

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

Методичні вказівки до самостійної роботи з курсу

Частина 2. Теорія теплообміну

(з електронною версією)

для студентів за напрямками підготовки

6.050502 “Інженерна механіка”

6.051701 “Харчова технологія та інженерія ”

Харків
2013

Рекомендовано кафедрою
енергетики та фізики,
протокол № 11 від 26.02.2013 р.

Схвалено науково-методичною
комісією факультету обладнання та
технічного сервісу
протокол № від 25.03.2013 р.

Рецензент канд. техн. наук, проф. Постнов В.І.

Навчальне видання

Укладачі:

ТОРЯНИК Олександр Іванович

МАЛАФАСВ Микола Тимофійович

ЧЕКАНОВ Микола Анатолійович

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

Методичні вказівки до самостійної роботи з курсу

Частина 2. Теорія теплообміну

(з електронною версією)

для студентів за напрямками підготовки
6.050502 “Інженерна механіка”

6.051701 “Харчова технологія та інженерія ”

Підп. до друку .05.13 р. Формат 60 x 84 1/16.

Папір офсет. Друк офсет. Ум. друк. арк. 2,8

Тираж 100 прим. Зам.

Видавець та виготовлювач

Харківський державний університет харчування та торгівлі
61051. Харків-51, вул. Клочківська, 333.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 2319 від 19.10.2005 р.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ	4
ТЕМА 1. ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ	5
Приклади розв'язання задач	7
Задачі для самостійного розв'язання.....	17
ТЕМА 2. КОНВЕКЦІЯ.....	19
Приклади розв'язання задач.....	23
Задачі для самостійного розв'язання.....	28
ТЕМА 3. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	<u>35</u>
Приклади розв'язання задач.....	43 <u>6</u>
Задачі для самостійного розв'язання.....	54 <u>41</u>
ТЕМА 4. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ	35 <u>43</u>
Приклади розв'язання задач.....	<u>45</u>
Задачі для самостійного розв'язання.....	41 <u>56</u>
ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ТА ПОВТОРЕННЯ З ОСНОВ ТЕОРІЇ ТЕПЛООБМІНУ	42 <u>58</u>
<u>Додатки</u>	
ДОДАТОК 1	<u>59</u>
ДОДАТОК 2	<u>63</u>
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	64 <u>4</u>

ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ

Метою цього електронного посібника є поглиблення знань, практичних навичок з матеріалу курсу, систематичне викладення порядку розв'язання задач і тестових завдань з розділу “Теорія теплообміну”, який є другою частиною електронного навчального посібника з розв'язання задач з курсу теплотехніки.

Підбиття підсумків рішення цих задач дозволяє вчасно встановити недоліки в засвоєнні навчального матеріалу та винайти шляхи їх своєчасного усунення перед складанням модулів, заліків та іспитів.

Під час проведення контрольних занять з самостійної роботи та при захисту виконаних домашніх завдань студент повинен:

ЗНАТИ:

- ⇒ основні поняття та закони з теорії теплообміну,
- ⇒ основні формули, їх варіанти, параметри, порядок їхнього визначення та розрахунку.

ВМІТИ:

- ⇒ обґрунтувати вибір необхідних законів з теорії теплообміну та формул під час розв'язання завдань,
- ⇒ користуватися допоміжними таблицями, діаграмами,
- ⇒ проводити теплотехнічні розрахунки із допомогою калькуляторів.

Задачі сгруповані за п'ятью темами:

1. Теплопровідність;
2. Конвекція;
3. Теплове випромінювання;
4. Теплопередача. Теплообмінні апарати.

З кожної теми підібрано задачі та показано хід їх розв'язання за принципом від простого до більш складного. У посібнику наведено близько 40 задач з рішеннями та методичними коментарями до них. Наприкінці тем надано задачі для самостійного розв'язання студентами. В електронному варіанті посібника можна здійснювати навігацію та одержати коментарі до розв'язання задач за допомогою гіпертекстових посилань.

Під час проведення розрахунків використовують одиниці системи СІ. Точність окремих розрахунків повинна бути не гіршою ніж $\pm(0,1\dots0,4)\%$, щоб загальна похибка всіх розрахунків не перевищувала $(0,5\dots1)\%$. Тому всі результати повинні мати 3...4 значущих цифри, наприклад: 1126; 95,6; 0,00248; 12500; $2,18 \cdot 10^6$. При кількості знаків у числі більшої за 4 одиниці доцільно використовувати експонентний формат представлення результатів: $0,00248 = 2,48 \cdot 10^{-3}$; $125000 = 1,25 \cdot 10^5$; $4,25 \cdot 10^{-7}$; $5,18 \cdot 10^{12}$.

У ряді випадків при запису результатів розрахунків доцільно використовувати кратні одиниці, наприклад: $1 \text{ м} = 10^2 \text{ см} = 10^3 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ км}$, $1 \text{ МПа} = 10 \text{ бар} = 10^3 \text{ кПа} = 10^6 \text{ Па}$. Але під час проведення розрахунків треба завжди використовувати основні одиниці системи СІ, щоб запобігти можливих похибок у результатах.

ТЕОРІЯ ТЕПЛООБМІНУ

Теорія теплообміну (або *теплопередача*) вивчає процеси розповсюдження теплоти в твердих, рідких, газоподібних тілах. Вона базується на 2-му законі термодинаміки, згідно якого під час встановлення термодинамічної рівноваги теплота передається від гарячого тіла або його частини до більш холодного. Теплообмін завжди відбувається за наявності у системі різниці температур (температурного напору), які у шкалах Цельсія і Кельвіна однакові: $\Delta t = \Delta T$.

Теплота передається трьома основними *простими способами*: теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням. Звичайно у твердих тілах переважає теплопровідність, у рідинах – конвекція та у вакуумі і за наявності високих температур в газах – теплове випромінювання.

Також спостерігаються *складні способи теплообміну*: тепловіддача, теплопередача та радіаційно-конвективний. В них сумісно працюють 2 або всі 3 простих способи теплообміну. Явище теплопередачі реалізується під час роботи різних теплообмінних апаратів, яке має велике практичне значення.

Теплообмін залежить від температурного поля, що характеризує розподіл температур у просторі. Градієнт температури визначає швидкість зміни температури у просторі у напрямі найбільш швидкого його зростання – dt/dn [К/м]. Якщо цей напрям вектору n співпадає з віссю x , то $dt/dn = dt/dx$. Якщо температурне поле не змінюється з часом – воне зветься *стаціонарним*.

Тепловий потік Q (Вт) – це кількість теплоти Q' , що передається за одиницю часу через площу поверхні теплообміну F . Тепловий потік через одиницю площі поверхні називається *густиною теплового потоку* q [Вт/м²]:

$$q = dQ/dF \approx Q/F.$$

$$\text{Відповідно } Q = \int_{(F)} q dF \text{ або, за умови } q = \text{const: } Q = q F.$$

При розгляді теплового потоку через циліндричну поверхню використовують поняття *лінійної густини теплового потоку* $q_l = Q/l$, тобто величини потоку, відведеної з одиниці довжини циліндра (труби).

