

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Харківська національна академія міського господарства

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ,  
ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ,  
КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ  
З ДИСЦИПЛІНИ

# ТЕРМОДИНАМІКА І ТЕПЛОПЕРЕДАЧА З ОСНОВАМИ ФІЗИЧНОЇ ХІМІЇ

*(для студентів 5 курсу заочної форми навчання  
освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр, напрямів підготовки  
0926 – «Водні ресурси», 6.060103 – «Гідротехніка (водні ресурси)»  
спеціальності «Водопостачання та водовідведення»)*

Харків  
ХНАМГ  
2011

Методичні вказівки до практичних занять, лабораторної роботи, контрольної роботи з дисципліни «Термодинаміка і теплопередача з основами фізичної хімії» (для студентів 5 курсу заочної форми навчання освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр, напрямів підготовки 0926 – «Водні ресурси», 6.060103 – «Гідротехніка (водні ресурси)» спеціальності «Водопостачання та водовідведення») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: С. Ю. Нікулін, Н. Ю. Колеснік. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 46 с.

Укладачі: С. Ю. Нікулін,  
Н. Ю. Колеснік

Рецензент: доц., канд. техн. наук М. Я. Берещук

Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення та очистки вод,  
протокол № 1 від 02.09.2008 р.

## ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Дисципліна «Термодинаміка і теплопередача з основами фізичної хімії» є одною з профільюючих дисциплін спеціальності «Водопостачання та водовідведення» за напрямками підготовки 0926 – «Водні ресурси», 6.060103 – «Гідротехніка (водні ресурси)». Комплексний характер цієї дисципліни обумовлений наявністю в системах холодного і гарячого водопостачання різних теплообмінних пристроїв.

Будівництво водяних та теплових мереж, а також внутрішніх мереж опалення, холодного і гарячого водопостачання населених міст і промислових підприємств пов'язане з великими витратами матеріалів і людських ресурсів. Великі витрати теплоти також призводять до значних витрат палива і енергоресурсів на їх виробку. Отже від теплотехнічного розрахунку залежать тепловитрати будинків і мереж. І, як слідство, вартість систем опалення та водопостачання, залежить ефективність використання капітальних внесків витрат у будівництво цих систем. У промисловості при розрахунках оборотних систем водопостачання, вода яку використовують у основному для охолодження обладнання та продукції необхідно враховувати теплотехнічні умови експлуатації розподільчих елементів систем водопостачання, а також фізико-хімічний склад охолоджуваної води. Останній фактор разом з теплотехнічним є визначальними з точки зору нормальних (безаварійних) умов експлуатації систем водопостачання, охолодження та водовідведення для виробництв з великими питомими тепловими потоками.

У методичних вказівках до практичних занять з курсу «Термодинаміка і теплопередача з основами фізичної хімії» наведені основні теоретичні положення, практичні математичні залежності, що необхідні для виконання інженерних розрахунків, у яких визначаються необхідний та дійсний опір теплопередачі, товщину стіни, наведено основні фактори впливу на розрахунок основних елементів систем водяного й випарного охолодження фізико-хімічних процесів у охолоджувачі, наведені приклади розв'язання задач з теплотехнічних розрахунків.

У методичних вказівках до контрольної роботи з курсу «Термодинаміка і теплопередача з основами фізичної хімії» наведено варіанти контрольних робіт, що містять задачі: виконання деяких екологічних завдань, з термодинаміки до систем каналізації або з теплопередачі крізь будівельні конструкції або конструктивного розрахунку теплообмінного апарату. Містять перелік літератури, що необхідна при виконанні практичних розрахунків.

У методичних вказівках до лабораторної роботи з курсу «Термодинаміка і теплопередача з основами фізичної хімії» наведено методику розрахунку й визначення стабільності води в залежності від фізико-хімічного складу охолоджувача, зрушення вуглецевої рівноваги в область виникнення відкладень або корозії та оцінка можливого впливу відкладень на теплопровідну спроможність металевої плоскої та циліндрової стінки систем охолодження.

# І. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

## *Робоча програма*

*Практичні заняття відповідно до змістовних модулів містять матеріали з тем:*

- **ЗМ 1.1. Технічна термодинаміка:** Параметри стану робочого тіла. Основні закони ідеальних газів. Внутрішня енергія робочого тіла. Теплоємність газів. Перший закон термодинаміки. Визначення Роботи. Перший закон термодинаміки відповідно до основних газових законів. Теплопровідність. Визначення теплового потоку крізь плоску й циліндричну стінку. Приклади розв'язання задач з тем.

- **ЗМ 1.2. Теплопередача й теплообмінні апарати, що використовують в системах водопостачання та водовідведення з основами фізичної хімії:** Визначення опору теплопередачі двошарової плоскої стінки. Визначення площі поверхні теплообмінного апарату й кінцевих температур потоків рідини. Визначення впливу, на розрахунок основних елементів, систем водяного й випарного охолодження фізико-хімічних процесів у охолоджувачі. Приклади розв'язання задач з тем.

## *Методичні вказівки*

На практичних заняттях студенти вивчають основні теоретичні положення, математичні залежності термодинаміки в межах визначених тем, які необхідні для виконання практичних розрахунків і контрольної роботи. Розглядають приклади вирішення задач: загальних екологічних; визначення параметрів стану ідеальних газів; визначення температури внутрішньої поверхні й оцінки умов експлуатації каналізаційних труб; визначення необхідного та дійсного опору теплопередачі та товщини плоскої однорідної стінки конструкцій, що огорожують, а також з теплотехнічного розрахунку трубчатих елементів і в цілому теплообмінного пристрою.

### *1. Технічна термодинаміка*

#### *1.1. Параметри стану робочого тіла*

Величини, що характеризують фізичний стан робочого тіла називають параметрами стану. До них відносять тиск, температуру й питомий об'єм.

Тиском називають силу, що діє на одиницю площини поверхні тіла в напрямку нормалі до неї. В техніці розрізняють абсолютний, надлишковий (манометричний) тиск і розрядження. Абсолютний тиск – це дійсний тиск робочого тіла всередині сосуда; надлишковий тиск – це різниця між абсолютним тиском у сосуді й тиском оточуючого середовища. Таким чином, якщо тиск у сосуді перевищує тиск оточуючого середовища, то

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{ман}} + P_{\text{бар}}, \quad (1.1)$$

де  $P_{\text{абс}}$  - абсолютний тиск у сосуді, Па;

$P_{\text{ман}}$  - манометричний тиск, Па;

$P_{\text{бар}}$  - тиск оточуючого середовища, що також називають барометричним чи атмосферним, Па.

Якщо абсолютний тиск менше ніж тиск оточуючого середовища, різницю між ними називають розрядженням чи вакуумом. У такому випадку

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{бар}} - P_{\text{вак}}, \quad (1.2)$$

де  $P_{\text{вак}}$  - розрядження (вакуум), Па.

Прибори для вимірювання тиску робочого тіла, більшого за атмосферний, називають манометром. Розрядження вимірюють за допомогою вакуумметра, що показує різницю між тиском оточуючого середовища й абсолютним тиском газу в посуді.

Слід мати на увазі, що під час визначення тиску за висотою стовпчика ртуті, на показники приладу впливає не тільки тиск, що вимірюють, а також температура ртуті, тому що зі зміною останньої змінюється щільність ртуті, як слідство, висота її стовпчика. Тому висоту ртутного стовпчика необхідно привести до 0 °С введенням поправки на температуру ртуті в приладі за формулою

$$P_{0 \text{ бар}} = P_{\text{бар}} (1 - 0,000172 t), \quad (1.3)$$

де  $P_{0 \text{ бар}}$  - барометричний тиск який приведений до 0 °С, Па;

$P_{\text{бар}}$  - дійсний тиск при температурі повітря  $t$ , Па;

$t$  - температура повітря, °С.

Температура є мірою середньої кінетичної енергії молекул і ступеня нагріву тіла. Її вимірюють за термодинамічною та Міжнародною практичною температурними шкалами. Температуру, що вимірюють за термодинамічною шкалою позначають  $T$ , одиниця термодинамічної шкали – кельвін(К). Температуру, що вимірюють за Міжнародною практичною шкалою позначають  $t$  і виражають в градусах Цельсія (°С). Співвідношення між двома значеннями температури визначають за формулою

$$T = t + 273,15\text{К}. \quad (1.4)$$

Питомим об'ємом робочого тіла називають об'єм одиниці маси тіла. Питомий об'єм позначається  $\nu$ , його виражають у кубічних метрах на кілограм, м<sup>3</sup>/кг,

$$\nu = V/M. \quad (1.5)$$

Щільністю робочого тіла називають щільність однорідного тіла, що має об'єм 1 м<sup>3</sup> та масу 1 кг. Щільність позначають буквою  $\rho$  та визначають у кг/м<sup>3</sup>,

$$\rho = M/V = 1/\nu. \quad (1.6)$$

## 1.2. Основні закони ідеальних газів

Клайперон встановив закон для ідеальних газів у вигляді рівняння Клайперона:

$$PV = MRT, \quad (1.7)$$

де  $P$  - абсолютний тиск, Па;

$V$  - об'єм газу, м<sup>3</sup>;

$M$  - маса газу, кг;

$T$  - абсолютна температура, К;

$R$  - універсальна газова постійна, Дж/(кг К),  $R = 8314/\mu$ ;

$\mu$  - молекулярна маса, кмоль.

Для газу масою 1 кг характеризуючи рівняння стану (1.7) має вигляд:

$$P_v = RT \quad (1.8)$$

З рівняння Клайперона витікають закони ідеальних газів, що характеризують ізотермічний ( $T = \text{const}$ , закон Бойля-Маріотта), ізобарний ( $P = \text{const}$ , закон Гей-Люссака) та ізохорний ( $V = \text{const}$ , закон Шарля) процеси.

Якщо характерне рівняння (1.8) записати при  $T = \text{const}$ , одержимо закон Бойля-Маріотта, тобто  $P_v = \text{const}$ , звідки

$$P_1 v_1 = P_2 v_2, \quad (1.9)$$

$$P_2/P_1 = v_1/v_2 = \rho_2/\rho_1. \quad (1.10)$$

Якщо характерне рівняння (1.8) записати при  $P = \text{const}$ , одержимо закон Гей-Люссака, тобто  $v/T = \text{const}$ , звідки

$$T_2/T_1 = v_2/v_1. \quad (1.11)$$

Якщо характерне рівняння (1.8) записати при  $v = \text{const}$ , одержимо закон Гей-Люссака, тобто  $P/T = \text{const}$ , звідки

$$T_2/T_1 = P_2/P_1. \quad (1.12)$$

### **1.3 Внутрішня енергія робочого тіла. Теплоємність газів**

У загальному випадку повна енергія робочого тіла складається з його внутрішньої  $U$  та зовнішньої  $U_{\text{вн}}$  енергій, тобто

$$E = U + U_{\text{вн}}. \quad (1.13)$$

У свою чергу, внутрішня енергія робочого тіла є сукупністю кінетичної енергії молекул, що хаотично рухаються, енергії коливань атомів усередині молекул і потенційної енергії сил взаємодії молекул.

Зовнішня енергія робочого тіла складається з кінетичної енергії, його поступового руху  $E_{\text{к}}$  і потенційної енергії  $E_{\text{п}}$ , що є енергією взаємодії робочого тіла з гравітаційним полем, тобто  $U_{\text{вн}} = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}$ , тому повна енергія, що визначається за формулою (1.13), приймає вигляд  $E = U + E_{\text{к}} + E_{\text{п}}$ . Ці формули належать реально існуючим у природі тілам – газам, проте для кращого розуміння процесів у термодинаміці використовують поняття ідеального газу.

Під ідеальним газом розуміють сукупність матеріальних пружних молекул зневажаючи малими об'ємами, що не мають сил взаємного тяжіння і відштовхування. Таким чином, внутрішня енергія ідеального газу визначається тільки ступенем його нагріву, тобто температурою, тому що сили молекулярної взаємодії у нього відсутні. Тому можна записати  $U_i = f(T)$ .

Внутрішня енергія реального газу визначається не тільки температурою, але й силовою молекулярною взаємодією, тобто вона залежить не тільки від температури, але й від питомого об'єму газу. Тому можна написати  $U_p = f(T, v)$ .

У теплотехнічних розрахунках звичайно потрібно знати не абсолютне значення внутрішньої енергії  $U$ , а її зміну в даному процесі  $\Delta U$ . При цьому відрахунок можна вести від будь-якого умовного нуля (за початок відрахунку можна прийняти значення внутрішньої енергії спочатку процесу). Тоді зміна внутрішньої енергії в деякому процесі 1-2:

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1. \quad (1.14)$$

Теплоємністю газів називають кількість теплоти, яку необхідно підвести до тіла (газу) для того, щоб підвищити температуру будь-якої одиниці кількості на  $1^\circ\text{C}$ .

Теплоємність газу залежить від його температури. За цією ознакою відрізняють середню та істинну теплоємність.

Середня теплоємність у заданому інтервалі температур – це кількість теплоти, що подається до одиниці кількості газу (чи відбирається від нього) під час зміни температури газу від  $t_1$  до  $t_2$  і визначається за формулою

$$c_m = \frac{q}{t_2 - t_1}. \quad (1.15)$$

Край цього відношення, коли різниця температур прямує до нуля, називають істиною теплоємністю чи теплоємністю при заданій температурі. Аналітично остання визначається як  $c = d_q/d_t$ .

#### **1.4. Перший закон термодинаміки. Визначення Роботи. Перший закон термодинаміки відповідно до основних газових законів**

Перший закон термодинаміки встановлює еквівалентність під час взаємних перетворень механічної і теплової енергії, й математично може бути записана так:

$$Q = L, \quad (1.16)$$

де Q- кількість теплоти, що перетворилась у роботу;

L- робота, отримана за рахунок теплоти Q.

Використовуючи перший закон термодинаміки, можна визначити коефіцієнт корисної дії теплосилових приладів, що характеризує ступінь досконалості перетворення ними теплоти в роботу за формулою

$$\eta_{cm} = \frac{3600}{Q_n^p b}, \quad (1.17)$$

де  $Q_{рн}$ - теплотворна здатність палива, кДж/кг;

b- витрата палива на 1 кВт·год..

Для вкрай малої зміни стану 1 кг газу аналітичне відбиття першого закону термодинаміки має вигляд:

$$dq = du + Cl, \quad (1.18)$$

де du – зміна внутрішньої енергії 1 кг ідеального газу для будь-якого процесу з вкрай малою зміною стану,  $du = cv dt$ ;

dl – робота розширення 1 кг ідеального газу для будь-якого процесу з вкрай малою зміною стану,  $dl = pdv$ .

Для кінцевої зміни стану рівняння (1.17) має вигляд:

$$q = \Delta u + l, \quad (1.19)$$

$$l = \int_{v_1}^{v_2} pdv$$

де l– робота, що виконана за цикл,

#### **Основними термодинамічними процесами є:**

1) процес підводу чи відведення теплоти при постійному об'ємі газу ( $V = \text{const}$ ) – ізохорний процес;

2) процес підводу чи відведення теплоти при постійному тиску ( $P = \text{const}$ ) – ізобарний процес;

3) процес підводу чи відведення теплоти при постійній температурі ( $T = \text{const}$ ) - ізотермічний.

Співвідношення між параметрами стану для цих процесів визначають за формулами (1.9)-(1.12).

Зміну внутрішньої енергії, виконану роботу й кількість наведеної теплоти визначають за формулами:

$$\begin{aligned} &\text{для ізохорного процесу} \\ &\Delta u = Q_v = c_{vm} \cdot M(t_2 - t_1), \\ &l=0. \end{aligned} \quad (1.20)$$

$$\text{для ізобарного процесу} \\ L = p(V_2 - V_1) = RM(T_2 - T_1), \quad (1.21)$$

$$Q_p = c_{pm} \cdot M(t_2 - t_1), \quad (1.22)$$

$$\text{для ізотермічного процесу} \\ q_l = l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_2 v_2 \ln \frac{p_1}{p_2} = \dots, \quad (1.23) \\ \Delta u = 0.$$

### 1.5. Теплопровідність. Визначення теплового потоку крізь плоску й циліндричну стінку

Під теплопровідністю розуміють процес перенесення теплоти рухом торкання (співударів) часток у твердому тілі. Питомий тепловий потік, що передається крізь стінку різноманітного профілю, визначається за формулами: для однорідної плоскої стінки

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2), \quad (1.24)$$

де  $q$  – тепловий потік, що передається крізь стінку, Вт/м<sup>2</sup>(ккал/м<sup>2</sup>·год.);

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°С;

$\delta$  – товщина стінки, м;

$t_1, t_2$  – температури на поверхні стінки (зовнішньої і внутрішньої, чи навпаки), °С.

для одношарової циліндричної стінки (для труби на одиницю її довжини)

$$q_l = \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (1.25)$$

де  $d_1, d_2$  – відносно зовнішній і внутрішній діаметр стінки труби, м (усі інші позначення як у (1.23)).

