (олов'яниста)	21
Латунь	20

## ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

Таблиця Б.1 – Розрахункові значення теплофізичних характеристик талих і мерзлих ґрунтів (згідно з СНіП II-Б.6-66)\*

Густина $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Сумарна вологість ґрунту $W_c$	Коефіцієнт теплопровідності ґрунту, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$						Об'ємна теплоємність ґрунту, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$	
		піски		супіски		суглинки і глини		$c_T$	$c_M$
		$\lambda_T$	$\lambda_M$	$\lambda_T$	$\lambda_M$	$\lambda_T$	$\lambda_M$		
1200	0,05	0,466	0,605	–	–	–	–	1194	1089
1200	0,10	0,722	0,919	0,442	0,524	–	–	1341	1131
1400	0,05	0,663	0,803	–	–	–	–	1383	1257
1400	0,10	1,013	1,257	0,605	0,803	0,512	0,794	1550	1320
1400	0,15	1,164	1,455	0,826	1,024	0,652	0,978	1718	1383
1400	0,20	–	–	0,978	1,222	0,757	1,094	1886	1446
1400	0,25	–	–	1,071	1,350	0,838	1,164	2053	1508
1600	0,05	0,873	1,059	–	–	–	–	1592	1425
1600	0,10	1,222	1,571	–	–	–	–	1802	1508
1600	0,15	1,455	1,862	1,082	1,280	0,838	1,141	1969	1550
1600	0,20	1,583	2,013	1,222	1,501	1,024	1,304	2179	1655
1600	0,25	1,641	2,118	1,350	1,676	1,117	1,443	2367	1718
1600	0,30	–	2,246	1,397	1,804	1,164	1,513	2556	1802
1600	0,35	–	–	1,513	1,920	1,222	1,571	2724	1865
1600	0,40	–	–	–	2,002	1,280	1,641	2933	1948
1600	0,60	–	–	–	–	–	1,746	–	2095
1800	0,10	1,513	1,862	–	–	–	–	2011	1676
1800	0,15	1,804	2,211	1,385	1,525	0,838	1,141	2221	1760
1800	0,20	1,920	2,444	1,560	1,769	1,024	1,304	2430	1844
1800	0,25	2,037	2,595	1,664	1,979	1,117	1,443	2682	1927
1800	0,30	–	2,700	1,723	2,118	1,164	1,513	2891	2011
1800	0,35	–	–	1,757	2,246	1,222	1,571	3101	2095
1800	0,40	–	–	–	2,328	1,280	1,641	3331	2179
1800	0,60	–	–	–	–	–	1,839	–	2346
2000	0,15	2,048	2,561	1,629	1,746	–	–	2472	1969
2000	0,20	2,328	2,817	1,816	2,037	1,443	1,746	2724	2053
2000	0,25	2,630	3,166	2,014	2,246	1,571	1,920	2954	2137
2000	0,30	–	–	2,095	2,444	1,676	2,037	3226	2221
2000	0,35	–	–	–	–	1,781	2,165	3436	2325

\*Величина  $c_M$  наведена для температури  $-10^\circ\text{C}$

В інтервалі температур від  $-0,5$  до  $-10$  °C  $c'_m$  визначається від кількості води, що не замерзла за заданої температури за формулою  $c'_m = [c_m^{-10^{\circ C}} (W_c - W_n) + c_T W_n] / W_c$ .

Величину вологості ґрунту за рахунок незамерзлої води, що міститься в мерзлом ґрунті за температури  $t$ , обчислюють за формулою

$$W_n \approx k_n W_c,$$

де  $k_n$  – коефіцієнт, що враховує вид ґрунту, число пластичності  $W_n$  і температуру вибирають із таблиці Б.2.