ТЕМА 1. ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ

Теплопровідність - це процес розповсюдження теплоти між тілами, що безпосередньо взаємодіють, або між частинками одного и того ж тіла, що мають різну енергію і температуру. Цей процес відбувається у всіх тілах, але у твердих тілах є головним. Він відсутній тільки у вакуумі, де немає ніяких частинок.

Основний закон *стаціонарної* теплопровідності - *закон Фур'є*: Вектор густини теплового потоку пропорційний градієнтови температури:

$$\vec{q} = -\lambda \frac{dt}{d\vec{n}} = -\lambda \text{grad} t,$$

де λ - *коефіцієнт теплопровідності* [Вт/(м К)], якій характеризує здатність даного тіла проводити теплоту. Для стаціонарного температурного поля

градієнт температури та густина теплового потоку теж є стаціонарними і з часом не змінюються.

Диференційне рівняння *нестационарної* теплопровідності (рівняння Фур'є) дозволяє вирішувати будь яку задачу теплопровідності та має вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 t = a \nabla^2 t,$$

де $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, квадрат оператора Набла

(∇) визначається, як сума других похідних по координатах

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}.$$

За наявності *внутрішніх джерел теплоти* (хімічні процеси, нагрів електричним струмом, електромагнітними хвилями тощо) рівняння уточнимо:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c\rho},$$

де $q_v = \frac{dQ}{dV}$ – об'ємна потужність внутрішніх джерел теплоти [Вт/м³].

Рівняння теплопровідності вирішується за всіма необхідними умовами однозначності (або крайовими умовами).

Умови однозначності задаються у вигляді:

- *фізичні* – значень фізичних параметрів тіл – λ, c, ρ, a, v ;
- *геометричні* – форми і геометричних розмірів тіл – l_i, δ_i ;
- *часові* $t = t(x, y, z, \tau)$ або *початкові* умови – значення температури тіла в початковий момент часу – $t_0 = t(x, y, z, \tau_0 = 0)$;
- *граничні* умови – температури або теплові потоки на поверхні тіла.

Гранична умова *1 роду* – задана незмінна температура на поверхні тіла.

Гранична умова *2 роду* – заданий тепловий потік на поверхню. Гранична умова

3 роду – задани температури теплоносія та тіла і закон теплообміну між ними.

Практичні формули закону стаціонарної теплопровідності.

Для плоскої стінки закон Фур'є має вигляд

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}),$$

де δ – товщина стінки, t_{c1}, t_{c2} – температури поверхонь стінки.

Закон Фур'є можна записати також у вигляді

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R},$$

де R – термічний опір плоскої стінки.

Для одношарової плоскої стінки термічний опір дорівнює

$$R = \frac{\delta}{\lambda}.$$

Для багатошарової плоскої стінки з n - шарів термічний опір дорівнює:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n},$$

Для циліндричної стінки (труби) лінійна густина теплового потоку

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{\pi(t_{c1} - t_{c2})}{R_l},$$

де для одношарової циліндричної стінки (труби) *лінійний термічний опір*

$$R_l = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1},$$

d_1, d_2 – внутрішній та зовнішній діаметри стінки, l – її довжина.

Для багатошарової циліндричної стінки з n - шарів

$$R_l = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} = \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}.$$

Температура на межі k -го та $(k+1)$ -го плоского шару

$$t_{k+1} = t_1 - q \sum_{i=1}^k R_i.$$

Температура на межі k -го та $(k+1)$ -го циліндричного шару

$$t_{k+1} = t_1 - q_l \sum_{i=1}^k R_{li}.$$

Приклади розв'язання задач

Задача 1.

Визначити коефіцієнт теплопровідності матеріалу, якщо при товщині листа 100 мм та різниці температур на його поверхнях 20 °С і густина теплового потоку дорівнює 150 Вт/м².

Розв'язок

Дано:

$$\delta = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}$$

$$\Delta t = \Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$q = 150 \text{ Вт/м}^2$$

Знайти: λ

З основного закону теплопровідності - закону Фур'є для плоскої стінки:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}),$$

де δ - товщина, λ - коефіцієнт теплопровідності стінки, $\Delta t = t_{c1} - t_{c2}$.

Знаходимо вираз для коефіцієнту теплопровідності та його значення

$$\lambda = \frac{q\delta}{(t_{c1} - t_{c2})}$$

$$\lambda = \frac{150 \cdot 0,1}{20} = 0,75 \text{ Вт/(м К)}.$$

Відповідь: $\lambda = 0,75 \text{ Вт/(м К)}$

Задача 2.

Яку товщину повинна мати стіна приміщення з термічним опором $2 \text{ (м}^2 \text{ К)/Вт}$, що потрібен за сучасними стандартами теплозбереження, якщо її зробити з залізобетону, цегли будівельної, газобетону або з пінопласту?

Розв'язок

Дано:

$$R = 2 \text{ (м}^2 \text{ К)/Вт}$$

$$\lambda_1 = 1,8 \text{ Вт/(м К)}$$

$$\lambda_2 = 0,8 \text{ Вт/(м К)}$$

$$\lambda_3 = 0,15 \text{ Вт/(м К)}$$

$$\lambda_4 = 0,035 \text{ Вт/(м К)}$$

Знайти: $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$

Для одношарової плоскої стінки термічний опір дорівнює

$$R = \frac{\delta}{\lambda}.$$

Знаходимо вираз для товщини стіни $\delta = R \cdot \lambda$.
Значення для коефіцієнтів теплопровідності λ беремо з таблиці 6 додатку 1. Рахуємо товщини цих стін:

Залізобетон: $\delta_1 = 2 \cdot 1,8 = 3,6 \text{ м,}$

цегла будівельна: $\delta_2 = 2 \cdot 0,8 = 1,6 \text{ м,}$

газобетон: $\delta_3 = 2 \cdot 0,15 = 0,3 \text{ м,}$

пінопласт: $\delta_4 = 2 \cdot 0,035 = 0,07 \text{ м.}$

Відповідь: $\delta_1 = 3,6 \text{ м, } \delta_2 = 1,6 \text{ м, } \delta_3 = 0,3 \text{ м, } \delta_4 = 0,07 \text{ м.}$

Задача 3.

Як зміниться тепловий потік при теплопровідності через плоску стінку, якщо товщину шару та температурний напір збільшити у 2 рази ?