### 1.6 Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Гравітаційне поле Землі притягає атмосферу і створює таким чином на поверхні тиск, достатній для підтримки стовпчика ртуті в барометрі висотою 75 см (101325 Па) при температурі 273 К. Визначити масу атмосфери, приймаючи, що радіус Землі дорівнює 6400 км. Зміну гравітаційної сили не враховувати.

Рішення.

Визначимо об'єм Землі:

$$V = 4/3 \pi R^3 = 1,09 \cdot 10^{21} \text{ м}^3.$$

Масу атмосфери визначимо з формули (1.7) з урахуванням того, що на одиницю маси повітря діє така ж сама сила важкості, що й на одиницю маси ртуті

$$M = \frac{PV}{RT} = \frac{101325 \cdot 1,09 \cdot 10^{21}}{287 \cdot 273} = 1,409 \cdot 10^{21} \text{ кг.}$$

Приклад 2. Манометр, що встановлений на паровому котлі, показує тиск 0,17 МПа. Визначити абсолютний тиск у котлі, якщо тиск, що визначений за ртутним барометром при температурі 298 К дорівнює 740 мм. рт. ст.



Рішення.

Показання барометра  $P_{\text{бар}}$  одержане при  $25^{\circ}\text{C}$ , тому його слід привести до  $0^{\circ}\text{C}$  за формулою (1.3, але попереду одержимо тиск у Паскалях)

$$P_{\text{бар}} = 740 \cdot 133,3 = 98642 \text{ Па} \approx 0,099 \text{ МПа};$$

$$P_{\text{бар}} = 98642(1 - 0,000172 \cdot 25) = 98217 \text{ Па} \approx 0,098 \text{ Мпа.}$$

Абсолютний тиск у котлі знайдемо за формулою (1.1)

$$P_{\text{бар}} = 0,17 + 0,098 = 0,268 \text{ Мпа.}$$

Приклад 3. Водій автомобілю встановив, що тиск у шинах перед поїздкою дорівнює 2,1 атм при температурі  $22^{\circ}\text{C}$ . Після декількох годин їзди він знову перевіряв тиск, він дорівнює 2,5 атм. На скільки зросла температура повітря в шинах?

Рішення.

Запишемо рівняння (1.12) для першого й другого стану з умовою, що місткість шин не змінюється

$$\frac{2,5}{2,1} = \frac{T_2}{295},$$

звідки  $T_2 = 295 \cdot 1,19 = 351 \text{ К} = 78^{\circ}\text{C}$ , тобто температура в шинах зросла на  $78 - 22 = 56^{\circ}\text{C}$ .

Приклад 4. Яка щільність оксиду вуглецю в повітрі, що має температуру  $28^{\circ}\text{C}$  і тиск 0,01 МПа, якщо відомо, що з тиском 0,2 МПа й температурою  $15^{\circ}\text{C}$  вона дорівнює  $1,169 \text{ кг/м}^3$  ?

Рішення.

$$\text{З рівняння (1.8)} \quad \frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}, \quad \text{з урахуванням (1.6)} \quad \frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2}.$$

$$\text{Звідки} \quad \rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} = 1,169 \cdot \frac{0,01}{0,1} \cdot \frac{288}{301} = 0,111 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Приклад 5. У балоні місткістю 0,2 м<sup>3</sup> знаходиться кисень під тиском 12 МПа при температурі  $25^{\circ}\text{C}$ . Скільки витрачено кисню, якщо тиск у балоні знижено до 8,5 МПа, а температуру до  $17^{\circ}\text{C}$ ?

Рішення.

Маса кисню до втрати визначається з рівняння (1.7)

$$M_1 = \frac{p_1 v_1}{RT_1} = \frac{12 \cdot 10^6 \cdot 0,2}{259,8 \cdot 298} = 30,99 \text{ кг},$$

де  $R(\text{O}_2) = 8314/32 = 259,8 \text{ Дж/кг/К}$ .

Маса кисню після втрати:

$$M_2 = \frac{p_2 v_2}{RT_2} = \frac{8,5 \cdot 10^6 \cdot 0,2}{259,8 \cdot 290} = 22,56 \text{ кг}.$$

Маса витраченого кисню:

$$\Delta M = 30,99 - 22,56 = 8,43 \text{ кг}.$$

Приклад 6. Знайти часову витрату палива, необхідну для роботи парової турбіни потужністю 25 МВт, якщо теплота згоряння палива відома, що на перетворення теплової енергії в механічну витрачається лише 35% теплоти палива.

Рішення.

Часову витрату палива знайдемо за формулою (1.16)

$$b = \frac{Nt}{\eta Q_n^p} = \frac{3600 \cdot 25 \cdot 10^3}{0,35 \cdot 33850} = 7,56 \cdot 10^3 \text{ кг/ч} = 7,56 \text{ т/год.}$$

Приклад 7. Сосуд місткістю 60л заповнено киснем з тиском 12,5 МПа. Визначити кінцевий тиск кисню й кількість підведеної до нього теплоти, якщо початкова температура кисню 10°C, кінцева – 30°C, теплоємність кисню 0,656 кДж/кг/К.

Рішення.

Кінцевий тиск кисню визначимо для ізохорного процесу за формулою (1.12):

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 12,5 \frac{303}{283} = 13,4 \text{ МПа.}$$

Масу витраченого кисню знайдемо з рівняння (1.7)

$$M = \frac{p_1 v_1}{RT_1} = \frac{12,5 \cdot 10^6 \cdot 0,06}{259,8 \cdot 283} = 10,2 \text{ кг.}$$

Кількість підведеної до кисню теплоти визначає з формули (1.19):

$$Q = 10,2 \cdot 0,656 \cdot (30 - 10) = 133,8 \text{ кДж.}$$

Приклад 8. У циліндрі діаметром 0,5м знаходиться 0,2 м<sup>3</sup> повітря з постійним тиском 0,2 мПа. Його підігрівають до 200°C. Теплоємність повітря прийняти постійною що дорівнює 1 кДж/кг/К. Визначити кількість витраченої теплоти, роботу розширення й переміщення поршню.

Рішення. Масу повітря знайдемо з рівняння (1.7):

$$M = \frac{pv}{RT_1} = \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 0,2}{287 \cdot 291} = 0,48 \text{ кг.}$$

Кількість підведеної до повітря теплоти визначаємо з формули (1.21):

$$Q = 0,48 \cdot 1 \cdot (200 - 18) = 87,3 \text{ кДж.}$$

Роботу розширення знайдемо з формули (1.20):

$$L = 0,48 \cdot 287 \cdot (200 - 18) = 25072 \text{ Дж.}$$

З іншого боку робота розширення визначається за формулою:

$$L = p \cdot F \cdot h, \quad (1.25)$$

де  $p$  - тиск, Па;

$F$  - площа поршню, що дорівнює  $F = \pi d^2/4$  (1.26);

$h$  - переміщення поршню, м.

Переміщення поршню знайдемо з (1.26) з урахуванням (1.25):

$$h = \frac{L}{pF} = \frac{25072}{0,196 \cdot 0,2 \cdot 10^6} = 0,64 \text{ м.}$$

Приклад 9. Який максимальний шар льоду може утворюватися на поверхні прісного водоймища, якщо середня температура на верхній поверхні льоду буде зберігатися –10°C, щогодинна витрата теплоти водою крізь лід складає 24,1 ккал/ м<sup>2</sup>·ч, а коефіцієнт теплопровідності льоду 1,935 ккал/м·ч·°C?

Рішення. Максимальний шар льоду знайдемо з формули (1.23)

$$\delta = \frac{1,935 \cdot [0 - (-10)]}{24,1} = 0,8 \text{ м.}$$

**Приклад 10.** Визначити температуру внутрішньої поверхні каналізаційної труби й перевірити, чи можна прокладати каналізацію бетонними трубами діаметром 150x25 мм без теплової ізоляції в ґрунті, температура якого на глибині закладання труби безпосередньо біля її поверхні досягає  $t_2 = -1,8^\circ\text{C}$ . Температура замерзання каналізаційної рідини  $t_3 = -0,5^\circ\text{C}$ . На 1 пог. м труби втрачається 18,7 ккал/год. теплоти. Коефіцієнт теплопровідності бетону  $1,1 \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C}$ . Вплив швидкості руху рідини трубою не враховувати.

**Рішення.** Для відповіді на це питання потрібно з'ясувати, чи буде каналізаційна рідина за даними умовами намерзати на внутрішній поверхні труб; це трапиться, якщо температура внутрішньої поверхні труби буде нижче точки замерзання, що дорівнює  $t^3 = -0,5^\circ\text{C}$ .

Температуру внутрішньої поверхні труби знайдемо з формули (1.24):

$$q_l = \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda} 2,31g \frac{d_2}{d_1}},$$

$$t_1 = \frac{q_l \cdot 2,31g \frac{d_2}{d_1}}{\lambda \cdot 2\pi} = \frac{18,7 \cdot 2,31g \frac{150}{100}}{1,1 \cdot 2 \cdot 3,14} = -0,71^\circ\text{C},$$

Тому можна зробити висновок, прокладка труб на даній глибині неможлива, тому що рідина буде намерзати на поверхні труб й слід збільшити глибину закладання труб чи заізолювати їх.

## 2. Теплопередача

### 2.1 Визначення опору теплопередачі двошарової плоскої стінки, теплотехнічний розрахунок конструкції, що огорожують

**Мета теплотехнічного розрахунку** – визначення опору теплопередачі  $R_0$  двошарової плоскої стінки, що використовується в якості конструкцій, що огорожують. Розрахунок виконують відповідно до [2, п.2]. Знайдена величина  $R_0$  повинна бути не менше необхідного опору теплопередачі  $R_{отр}$ .

У розрахунках потрібно розрахувати опір теплопередачі зовнішньої плоскої стіни, горищного або безгорищного покриття, визначити опір теплопередачі перекриття над неопалюваним підвалом.

Розрахунок рекомендують виконувати в такій послідовності.

Для заданого пункту проектування виписати з [1] наступні дані: розрахункову зимову температуру зовнішнього повітря -  $t_n$ , зону вологості.

Потім з урахуванням режиму вологості приміщень за табл. 1.2. [4] знаходять умови експлуатації А чи Б конструкцій, що обгороджують.

#### 2.1.1 Теплотехнічний розрахунок стіни

Обчислюємо необхідний опір теплопередачі двошарової плоскої стіни, конструкцію якої наведено на рис.2.1,  $\text{м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}$ , що складається з пінобетону й штукатурки з вапняно-піщаного розчину, за формулою (1.1).

$$R_{OTP} = \frac{n (t_b - t_n)}{\Delta t_n \alpha_b} R_{эф}, \quad (2.1)$$

де  $n$  - коефіцієнт, прийнятий залежно від положення зовнішньої поверхні конструкцій, що обгороджують, стосовно зовнішнього повітря, приймається за табл.3 [2];

$t_b$  – розрахункова температура внутрішнього повітря, прийнята рівною  $18\text{ }^\circ\text{C}$  при  $t_n \geq -30\text{ }^\circ\text{C}$  і  $20\text{ }^\circ\text{C}$  при  $t_n \leq -31\text{ }^\circ\text{C}$ ;

$\Delta t_n$  – нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження, приймається за табл.2 [2], прийнято  $\Delta t_n = 6\text{ }^\circ\text{C}$ ;

$\alpha_b = 8,7\text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$  – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує, приймається за табл.2 [2];

$R_{эф} = 1,1$  – підвищувальний коефіцієнт, прийнятий за табл.9а\* [2];

$t_n(p)$  – розрахункова зимова температура зовнішнього повітря (параметри Б).

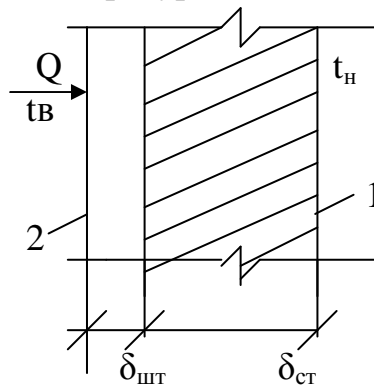


Рис.2.1 - Розрахункова конструкція стіни: 1 - стіна; 2 -штукатурний шар.

Опір теплопередачі зовнішньої стіни,  $\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C / Вт}$ , визначають за формулою

$$R_o = (1/\alpha_b) + (\delta_{шт} / \lambda_{шт}) + (\delta_{ст} / \lambda_{ст}) + (1/\alpha_n), \quad (2.2)$$

де  $\alpha_n$  – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує, прийнятий за табл.6 [2],  $\alpha_n = 23\text{ (Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ ;

$\delta_{шт}$ ,  $\delta_{ст}$  – товщина, м, відповідно штукатурного шару й стіни;

$\lambda_{шт}$ ,  $\lambda_{ст}$  – коефіцієнти теплопровідності,  $\text{Вт/м }^\circ\text{C}$ , відповідно штукатурного шару й стіни, взяті за [2, стор.18].

Приймаючи  $R_o = R_{отр}$ , одержимо:

$$R_o = R_{отр} = 1/\alpha_b + \delta_{шт} / \lambda_{шт} + \delta_{ст} / \lambda_{ст} + 1/\alpha_n, \quad (2.3)$$

відкіля визначаємо товщину окремого шару, м

$$\delta_{ст} = (R_{отр} - 1/\alpha_b - \delta_{шт} / \lambda_{шт} - 1/\alpha_n) \lambda_{ст}, \quad (2.4)$$

Для подальшого розрахунку приймають найближчий більший стандартний розмір огороження: для цегельної стіни – з урахуванням конструктивних розмірів кладки, для панельних стін – з будівельного каталогу, мінімальна товщина панелі – 250 мм.

Опір теплопередачі конструкції, що розраховують, з урахуванням стандартної товщини стіни обчислює за формулою (2.3)

Отримане значення  $R_o$  порівнюємо з величиною  $R_{отр}$

$$R_o > R_{отр}$$

Визначаємо теплову інерцію конструкції за формулою

$$D = (\delta_{шт} / \lambda_{шт}) \cdot S_{шт} + (\delta_{ст} / \lambda_{ст}) \cdot S_{ст} , \quad (2.5)$$

де  $S_{шт}$ ,  $S_{ст}$  – коефіцієнти теплозасвоєння, Вт/м<sup>2</sup>С, взяті за [2, стор.18].

### 2.1.2 Теплотехнічний розрахунок перекриття

Розрахунок зводиться до визначення товщини утеплювача  $\delta_{ут}$ . Для цього необхідно розрахувати опір теплопередачі сполученої покрівлі й багатопустотної залізобетонної панелі середньої масивності (рис. 2.2).

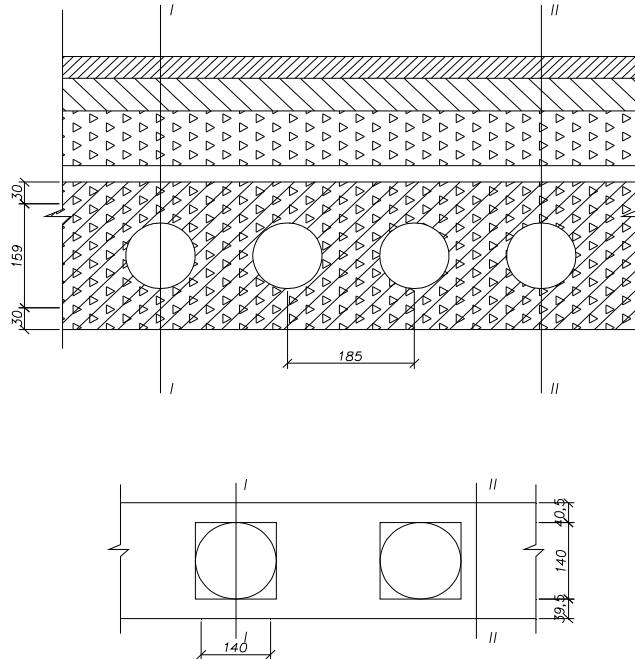


Рис. 2.2 - Розрахункова схема до розрахунку опору теплопередачі перекриття.

Необхідний опір теплопередачі  $R_{отр}$ , м<sup>2</sup>·год. °С /ккал визначаємо за табл. 1.8 [3].

Знаходимо термічний опір багатопустотної залізобетонної панелі, потім оптимальну товщину утеплювача, але без обліку водоізоляційного килима, шару, що вирівнює і пароізоляції.

Для спрощення круглі щілини – порожнечі, тобто панелі діаметром 159 мм змінюємо рівновеликими за площею квадрати зі стороною 140 мм.

Термічний опір панелі в напрямку, паралельному руху теплового потоку обчислюємо для двох характерних перерізів:

Для перерізу I-I (два шару з/б товщиною  $\delta_1 = 0,0405$  м і  $\delta_2 = 0,0395$  м з  $\lambda_{1,2} = 1,92$  (ккал/м<sup>2</sup>·год.°С) і повітряний прошарок товщиною  $\delta = 0,140$  м термічний опір визначається за формулою:

$$R_I = \delta_1 / \lambda_{1,2} + \delta_2 / \lambda_{1,2} + R_{вп} , \quad (2.6)$$

де  $R_{вп}$  – термічний опір замкнутого горизонтального повітряного прошарку при потці тепла знизу вгору визначаємо за табл. 1.6 [4]  $R_{вп} = 0,21$  (м<sup>2</sup>· год · °С)/ккал.