Таблиця Б.2 – Величини коефіцієнта  $k_n$

Вид ґрунту	Число пластичності	Значення $k_n$ за температури $t$ , °C					
		-0,3	-0,5	-1	-2	-4	-10
Піски	$W_n < 0,01$	0	0	0	0	0	0
Супіски	$0,01 < W_n \leq 0,02$	0	0	0	0	0	0
	$0,02 < W_n \leq 0,07$	0,6	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25
Суглинки	$0,07 < W_n \leq 0,13$	0,7	0,65	0,6	0,5	0,45	0,4
	$0,13 < W_n \leq 0,17$	1,0	0,75	0,65	0,55	0,5	0,45
Глини	$W_n > 0,17$	1,0	0,95	0,9	0,65	0,6	0,55

Таблиця Б.3 – Температура початку замерзання незасоленого ґрунту

Ґрунти	$t_{зам}^{поч}$ , °C
Піски різних фракцій	-0,10
Супіски і пилуваті піски	-0,15
Суглинки	-0,20
Глини	-0,25

Таблиця Б.4 – Температура початку замерзання торфу

Тип торфу	Сумарна вологість ґрунту $W_c$	$t_{зам}^{поч}$ , °C
Верховий, такий що погано розклався	7,30	-0,14
	5,90	-0,16
	3,27	-0,25
	1,64	-0,35
Верховий, такий що середньо розклався	3,50	-0,13
	0,90	-0,20

## ДОДАТОК В

(обов'язковий)

Таблиця В.1 – Ентальпії харчових продуктів  
за різних температур, кДж/кг

Темпе- ратура про- дукту, °С	Яловичина, птиця	Баранина	Свинина	Риба
-20	0	0	0	0
-18	4,6	4,6	4,6	5,0
-15	13,0	12,6	12,2	14,3
-12	22,2	21,8	21,4	24,8
-10	30,2	29,8	28,9	33,6
-8	39,4	38,5	34,8	43,5
-5	57,3	55,6	54,4	64,0
-3	75,3	74,0	73,3	88,4
-2	98,8	95,8	91,6	111,6
-1	185,5	179,5	170,0	212,2
0	232,2	224,0	211,8	265,8
1	235,5	227,0	214,7	269,5
2	238,2	230,0	217,8	272,9
4	245,5	236,3	224,0	280,0
8	248,2	249,0	235,8	293,9
10	264,5	255,3	241,7	301,0
12	270,8	261,4	248,2	308,0
15	280,4	271,2	256,8	314,4
20	296,8	286,7	272,5	336,0
25	312,0	301,8	287,7	353,6
30	329,0	314,0	301,8	371,0
35	345,0	334,0	317,8	388,0
40	361,0	349,8	332,2	406,0

# ДОДАТОК Г

(обов'язковий)