Розв'язок

Дано:

$$\begin{aligned}\delta_2/\delta_1 &= 2 \\ \Delta t_2/\Delta t_1 &= 2 \\ \lambda_2 &= \lambda_1 = \lambda\end{aligned}$$

Знайти: q_2/q_1

З закону Фур'є для плоскої стінки:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}).$$

Знаходимо вираз для відношення теплових потоків q_2/q_1 :

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\lambda_2 \Delta t_2}{\delta_2} \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1 \Delta t_1} = \frac{\lambda}{\lambda} \cdot \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \cdot \frac{\delta_1}{\delta_2} = 1 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} = 1.$$

Відповідь: тепловий потік не зміниться.

Задача 4.

Як зміниться тепловий потік при теплопровідності тришарової плоскої стінки, якщо товщини шарів збільшити у 2 рази, а температурний напір зменшити у 4 рази ?

Дано:

$$\begin{aligned}\delta^*_i/\delta_i &= 2 \\ \Delta t_2/\Delta t_1 &= 1/4 \\ \lambda &= \text{const}\end{aligned}$$

Знайти: q_2/q_1

Розв'язок

Закон Фур'є для плоскої стінки:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R},$$

де для багат шарової плоскої стінки з трьох шарів термічний опір дорівнює:

$$R = \sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}.$$

Унаслідок збільшення товщини шарів (δ^*_i/δ_i) у 2 рази термічний опір всіх шарів також збільшується у 2 рази.

$$R_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\delta^*_i}{\lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{2\delta_i}{\lambda_i} = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = 2R_1$$

Знаходимо вираз для відношення теплових потоків q_2/q_1 :

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\Delta t_2}{R_2} \cdot \frac{R_1}{\Delta t_1} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \cdot \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8},$$

$$q_2 = q_1 \cdot /8.$$

Відповідь: тепловий потік зменшиться у 8 разів.

Задача 5.

Як зміниться тепловий потік при теплопровідності двошарової плоскої стінки, якщо коефіцієнти теплопровідності та температурний напір збільшити у 2 рази?

Дано:

$$\Delta t_2 / \Delta t_1 = 2$$

$$\lambda_2 / \lambda_1 = 2$$

$$\delta^*_i / \delta_i = 1$$

Знайти: q_2 / q_1

Розв'язок

Закон Фур'є для плоскої стінки:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R},$$

де для багатошарової плоскої стінки з двох шарів термічний опір дорівнює:

$$R = \sum_{i=1}^2 \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}$$

Унаслідок збільшення коефіцієнтів теплопровідності у 2 рази термічний опір всіх шарів зменшиться у 2 рази.

$$R_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{2\lambda_i} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{1}{2} R_1$$

Знаходимо вираз для відношення теплових потоків q_2 / q_1 :

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\Delta t_2}{R_2} \cdot \frac{R_1}{\Delta t_1} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \cdot \frac{R_1}{R_2} = 2 \cdot 2 = 4,$$

Відповідь: тепловий потік збільшиться у 4 рази.

Задача 6.

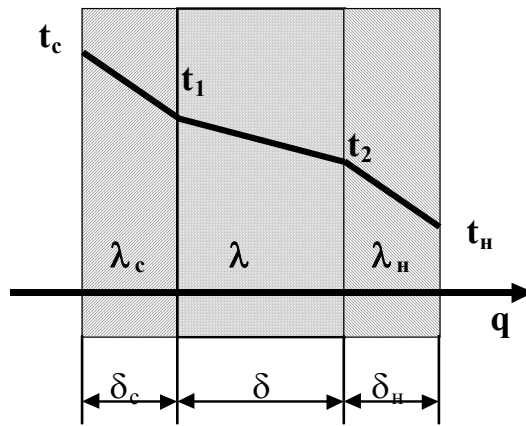
Плоска сталева стінка товщиною $\delta = 30$ мм з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 50$ Вт/(м К) з одного боку покрита шаром накипу товщиною $\delta_n = 3$ мм з теплопровідністю $\lambda_n = 2,3$ Вт/(м К), а з іншого боку - шаром сажі товщиною $\delta_c = 1,5$ мм з теплопровідністю $\lambda_c = 0,08$ Вт/(м К). Температура зовнішньої поверхні сажі $t_c = 600^\circ\text{C}$, накипу $t_n = 120^\circ\text{C}$. Визначити питомий тепловий потік q через стінку, температури поверхонь контакту сталі з накипом та сажею. У скільки разів збільшиться тепловий потік через стінку, якщо прибрати сажу та накип при незмінних температурах поверхонь?

Розв'язання:

Дано:

$$\begin{aligned} \delta &= 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \\ \lambda &= 50 \text{ Вт/(м К)}, \\ \delta_n &= 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \\ \lambda_n &= 2,3 \text{ Вт/(м К)}, \\ \delta_c &= 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \\ \lambda_c &= 0,08 \text{ Вт/(м К)}, \\ t_c &= 600^\circ\text{C}, \\ t_n &= 120^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Знайти: q , q'/q , t_1 , t_2



Тепловий потік на 1 м^2 поверхні плоскої стінки

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R}$$

Термічний

опір стінки R складається з трьох доданків:

$$R = \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{0,08} + \frac{0,03}{50} + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2,3} = 0,021 \text{ (м}^2 \text{ К)/Вт.}$$

$$\text{Тоді } q = \frac{600 - 120}{0,021} = 2,3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура поверхні контакту стінки та сажі

$$t_1 = t_c - q \cdot \frac{\delta_c}{\lambda_c} = 600 - 2,3 \cdot 10^4 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{0,08} = 163^\circ\text{C}.$$

Температура поверхні контакту стінки та накипу

$$t_2 = t_n + q \cdot \frac{\delta_n}{\lambda_n} = 120 + 2,3 \cdot 10^4 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2,3} = 150^\circ\text{C},$$

або
$$t_2 = t_1 - q \cdot \frac{\delta}{\lambda} = 163 - 2,3 \cdot 10^4 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-3}}{50} = 150^\circ\text{C}.$$

Після видалення шару накипу та сажі термічний опір дорівнюватиме

$$R' = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,03}{50} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^2 \text{ К)/Вт.}$$

Питомий тепловий потік $q' = \frac{t_c - t_n}{R'}$, збільшується в

$$\frac{q'}{q} = \frac{R}{R'} = \frac{0,021}{6 \cdot 10^{-4}} \approx 35 \text{ разів.}$$

Відповідь: $q = 2,3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, $q'/q = 35$, $t_1 = 163^\circ\text{C}$, $t_2 = 150^\circ\text{C}$.

Задача 7.