Для перетину II-II (товщина глухої частини панелі  $\delta = 0,22$  м) термічний опір теплопередачі визначається за формулою:

$$R_{II} = \delta / \lambda \quad (2.7)$$

Термічний опір огородження  $R_{ог}$ , м<sup>2</sup>·год.°С/ккал, визначається за формулою:

$$R_2 = \frac{(F_1 + F_{II} + \dots + F_n)}{\frac{F}{R_1} + \frac{F_{II}}{R_{II}} + \dots + \frac{F_n}{R_n}} \quad (2.8)$$

де  $R_1, R_{II}, R_n$  – термічний опір окремих ділянок,  $(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C})/\text{ккал}$ ;  
 $F_1, F_{II}, F_n$  – площа окремих ділянок,  $\text{м}^2$ .

Термічний опір панелі в напрямку, перпендикулярному до руху теплового потоку обчислюємо для трьох характерних перерізів.

Для I і III шарів товщиною 0,045 м термічний опір теплопередачі визначається за формулою (2.6).

Для визначення термічного опору другого шару панелі попередньо знаходимо середній коефіцієнт теплопровідності,  $\text{ккал}/\text{м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C}$ , за формулою:

$$\lambda_{cp} = \frac{(\lambda_1 \cdot F_1 + \lambda_2 \cdot F_2 + \dots + \lambda_n \cdot F_n)}{(F_1 + F_2 + \dots + F_n)}, \quad (2.9)$$

де  $\lambda_i, i = 1 \dots n$  – коефіцієнти теплопровідності матеріалів, що входять у розглянутий шар,  $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

-  $F$  – площа ділянок матеріалів, що входять у розглянутий шар,  $\text{м}^2$ .

Конструкція одного шару складається з повітряного прошарку товщиною  $\delta_1 = 0,14$  м і залізобетону товщиною  $\delta_2 = 0,045$  м. Для повітряного прошарку потрібно знайти еквівалентний коефіцієнт теплопровідності за формулою

$$\lambda_3 = \lambda_1 = \delta_1 / R_{в.п.} \quad (2.10)$$

Середній термічний опір для другого шару (повітряного прошарку) визначаємо за формулою

$$R_2 = \delta_{вп} / \lambda_{cp} \quad (2.11)$$

Сумарний термічний опір усіх трьох шарів панелі в напрямку, перпендикулярному до руху теплового потоку визначаємо за формулою

$$R_{\perp} = R_{1,3} \cdot 2 + R_2 \quad (2.12)$$

Різниця між  $R_{II}$  і  $R_{\perp}$  повинна складати менше ніж 25%.

Повний термічний опір багатопустотної залізобетонної плити визначаємо за формулою:

$$R = \frac{R_{II} + 2R_{\perp}}{3} \quad (2.13)$$

Загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції:

$$R_o = 1/\alpha_{в} + R_{зб.п.} + 1/\alpha_{н} \quad (2.14)$$

Знаючи величину необхідного опору сполученої покрівлі й повний термічний опір панелі, можна знайти найменшу товщину шару теплоізоляції за формулою:

$$R_o = R_{в} + R_{зб.п.} + R_{т.і.} + R_{н} = 0,354 + \delta_{т.і.} / \lambda_{т.і.} \quad (2.15)$$

звідки

$$\delta_{т.і.} = \lambda_{т.і.} (R_{отр} - 0,354) \quad (2.16)$$

## 2.2 Приклади розв'язання задач

*Приклад 1.* Визначити необхідний опір теплопередачі, якщо нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta t_{н} = 6$   $^{\circ}\text{C}$ ; підвищувальний коефіцієнт  $R_{эф} = 1,1$ ; розрахункова зимова температура зовнішнього повітря  $t_{н} = -19$   $^{\circ}\text{C}$ ; розрахункова температура внутрішнього повітря  $t_{в} = 18$   $^{\circ}\text{C}$ ; коефіцієнт,

прийнятий залежно від положення зовнішньої поверхні конструкцій, що обгороджують, стосовно зовнішнього повітря  $n = 1$ ; коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{в} = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ .

*Рішення.* Необхідний опір теплопередачі визначаємо за формулою(2.1):

$$R_{o}^{mp} = \frac{1(18 - (-19))}{6 \cdot 8,7} \cdot 1,1 = 0,78 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C/Вт)}$$

*Приклад 2.* Визначити товщину двошарової стіни, якщо необхідний опір теплопередачі  $R_{o}^{tp} = 0,78 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ ; коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{в} = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ; товщина штукатурного шару  $\delta_{шт} = 0,02 \text{ м}$ ; коефіцієнти теплопровідності,  $\text{Вт/м} \cdot \text{°C}$ , відповідно штукатурного шару й стіни  $\lambda_{шт} = 0,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ ,  $\lambda_{ст} = 0,62 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ ; коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{н} = 23 \text{ (Вт/м}^2 \cdot \text{°C)}$ .

*Рішення.* Товщину стіни визначають за формулою (2.4)

$$\delta_{ст} = \left( 0,78 - \frac{1}{8,7} - \frac{0,02}{0,7} - \frac{1}{23} \right) \cdot 0,62 = 0,368 \text{ м}$$

*Приклад 3.* Визначити дійсний опір теплопередачі, якщо коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{н} = 23 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ; товщина штукатурного шару  $\delta_{шт} = 0,02 \text{ м}$ ; товщина стіни  $\delta_{ст} = 0,4 \text{ м}$ ; коефіцієнт теплопровідності штукатурного шару  $\lambda_{шт} = 0,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ ; коефіцієнт теплопровідності стіни  $\lambda_{ст} = 0,62 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ ; коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{в} = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ .

*Рішення.* Дійсний опір теплопередачі зовнішньої стіни визначають за формулою (2.2):

$$R_{o} = \frac{1}{\alpha_{в}} + \frac{\delta_{шт}}{\lambda_{шт}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{н}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,4}{0,62} + \frac{1}{23} = 0,83 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C/Вт)}$$

*Приклад 4.* Визначити теплову інерцію двошарової конструкції, що складається з оштукатуреної стіни, якщо коефіцієнти тепло засвоєння  $S_{шт} = 8,69 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$  та  $S_{ст} = 8,54 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ; товщина штукатурного шару  $\delta_{шт} = 0,02 \text{ м}$ ; товщина стіни  $\delta_{ст} = 0,4 \text{ м}$ ; коефіцієнт теплопровідності штукатурного шару  $\lambda_{шт} = 0,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ ; коефіцієнт теплопровідності стіни  $\lambda_{ст} = 0,62 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ . Нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta_{тн} = 6 \text{ °C}$  Теплову інерцію конструкції визначають за формулою (2.5):

$$D = \left( \frac{0,02}{0,7} \right) \cdot 8,69 + \left( \frac{0,4}{0,62} \right) \cdot 8,54 = 5,76$$

*Приклад 5.* Визначити термічний опір багатопустотної залізобетонної панелі діаметром 159 мм у напрямку, паралельному руху теплового потоку.

*Рішення.* Для спрощення круглі щілини – порожнечі, тобто панелі діаметром 159 мм змінюємо на рівновеликі за площею квадратами зі стороною 140 мм. Термічний опір панелі в напрямку, паралельному руху теплового потоку обчислюємо для двох характерних перерізів:

для перерізу I-I (два шари з/б товщиною  $\delta_1 = 0,0405 \text{ м}$  і  $\delta_2 = 0,0395 \text{ м}$  з  $\lambda_{1,2} = 1,92 \text{ (ккал/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C)}$  і повітряний прошарок товщиною  $\delta = 0,140 \text{ м}$  термічний опір визначають за формулою (2.6):

$$R_I = 0,0405 / 1,92 + 0,0395 / 1,92 + 0,21 = 0,2517 \text{ [(м}^2 \text{ год} \cdot \text{ }^\circ\text{C)/ккал}$$

Згідно (2.7):

$$R_{II} = 0,22/1,92 = 0,1146 \text{ ( м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C)/ккал}$$

На підставі формули (2.8):

$$\frac{(0,14 + 0,0405 + 0,0395)}{\left(\frac{0,14}{0,25} + \frac{0,0405}{0,1146} + \frac{0,0395}{0,1146}\right)} = 0,206 \text{ ( м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C/ккал)}$$

*Приклад 6.* Визначити термічний опір багатопустотної залізобетонної панелі діаметром 159 мм у напрямку, перпендикулярному руху теплового потоку.

*Рішення.* Для спрощення круглі щілини – порожнечі, тобто панелі діаметром 159 мм змінюємо на рівновеликими за площею квадрати зі стороною 140 мм. Термічний опір панелі в напрямку, перпендикулярному до руху теплового потоку обчислюємо для трьох характерних перерізів.

Для I і III шарів товщиною 0,045 м термічний опір теплопередачі визначають за формулою (2.6). Для I і III шарів товщиною 0,045 м термічний опір теплопередачі визначають за формулою (2.6):

$$R_{1,3} = 0,045/1,92 = 0,023 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C/ккал}$$

Для повітряного прошарку потрібно знайти еквівалентний коефіцієнт теплопровідності за формулою (2.10):

$$\lambda_{\text{э}} = 0,14/0,21 = 0,667 \text{ ккал/м} \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

Середній коефіцієнт теплопровідності панелі визначають за формулою(2.9):

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{(0,667 \cdot 0,14 + 1,92 \cdot 0,045)}{(0,14 + 0,045)} = 0,967 \text{ ккал/м} \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

Середній термічний опір для другого шару (повітряного прошарку) визначають за формулою (2.11):

$$R_2 = \frac{0,14}{0,96} = 0,1448 \text{ (м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C) /ккал}$$

Сумарний термічний опір усіх трьох шарів панелі в напрямку, перпендикулярному до руху теплового потоку визначають за формулою (2.12):

$$R^{\perp} = 0,023 \cdot 2 + 0,1448 = 0,1908 \text{ [(м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C) /ккал}$$

*Приклад 7.* Визначити повний термічний опір багатопустотної залізобетонної панелі діаметром 159 мм а також загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції, якщо термічний опір у напрямку, паралельному руху теплового потоку складає  $R_{II} = 0,206 \text{ ( м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C/ккал)}$ ; термічний опір у напрямку, паралельному руху теплового потоку складає  $R^{\perp} = 0,1908 \text{ [( м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C) /ккал}$ ; коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{в} = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ ; коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{н} = 23 \text{ (Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ .

*Рішення.* Повний термічний опір багатопустотної залізобетонної плити визначаємо за формулою (2.13)

$$R_{\text{зб. п}} = (0,206 + 2 \cdot 0,1908) / 3 = 0,1959 \text{ (м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C)/ ккал}$$

Загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції визначаємо за формулою (2.14)

$$R_0 = 1/8,7 + 0,1959 + 1/23 = 0,3538 \text{ (м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C)/ ккал}$$



*Приклад 8*. Визначити товщину шару теплоізоляції та дійсний загальний опір теплопередачі перекриття, якщо розрахункова зимова температура зовнішнього повітря  $t_n = -19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; розрахункова температура внутрішнього повітря  $t_w = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; коефіцієнт, прийнятий залежно від положення зовнішньої поверхні конструкцій, що обгороджують, відносно зовнішнього повітря  $n = 0,9$ ; нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta t_n = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; утеплювач перекриття – гравій керамзитовий  $\gamma_0 = 600\text{ кг/м}^3$ , що має коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 0,17\text{ ккал/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ; загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції складає  $R_0 = 0,354(\text{м}^2\cdot\text{год}\cdot^{\circ}\text{C})/\text{ккал}$ .

*Рішення*. Необхідний опір теплопередачі  $R_0^{\text{тп}}$ ,  $\text{м}^2\cdot\text{год}\cdot^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$  визначаємо за табл. 1.8 [3].  $R_0^{\text{тп}} = 1,095\text{ м}^2\cdot\text{год}\cdot^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$  - для сполученої покрівлі при різниці розрахункових температур  $t(p) = t_w - t_n = 18 - (-19) = 37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; при  $\Delta t_n = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $n = 0,9$ .

Найменшу товщину шару теплоізоляції, керамзитового гравію знаходимо за формулою (2.16)

$$\delta \text{ к. г} = \lambda \text{ кг} (R_0^{\text{тп}} - 0,354) = 0,17 (1,095 - 0,354) = 0,126 \text{ м.}$$

Приймаємо товщину шару теплоізоляції товщиною 130 мм і знаходимо дійсний загальний опір теплопередачі перекриття за формулою (2.15)

$$R_0 = 0,354 + 0,13/0,17 = 1,119 [(\text{м}^2 \text{ год. } ^{\circ}\text{C}) / \text{ккал}] = 0,96 \text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$$

### **3. Визначення площі поверхні теплообмінного апарату й кінцевих температур потоків рідини**

#### **3.1 Конструктивний розрахунок теплообмінного пристрою**

*Мета конструктивного розрахунку* – визначення необхідної площі й кількості трубок двоходового горизонтального теплообмінника типу ТН.

##### **3.1.1 Методика конструктивного розрахунку теплообмінного пристрою**

Розрахунок рекомендують вести в такій послідовності.

Визначаємо теплове навантаження, Вт, за формулою:

$$Q = G_1 \cdot c_1 (t_1' - t_1''), \quad (3.1)$$

де  $G_1$  - годинна витрата середовища, що охолоджують, кг/год.

$c_1$  - питома масова теплоємність теплоносія, що охолоджують, Дж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$ ;

$t_1'$  - початкова температура теплоносія, що охолоджують,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_1''$  - кінцева температура теплоносія, що охолоджують,  $^{\circ}\text{C}$ .

З рівняння теплового балансу кількість теплоти, переданої від теплоносія, що охолоджують до теплоносія, що охолоджує

$$Q = G_1 \cdot c_1 (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_2 (t_2'' - t_2'), \quad (3.2)$$

знаходимо годинну витрату середовища, що охолоджує:

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 (t_2'' - t_2')}, \quad (3.3)$$

де  $G_2$  - годинна витрата середовища, що охолоджує, кг/год

$c_2$  - питома масова теплоємність теплоносія, що охолоджує, Дж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$ ;

$t_2'$  - початкова температура теплоносія, що охолоджує,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_2''$  - кінцева температура теплоносія, що охолоджує,  $^{\circ}\text{C}$ .

Приймаємо змішану схему руху теплоносіїв. Для такої схеми руху теплоносіїв температурний напор визначають за формулою:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}}, \quad (3.4)$$

де  $\Delta t_{max}$  – максимальна різниця температур між теплоносіями

$$\Delta t_{max} = t_1' - t_2'';$$

$\Delta t_{min}$  - мінімальна різниця температур між теплоносіями  $\Delta t_{min} = t_1'' - t_2'$ ;

$t_1', t_1''$  - відповідно початкова і кінцева температури теплоносія, що охолоджують, °С;

$t_2'$  - початкова температура теплоносія, що охолоджує, °С;

$t_2''$  - кінцева температура теплоносія, що охолоджує, °С.

Визначаємо водяні еквіваленти теплоносіїв, кВт/°С, за формулою:

$$W = G c, \quad (3.5)$$

Визначаємо середні температури теплоносіїв, °С, за формулами:

$$t_{1cp} = t_2' + \Delta t_{cp}. \quad (3.6)$$

$$t_{2cp} = (t_2' + t_2'')/2. \quad (3.7)$$

За відомими середніми температурами теплоносіїв за табл.П-4 та П-7 [2] визначаємо теплофізичні показники.

Визначаємо критерій Рейнольдса для теплоносіїв за формулою:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\mu}, \quad (3.8)$$

де  $V$  – масові швидкості теплоносіїв, кг/м<sup>2</sup> с;

$d$  - внутрішній та зовнішній діаметри трубки, м

$\mu$  - коефіцієнти динамічної в'язкості теплоносіїв, Нс/м<sup>2</sup>.

Якщо число  $Re \leq 2300$ , режим руху теплоносія ламінарний; якщо число  $2300 \leq Re < 10000$ , режим руху теплоносія перехідний; якщо число  $Re > 10000$ , режим руху теплоносія турбулентний.

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі від мастила до стінки труби й від стінки труби до води за формулою:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, \quad (3.9)$$

де  $Nu$  – критерій Нуссельта для води чи мастила;

$\lambda$  – коефіцієнти теплопровідності води чи мастила, Вт/м·°С;

$d$  - діаметр, зовнішній і внутрішній, м.

Для визначення критерію Нуссельта використовують критеріальні рівняння вид яких залежить від режиму течії теплоносія й форми каналу, де він рухається.