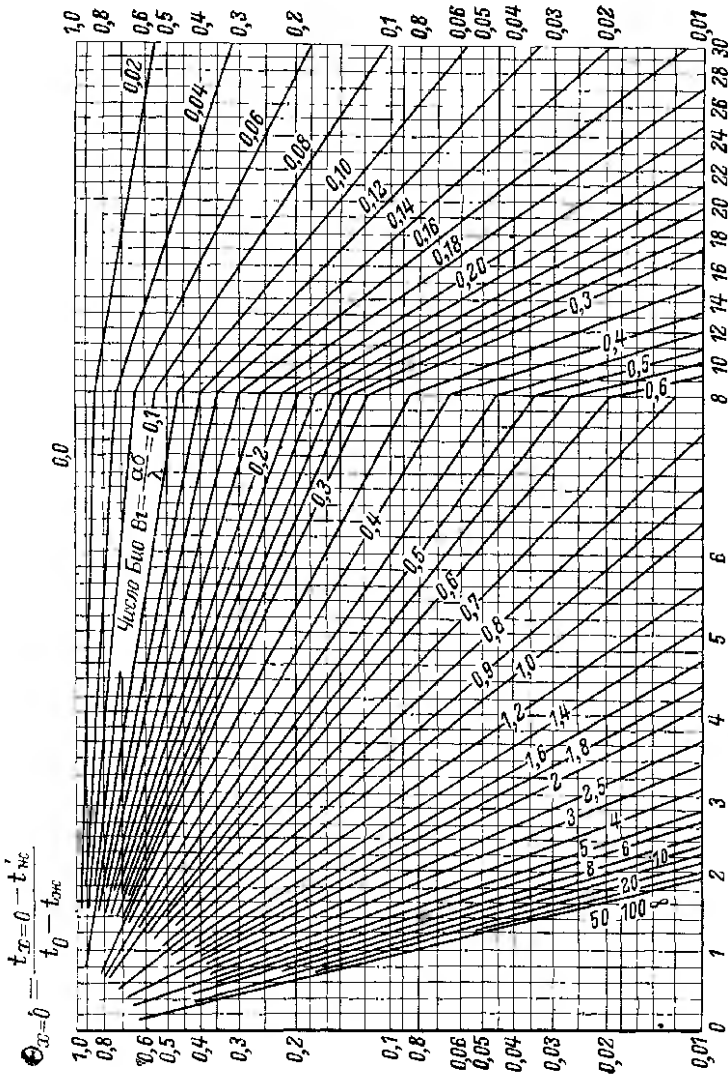


Рисунок Г.1 – Номограма залежності  $\theta = f(Bi; Fo)$   
для центра пластини

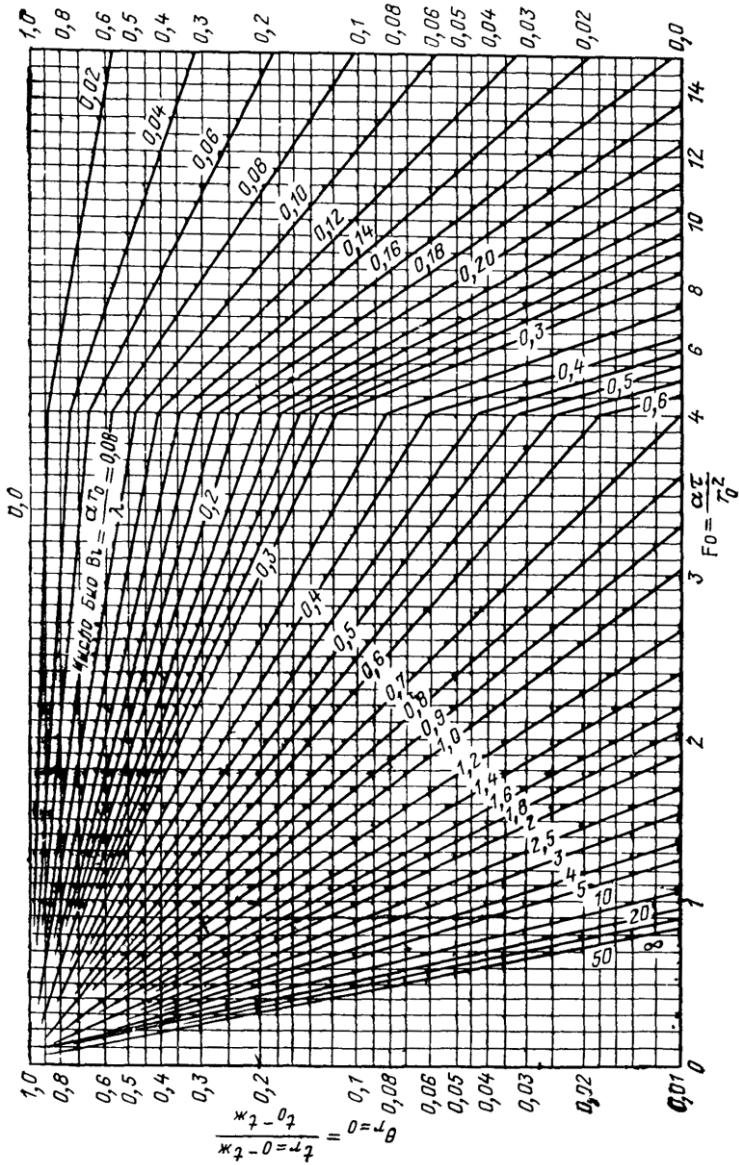


Рисунок Г.2 – Номограма залежності  $\theta = f(Bi; Fo)$  для осі циліндра

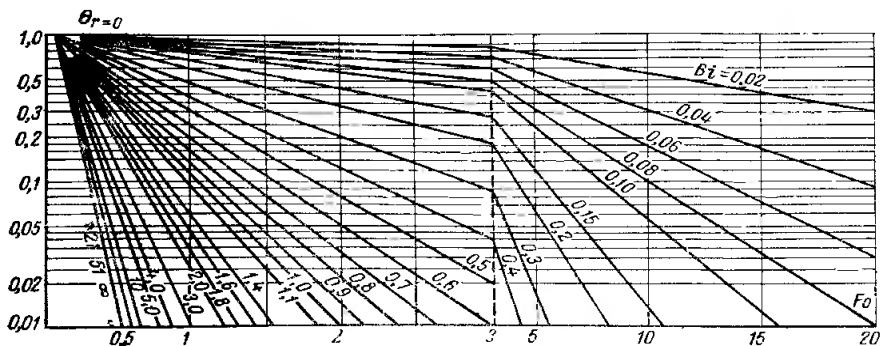


Рисунок Г.3 – Номограма залежності  $\theta = f(Bi; Fo)$   
для центра кулі



## ДОДАТОК Д

(обов'язковий)

Таблиця Д.1 – Фізичні властивості сухого повітря  
за нормальних умов (тиск 760 мм рт. ст.; температура 0 °С)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{(\text{м}\cdot\text{К})}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	11,79	0,716
-10	1,342	1,005	2,36	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,009	2,90	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	49,0	177,1	0,719

## ДОДАТОК Е

(обов'язковий)

Таблиця Е.1 – Фізичні властивості води на лінії  
насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ <i>бар</i>	$\rho,$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$c_p,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\lambda\cdot 10^2,$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$\mu\cdot 10^6,$ $\text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu\cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\beta\cdot 10^4,$ $\text{К}^{-1}$	Pr