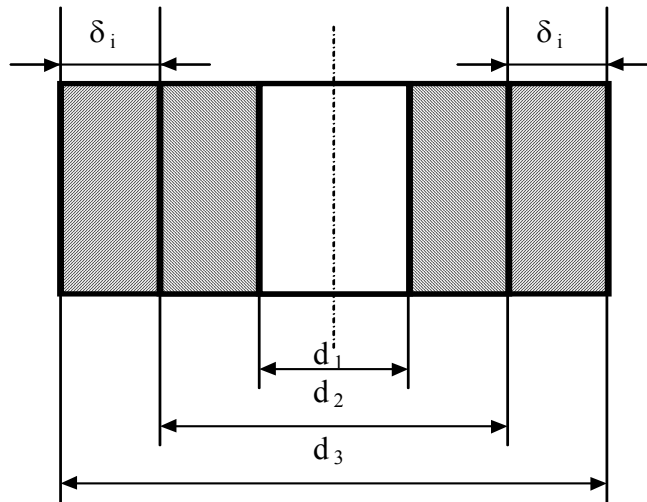
Циліндричний сталевий паропровід з внутрішнім діаметром $d_1 = 60$ мм та зовнішнім $d_2 = 80$ мм покритий шаром теплової ізоляції товщиною $\delta_i = 50$ мм; коефіцієнт теплопровідності сталі $\lambda = 50$ Вт/(м К), ізоляції $\lambda_i = 0,08$ Вт/(м К). Температура внутрішньої поверхні $t_1 = 170^\circ\text{C}$, зовнішньої $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Визначити добову витрату теплоти з 1 м довжини трубопроводу.

Розв'язання:

Дано:

$$\begin{aligned}d_1 &= 0.06 \text{ м} \\d_2 &= 0.08 \text{ м} \\ \delta_i &= 0,05 \text{ м} \\ \lambda &= 50 \text{ Вт/(м К)} \\ \lambda_i &= 0,08 \text{ Вт/(м К)} \\ t_1 &= 170^\circ\text{C} \\ t_2 &= 20^\circ\text{C} \\ l &= 1 \text{ м} \\ \tau &= 86400 \text{ с}\end{aligned}$$

Знайти: Q



Витрати теплоти з 1 м довжини паропроводу

$$Q = \frac{\pi \cdot (t_1 - t_2) \cdot \tau}{R},$$

де R - термічний опір двошарової циліндричної стінки

$$R = \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2},$$

де $d_3 = d_2 + 2 \delta_i = 0.08 + 2 \cdot 0.05 = 0.18$ м;

$$R = \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \ln \frac{0.08}{0.06} + \frac{1}{2 \cdot 0.08} \cdot \ln \frac{0.18}{0.08} = 5.1 \text{ (м К)/Вт};$$

$$Q = \frac{3.14 \cdot (170 - 20) \cdot 86400}{5.1} = 8 \cdot 10^6 \text{ Дж/м} = 8,0 \text{ МДж/м}.$$

Відповідь: $Q = 8,0 \cdot 10^6$ Дж/м.

Задача 8

Плоска сталевая стінка має двошарову ізоляцію: перший шар - з матеріалу з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_1 = 0,12$ Вт/(м·К) - Має товщину $\delta_1 = 50$ мм; другий - з матеріалів з $\lambda_2 = 0,06$ Вт/(м·К) а товщина $\delta_2 = 60$ мм. Знайти товщину

шару δ ізоляція з матеріалу $\lambda = 0,035$ Вт/(м·К), яким можна замінити первісну двошарову ізоляцію без порушення теплоізоляційних властивостей стінки.

Дано:

$$\lambda_1 = 0,12 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$\delta_1 = 50 \text{ мм}$$

$$\lambda_2 = 0,06 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$\delta_2 = 60 \text{ мм}$$

$$\lambda = 0,035 \text{ Вт/(м·К)}$$

Знайти: δ

Розв'язання:

Для виконання умови задачі необхідно зберегти незмінним термічний опір теплоізоляції стінки R_t . Величина R_t для стінки з двошаровою ізоляцією дорівнює:

$$R_t = \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2},$$

де δ_c, λ_c товщина і коефіцієнт теплопровідності

стінки без ізоляції.

При наявності одношарової ізоляції.

$$R_{t2} = \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta}{\lambda}.$$

З умови $R_{t1} = R_{t2}$ знаходимо:

$$\frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta}{\lambda}$$

або

$$\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{\delta}{\lambda}$$

Звідси для шуканої товщини одношарової ізоляції отримаємо:

$$\delta = \lambda \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) = 0,035 \left(\frac{0,05}{0,12} + \frac{0,06}{0,06} \right) = 0,049(\text{м}) = 49(\text{мм})$$

(Зверніть увагу на отриманий виграш у товщині шару ізоляції)

Відповідь: $\delta = 0,049$ (м) = 49 (мм).

Задача 9

Неізольований сталевий паропровід має внутрішній діаметр $d_1 = 50$ мм і зовнішній $d_2 = 60$ мм; коефіцієнта теплопровідності сталі $\lambda = 50$ Вт/(м·К). Температура внутрішньої поверхні стінки труби $t_1 = 170^\circ\text{C}$, зовнішньої – $t_2 = 15^\circ\text{C}$. Визначити лінійний термічний опір паропроводу і добову втрату теплоти з 1 м довжини паропроводу.

Дано:

$$d_1 = 0,05 \text{ м}$$

$$d_2 = 0,06 \text{ м}$$

$$\lambda = 50 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$t_1 = 170^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 15^\circ\text{C}$$

$$\tau = 3600 \text{ с} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ с}$$

$$l = 1 \text{ м}$$

Знайти: R_l, q_l

Розв'язання:

Лінійний термічний опір одношарової циліндричної стінки за формулою:

$$R_l = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2 \cdot 50} \ln \frac{0,06}{0,05} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$$

Втрата теплоти з 1 м довжини паропроводу визначається як $Q_l = q_l \tau$, де

$$q_l = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{R_l}$$

та

$$Q_l = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{R_l} \tau$$

Проводимо розрахунок:

$$Q_l = \frac{3,14 \cdot (170 - 15) \cdot 3,6 \cdot 10^3}{1,8 \cdot 10^{-3}} = 9,7 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}$$

Відповідь: $R_l = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м·К /Вт}$; $q = 9,7 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}$.

Задача 10

Визначити товщину шару льоду, що утворюється протягом доби на спокійній поверхні озера при постійній температурі повітря $t = -10^\circ\text{C}$. Прийняти температуру зовнішньої поверхні льоду рівною температурі повітря. Значення λ_l, r, ρ взяти з таблиць при температурі $t_{nl} = 0^\circ\text{C}$. Вважати, що воду охолоджувати до 0°C не потрібно.

Дано:

$$\lambda_l = 2,2 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$r = 3,35 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$$

$$\rho_l = 900 \text{ кг/м}^3$$

$$t_{nl} = 0^\circ\text{C}$$

$$t = -10^\circ\text{C}$$

$$\tau = 86400 \text{ с}$$

Знайти: δ

Розв'язання:

Зважаючи з повільного характеру процесу замерзання води (пов'язаного з необхідністю відведення значної теплоти плавлення r в навколишнє середовище через шар льоду товщиною δ з низькою теплопровідністю λ_l) в шарі льоду, що утворюється товщиною δ встигає встановлюватись стаціонарний розподіл температури - лінійний спад від t_{nl} до t , що відповідає закону Фур'є.