Згідно з рекомендаціями [2] використовують наступні рівняння:

При течії рідини в трубах:

*при ламінарному режимі:*

$$Nu = 1,4 \left( Re_{d_{ж}} \frac{d}{l} \right)^{0,4} Pr_{ж}^{0,33} (Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25}; \quad (3.10)$$

*при турбулентному режимі:*

$$Nu = 0,021(Re_{жс})^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}; \quad (3.11)$$

При поперечному обтіканні пучків труб:

*А. Коридорні пучки труб:*

При  $Re_{дж} < 103$

$$Nu = 0,56(Re_{дж})^{0,5} Pr_{жс}^{0,36} (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}; \quad (3.12)$$

При  $Re_{дж} > 103$

$$Nu = 0,22(Re_{дж})^{0,65} Pr_{жс}^{0,36} (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}; \quad (3.13)$$

*Б. Шахматні пучки труб:*

При  $Re_{дж} < 103$

$$Nu = 0,56(Re_{дж})^{0,5} Pr_{жс}^{0,36} (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}; \quad (3.14)$$

При  $Re_{дж} > 103$

$$Nu = 0,40(Re_{дж})^{0,60} Pr_{жс}^{0,36} (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}; \quad (3.15)$$

Далі визначаємо коефіцієнт теплопередачі від одного теплоносія до другого крізь стінку, що їх розділяє,  $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$ , за формулою:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3.16)$$

де  $\alpha^1$  та  $\alpha^2$  – коефіцієнти тепловіддачі відповідно від мастила до стінки труби й від стінки труби до води,  $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$ ;

$\delta$  – товщина стінки труби, м,  $\delta = d_H - d_B$ ;

$\lambda_{ст}$  - коефіцієнти теплопровідності стінки,  $Вт/м \cdot ^\circ C$ .

Потім визначаємо необхідну поверхню теплообмінника,  $м^2$ , за формулою:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (3.17)$$

де  $Q$  – теплове навантаження,  $Вт$ ;

$K$  – коефіцієнт тепло передачі,  $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$ ;

$\Delta t_{cp}$  – середній температурний напір,  $^\circ C$ .

Далі визначаємо необхідну довжину труб теплообмінника, м, за формулою:

$$l_1 = \frac{F}{\pi \cdot d_H}, \quad (3.18)$$

де  $F$  - необхідна поверхня теплообмінника,  $м^2$ ;

$d_H$  – зовнішній діаметр труб, м.

Потім визначаємо необхідну кількість стандартних труб за формулою:

$$n = l_1 / l, \quad (3.19)$$

де  $l$  - стандартна довжина трубки теплообмінника, м.

### 3.2. Приклади розв'язання задач

*Приклад 1.* Визначити годинну витрата середовища, що охолоджує, тобто води, якщо годинна витрата середовища, що охолоджують  $G_1 - 18000$  кг/год; температури теплоносія, що охолоджують(мастила): початкова  $t_1' - 90$   $^\circ C$ ; кінцева  $t_1'' - 45$   $^\circ C$ ; температури теплоносія, що охолоджує(води): початкова

$t_2' - 20^{\circ}\text{C}$ ; кінцева  $t_2'' - 40^{\circ}\text{C}$ ; питома масова теплоємність: теплоносія, що охолоджують  $c_1 - 2035 \text{ Дж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ; теплоносія, що охолоджує  $c_2 - 175 \text{ Дж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

*Рішення.* Згідно з формулою (3.1) теплове навантаження (кількість теплоти, переданої від теплоносія, що охолоджують до теплоносія, що охолоджує)

$$Q = \frac{18000}{3600} \cdot 2035(90 - 45) = 457875 \text{ Вт}$$

Згідно з формулою (2.3) годинна витрата середовища, що охолоджує

$$G_2 = \frac{457875}{4175(40 - 20)} = 5,48 \text{ кг/с}$$

*Приклад 2.* Визначити середній температурний напір для змішаної схеми руху теплоносіїв, якщо температури теплоносія, що охолоджують (мастила): початкова  $t_1' - 90^{\circ}\text{C}$ ; кінцева  $t_1'' - 45^{\circ}\text{C}$ ; температури теплоносія, що охолоджує (води): початкова  $t_2' - 20^{\circ}\text{C}$ ; кінцева  $t_2'' - 40^{\circ}\text{C}$ .

*Рішення.* Для такої схеми руху теплоносіїв температурний напір визначають за формулою (3.4)

$$\Delta t_{\max} = t_1' - t_2'' = 90 - 40 = 50^{\circ}\text{C}.$$

$$\Delta t_{\min} = t_1'' - t_2' = 45 - 20 = 25^{\circ}\text{C}.$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{50 - 25}{\ln 2} = 35,71^{\circ}\text{C}$$

*Приклад 3.* Визначити водяні еквіваленти мастила й води, якщо годинна витрата мастила (середовища, що охолоджують)  $G_1 - 18000 \text{ кг/год}$ ; питома масова теплоємність: теплоносія, що охолоджують (мастила)  $c_1 - 2035 \text{ Дж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ; теплоносія, що охолоджує (вода)  $c_2 - 4175 \text{ Дж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

*Рішення.* Згідно з формулою (3.5) водяні еквіваленти мастила й води складають:

$$W_m = \frac{18000}{3600} \cdot 2,035 = 10,17 \text{ кгВт/}^{\circ}\text{C}$$

$$W_w = 5,48 \cdot 4,175 = 22,88 \text{ кгВт/}^{\circ}\text{C}$$

*Приклад 4.* Визначити коефіцієнт тепловіддачі від мастила до стінки труби теплообмінника, якщо масова швидкість мастила  $V_m - 210 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$ ; коефіцієнт динамічної в'язкості мастила  $\mu_1 = 79,75 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$ ; коефіцієнт теплопровідності мастила  $\lambda_1 = 0,1376 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ; зовнішній діаметр труби  $d_n = 300 \text{ мм}$ ; критерій Прандтля мастила  $Pr_m = 1089$ .

*Рішення.* Згідно з формулою (3.8) критерій Рейнольдса складає:

$$Re_m = \frac{210 \cdot 0,3}{79,75 \cdot 10^{-4}} = 7900$$

Таким чином, теплоносій (мастило) рухається в турбулентному режимі. Мастило всередині теплообмінника тече в міжтрубному просторі (між коридорними пучками труб), тому за допомогою рекомендацій [2] обираємо критеріальне рівняння для течії мастила (3.13). Також приймаємо  $(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} = 1$ . Тоді, згідно з рівнянням (3.13)

$$Nu_m = 0,22 \cdot (7900)^{0,65} \cdot 1089^{0,36} = 0,22 \cdot 341,55 \cdot 12,39 = 931$$

Визначаємо за формулою (3.9) коефіцієнт тепловіддачі від мастила до стінки труби теплообмінника

$$\alpha_1 = \frac{931 \cdot 0,1376}{0,3} = 427,018 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ \text{C}$$

*Приклад 5.* Визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби теплообмінника до охолоджуючої води, якщо масова швидкість води (в трубах)  $V_B = 310 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$ ; коефіцієнт динамічної в'язкості води  $\mu_2 = 81,7 \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$ ; коефіцієнт теплопровідності води  $\lambda_2 = 0,612 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$ ; внутрішній діаметр труби  $d_B = 250 \text{ мм}$ ;  $Pr_B = 5,45$ .

*Рішення.* Згідно з формулою (3.8) критерій Рейнольдса складає:

$$Re_e = \frac{310 \cdot 0,25}{81,7 \cdot 10^{-4}} = 9486$$

Таким чином, теплоносій (вода) рухається в турбулентному режимі. За допомогою рекомендацій [2] обираємо критеріальне рівняння для течії води в трубах (3.11), приймаємо  $(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} = 1$ . Тоді, згідно з рівнянням (3.11)

$$Nu_e = 0,021 \cdot (9486)^{0,8} \cdot 5,45^{0,43} = 0,021 \cdot 1519,38 \cdot 2,07 = 66,05$$

Визначаємо за формулою (3.9) коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби теплообмінника до води

$$\alpha_2 = \frac{66,05 \cdot 0,612}{0,25} = 161,69 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ \text{C}$$

*Приклад 6.* Визначити коефіцієнт теплопередачі від мастила, що протікає по трубах теплообмінника до води, що рухається в міжтрубному просторі крізь стінку, що їх розділяє, якщо коефіцієнт тепловіддачі від мастила до стінки труби теплообмінника  $\alpha_1 = 427,018 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ \text{C}$ , коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби теплообмінника до води  $\alpha_2 = 161,69 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ \text{C}$ , товщина стінки труби  $\delta = 0,05 \text{ м}$ ; коефіцієнт теплопровідності сталі  $\lambda_{ст} = 17 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$ .

*Рішення.* Коефіцієнт теплопередачі від мастила, що протікає по трубах теплообмінника до води, що рухається в міжтрубному просторі крізь стінку, що їх розділяє визначаємо з формули (3.16)

$$K = \frac{1}{\frac{1}{427,018} + \frac{0,05}{17} + \frac{1}{161,69}} = 88,49 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ \text{C}$$

*Приклад 7.* Визначити необхідну кількість стандартних труб теплообмінника довжиною 6 м для здійснення охолодження мастила водою крізь стінку, що їх розділяє, якщо кількість теплоти, яка передається від мастила до води складає  $Q = 457875 \text{ Вт}$ , коефіцієнт теплопередачі від мастила до води  $K = 88,49 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ \text{C}$ , температурний напір  $\Delta t_{cp} = 35,71^\circ \text{C}$ .

*Рішення.* необхідну кількість стандартних труб теплообмінника довжиною 6 м для здійснення охолодження мастила водою крізь стінку, що їх розділяє визначаємо з формули (3.19) з урахуванням формул (3.17 і 3.18).

Згідно з формулою (3.17) необхідна поверхня теплообмінника

$$F = \frac{457875}{88,49 \cdot 35,71} = 144,89 \text{ м}^2$$

Згідно (3.18) необхідна довжина труб теплообмінника

$$l_1 = \frac{144,89}{3,14 \cdot 0,3} = 153,82 \text{ м}$$

Необхідну кількість стандартних труб теплообмінника довжиною 6 м визначаємо з формули (3.19)

$$n = l_1 / l = 153,82 / 6 = 26 \text{ шт}$$

#### **4. Визначення впливу на розрахунок основних елементів систем водяного й випарного охолодження фізико-хімічних процесів у охолоджувачі**

*Мета:* визначення впливу товщини і якісного складу відкладень на охолоджувальну спроможність, надійність матеріалу й відповідно, розрахунок охолоджувального й теплообмінного обладнання .

##### **4.1 Вплив товщини і якісного складу відкладень на надійність охолоджувального й теплообмінного обладнання і на їх розрахунок**

Процес водяного охолодження - це відведення тепла водою від стінки, що обігривається і підтримка температури стінки в заданих межах. Температура стінки залежить від призначення охолодження: вона визначає або технологічний процес, або стійкість охолоджуваного елемента, виготовленого з даного матеріалу (табл. 4.1). В обох випадках температуру стінки визначають загальною схемою руху теплового потоку в ув'язці з якістю води (фізико-хімічний склад води) (рис. 4.1).

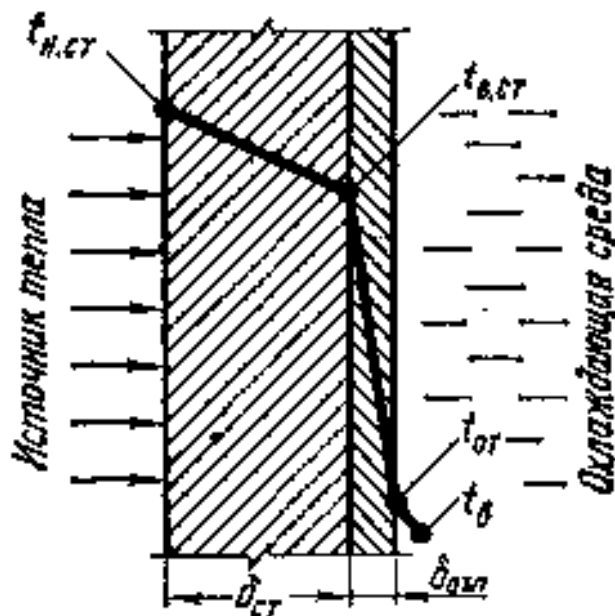


Рис. 4.1 - Схема теплового потоку за наявності відкладень на стінці

**Таблиця 4.1 – Граничні температури, допустимі для різних матеріалів**

Матеріал	Температура, °С		
	Плавлення	Гранична для нормальної роботи	Втрата механічної міцності
охолоджуючих систем			
<i>Сталь:</i>			
- маловуглецева Ст. 3,15К;	1525-1530	400	600
- вуглецева 20К, 25К	1520-1530	400	600
<i>Чавун:</i>			
- звичайний сірий СЧ15-32;	1225-1250	400	500
- хромокремністий Ж4С-55	1350-1400	850	1000
<i>Кольорові сплави:</i>			
-мідь червона М1;	1083	300	600
-латунь Л68÷Л62	940-952	300-350	650
Нагрівальних печей			
<i>Цегла:</i>			
- шамотна;	1610-1750	1250-1400	1450-1490
- диасова;	1690-1710	1620-1660	1630-1650
- доломітова;	2300	1660-1700	1850-1900
- магнезитова	1750-2000	1490-1550	1650-1700

Для інженерних (практичних) розрахунків охолоджуючих систем використовують рівняння теплообміну для плоскої однорідної стінки, що враховують наявність сольових відкладень на теплонавантаженій поверхні охолоджуючих систем 4.1 [7]:

$$t_{н. ст.} = q \left( \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{вк}}{\lambda_{вк}} + \frac{1}{\alpha} \right) + t_{\lambda} \quad (4.1)$$

де  $q$  –теплова напруга, ккал/(ч·год·м<sup>2</sup>);  $\lambda_{ст}$  - коефіцієнт теплопровідності стінки охолоджуваного елемента, ккал/(м<sup>0</sup>С);  $\delta_{ст}$  - товщина стінки охолоджуваного елемента, м;  $t_{н. ст.}$ ; - температура зовнішньої поверхні стінки деталі з боку сприймання тепла, °С;  $\lambda_{вк}$  - коефіцієнт теплопровідності відкладень, ккал/(м<sup>0</sup>С);  $\delta_{вк}$  - товщина відкладень, м;  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні деталі до води, ккал/(год·м<sup>2</sup>·°С);  $t_{в}$  –середня температура охолоджуючої води, °С.

Витрату охолоджуючої води для відведення тепла через стінку визначають рівнянням 4.2:

$$M = \frac{q \cdot F}{i_2 - i_1} \quad (4.2)$$

де  $M$  - витрата охолоджуючої води, кг/ч;  $F$  - площа поверхні, що обігривається, м<sup>2</sup>;  $i_2$   $i_1$  - ентальпія відповідно нагрітої і води, що поступає, ккал/кг.

З рівнянь (4.1) і (4.2) видно, що нормальне охолодження й температура стінки  $t_{н. ст.}$ , що обігривається, залежать у першу чергу від теплового потоку, а окрім цього - від конструктивних і технологічних показників охолоджуваного елемента й характеру відкладень, пов'язаних з якістю охолоджуючої води.

## 4.2 Приклад розв'язання задач

Як ілюстрація впливу товщини і якості відкладень на величину теплопередачі розглянемо розрахунок відповідно до рівняння (4.1):

$$t_{н. ст.} = q \left( \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{вк}}{\lambda_{вк}} + \frac{1}{\alpha} \right) + t_{\lambda}$$

До розрахунку прийняті наступні вихідні дані:

- звичайний для охолоджуючих систем матеріал - сталь (Ст. 3);
- товщина сталеві стінки -  $\delta_{ст} = 10$ мм;
- коефіцієнт теплопровідності сталеві стінки охолоджуваного елемента  $\lambda_{ст}=40$  ккал/(год·м·°С);
- товщина відкладень  $\delta_{вк}$  :  
карбонатних –  $\delta_{КВК} = 1,0$ мм або силікатних –  $\delta_{СВК} = 0,5$ мм
- коефіцієнт теплопровідності відкладень  $\lambda_{вк}$  :  
карбонатних -  $\lambda_{КВК}=0,5$ ккал/(год·м·°С) або  
силікатних –  $\lambda_{СВК}=0,05$ ккал/(год·м·°С);
- коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні деталі з відкладеннями до води  $\alpha= 10000$  ккал/(год·м<sup>2</sup> · °С);
- середня температура води –  $t_{в} = 30$  °С;
- $q_1$  - тепла напруга (поверхнева щільність теплового потоку):  
(середня - 20) тис. ккал/(год·м<sup>2</sup>) є характерною для технологічних агрегатів;
- $q_2$  - тепла напруга (поверхнева щільність теплового потоку)  
(середня - 400) тис. ккал/(год·м<sup>2</sup>) є характерною для металургійних печей.

У табл. 4.2 наведені результати розрахунків впливу карбонатних і силікатних відкладень на температуру стінки відповідно до рівняння (4.1).