0	1,013	999,9	4,212	55,1	1788	1,789	-0,63	13,67
10	1,013	999,7	4,191	57,4	1306	1,306	0,7	9,52
20	1,013	998,2	4,183	59,9	1004	1,006	1,82	7,02
30	1,013	995,2	4,174	61,8	801,5	0,805	3,21	5,42
40	1,013	992,2	4,174	63,5	653,3	0,659	3,87	4,31
50	1,013	988,1	4,174	64,8	549,4	0,556	4,49	3,54
60	1,013	983,2	4,179	65,9	469,4	0,478	5,11	2,98
70	1,013	977,8	4,187	66,8	406,1	0,415	5,70	2,55
80	1,013	971,8	4,195	67,4	355,1	0,365	6,32	2,21
90	1,013	965,3	4,208	68,0	314,9	0,326	6,95	1,95
100	1,013	958,4	4,220	68,3	282,5	0,295	7,52	1,75
110	1,43	951,0	4,233	68,5	259,0	0,272	8,08	1,60
120	1,98	943,1	4,250	68,6	237,4	0,252	8,64	1,47
130	2,70	934,8	4,266	68,6	217,8	0,233	9,19	1,36
140	3,61	926,1	4,287	68,5	201,1	0,217	9,72	1,26
150	4,76	917,0	4,313	68,4	186,4	0,203	10,3	1,17
160	6,18	907,4	4,346	68,3	173,6	0,191	10,7	1,10
170	7,92	897,3	4,380	67,9	162,8	0,181	11,3	1,05
180	10,03	886,9	4,417	67,4	153,0	0,173	11,9	1,00
190	12,55	876,0	4,459	67,0	144,2	0,165	12,6	0,96
200	15,55	863,0	4,505	66,3	136,4	0,158	13,3	0,93