Відповідно до закону Фур'є, кількість теплоти, що минає в атмосферу з одиниці площі поверхні льоду F за час dt дорівнює:

$$dq = \lambda \frac{t_{nl} - t}{x} dx$$

(аналогічно формулі для теплопровідності плоскої стінки товщиною x).

З іншого боку, ця ж величина дорівнює теплоті, що виділилася під час замерзання льоду

$$dq = dQ/F = r \cdot \rho_l \cdot dv/F = r \cdot \rho_l \cdot dx$$

де r – питома теплота плавлення, ρ_l – густина льоду, $dv = Fdx$ – об'єм льоду і dx – товщина шару льоду, що утворюється за час dt . Складаємо рівняння теплового балансу:

$$\lambda \frac{t_{nl} - t}{x} d\tau = r \cdot \rho_l \cdot dx ,$$

або

$$\lambda (t - t) d\tau = r \cdot \rho_l \cdot x dx$$

Беремо інтеграл від обох частин рівняння теплового балансу:

$$\lambda (t_{nl} - t) \tau = \frac{1}{2} \rho_l x^2 + const$$

З початкової умови $\delta (\tau = 0) = 0$ випливає, що довільна стала інтегрування $const$ в даному випадку дорівнює нулю, так що:

$$\lambda (t_{nl} - t) \tau = \frac{1}{2} r \rho_l x^2 = \frac{1}{2} r \rho_l \delta^2$$

звідси знаходимо залежність $\delta (\tau)$:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda (t_{nl} - t) \tau}{r \cdot \rho_l}}$$

Звідкиля за $\tau = 1$ добу одержимо товщину шару льоду

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,2[0 - (-10)]8,64 \cdot 10^4}{3,35 \cdot 10^5 \cdot 900}} = 0,11(\text{м}) = 11(\text{см})$$

(Порівняти цей результат з спостереженнями у природних умовах. Звернути увагу на нелінійність росту шару льоду у часі унаслідок зростання його термічного опору. Під час вирішення цього завдання за необхідності згадати необхідні відомості з курсів фізики і математики).

Відповідь: $\delta = 11\text{см}$.

Задача 11

По однорідному циліндричному дроту без ізоляції тече постійний електричний струм I ; поверхня дроту підтримується при незмінній температурі t_c . Визначити стаціонарний розподіл температури у поперечному перетині дроту.

Дано:

$$I = const$$

$$t_{нов} = t_c = const$$

Знайти : t

Рішення

У об'ємі дроту, по якому тече електричний струм, виділяється теплота за законом Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R_o \tau,$$

де I – сила струму, R_o – електричний опір дроту довжиною l , τ – час.

Таким чином, в дроті діє внутрішнє джерело тепла з об'ємною потужністю:

$$q_v = \frac{Q}{V\tau} = \frac{I^2 R_o}{V} = \frac{I^2 \rho \frac{l}{S}}{lS} = \frac{I^2 \rho}{S^2} = \frac{I^2 \rho}{\pi^2 R^4}.$$

Де $V = lS$ – об'єм ділянки дроту довжиною l , $S = \pi R^2$ - площа перетину дроту, R - радіус дроту, ρ - питомий електричний опір матеріалу дроту, $R_o = \rho l / S$.

Лінійна густина теплового потоку через ізотермічну поверхню радіуса r за законом Фур'є та з нагріву струмом відповідного об'єму дорівнюють

$$q_\ell = -\lambda \frac{dt}{dr} 2\pi r = q_v \pi r^2.$$

Звідки одержемо рівняння стаціонарної теплопровідності у дроту

$$dt = -\frac{q_v}{2\lambda} r dr.$$

Інтегруючи це рівняння, отримаємо:

$$t_0 = -\frac{q_v}{4\lambda} r^2 + const.$$

За умови задачі $t_{нов} = t(r = R) = t_c$ слідує

$$const = t_c + \frac{q_v}{4\lambda} R^2.$$

Тоді для температури t унутрі дроту маємо:

$$t = t_c + \frac{q_v}{4\lambda} (R^2 - r^2).$$

Підставляємо сюди отриманий вище вираз для q_v :

$$t = t(r) = t_c + \frac{I^2 \rho}{\pi^2 R^4 \lambda} (R^2 - r^2).$$

На осі дроту температура максимальна і дорівнює

$$t_m = t(r=0) = t_c + \frac{I^2 \rho}{4\pi^2 R^2 \lambda}.$$

Таким чином, центральна зона дроту має "перегрів" відносно поверхні дроту t_c на

$$\Delta t = t_m - t_c = \frac{I^2 \rho}{4\pi^2 R^2 \lambda} = \frac{I^2}{\pi^2 R^4} \frac{\rho R^2}{4\lambda}$$

або

$$\Delta t = j^2 \frac{\rho R^2}{4\lambda},$$

де $j = \frac{I}{S}$ - щільність електричного струму у дроті [A/m^2].

При дуже великих j та R перегрів може привести до розплавлення дроту.

Відповідь: розподіл температури у дроті є параболічним.

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 1

Визначити коефіцієнт теплопровідності матеріалу, якщо при товщині листа 100 мм та різниці температур на його поверхнях $10^\circ C$ густина теплового потоку дорівнює 150 Вт/м^2 .

Задача 2

Як зміниться тепловий потік при теплопровідності тришарової плоскої стінки, якщо товщини шарів зменшити у 2 рази, а температурний напір – у 4 рази?

Задача 3

Визначити густину теплового потоку, якщо при товщині листа 100 мм та різниці температур на його поверхнях $20^\circ C$, коефіцієнт теплопровідності матеріалу дорівнює $0,1 \text{ Вт/(м К)}$.

Задача 4

Як зміниться тепловий потік при теплопровідності двошарової плоскої стінки, якщо товщини шарів збільшити у 4 рази, а температурний напір зменшити у 2 рази ?

Задача 5

Плоска сталева стінка товщиною $\delta = 10 \text{ мм}$ з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 40 \text{ Вт/(м К)}$ вкрита з одного боку шаром сажі товщиною $\delta_c = 2,5 \text{ мм}$ з теплопровідністю $\lambda_c = 0,08 \text{ Вт/(м К)}$. Температура зовнішньої

поверхні сажі $t_c = 500^\circ\text{C}$, стінки $t_c = 130^\circ\text{C}$. Визначити питомий тепловий потік q через стінку, температуру поверхні контакту сталі з сажею. У скільки разів збільшиться тепловий потік через стінку, якщо прибрати сажу при незмінних температурах поверхонь?

Задача 6

Циліндричний сталевий паропровід з внутрішнім діаметром $d_1 = 90$ мм та зовнішнім $d_2 = 100$ мм покритий шаром теплової ізоляції товщиною $\delta_i = 50$ мм; коефіцієнт теплопровідності сталі $\lambda = 40$ Вт/(м К), ізоляції $\lambda_i = 0,05$ Вт/(м К). Температура внутрішньої поверхні $t_1 = 150^\circ\text{C}$, зовнішньої $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Визначити годинну витрату теплоти з 1 м довжини трубопроводу.