**Таблиця 4.2 – Вплив якості й товщини відкладень на температуру стінки**

Поверхнева щільність теплового потоку, тис. ккал/(год·м <sup>2</sup> )	Температура стінки, °С		
	Без відкладень	За наявності карбонатних відкладень товщиною 1 мм	За наявності силікатних відкладень товщиною 0,5 мм
20	34	87	2034
400	170	96	4044

Аналіз отриманих результатів розрахунку свідчить, що при наявності в охолоджувальній воді одночасно хімічних розчинних компонентів відповідальних за утворення карбонатних відкладень і фізичних чинників – механічних забруднень (завислих речовин) – силікатів (піску) температура стінки знаходиться в межах 87-4044°С у залежності від співвідношення силікатних і карбонатних відкладень при їх товщині в межах 0,5-1,0 мм. Відомо, проте, що відкладення, які утворюються на стінках охолоджуваних елементів, досягають товщини 1-10 мм, а поверхнева щільність теплового потоку може коливатися в діапазоні: для технологічних агрегатів – 10-50 тис. ккал/(год·м<sup>2</sup>); для деталей охолоджувальних систем металургійних печей 50-800 тис. ккал/(год·м<sup>2</sup>) [7]. Таким чином, з урахуванням даних за табл.1, охолоджувальні пристрої будуть працювати при граничних для нормальної роботи значеннях температур стінки або навіть при температурах втрат механічної міцності. В обох випадках робота системи охолодження є ненадійною.



### 4.3 Вплив товщини та якісного складу відкладень на розрахунок основних елементів систем водяного й випарного охолодження

Основними чинниками, що впливають на процес утворення твердих відкладень, їх інтенсивність (швидкість) і якісний склад, окрім поверхневої щільності теплового потоку й температури, є компоненти хімічного складу охолоджувальної води (карбонатна лужність, хлориди, сульфати, іони кальцію, магнію, окислюванність) й механічні забруднення – завислі речовини різного походження й олієнафтомісткі речовини. Для останніх суттєвим є, як їх концентрація, так і розмір частинок або умовних краплин [8].

На даний час, у зв'язку з комплексним підходом до використання водних ресурсів, на підприємствах застосовують схему оборотного водопостачання. При цьому основним напрямом розвитку енергогосподарства підприємств є створення безстічних систем водного господарства на базі локальних оборотних циклів окремих цехів і виробництв підприємств.

Системи водяного охолодження розділяють на умовно чисті й умовно брудні. Для умовно чистих систем характерним є охолодження через плоску або циліндрову стінку без забруднення теплоносія (води). При цьому охолодження проводиться в основному за рахунок конвективного теплообміну, тобто руху потоку води. Для умовно брудних систем характерним є охолодження з безпосереднім контактом охолоджуваних матеріалів або деталей, пристроїв. При цьому охолодження проводять у основному також за рахунок конвективного теплообміну. Одночасно відбувається забруднення охолоджуючої води продуктами окислення матеріалів у вигляді зважених речовин або розчинених компонентів.

Наведемо приклад фактичних даних, щодо утворення відкладень у системах охолодження прокату й технологічного обладнання в забруднених оборотних циклах водопостачання станів гарячої прокатки. На рис. 4.2, 4.3 наведено графіки залежностей товщини відкладень від часу експлуатації цих систем [9].

Наведені графіки можна використовувати при розрахунку охолоджувальних пристроїв оборотних систем водопостачання наведених у розділі 3 (формула 3.16) на випадок урахування шару відкладень ( $\delta_{BK}$ ) і коефіцієнта теплопровідності відкладень ( $\lambda_{BK}$ ).

У табл. 4.3 наведено хімічний склад відкладень з систем охолодження станів [10].

**Таблиця 4.3 – Хімічний склад відкладень систем охолодження прокатних станів**

Показники	Операції прокатки				
	Охолодження роликів рольгангів		Охолодження прокатних валків	Охолодження прокату	
	внутрішнє	зовнішнє		знизу	зверху
	%				
1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	3,11	0,21	0,22	0,19	3,25
	2,12	1,91	1,49	0,98	1,03
Fe <sub>общ</sub>	4,85	40,15	34,14	52,26	41,92
	2,85	9,80	23,95	11,30	5,90
CaO	43,68	22,50	16,83	20,38	18,30
	48,76	45,06	35,30	35,70	48,00

MgO	1,27	0,90	0,40	0,38	1,35
	1,01	1,01	1,39	0,89	0,81
SO <sub>4</sub>	0,62	0,47	0,90	0,38	0,92
	0,73	0,95	0,95	1,15	0,39
Олія	3,00	8,30	8,00	6,00	9,20
	1,50	2,00	2,20	1,90	0,50
Втрати при прожаренні	40,35	24,97	34,57	16,41	20,88
	40,30	36,89	30,20	44,37	40,48
Інші	3,12	2,50	4,94	4,00	4,18
	2,73	2,38	4,52	3,71	2,89

**Примітка:** - у чисельнику – показники для стану "2000" НЛМК;  
- у знаменнику - показники для стану "2000" ЧерМК.

Згідно з наведеними в табл. 4.3 даними кількість хімічних компонентів, що відповідають за величину карбонатних відкладень складає ~ 35-85%, силікатних відкладень 0,3-3,5%. Крім того у відкладеннях у наявності оксиди заліза (іржа) ~ 4,8-53% - продукти корозії металу охолоджувальних пристроїв, мереж і масла. Згідно з відомим дослідженням [7] коефіцієнт теплопровідності відкладень товщиною 0,5-1,0 мм складає: для карбонатних -  $\lambda_{\text{КВК}} \approx 0,2-0,5$  ккал/(год·м·°С); для силікатних –  $\lambda_{\text{КВК}} \approx 0,02-0,05$  ккал/(год·м·°С).

Хімічний склад відкладень і частка їх компонентів є характерними для більшості забруднених оборотних циклів охолодження в металургійних виробництвах і можуть бути використані при розрахунках охолоджувальних пристроїв аналогічних за умовами експлуатації інших виробництв. Хімічний склад відкладень згідно з табл. 2 потрібно враховувати при розрахунках охолоджувального пристрою наведеному в розділі 3 (формула 3.16).

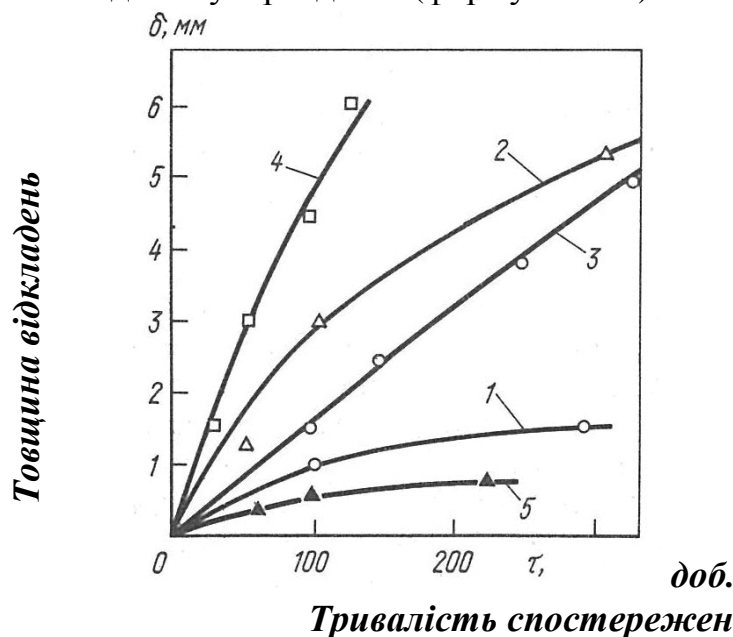


Рис. 4.2 – Графіки залежності товщини відкладень від часу спостережень на стані 2000 НЛМК гарячої прокатки (1 – охолодження робочих валків (чорнових і чистових клітей); 2 і 3 - внутрішнє і зовнішнє охолодження роликів рольгангів; 4 і 5 - охолодження смуги (прокату) знизу і зверху )

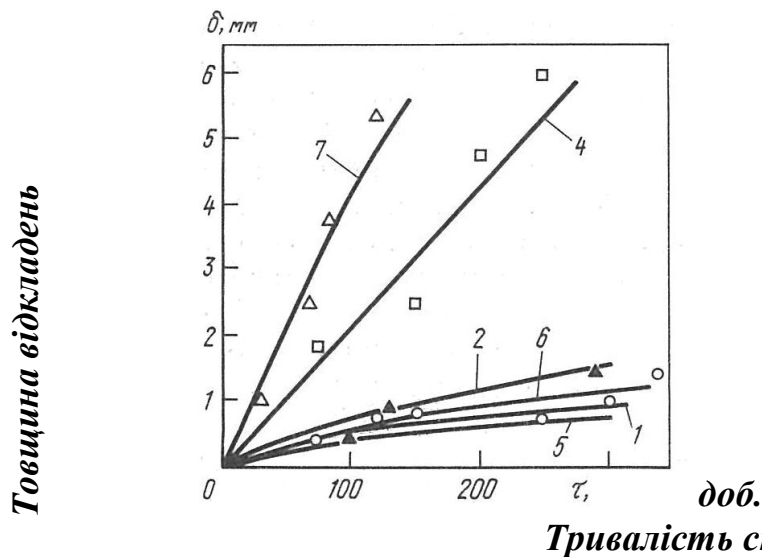


Рис. 4.3 - Графіки залежності товщини відкладень від часу спостережень на стані 2000 ЧерМК гарячої прокатки (1 - охолодження робочих валків (чорнових і чистових клітей); 2 і 3 - внутрішнє і зовнішнє охолодження роликів рольгангів; 4 і 5 - охолодження смуги (прокату) знизу і зверху; 6 і 7 - зовнішнє охолодження роликів рольгангів на проміжному і відвідному рольгангах )

#### Список джерел

1. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. - М.: Энергия, 1986.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М.: Энергия, 1973.
3. Тихомиров К.В., Сергеенко Э.С. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. - М.: Стройиздат, 1991.
4. Кузовлев В.А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. - М.: Высшая школа, 1983.
5. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. - М.: Машиностроение, 1973.
6. Криворот А.С. Конструкция и основы проектирования машин и аппаратов химической промышленности. Уч. пособие для техникумов. - М.: Машиностроение, 1976.
7. Андоньев С.М., Жильцов В.М., Левин Г.М. и др. Особенности промышленного водоснабжения. - К.: Будівельник, 1981.
8. Пантелят Г.С. Системы водоснабжения металлургических производств, включающих сброс отработанных вод в водоёмы: Дис. д.т.н.-Харьков, 1986.
9. Никулин С.Е. Совершенствование замкнутых систем оборотного водоснабжения станов горячей прокатки //Сталь. - 1990. - № 9.
10. Никулин С.Е. Усовершенствованная система оборотного водоснабжения станов горячей прокатки. Дис. на соиск. уч. степ. к. т. н.-Харьков: НДПИ Энергосталь.- 1994.

## II. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

### 1.Робоча програма

Згідно ЗМ 1.2 передбачена 1 лабораторна робота на тему: “Оцінка впливу основних компонентів фізико-хімічного складу охолоджувальної води (іони: сульфати, хлориди, кальцій, магній; окислюваність, температура) на величину рівноважної лужності оборотної охолоджуючої води й теплопровідну спроможність металевої плоскої і циліндрової стінки” - 2 год.

### 2.Методичні вказівки

При виконанні лабораторної роботи студентам необхідно попередньо знати теоретичні основи фізико-хімічних процесів у охолоджувачі й практичні положення впливу відкладень (карбонатних, силікатних) на надійність й розрахунок основних елементів систем водяного й випарного охолодження.

Оцінка впливу основних компонентів фізико-хімічного складу охолоджувальної води виконують за допомогою методики розрахунку прогнозованої величини рівноважної лужності оборотної охолоджуючої води [1,2,3]. Методика розрахунку враховує вплив основних компонентів хімічного складу води (лужності, іонів: сульфатів, хлоридів, кальцію, магнію; окислюваності), що підживлює систему охолодження, температури води й концентрації завислих речовин і олії на величину рівноважної лужності оборотної охолоджуючої води. На основі порівняння прогнозованої (розрахункової) рівноважної лужності з теоретично можливою для даного хімічного складу води виконують оцінку стабільності води й зрушення вуглецевої кислотної рівноваги в область виникнення відкладень або корозії. За результатами порівняння виконують оцінку можливого впливу відкладень на теплопровідну спроможність металевої плоскої та циліндрової стінки систем охолодження.

Прогнозовану (розрахункову) величину рівноважної лужності оборотної води розраховують за формулою:

$$\text{ЩПР}_{\text{рівн}} = \frac{a \times n_1 \times n_2 \times n_3 \times n_4 \times n_5 \times n_6 \times n_8}{1,02 \times n_7} \quad (\text{мг - екв/л}), \quad (2.1)$$

де ЩПР<sub>рівн</sub> - рівноважна лужність даної води, мг-екв/л;

a - залежність рівноважної лужності води відомого хімічного складу від температури води, мг-екв/л;

n<sub>1</sub> - поправочний коефіцієнт, що враховує вплив хлоридів;

n<sub>2</sub>, n<sub>3</sub> - поправочні коефіцієнти, що враховують вплив сульфатів;

n<sub>4</sub> - поправочний коефіцієнт, що враховує вплив іонів магнію;

n<sub>5</sub>, n<sub>6</sub>, n<sub>7</sub> - поправочні коефіцієнти, що враховують вплив іонів кальцію;

n<sub>8</sub> - поправочний коефіцієнт, що враховує вплив окислюваності.

n<sub>1</sub>- n<sub>8</sub> визначають за графіками для компонентів хімічного складу води, що підживлює (див.рис.2.1-2.5).

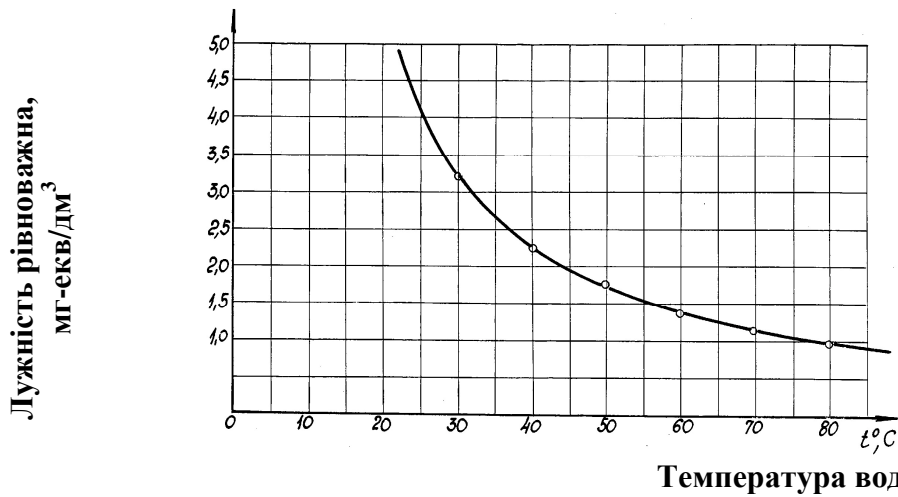


Рис. 2.1 – Залежність рівноважної лужності від температури води

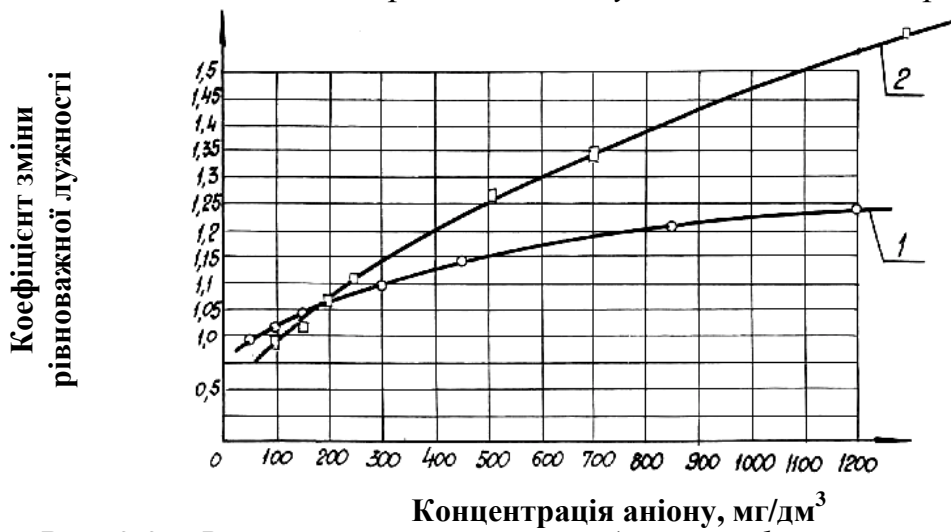


Рис. 2.2 – Вплив концентрації хлоридів і сульфатів на стабільність Води (1 – хлориди, 2 – сульфати)



Рис. 2.3 - Вплив концентрації магнію на стабільність води (1 – вплив хлористого магнію, 2 – вплив іона магнію після вилучення впливу іону хлору)