## ДОДАТОК Ж (обов'язковий)

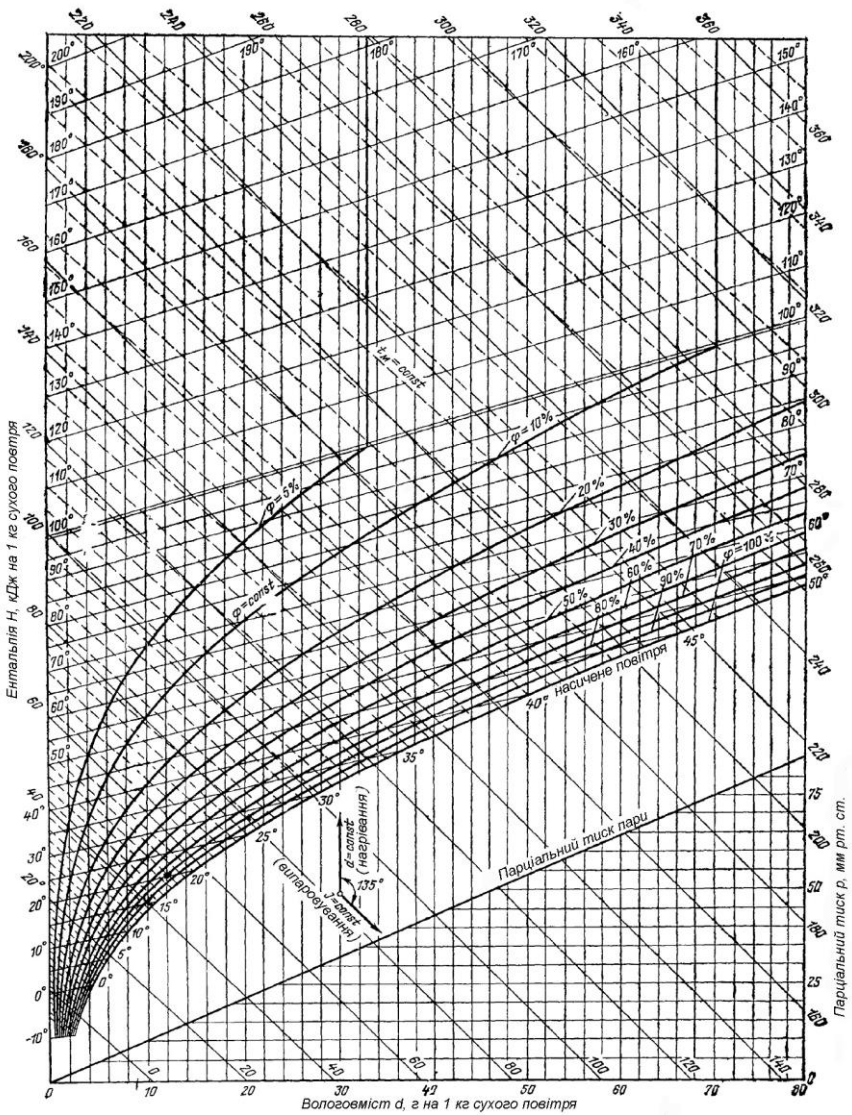


Рисунок Ж.1 –  $h, d$ -діаграма для вологого повітря  
за  $p = 745 \text{ мм рт. ст.}$

Навчальне видання

**Козін Віктор Миколайович,  
Шарапов Сергій Олегович**

# **ХОЛОДИЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСНОВИ ТЕОРІЇ, ПРИКЛАДИ І ЗАВДАННЯ**

Навчальний посібник

Художнє оформлення обкладинки С. О. Шарапова  
Редактори: Н. З. Клочко, С. М. Симоненко  
Комп'ютерне верстання В. М. Козіна

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 8,14. Обл.-вид. арк. 7,98. Тираж 300 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.