Задача 7

Плоска сталева стінка має двошарову ізоляцію: перший шар - з матеріалу з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_1 = 0,15$ Вт/(м·К) - Має товщину $\delta_1 = 40$ мм; другий - з матеріалів з $\lambda_2 = 0,05$ Вт/(м·К) а товщина $\delta_2 = 60$ мм. Знайти товщину шару δ ізоляція з матеріалу $\lambda = 0,035$ Вт/(м·К), яким можна замінити первісну двошарову ізоляцію без порушення теплоізоляційних властивостей стінки.

Задача 8

Визначити градієнт температури та густину теплового потоку через стінку, якщо при товщині листа 120 мм температурний напір на його поверхнях дорівнює 24 К, а коефіцієнт теплопровідності – 0,15 Вт/(мК).

Задача 9

Неізольований сталевий паропровід має внутрішній діаметр $d_1 = 50$ мм і зовнішній $d_2 = 60$ мм; коефіцієнта теплопровідності сталі $\lambda = 40$ Вт/(м·К). Температура внутрішньої поверхні стінки труби $t_1 = 120^\circ\text{C}$, зовнішньої – $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Визначити лінійний термічний опір паропроводу і добову втрату теплоти з 10 м довжини паропроводу.

Задача 10

Яким повинен бути коефіцієнт теплопровідності матеріалу, якщо при товщині стінки у 100 мм та різниці температур на його поверхнях 50°C тепловтрати за годину з одиниці площі повинні бути меншими за 0,1 МДж.

ТЕМА 2. КОНВЕКЦІЯ

Конвекція (конвективний теплообмін) - це теплообмін, якій відбувається під час руху нерівномірно нагрітих об'ємів, потоків *теплоносія* – *рідини або газу*. Вона буває *вільна* (самодовільний рух рідини або газу) або *вимушена* (рух під дією зовнішніх сил). Теплообмін між твердою стінкою та потоком рідини або газу (між «стінкою і рідиною») називають **тепловіддачею**.

Основний закон тепловіддачі (конвекції) - закон Ньютона-Ріхмана:

Тепловий потік $[Q, \text{Вт}]$ у процесі тепловіддачі пропорційний площі поверхні теплообміну F та різниці температур поверхні t_c та рідини (газу) t_p :

$$Q = \alpha F (t_c - t_p),$$

або для густини теплового потоку q $[\text{Вт}/\text{м}^2]$:

$$q = \alpha (t_c - t_p),$$

де α - *коефіцієнт тепловіддачі* $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$.

Термічний опір для тепловіддачі дорівнює

$$R = \frac{1}{\alpha}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі α залежить від багатьох параметрів – виду конвекції, теплофізичних властивостей теплоносія (його теплопровідності, теплоємності, в'язкості, густини та ін.), від розмірів та геометрії поверхні теплообміну, від швидкості течії та ін. Залежність α від багатьох параметрів є основною труднощію під час розрахунків теплових витрат. Тут допомагає теорія подібності, згідно до якої два фізичних явища подібні, якщо в них однакові безрозмірні комплекси - числа (критерії) подібності.

Теорія подібності базується на теорії пристінного (пограничного) шару, що утворюється між стінкою тіла та потоком теплоносія. Теплообмін у пристінному шарі товщиною δ відбувається теплопровідністю з коефіцієнтом теплопровідності теплоносія λ . И тому порівнюючи закон тепловіддачі з законом Фур'є можемо написати

$$\alpha = \lambda/\delta.$$

З цього рівняння бачимо, що коефіцієнт тепловіддачі залежить від товщини пристінного шару. Ця товщина відповідає області у який швидко змінюється температура. Причому тепловий та гідравлічний пристінні шари пропорційні один одному. Тому його товщина у першу чергу залежить від діючих на теплоносій сил та його в'язкості.

Для різних видів конвекції існують універсальні для всіх теплоносіїв рівняння, що складено за допомогою критеріїв подібності. Ці рівняння одержують та перевіряють експериментально.

Критерій подібності – це число подібності, що осереднено для даного процесу за певними правилами методики розрахунку.

Для теорії тепловіддачі *основними* є наступні критерії подібності:

Нусельта $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ - безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі,

Рейнольдса $Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$ - критерій вимушеної конвекції, який характеризує відношення сил інерції потоку до сил в'язкості,

Грасгофа $Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t$ - критерій вільної конвекції, який характеризує відношення виштовхуючої сили Архімеда, що виникає при нагріві або охолодженні теплоносія до сил в'язкості,

Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu C_p}{\lambda}$ - критерій, що враховує теплофізичні властивості теплоносія за робочої (визначальної) температури,

Галілея $Ga = \frac{g l^3}{\nu^2}$ - критерій, що визначає рух конденсата під час конденсації,

Кутателадзе $Ku = \frac{r}{C_p \Delta t}$ - критерій конденсації,

де w - швидкість течії, м/с;

l - визначальний розмір, м;

μ, ν ($\mu = \nu \rho$) - коефіцієнти динамічної [Па с] та кінематичної [м²/с] в'язкості;

ρ - густина теплоносія, кг/м³;

g - прискорення вільного падіння, м/с²;

α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К);

β - коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹

(для газів $\beta = \frac{1}{T_{cp}} = \frac{1}{t_{cp} + 273}$, $t_{cp} = (t_c + t_p)/2$);

[Тому для газів критерій Грасгофа рахуємо як: $Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\Delta t}{T_{cp}}$]

C_p - питома теплоємність за сталого тиску, Дж/(кг К);

$\Delta t = t_c - t_p = \Delta T$ - температурний напір, в К або °С – він однаковий!;

t_c, t_p, t_n – температури стінки, рідини та насичення, °С або К;

r - питома теплота пароутворювання, Дж/кг.

Комбінації критеріїв також можуть бути критеріями, наприклад: критерій Релея $Ra = Gr Pr$, Пекле $Pe = Re Pr$ та ін.

Для визначення значень критеріїв потрібно знати за умовами задачі їх визначальні параметри: *визначальну температуру* та *визначальний розмір*.

Усі значення теплофізичних параметрів, що входять до складу критеріїв подібності, визначають з таблиць властивостей за визначальною температурою. Для вільної конвекції - це середня температура пристінного шару: $t_{cp} = 0,5 (t_c + t_p)$, для вимушеної конвекції - температура теплоносія - рідини t_p , при конденсації - середня температура конденсата $t_{к.} = 0,5 (t_c + t_H)$.

Визначальний розмір – це тій розмір тіла, від якого залежить інтенсивність тепловіддачі. Для вільної конвекції та при конденсації – це для горизонтально розташованого циліндра чи труби – діаметр, для вертикального – довжина, для стінки – висота, для вимушеної конвекції – діаметр труби.