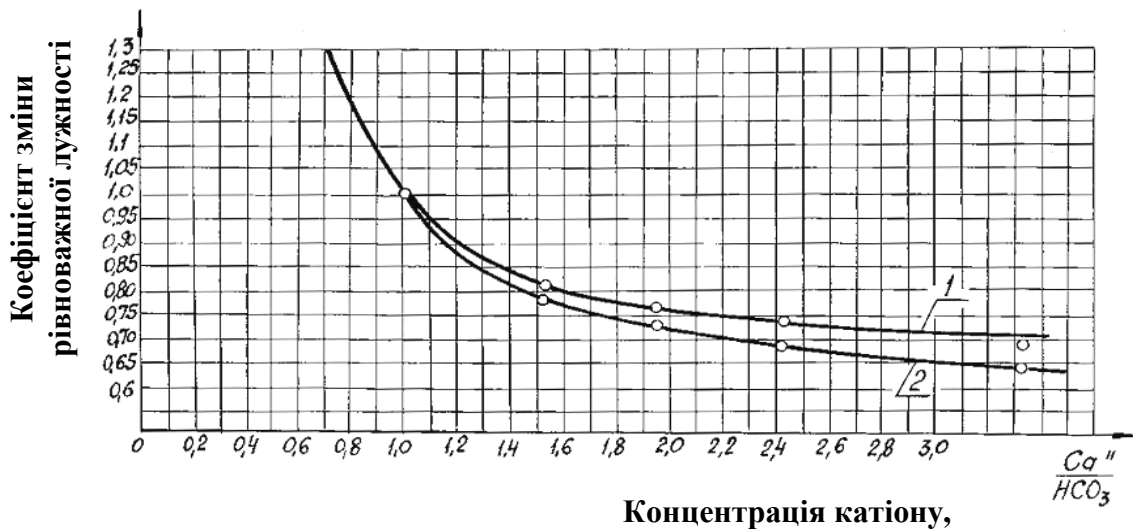


Рис. 2.4 – Вплив концентрації кальцію на стабільність води (1 – вплив хлористого кальцію, 2 – вплив іона кальцію після вилучення впливу іону хлору)

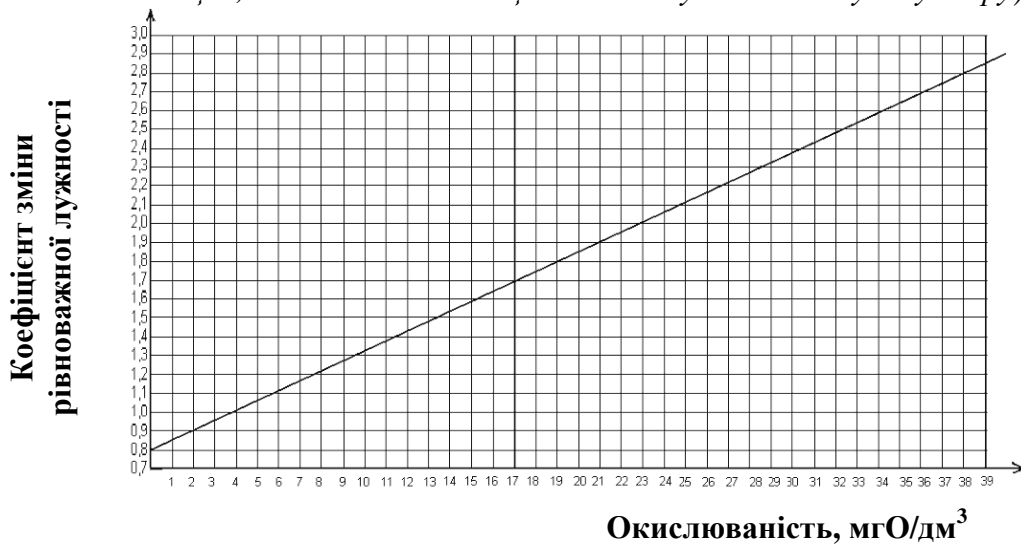


Рис. 2.5 – Вплив окислюваності на стабільність води

Теоретично можливі сталі концентрації компонентів хімічного складу ( $Щс_{теор}$ ) в оборотній воді визначають з урахуванням коефіцієнта упарювання ( $K_y$ ) за формулою:

$$Щс_{теор} = K_y \times Щп, \quad (2.2)$$

де  $Щс_{теор}$  - стала (теоретична) концентрація лужності (мг-екв/л);

$K_y$  - коефіцієнт упарювання (табл. 2.2);

$Щп$  – концентрація лужності в підживлювальній воді (табл.1), (мг-екв/л).

Стабільність води визначають за різницею ( $\Delta Щ$ ) між сталою теоретичною і прогнозованою (розрахунковою) рівноважною лужностями:

$\Delta Щ = Щс_{теор} - ЩПР_{рівн} = 0 \pm 0,7$  – вода стабільна ( карбонатні відкладення відсутні);

$\Delta Щ = Щс_{теор} - ЩПР_{рівн} = > 0,7$  – вода не стабільна (схильна до відкладень);

$\Delta Щ = Щс_{теор} - ЩПР_{рівн} = < - 0,7$  – вода не стабільна (схильна до корозії).

При цьому  $\pm 0,7$  - допустима різниця між теоретично можливою і рівноважною лужностями, при якій вода практично стабільна.

Вплив механічних забруднень в умовно брудних оборотних циклах охолодження, визначають відповідно до графіка залежності коефіцієнта інгібування малорозчинних солей від концентрації завислих речовин і олії (див. рис. 2.6) [3,4].

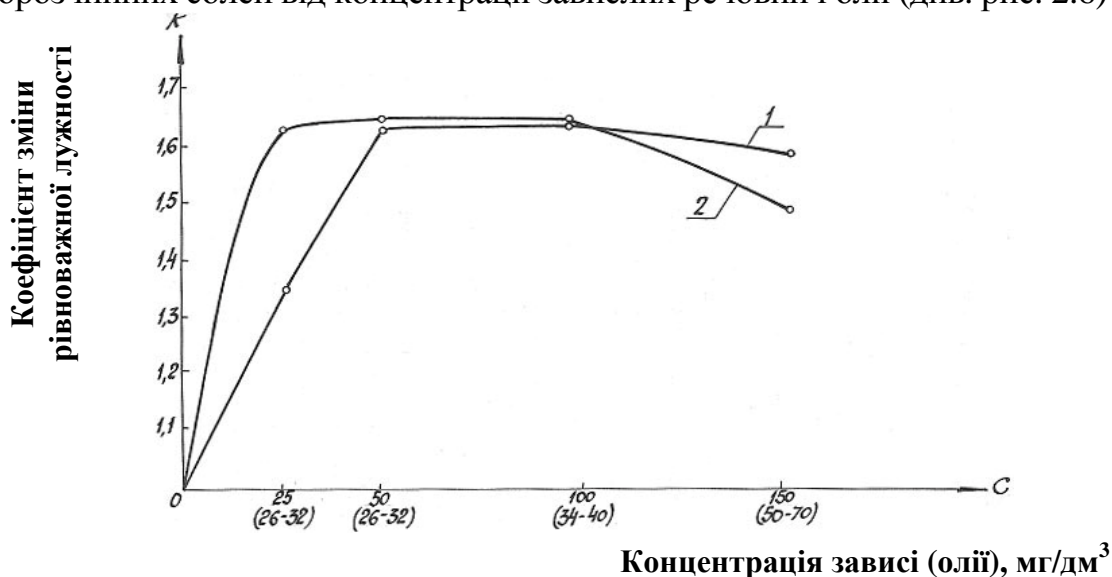


Рис. 2.6 – Залежність поправочного коефіцієнта інгібування малорозчинних солей від концентрації завислих речовин і олії (1 -  $tB=50^{\circ}C$ ; 2 -  $tB=35^{\circ}C$ )

Застосування вказаного коефіцієнта справедливе в межах наступних показників: температурі оборотної води –  $35-50^{\circ}C$ ; - концентрації масел -  $0...70$  мг/л; - концентрації зважених речовин -  $0...150$  мг/л.

Для розрахунків за варіантами використовують отримані експериментально значення вихідного хімічного складу підживлювальної води (табл. 2.1), коефіцієнта упарювання ( $K_y$ ) і температури оборотної води для різних систем охолодження металургійних виробництв (табл. 2.2), концентрації завислих речовин ( $C_3$ ) і олії ( $C_0$ ) (табл. 2.3)[1,2,3].

Таблиця 2.1 – Експериментальні значення хімічного складу підживлювальної води

№ варіанту	Найменування показників					
	Щ <sub>п</sub> , мг-екв/л	Cl <sup>-</sup> , мг/л	SO <sup>2-</sup> <sub>4</sub> , мг/л	Ca <sup>2+</sup> , мг-екв/л	Mg <sup>2+</sup> , мг-екв/л	Окислюваність, мг О/л
	№ варіанту					
	1	2	3	4	5	6
1	1,6	8,0	32	1,6	1,0	12,0
2	2,9	30	60	2,6	1,1	10,0
3	5,2	34	58	4,0	2,5	21,0
4	4,7	570	2837	4,6	3,7	3,5
5	6,2	454	525	9,3	4,1	2,5
6	6,1	39	107	8,4	9,8	2,8

Примітка № варіанту - підживлювальна вода з водойми: 1 - р. Шексна (ЧерМК); 2 - р. Дніпро (ДМК, МК "Запоріжсталь"); 3 - р. Воронеж (НЛМК);

4-Орловські пруди (Алчевський МК); 5 - р. Брянка (Алчевський МК); 6 - р.Кальміус (МарМК)

**Таблиця 2.2 – Експериментальні значення коефіцієнта упарювання (Куп) й температура (ТВ) оборотної води для різних систем охолодження металургійних виробництв**

№ варіанту	Найменування показників											
	Куп	ТВ, °С	Куп	ТВ, °С	Куп	ТВ, °С	Куп	ТВ, °С	Куп	ТВ, °С	Куп	ТВ, °С
	№ варіанта											
	1		2		3		4		5		6	
1	1,25	25	1,45	30	1,90	35	2,30	40	2,80	45	3,00	50
2	1,30	28	1,55	32	2,20	38	2,50	43	3,00	47	3,20	42
3	1,35	30	1,70	34	2,35	40	2,70	45	3,20	50	3,40	44
4	1,40	35	1,85	36	2,50	42	2,80	47	3,30	42	3,50	45
5	1,50	38	1,95	40	2,60	44	2,9	49	3,50	45	3,60	50

**Таблиця 2.3 – Експериментальні значення концентрацій завислих речовин (СЗ) та олії (СО) в оборотній воді для різних систем охолодження металургійних виробництв**

№ варіанту	Найменування показників											
	СЗ	СО	СЗ	СО	СЗ	СО	СЗ	СО	СЗ	СО	СЗ	СО
	№ варіанта											
	1		2		3		4		5		6	
1	0	0	5	5	10	15	25	25	50	30	100	40
2	50	26	0	0	5	5	75	33	150	70	50	26
3	25	30	150	70	0	0	150	70	5	5	0	0
4	150	70	75	33	25	30	0	0	75	33	25	30
5	75	33	10	15	150	70	5	5	0	0	150	70

Якісну оцінку впливу на теплопровідну спроможність можливих відкладень або їх відсутність виконують аналізом залежностей (2.3), (2.4) для теплового потоку для однорідної плоскої стінки й циліндричної стінки, рівняння (2.5) теплообміну для плоскої однорідної стінки, що враховують наявність сольових відкладень на теплонавантаженої поверхні охолоджуючих систем, формули (2.6) визначення коефіцієнта теплопередачі від одного теплоносія до другого крізь стінку, що їх розділяє [5-8].

для однорідної плоскої стінки:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) \quad (2.3)$$

де q – тепловий потік, що передається крізь стінку, Вт/м<sup>2</sup>(ккал/м<sup>2</sup> · ч);

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°С;

δ – товщина стінки, м;

t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub> – температури на поверхні стінки (зовнішньої і внутрішньої чи навпаки), °С.



2) для одношарової циліндричної стінки (для труби на одиницю її довжини)

$$q_l = \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (2.4)$$

де  $d_1, d_2$  - відносно зовнішній і внутрішній діаметр стінки труби, м (усі інші позначення як у (3)).

3) рівняння теплообміну для плоскої однорідної стінки при наявності шару відкладень на поверхні стінки:

$$t_{H. CT.} = q \left( \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + \frac{\delta_{BK}}{\lambda_{BK}} + \frac{1}{\alpha} \right) + t_B, \quad (2.5)$$

де  $q$  –теплова напруга, ккал/(год·м<sup>2</sup>);  $\lambda_{CT}$  - коефіцієнт теплопровідності стінки охолоджуваного елемента, ккал/(год·м·°С);  $\delta_{CT}$  - товщина стінки охолоджуваного елемента, м;  $t_{H. CT.}$ ; - температура зовнішньої поверхні стінки деталі з боку сприймання тепла, °С;  $\lambda_{BK}$  - коефіцієнт теплопровідності відкладень, ккал/(год·м·°С);  $\delta_{BK}$ - товщина відкладень, м;  $\alpha$ - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні деталі до води, ккал/(год·м<sup>2</sup>·°С);  $t_B$  –середня температура охолоджуючої води, °С.

4) коефіцієнт теплопередачі від одного теплоносія до другого крізь стінку, що їх розділяє, Вт/м<sup>2</sup>·°С,:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.6)$$

де  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі відповідно від мастила до стінки труби й від стінки труби до води, Вт/м<sup>2</sup>·°С;

$\delta$  – товщина стінки труби, м;  $\delta = d_n - d_b$ ;

$\lambda_{cm}$  - коефіцієнти теплопровідності стінки, Вт/м·°С.

Оцінка (якісна) полягає в визначенні яким чином вплине наявність або відсутність відкладень і продуктів корозії на теплопровідну спроможність стінки: вона зменшиться, зросте або не зміниться.

### 3. Варіант лабораторної роботи

Варіант контрольної роботи за табл.1 вибирають відповідно 6 цифр, що складаються з однозначного або двозначного порядкового номеру переліку студентів у журналі групи і 5 і 4 цифр, відповідно до залікової книжки. Якщо останні дві цифри більше 6, то за різницею між 10 і варіантом. (наприклад, порядковий номер студента 23 залікова книжка № 74694, варіанти по горизонталі: 23 (10-7= 3), 46 (10-9=1) таким чином: 233461; по вертикалі в зворотному порядку: 164332).

Варіант контрольної роботи за табл.2 и 3 вибирають відповідно до першої і останньої цифр шифру залікової книжки по вертикалі і горизонталі, відповідно (залікова книжка № 34621). Якщо останні дві цифри більше 5 або 6, то за різницею між 10 і варіантом (наприклад, залікова книжка № 74649, варіант по вертикалі: 10-7= 3; по горизонталі: 10-9= 1).

*Мета роботи* – Оцінка впливу основних компонентів фізико-хімічного складу охолоджувальної води на величину рівноважної лужності оборотної охолоджуючої води й теплопровідну спроможність металевої плоскої та циліндрової стінки.

#### 4. Методика виконання роботи

1. Відповідно до варіанта заносять у лабораторний журнал (зошит) індивідуальні вихідні дані, щодо хімічного складу підживлювальної води (табл. 2.1), коефіцієнта упарювання (Куп), температури (ТВ) (табл. 2.2), концентрації завислих речовин (СЗ) і олії (СО) в оборотній воді системи охолодження (табл. 2.3).
2. Виконують визначення рівноважної щільності (а) та коефіцієнтів n1-n8 формули (1) згідно з графіками № 2.1-2.5. При наявності завислих речовин та олії поправочний коефіцієнт К визначають за графіком (рис. 2.6).
3. Згідно з формулою 2.1 виконують розрахунок величини прогнозованої рівноважної лужності води.
4. Згідно з формулою 2.2 виконують розрахунок сталої (теоретичної) концентрація лужності в оборотній воді.
5. Виконують визначення стабільності води порівнянням величини прогнозованої рівноважної і сталої (теоретичної) лужності води та виконують висновок щодо стабільності води.
6. На основі висновку щодо стабільності води (стабільна; не стабільна); виконують якісну оцінку можливої наявності відкладень (схильна до відкладень карбонатних) або продуктів корозії (схильна до корозії), або їх відсутності.
7. Виконують якісну оцінку впливу, при наявності або відсутності відкладень, на теплопровідну спроможність металевої плоскої і циліндрової стінки охолоджувальних систем (формули 2.3-2.6).

#### 5. Результати виконання роботи

Результати виконання роботи заносять у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Розрахункові дані за результатами лабораторної роботи

№	Найменування Параметру	Одиниці виміру	Значення експериментальні	Значення розрахункові або визначені	Висновок про стабільність води	Оцінка	
						Наявності: відкладень; продуктів корозії; відсутність	зміни теплопровідної спроможності
1	Хімічний склад підживлювальної води:						
	- Щп	мг-екв/дм <sup>3</sup>	+				
	- Сl <sup>-</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	+				
	- SO <sup>2-</sup> <sub>4</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	+				
	- Ca <sup>2+</sup>	мг-екв/дм <sup>3</sup>	+				
	- Mg <sup>2+</sup>	мг-екв/дм <sup>3</sup>	+				
- Окислювність	мгО/дм <sup>3</sup>	+					

2	Фізичні показники: якості оборотної води: - $T_B$	$C^0$					
	Концентрація: - $C_3$	мг/дм <sup>3</sup>	+				
	- $C_O$	мг/дм <sup>3</sup>	+				
	- $K$	-		+			
	якості оборотної системи - $K_{уП}$	-	+				
3	Показники й коефіцієнти: - $a$	мг-екв/л		+			
	- $n_1$	-		+			
	- $n_2$	-		+			
	- $n_3$	-		+			
	- $n_4$	-		+			
	- $n_5$	-		+			
	- $n_6$	-		+			
	- $n_7$	-		+			
	- $n_8$	-		+			
4	- ЩПРрівн	мг-екв/		+			
5	- Щс.теор.	мг-екв/		+			
6	- $\Delta\psi$	мг-екв/		+	+	+	+

### Список джерел

1. Пантелят Г.С., Шуб В.Б. Стабилизационная обработка оборотной воды// Водоснабжение санитарная техника.- 1985.-№5.
2. Пантелят Г.С. Системы водоснабжения металлургических производств, исключающих сброс отработанных вод в водоёмы: Дис.д.т.н.-Харьков, 1986.
3. Никулин С.Е. Совершенствование замкнутых систем оборотного водоснабжения станов горячей прокатки //Сталь. – 1990. - № 9.
4. Никулин С.Е. Усовершенствованная система оборотного водоснабжения станов горячей прокатки. Дис. на соиск. уч. степ. к. т. н.-Харьков: НДПИ Энергосталь.- 1994.
5. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. - М.: Энергия, 1986.
6. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М.:Энергия, 1973.
7. Кузовлев В.А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. – М.:Высшая школа, 1983.
8. Андоньев С.М., Жильцов В.М., Левин Г.М. и др. Особенности промышленного водоснабжения. - К.: Будівельник, 1981.

### **III. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ**

#### **1. Робоча програма**

Кожен студент розв'язує задачі з термодинаміки, застосовує математичні залежності термодинаміки до виконання деяких екологічних завдань, стосовно систем каналізації, або розв'язує задачі з теплопередачі крізь будівельні конструкції чи виконує конструктивний розрахунок теплообмінного апарату. Обсяг контрольної роботи 2-4 сторінки.

#### **2. Методичні вказівки**

Письмову контрольну роботу виконують після вивчення основних теоретичних положень і математичних залежностей, що необхідні для виконання практичних розрахунків, у яких визначаються необхідний і дійсний опір теплопередачі, товщина стінки, а також прикладів розв'язання задач за темами: Теплотехнічні розрахунки деяких екологічних задач. Теплотехнічний розрахунок конструкцій, що огороджують. Теплотехнічний розрахунок теплообмінного пристрою.

#### **3. Основні джерела для вирішення задач**

1. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. - М.: Энергия, 1986.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М.: Энергия, 1973.
3. Тихомиров К.В., Сергеенко Э.С. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. – М.: Стройиздат, 1991.
4. Кузовлев В.А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. –М.: Высшая школа, 1983.
5. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. - М.: Машиностроение, 1973.
6. Криворот А.С. Конструкция и основы проектирования машин и аппаратов химической промышленности. Уч. пособие для техникумов. – М.: Машиностроение, 1976.

#### **4. Додаткові джерела для вирішення задач**

1. СНиП II-3-79\*\*. Нормы проектирования. Строительная теплотехника. – М.: ЦИТП, 1986.
2. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1973.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М.: Энергия, 1973.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Физматгиз, 1963.
5. Данилова Г.Н., Филаткин В.Н. и др. Сборник задач и расчетов по теплопередаче. - М.: Госторгиздат, 1961.

## 5. Варіанти контрольних робіт

Варіант контрольної роботи вибирають відповідно до двох останніх цифр шифру залікової книжки (залікова книжка №54625, якщо останні дві цифри більше 30, то за останньою цифрою, наприклад №54647).

### Варіант №1

1. Манометр, що приєднано до збірника стисненого повітря, показує тиск 3,7 кг/см<sup>2</sup>. Барометричний тиск 770 мм рт. ст. з температурою ртуті 0<sup>0</sup>С. Який тиск у збірнику в абсолютних технічних атмосферах?

2. Визначити необхідний опір теплопередачі, якщо нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря і температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta t_n = 6^0$  С; підвищувальний коефіцієнт  $R_{\text{эф}} = 1,1$ , коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{\text{в}} = 8,7$  Вт/м<sup>2</sup> 0<sup>0</sup>С. Температура зовнішнього повітря,  $t_n = -15^0$ С. Коефіцієнт  $n=1$ .

### Варіант №2

1. Вакуумметр, що приєднаний до сосуду, показує розрядження 270 мм рт. ст. з  $t_{\text{ртуті}} = 30^0$ С. Барометричний тиск 735 мм рт. ст. з температурою ртуті 15<sup>0</sup>С. Який тиск у сосуді?

2. Визначити дійсний опір теплопередачі, якщо коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{\text{н}} = 23$  Вт/м<sup>2</sup> 0<sup>0</sup>С; коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{\text{в}} = 8,7$  Вт/м<sup>2</sup> 0<sup>0</sup>С. Товщина штукатурного шару  $\delta_{\text{шт}}=0,02$ м, товщина стіни  $\delta_{\text{ст}}=0,4$ м, коефіцієнт теплопровідності штукатурного шару,  $\lambda_{\text{шт}}=0,71$  Вт/ м<sup>0</sup>С, стіни  $\lambda_{\text{ст}}= 0,83$  Вт/ м<sup>0</sup>С.

### Варіант №3

1. У циліндрі, що зачинений рухливим поршнем, замкнений газ. Щоб утримати поршень у рівновазі, на ньому необхідно встановити вагу  $G = 10$  кг. Площа поперечного перерізу поршню  $F = 0,01$  м<sup>2</sup>. Який абсолютний тиск у циліндрі, якщо барометр показує 750 мм рт. ст. з  $t = 0^0$ С.

2. Визначити товщину двошарової стіни, якщо коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{\text{в}} = 8,7$  Вт/м<sup>2</sup> 0<sup>0</sup>С; коефіцієнти теплопровідності, відповідно, штукатурного шару й стіни  $\lambda_{\text{шт}} = 0,7$  Вт/м<sup>0</sup>С,  $\lambda_{\text{ст}} = 1,86$  Вт/м<sup>0</sup>С; коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{\text{н}} = 23$  (Вт/м<sup>2</sup> 0<sup>0</sup>С). Необхідний опір теплопередачі  $R_{\text{отр}} = 0,77$  м<sup>2</sup> 0<sup>0</sup>С/Вт, товщина штукатурного шару,  $\delta_{\text{шт}} = 0,04$ м.

### Варіант №4

1. Газ розширюється з постійною температурою від  $p_1 = 10$  ата,  $v_1 = 0,1$  м<sup>3</sup> до  $p_2 = 2$  ата. Знайти  $v_2$  ?

2. Визначити теплову інерцію двошарової конструкції, що складається з оштукатуреної стіни, якщо коефіцієнти теплозасвоєння штукатурки  $S_{\text{шт}}= 9,67$  Вт/ м<sup>2</sup> 0<sup>0</sup>С та  $S_{\text{ст}}=8,56$  Вт/ м<sup>2</sup> 0<sup>0</sup>С; товщина штукатурного шару  $\delta_{\text{шт}} = 0,02$  м; товщина стіни  $\delta_{\text{ст}} = 0,4$  м; коефіцієнт теплопровідності штукатурного шару  $\lambda_{\text{шт}} = 0,71$  Вт/ м<sup>0</sup>С; коефіцієнт теплопровідності стіни  $\lambda_{\text{ст}}= 0,82$  Вт/ м<sup>0</sup>С.

### **Варіант №5**

1. У циліндрі компресора стискається 1,5 кг повітря від тиску 1 ата до тиску 5 ата. Початковий об'єм циліндру  $V_1 = 0,20 \text{ м}^3$ . Під час стискання температура повітря не змінюється. Знайти кінцевий об'єм повітря ?

2. Визначити повний термічний опір багатопустотної залізобетонної панелі з круглими порожнечами діаметром 159 мм, а також загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції, якщо коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{в}=8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{н}=23 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ ; термічний опір в напрямку, паралельному й перпендикулярному до руху теплового потоку складає,  $R_{\parallel}=0,27 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С/ккал}$  і  $R_{\perp}=0,16 \text{ (м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С) /ккал}$ .

### **Варіант №6**

1. 1 кг повітря з температурою  $0 \text{ }^\circ\text{С}$  і тиском 10 ата займає об'єм  $0,8 \text{ м}^3$ . Встановити, як зміниться його об'єм після нагріву з постійним тиском до температури  $120 \text{ }^\circ\text{С}$ ?

2. Визначити товщину шару теплоізоляції і дійсний загальний опір теплопередачі перекриття, якщо розрахункова зимова температура зовнішнього повітря  $t_{н} = -19 \text{ }^\circ\text{С}$ ; розрахункова температура внутрішнього повітря  $t_{в} = 18 \text{ }^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт, прийнятий залежно від положення зовнішньої поверхні конструкцій, що обгороджують, стосовно зовнішнього повітря  $n = 0,9$ ; нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря і температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta t_{н} = 4 \text{ }^\circ\text{С}$ ; утеплювач перекриття – гравій керамзитовий  $\gamma_0 = 600 \text{ кг/м}^3$ , що має коефіцієнт теплопровідності,  $\lambda=0,71 \text{ ккал/м} \cdot ^\circ\text{С}$ ; загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції складає  $R_0 = 0,32 \text{ (м}^2 \text{ год} \cdot ^\circ\text{С) / ккал}$ , необхідний опір теплопередачі  $R_{отр}=1,09 \text{ (м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С) /ккал}$ .

### **Варіант №7**

1. У балоні ємкістю 10 л знаходиться кисень під тиском 100 ата з температурою  $20 \text{ }^\circ\text{С}$ . Знайти вагу кисню в балоні. Як змінюється кількість кисню після випуску частини його, якщо тиск знизиться до 70 ата при тієї ж самої температурі? До якої температури треба нагріти газ, щоб з кількістю, що залишилась, відновити початковий тиск 100 ата?

2. Визначити необхідний опір теплопередачі, якщо нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta t_{н} = 6 \text{ }^\circ\text{С}$ ; підвищувальний коефіцієнт  $R_{эф} = 1,1$ , коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{в}=8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ . Температура зовнішнього повітря,  $t_{н}= - 22 \text{ }^\circ\text{С}$ . Коефіцієнт  $n=0,9$ .

### **Варіант №8**

1. Яка щільність оксиду вуглецю в повітрі, яке має температуру  $28 \text{ }^\circ\text{С}$  й тиск  $0,01 \text{ МПа}$ , якщо відомо, що з тиском  $0,2 \text{ МПа}$  й температурою  $15 \text{ }^\circ\text{С}$  вона дорівнює  $1,169 \text{ кг/м}^3$  ?

2. Визначити дійсний опір теплопередачі, якщо коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{н} = 23 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт тепло-

віддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ . Товщина штукатурного шару  $\delta_{шт} = 0,03 \text{ м}$ , товщина стіни  $\delta_{ст} = 0,45 \text{ м}$ , коефіцієнт теплопровідності штукатурного шару,  $\lambda_{шт} = 0,84 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$ , стіни  $\lambda_{ст} = 0,85 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$ .

### **Варіант №9**

1. Повітря за об'ємом утримує 20,9% кисню і 79,1% азоту. Знайти склад повітря за вагою, парціальний тиск повітря й азоту з тиском суміші 760 мм рт. ст. і питому вагу повітря з нормальними фізичними й технічними умовами.

2. Визначити товщину двошарової стіни, якщо коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ ; коефіцієнти теплопровідності, відповідно, штукатурного шару й стіни,  $\lambda_{шт} = 0,83 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$ ,  $\lambda_{ст} = 0,96 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_n = 23 \text{ (Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$ . Необхідний опір теплопередачі  $R_{отр} = 0,82 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С/Вт}$ , товщина штукатурного шару,  $\delta_{шт} = 0,02 \text{ м}$ .

### **Варіант №10**

1. У балоні місткістю  $0,2 \text{ м}^3$  знаходиться кисень під тиском 12 МПа з температурою  $25 \text{ }^\circ\text{С}$ . Скільки витрачено кисню, якщо тиск у балоні знижено до 8,5 МПа, а температуру до  $17 \text{ }^\circ\text{С}$ ?

2. Визначити теплову інерцію двошарової конструкції, що складається з оштукатуреної стіни, якщо коефіцієнти теплозасвоєння штукатурки  $S_{шт} = 8,64 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$  та  $S_{ст} = 8,36 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ ; товщина штукатурного шару  $\delta_{шт} = 0,02 \text{ м}$ ; товщина стіни  $\delta_{ст} = 0,4 \text{ м}$ ; коефіцієнт теплопровідності штукатурного шару  $\lambda_{шт} = 0,75 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт теплопровідності стіни  $\lambda_{ст} = 0,86 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$ .

### **Варіант №11**

1. Знайти середню мольну, об'ємну й масову теплоємність у ізобарному й ізохорному процесі в інтервалі температур від 0 до  $1300 \text{ }^\circ\text{С}$  для суміші газів, що має такий склад: 8%  $\text{CO}_2$ ; 5%  $\text{H}_2$ ; 2%  $\text{CO}$  і 85%  $\text{N}_2$ .

2. Визначити товщину шару теплоізоляції і дійсний загальний опір теплопередачі перекриття, якщо розрахункова зимова температура зовнішнього повітря  $t_n = -19 \text{ }^\circ\text{С}$ ; розрахункова температура внутрішнього повітря  $t_b = 18 \text{ }^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт, прийнятий залежно від положення зовнішньої поверхні конструкцій, що обгороджують, стосовно зовнішнього повітря  $n = 0,9$ ; нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta_{тн} = 4 \text{ }^\circ\text{С}$ ; утеплювач перекриття – гравій керамзитовий  $\gamma_o = 600 \text{ кг/м}^3$ , що має коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 0,75 \text{ ккал/м} \cdot ^\circ\text{С}$ ; загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції складає  $R_o = 0,31 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{С)/ккал}$ , необхідний опір теплопередачі  $R_{отр} = 1,08$ .

### **Варіант №12**

1. У зачиненому резервуарі місткістю 100 л знаходиться повітря з температурою  $0 \text{ }^\circ\text{С}$ . Знайти теплоту, що йде на нагрівання цього повітря до  $200 \text{ }^\circ\text{С}$ .

2. Визначити необхідний опір теплопередачі, якщо нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta_{тн} = 6 \text{ }^\circ\text{С}$ ; підвищувальний коефіцієнт  $R_{эф} = 1,1$ , коефіцієнт

тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$ . Температура зовнішнього повітря,  $t_n = -32 \text{ } ^\circ\text{С}$ . Коефіцієнт  $n = 0,4$ .

### **Варіант №13**

1. До повітря масою 1,5 кг підведена теплота 30 Вт. Знайти зміну внутрішньої енергії повітря, зроблену роботу, зміну ентальпії.

2. Визначити товщину двошарової стіни, якщо коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$ ; коефіцієнти теплопровідності, відповідно, штукатурного шару й стіни  $\lambda_{шт} = 0,96 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С}$ ,  $\lambda_{ст} = 0,70 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_n = 23 \text{ (Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$ . Необхідний опір теплопередачі,  $R_{отр} = 0,85 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С/Вт}$ , товщина штукатурного шару,  $\delta_{шт} = 0,03 \text{ м}$ .

### **Варіант №14**

1. 1 кг повітря, що має початкові параметри:  $p_1 = 10 \text{ ата}$ ;  $t_1 = 25 \text{ } ^\circ\text{С}$ ;  $R = 259,8 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{С}$ ;  $C_p = 1,005 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{С}$ ;  $C_v = 0,71 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{С}$ ;  $k = 1,41$  знижує ізохорний свій тиск до 5 ата. Знайти кінцеві параметри повітря, а також роботу, кількість підведеної теплоти, зміну внутрішньої енергії та ентальпії.

2. Визначити дійсний опір теплопередачі, якщо коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_n = 23 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ . Товщина штукатурного шару  $\delta_{шт} = 0,04 \text{ м}$ , товщина стіни  $\delta_{ст} = 0,51 \text{ м}$ , коефіцієнт теплопровідності штукатурного шару,  $\lambda_{шт} = 0,77 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С}$ , стіни  $\lambda_{ст} = 0,87 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С}$ .

### **Варіант №15**

1. 1 кг повітря, що має початкові параметри:  $p_1 = 10 \text{ ата}$ ;  $t_1 = 25 \text{ } ^\circ\text{С}$ ;  $R = 259,8 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{С}$ ;  $c_p = 1,005 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{С}$ ;  $c_v = 0,71 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{С}$ ;  $k = 1,41$  знижує ізохорно свій тиск до 5 ата. Знайти кінцеві параметри повітря, а також роботу, кількість підведеної теплоти, зміну внутрішньої енергії та ентальпії.

2. Визначити теплову інерцію двошарової конструкції, що складається з оштукатуреної стіни, якщо коефіцієнти теплозасвоєння штукатурки  $S_{шт} = 10,1 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$  та  $S_{ст} = 9,35 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$ ; товщина штукатурного шару  $\delta_{шт} = 0,02 \text{ м}$ ; товщина стіни  $\delta_{ст} = 0,4 \text{ м}$ ; коефіцієнт теплопровідності штукатурного шару  $\lambda_{шт} = 0,81 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт теплопровідності стіни  $\lambda_{ст} = 0,96 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С}$ .