Використовуючи надані вище критерії подібності, можна надати результати експериментальних досліджень тепловіддачі у вигляді критеріальних рівнянь, які є універсальними для будь яких теплоносіїв. Але для різних режимів течії теплоносіїв коефіцієнти та ступеневі показники у рівняннях змінюються.

Для вільної конвекції критеріальне рівняння (Міхеєва) має вигляд

$$Nu = C (Gr Pr)^n,$$

де значення коефіцієнта C та ступеневого показника n визначають за величиною добутку критеріїв – критерію Релею ($Ra = Gr Pr$) за таблицею:

$Ra = Gr Pr$	C	n	Примітка
$< 10^{-3}$	0,5	0	Теплообмін теплопровідністю
$10^{-3} \dots 500$	1,18	1/8	Ламінарний рух теплоносія
$500 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	Перехідний режим руху теплоносія
$2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$	0,135	1/3	Турбулентний рух теплоносія

Часто для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі використовуються експериментальні формули. Наприклад, для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі взимку від повітря кімнати до поверхні стіни можемо використовувати спрощену формулу

$$\alpha = 1,45 \Delta t^{n_k},$$

де за умови температури у кімнаті $t_k = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$, висоті кімнати H у межах $2,5 \dots 4,2$ м показник $n_k = 0,32 + 0,014 H$, $\Delta t = t_k - t_c$.

Тепловіддача при вимушеному русі в трубі визначається величиною числа Рейнольдса, що характеризує відношення сил інерції до сил в'язкості. Для різних режимів течії, що також зв'язані з величиною критерію Рейнольдса, теплоносіїв коефіцієнти та ступеневі показники у рівняннях змінюються.

Якщо $Re < 2300$ (ламінарна течія) критеріальне рівняння має вигляд

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

Для $Re > 10^4$ (турбулентна течія) критеріальне рівняння дорівнює

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

Множник Міхеєва $(Pr/Pr_c)^{0,25}$ у критеріальних рівняннях враховує для рідин зміну тепловіддачі біля гарячої або холодної стінки і пов'язан зі зміною її в'язкості. В газах, де критерій Прандтля майже не змінюється з температурою, цим множником нехтують.

Для бульбашкового кипіння води за тиску до 40 бар коефіцієнт тепловіддачі виражається експериментальними формулами

$$\alpha = 3,14 q^{0,7} p^{0,15} \quad \text{або} \quad \alpha = 38,7 \Delta t^{2,33} p^{0,5}.$$

Тут p виражається в барах (1 бар = 10^5 Па), Δt – в К, q – в Вт/м².

Для середнього коефіцієнта тепловіддачі при конденсації насиченої пари на стінці за умови ламінарній течії конденсату існує формула Нусельта:

$$\alpha = C \left[\frac{g \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3 \cdot r}{\mu(t_n - t_c)x} \right]^{\frac{1}{4}}.$$

З цього рівняння одержане критеріальне рівняння для конденсації

$$Nu = C \cdot (Ga \cdot Ku \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25},$$

де для ламінарної течії для горизонтальної труби $C_2 = 0,728$ та визначальний розмір дорівнює діаметру ($x = d$) і для вертикальної труби або стінки $C_2 = 0,943$ та визначальний розмір дорівнює довжині ($x = l = H$). Для вертикальної труби у випадку перехідного режиму руху теплоносія ($l \approx 1$ м) $C_{2n} = 1,14$.

Таким чином, використовуючи критерії та критеріальні рівняння, можна знайти число Нусельта, а з нього - коефіцієнт тепловіддачі α :

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}.$$

Масова витрата сконденсованої пари [M , кг/с] пропорційна тепловому потоку і коефіцієнту тепловіддачі:

$$Q = \alpha F (t_n - t_c) = rM.$$

Приклади розв'язання задач

Задача 1

Як зміниться критерій Галілея, якщо пришвидшення сили тяжіння зменшиться у 4 рази, а лінійний розмір збільшиться у 2 рази ?

Дано:

$$g_2/g_1 = 1/4$$

$$l_2/l_1 = 2$$

$$v = \text{const}$$

Знайти: Ga_2/Ga_1

Розв'язок

Число Галілея має вираз

$$Ga = \frac{g\ell^3}{v^2}$$

Зміни числа Галілея дорівнюють

$$\frac{Ga_2}{Ga_1} = \left(\frac{g\ell^3}{v^2}\right)_2 / \left(\frac{g\ell^3}{v^2}\right)_1 = \left(\frac{g_2}{g_1}\right) \cdot \left(\frac{\ell_2}{\ell_1}\right)^3 = \frac{1}{4} \cdot 2^3 = 2$$

Більшість параметрів за умовами задачі не змінюються й тому скорочуються.

Відповідь: критерій Галілея збільшиться у 2 рази.

Задача 2

Як зміниться критерій Грасгофа, якщо діаметр горизонтальної труби та в'язкість пари зменшаться у 2 рази, а температурний напір збільшиться у 4 рази?

Дано:

$$l_2/l_1 = 1/2$$

$$v_2/v_1 = 1/2$$

$$\Delta t_2/\Delta t_1 = 4$$

Знайти: Gr_2/Gr_1

Розв'язок

Число Грасгофа має вираз

$$Gr = \frac{g\ell^3}{v^2} \beta \Delta t$$

Зміни нового числа Грасгофа дорівнюють для заданих параметрів

$$\frac{Gr_2}{Gr_1} = \left(\frac{g\ell^3}{v^2} \beta \Delta t\right)_2 / \left(\frac{g\ell^3}{v^2} \beta \Delta t\right)_1 = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^3 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right) = \left(\frac{1}{2}\right)^3 \cdot 2^2 \cdot 4 = \frac{1}{8} \cdot 4 \cdot 4 = 2$$

Більшість параметрів не змінюється й тому скорочуються.

Відповідь: критерій Грасгофа збільшиться у 2 рази.

Задача 3

Як зміниться число Рейнольдса рідини при течії всередині труби, якщо внаслідок охолодження її в'язкість збільшиться у 2 рази?

Дано:

$$\nu_2/\nu_1 = 2$$

Знайти: Re_2/Re_1

Розв'язок

Число Рейнольдса має вираз $Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$.

Вважаючи, що в нас змінюється тільки в'язкість, одержимо для числа Рейнольдса

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{w_2 \cdot d_2}{\nu_2} \cdot \frac{\nu_1}{w_1 \cdot d_1} = \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{1}{2}$$

Відповідь: число Рейнольдса зменшиться у 2 рази

Задача 4

Як зміниться число Рейнольдса, при течії рідини всередині труби, якщо її діаметр зменшиться у 2 рази при сталій витраті?