### **Варіант №16**

1. 1 кг повітря, що має початкові параметри:  $p_1 = 10 \text{ ата}$ ;  $t_1 = 25 \text{ } ^\circ\text{С}$ ;  $R = 259,8 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{С}$ ;  $c_p = 1,005 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{С}$ ;  $c_v = 0,71 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{С}$ ;  $k = 1,41$  знижує адиабатно свій тиск до 5 ата. Знайти кінцеві параметри повітря, а також роботу, кількість підведеної теплоти, зміну внутрішньої енергії та ентальпії.

2. Визначити повний термічний опір багатопустотної залізобетонної панелі з круглими порожнечами діаметром 159 мм, а також загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції, якщо коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_n = 23 \text{ (Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$  термічний опір у напрямку, паралельному й перпендикулярному руху теплового потоку складає,  $R_{\parallel} = 0,24 \text{ м}^2 \cdot \text{год } ^\circ\text{С/ккал}$  та  $R_{\perp} = 0,18 \text{ (м}^2 \cdot \text{год } ^\circ\text{С) /ккал}$ .



### **Варіант №17**

1. 1 кг повітря, що має початковий тиск 10 ата, температуру  $200^{\circ}\text{C}$  й об'єм  $0,138\text{ м}^3$  ізобарно розширюється вдвічі й має об'єм  $0,276\text{ м}^3$ . Знайти кінцеві параметри повітря.

2. Визначити товщину шару теплоізоляції та дійсний загальний опір теплопередачі перекриття, якщо розрахункова зимова температура зовнішнього повітря  $t_{\text{н}} = -19^{\circ}\text{C}$ ; розрахункова температура внутрішнього повітря  $t_{\text{в}} = 18^{\circ}\text{C}$ ; коефіцієнт, прийнятий залежно від положення зовнішньої поверхні конструкцій, що обгороджують, стосовно зовнішнього повітря  $n = 0,9$ ; нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta_{\text{тн}} = 4^{\circ}\text{C}$ ; утеплювач перекриття – гравій керамзитовий  $\gamma_0 = 600\text{ кг/м}^3$ , що має коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 0,81\text{ ккал/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ; загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції складає  $R_0 = 0,34\text{ (м}^2\cdot\text{год}^{\circ}\text{C)/ккал}$ , необхідний опір теплопередачі  $R_{\text{отр}} = 1,07\text{ (м}^2\cdot\text{год}^{\circ}\text{C)/ккал}$ .

### **Варіант №18**

1. 1 кг повітря, що має початковий тиск 10 ата, температуру  $200^{\circ}\text{C}$  й об'єм  $0,138\text{ м}^3$  ізотермічно розширюється вдвічі й має об'єм  $0,276\text{ м}^3$ . Знайти кінцеві параметри повітря.

2. Визначити повний термічний опір багатопустотної залізобетонної панелі з круглими порожнечами діаметром 159 мм, а також загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції, якщо коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{\text{в}} = 8,7\text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ; коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{\text{н}} = 23\text{ (Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$  термічний опір у напрямку, паралельному й перпендикулярному до руху теплового потоку складає,  $R_{\parallel} = 0,21\text{ м}^2\cdot\text{год}\cdot^{\circ}\text{C/ккал}$  та  $R_{\perp} = 0,19\text{ (м}^2\cdot\text{год}^{\circ}\text{C)/ккал}$ .

### **Варіант №19**

1. 1 кг повітря, що має початковий тиск 10 ата, температуру  $150^{\circ}\text{C}$  й об'єм  $0,138\text{ м}^3$  ізотермічно розширюється вдвічі й має об'єм  $0,276\text{ м}^3$ . Знайти кінцеві параметри повітря.

2. Визначити необхідний опір теплопередачі, якщо нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta_{\text{тн}} = 6^{\circ}\text{C}$ ; підвищувальний коефіцієнт  $R_{\text{эф}} = 1,1$ , коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{\text{в}} = 8,7\text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ . Температура зовнішнього повітря,  $t_{\text{н}} = -24^{\circ}\text{C}$ . Коефіцієнт  $n = 0,9$ .

### **Варіант №20**

1. Знайти кінцеві параметри повітря, якщо 1 кг повітря, що має початковий тиск 10 ата, температуру  $150^{\circ}\text{C}$  й об'єм  $0,138\text{ м}^3$  адіабатно розширюється вдвічі й має об'єм  $0,276\text{ м}^3$ .

2. Визначити товщину двошарової стіни, якщо коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_{\text{в}} = 8,7\text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ; коефіцієнти теплопровідності, відповідно, штукатурного шару і стіни  $\lambda_{\text{шт}} = 0,81\text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ,  $\lambda_{\text{ст}} = 0,72\text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ; коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, що об-

городжує  $\alpha_n = 23$  (Вт/м<sup>2</sup>·°С). Необхідний опір теплопередачі  $R_{отр} = 0,92$  м<sup>2</sup>·°С/Вт, товщина штукатурного шару,  $\delta_{шт} = 0,02$  м.

### **Варіант №21**

1. Паропровід діаметром 150/156 мм покрито ізоляцією товщиною 120 мм, коефіцієнт теплопровідності якої  $\lambda_2 = 0,1$  Вт/м·°С. Температура пара  $t_{ж1} = 300$  °С, зовнішнього повітря  $t_{ж2} = 25$  °С. Крім того відомо, що  $\lambda_1 = 0,1$  Вт/м·°С,  $\alpha_1 = 100$  та  $\alpha_2 = 8,5$  Вт/м<sup>2</sup>·°С. Знайти коефіцієнт теплопередачі. Переданий від пара до повітря крізь стінку паропроводу кількість теплоти й температуру на зовнішній поверхні стінки паропроводу.

2. Знайти часову витрату палива, необхідну для роботи парової турбіни потужністю 24 МВт, якщо теплота згоряння палива  $Q_n^p = 34,75$  МДж/кг й відомо, що на перетворення теплової енергії в механічну витрачається лише 37% теплоти палива.

### **Варіант №22**

1. Гладка плита шириною  $b = 1$  м і довжиною  $l = 1,2$  м обдувається повітрям зі швидкістю  $v = 8$  м/с. Знайти коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  і повний тепловий потік  $Q$ , якщо температура плити  $t_c = 60$  °С, а температура повітря  $t_{ж} = 20$  °С.

2. Визначити кінцевий тиск кисню й кількість підведеної до нього теплоти, якщо початкова температура кисню 16 °С, кінцева – 40 °С, теплоємність кисню 0,656 кДж/кг·К, місткість сосууду 60 л з початковий тиском 12,5 МПа.

### **Варіант №23**

1. Паропровід діаметром 200/216 мм покрито ізоляцією товщиною 120 мм, коефіцієнт теплопровідності якої  $\lambda_2 = 0,1$  Вт/м·°С. Температура пара  $t_{ж1} = 300$  °С, зовнішнього повітря  $t_{ж2} = 25$  °С. Крім того відомо, що  $\lambda_1 = 0,1$  Вт/м·°С,  $\alpha_1 = 100$  та  $\alpha_2 = 8,5$  Вт/м<sup>2</sup>·°С.

2. Знайти коефіцієнт теплопередачі. Переданий від пара до повітря крізь стінку паропроводу кількість теплоти й температуру на зовнішній поверхні стінки паропроводу. Манометр, що встановлений на паровому котлі, показує тиск 0,27 МПа. Визначити абсолютний тиск у котлі, якщо тиск, що визначений за ртутним барометром при температурі 289 К дорівнює 735 мм. рт. ст.

### **Варіант №24**

1. Водяний холодильник має поверхню нагріву  $F = 8$  м<sup>2</sup>. Знайти кінцеві температури рідини й кількість переданої за годину теплоти, якщо відомо:  $G_1 = 225$  кг/год;  $c_{p1} = 3,03$  кДж/кг·°С, початкова температура охолоджуємої рідини  $t'_1 = 120$  °С. Для охолодження використовують воду з витратою  $G_2 = 1000$  кг/год з температурою  $t'_2 = 10$  °С. Коефіцієнт теплопередачі  $k = 35$  Вт/м<sup>2</sup>·°С.

2. Яка щільність оксиду вуглецю в повітрі, що має температуру 28 °С й тиск 0,01 МПа, якщо відомо, що з тиском 0,3 МПа й температурою 15 °С вона дорівнює 1,169 кг/м<sup>3</sup> ?

### **Варіант №25**

1. У холодильному пристрої охолоджується рідина, витрата якої  $G_1 = 275$  кг/год від  $t'_1 = 120$  °С до  $t''_1 = 50$  °С. Для охолодження використовують во-

ду з витратою  $G_2 = 1100$  кг/год з температурою  $t'_2 = 10$  °С. Коефіцієнт теплопередачі  $k = 1000$  Вт/м<sup>2</sup> · °С. Знайти поверхню нагріву з прямотоком і противотоком.

2. Визначити кінцевий тиск кисню й кількість підведеної до нього теплоти, якщо початкова температура кисню  $14$  °С, кінцева –  $51$  °С, теплоємність кисню  $0,656$  кДж/кг · К, місткість сосуда  $60$  л з початковий тиском  $12,7$  МПа.

### **Варіант №26**

1. Гравітаційне поле Землі притягає атмосферу й створює таким чином на поверхні тиск, достатній для підтримки стовпчика ртуті в барометрі висотою  $75$  см ( $101325$  Па) при температурі  $273$  К. Визначити масу атмосфери, приймаючи, що радіус Землі дорівнює  $6400$  км. Зміну гравітаційної сили не враховувати.

2. Визначити годинну витрату середовища, що охолоджує, тобто води, якщо годинна витрата середовища, що охолоджують  $G_1 = 17000$  кг/год; температури теплоносія, що охолоджують (мастила): початкова  $t_1' = 80$  °С; кінцева  $t_1'' = 45$  °С; температури теплоносія, що охолоджує (води): початкова  $t_2' = 20$  °С; кінцева  $t_2'' = 35$  °С; питома масова теплоємність: теплоносія, що охолоджують  $C_1 = 2030$  Дж/кг · °С; теплоносія, що охолоджує  $C_2 = 170$  Дж/кг · °С.

### **Варіант №27**

1. Манометр, що встановлений на паровому котлі, показує тиск  $0,45$  МПа. Визначити абсолютний тиск у котлі, якщо тиск, що визначений за ртутним барометром при температурі  $303$  К дорівнює  $750$  мм. рт. ст.

2. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від мастила до стінки труби теплообмінника, якщо масова швидкість мастила  $V_m = 200$  кг/м<sup>2</sup> · с; коефіцієнт динамічної в'язкості мастила  $\mu_1 = 79,70 \cdot 10^{-4}$  Н · с/м<sup>2</sup>; коефіцієнт теплопровідності мастила  $\lambda_1 = 0,1370$  Вт/м · °С; зовнішній діаметр труби  $d_n = 200$  мм; критерій Прандтля мастила  $Re_m = 1088$ .

### **Варіант №28**

1. У балоні місткістю  $0,2$  м<sup>3</sup> знаходиться кисень під тиском  $12$  МПа при температурі  $25$  °С. Скільки витрачено кисню, якщо тиск у балоні знижено до  $8,5$  МПа, а температуру до  $17$  °С?

2. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби теплообмінника до охолоджуючої води, якщо масова швидкість води (в трубах)  $V_b = 300$  кг/м<sup>2</sup> · с; коефіцієнт динамічної в'язкості води  $\mu_2 = 81,7$  Н · с/м<sup>2</sup>; коефіцієнт теплопровідності води  $\lambda_2 = 0,611$  Вт/м · °С; внутрішній діаметр труби  $d_b = 150$  мм;  $Re_b = 5,35$ .

### **Варіант №29**

1. Який максимальний шар льоду може утворюватися на поверхні прісного водоймища, якщо середня температура на верхній поверхні льоду буде зберігатися  $-10$  °С, щогодинна витрата теплоти водою крізь лід складає  $24,1$  ккал/м<sup>2</sup> · год, а коефіцієнт теплопровідності льоду  $1,935$  ккал/м · год · °С?

2. Визначити необхідний опір теплопередачі, якщо нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta_{th} = 6$  °С; підвищувальний коефіцієнт  $R_{эф} = 1,1$ , коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, що обгороджує  $\alpha_b = 8,7$  Вт/м<sup>2</sup> · °С. Температура зовнішнього повітря,  $t_n = -30$  °С. Коефіцієнт  $n = 0,4$ .

### **Варіант №30**

1. Визначити температуру внутрішньої поверхні каналізаційної труби й перевірити, чи можна прокладати каналізацію бетонними трубами діаметром  $150 \times 25$  мм без теплової ізоляції в ґрунті, температура якого на глибині закладання труби безпосередньо біля її поверхні досягає  $t_2 = -1,8$  °С. Температура замерзання каналізаційної рідини  $t_3 = -0,5$  °С. На 1 пог. м труби втрачається 18,7 ккал/год теплоти. Коефіцієнт теплопровідності бетону  $1,1$  ккал/м · год · °С. Вплив швидкості руху рідини трубою не враховувати.

2. Визначити товщину шару теплоізоляції та дійсний загальний опір теплопередачі перекриття, якщо розрахункова зимова температура зовнішнього повітря  $t_{\text{н}} = -19$  °С; розрахункова температура внутрішнього повітря  $t_{\text{в}} = 18$  °С; коефіцієнт, прийнятий залежно від положення зовнішньої поверхні конструкцій, що обгороджують, стосовно зовнішнього повітря  $n = 0,9$ ; нормативний температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огороження  $\Delta_{\text{тн}} = 4$  °С; утеплювач перекриття – гравій керамзитовий  $\gamma_0 = 600$  кг/м<sup>3</sup>, що має коефіцієнт теплопровідності,  $\lambda = 0,83$  ккал/м · °С; загальний опір теплопередачі конструкції без теплоізоляції складає  $R_0 = 0,33$  (м<sup>2</sup> · год · °С) / ккал, необхідний опір теплопередачі  $R_{\text{отр}} = 1,06$  (м<sup>2</sup> · год · °С).

## ЗМІСТ

Стор.

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ.....	3
I. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ.....	4
1. Технічна термодинаміка.....	4
1.1. Параметри стану робочого тіла.....	4
1.2. Основні закони ідеальних газів.....	5
1.3. Внутрішня енергія робочого тіла. Теплоємність газів.....	6
1.4. Перший закон термодинаміки. Визначення Роботи. Перший закон термодинаміки відповідно до основних газових законів.....	7
1.5. Теплопровідність. Визначення теплового потоку крізь плоску й циліндричну стінку.....	8
1.6. Приклади розв'язання задач.....	8
2. Теплопередача.....	11
2.1. Визначення опору теплопередачі двошарової плоскої стінки, теплотехнічний розрахунок конструкції, що огорожують.....	11
2.1.1. Теплотехнічний розрахунок стіни.....	11
2.1.2. Теплотехнічний розрахунок перекриття.....	13
2.2. Приклади розв'язання задач.....	14
3. Визначення площі поверхні теплообмінного апарату й кінцевих температур потоків рідини.....	17
3.1. Конструктивний розрахунок теплообмінного пристрою.....	17
3.1.1. Методика конструктивного розрахунку теплообмінного пристрою.....	17
3.2. Приклади розв'язання задач.....	19
4. Визначення впливу на розрахунок основних елементів систем водяного й випарного охолодження фізико-хімічних процесів у охолоджувачі.....	22
4.1. Вплив товщини і якісного складу відкладень на надійність охолоджувального й теплообмінного обладнання і на їх розрахунок.....	22
4.2. Приклад розв'язання задач.....	24
4.3. Вплив товщини і якісного складу відкладень на розрахунок основних елементів систем водяного й випарного охолодження.....	25
Список джерел.....	27
II. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ.....	28
1. Робоча програма.....	28
2. Методичні вказівки.....	28
3. Варіант лабораторної роботи.....	33
4. Методика виконання роботи.....	34
5. Результати виконання роботи.....	34
Список джерел.....	35
III. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ.....	36
1. Робоча програма.....	36
2. Методичні вказівки.....	36
3. Основна література для вирішення задач.....	36
4. Додаткова література для вирішення задач.....	36
5. Варіанти контрольних робіт.....	37

Навчальне видання

Методичні вказівки  
до практичних занять,  
лабораторної роботи,  
контрольної роботи  
з дисципліни

**ТЕРМОДИНАМІКА І ТЕПЛОПЕРЕДАЧА  
З ОСНОВАМИ ФІЗИЧНОЇ ХІМІЇ**

(для студентів 5 курсу заочної форми навчання  
освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр, напрямів підготовки  
0926 – «Водні ресурси», 6.060103 – «Гідротехніка (водні ресурси)»  
спеціальності «Водопостачання та водовідведення»)

Укладачі: **НІКУЛІН** Сергій Юхимович,  
**КОЛЕСНИК** Наталія Юріївна

Відповідальний за випуск *К. Б. Сорокіна*

Редактор *З. М. Москаленко*

Комп'ютерне верстання *К. А. Алексанян*

План 2010, поз. 107 М

---

Підп. до друку 09.03.2010 р.

Формат 60×84/16

Друк на ризографі.

Ум. друк. арк. 2,6

Тираж 50 пр.

Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.