Дано:

$$d_2/d_1 = 1/2$$

$$G = \text{const}$$

Знайти: Re_2/Re_1

Розв'язок

Запишемо число Рейнольдса $Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$.

З рівняння нерозривності потоку можемо взяти, як при цьому зміниться швидкість течії w . Для рідини за сталої об'ємної витрати G :

$$G = wf = \text{const}, \quad \text{або} \quad w_2/w_1 = f_1/f_2$$

де площа перерізу труби дорівнює $f = \pi d^2/4$.

Звідкиля одержимо зміну швидкості для відношення діаметрів

$$w_2/w_1 = (d_1/d_2)^2 = 2^2 = 4.$$

Таким чином, зміни числа Рейнольдса дорівнюють

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{w_2 \cdot d_2}{\nu_2} \cdot \frac{\nu_1}{w_1 \cdot d_1} = \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{\nu_1}{\nu_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot 1 = 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 = 2$$

Відповідь: число Рейнольдса збільшиться у 2 рази

Задача 5

Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі при конденсації на горизонтальних трубах за умови зменшеного у 16 разів їх діаметрів ?

Розв'язок

Дано:

$$d_2/d_1 = 1/16$$

Знайти: a_2/a_1

Для коефіцієнта тепловіддачі при конденсації на горизонтальних трубах використаємо рівняння Нусельта:

$$\alpha = 0.728 \left[\frac{g \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3 \cdot r}{\mu(t_n - t_c)d} \right]^{1/4}$$

Вважаючи, що в нас змінюється тільки діаметри, а інші параметри сталі та при порівнянні скорочуються, одержимо для коефіцієнтів тепловіддачі

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \left[\frac{d_1}{d_2} \right]^{1/4} = 16^{1/4} = 2, \quad \text{або} \quad a_2 = 2 a_1.$$

Аналогічний результат можна одержати і з критеріального рівняння для конденсації, але не так швидко.

Відповідь: коефіцієнт тепловіддачі збільшиться у 2 рази

Задача 6

По сталевій трубі, що має внутрішній діаметр $d = 190$ мм, тече вода з середньою температурою $t_g = 120$ °С та швидкістю $w = 2,5$ м/с. Температура внутрішньої поверхні труби $t_c = 40$ °С. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від води до труби та тепловий потік на 1 м довжини труби.

Дано:

$$d = 0.19 \text{ м}$$

$$t_g = 120 \text{ °С}$$

$$t_c = 40 \text{ °С}$$

$$w = 2,5 \text{ м/с}$$

Знайти: $\alpha; q_l$

Розв'язок:

Для визначення режиму течії води розрахуємо

число Рейнольдса
$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$$

Значення ν знаходимо при $t_g = 120$ °С: $\nu = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{2,5 \cdot 0,19}{0,25 \cdot 10^{-6}} = 1,9 \cdot 10^6 > 10^4 \text{ - турбулентна течія.}$$

Значення Pr_g , λ та знаходимо з таблиці 3 при $t_g = 120$ °С та Pr_c при $t_c = 40$ °С

$$\nu = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \lambda = 0,686 \text{ Вт}/(\text{м К}), Pr = 1,47, Pr_c = 4,31.$$

Для турбулентного режиму течії критеріальне рівняння має вигляд

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25} = 0,021 \cdot (1,9 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 1,47^{0,43} \cdot \left(\frac{1,47}{4,31} \right)^{0,25} = 2 \cdot 10^3,$$

З виразу для критерію $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ знаходимо

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 0,686}{0,19} = 7,2 \cdot 10^3 \text{ (Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})).$$

Тепловий потік на 1 м довжини труби (лінійна густина):

$$q_l = \alpha (t_c - t_n) \pi d = 7,2 \cdot 10^3 (120 - 40) 3,14 \cdot 0,19 = 3,46 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}.$$

Відповідь: $\alpha = 7200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), q_l = 3,46 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}.$

Задача 7

Вертикально розміщена труба довжиною $L = 10 \text{ м}$ має зовнішній діаметр $d = 200 \text{ мм}$ та температуру $t_c = 45^\circ\text{C}$. Температура оточуючого повітря $t_n = 15^\circ\text{C}$, тиск $p = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити добову втрату теплоти за рахунок конвективної тепловіддачі трубою у навколишнє середовище.

Дано:

$$\begin{aligned} L &= 10 \text{ м} \\ d &= 0,2 \text{ м} \\ t_c &= 45^\circ\text{C} \\ t_n &= 15^\circ\text{C} \\ p &= 0,1 \text{ МПа} \\ \tau &= 1 \text{ год.} = 86400 \text{ с.} \end{aligned}$$

Знайти: Q

Розв'язок:

Добові витрати теплоти можна розрахувати згідно з формулою

$$Q = \alpha F (t_c - t_n) \tau,$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі;
 t_c - температура стінки;
 t_n - температура оточуючого повітря;
 F - площа поверхні теплообміну;
 τ - час.

$$F = \pi d L = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 10 = 6,28 \text{ м}^2,$$

Коефіцієнт тепловіддачі α визначимо з критеріального рівняння для вільної конвекції у повітрі:

$$Nu = C (Gr Pr)^n,$$

де
$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta t, \quad Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}.$$

Визначальним розміром є довжина L , визначальною температурою - середня температура повітря

$$t_{cp} = 1/2 (t_c + t_n) = 1/2 (45 + 15) = 30 \text{ }^\circ\text{C}.$$

З таблиці 2 додатка при температурі $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ знаходимо значення параметрів повітря

$$\lambda = 2,67 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м К)}, \quad \nu = 16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad Pr = 0,7.$$

Крім того, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $\Delta t = t_c - t_n = 45 - 15 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$\beta = \frac{1}{T_{cp}} = \frac{1}{273 + 30} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}.$$

$$Gr Pr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta t Pr = \frac{9,81 \cdot 10^3}{(16 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 0,7 = 2,7 \cdot 10^{12}.$$

При цьому добутку $C = 0,135$ $n = 1/3$.

$$Nu = 0,135 (2,7 \cdot 10^{12})^{1/3} = 1,88 \cdot 10^3,$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{1,88 \cdot 10^3 \cdot 2,67 \cdot 10^{-2}}{10} = 5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Добові витрати теплоти

$$Q = 5 (45 - 15) 6,28 \cdot 86400 = 81 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 81 \text{ МДж}.$$

Відповідь: $Q = 81 \text{ МДж}$.

Задача 8

Визначити коефіцієнт тепловіддачі та кількість насиченої пари, яка може сконденсуватися на поверхні горизонтально розміщеної труби за одиницю часу. Діаметр труби $d = 20 \text{ мм}$, довжина $l = 1 \text{ м}$, тиск пари $p = 0,22 \text{ МПа}$, середня температура зовнішньої поверхні труби $t_c = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Дано:

$$P = 0,22 \text{ МПа}$$

$$t_c = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$d = 0,020 \text{ м}$$

$$l = 1 \text{ м}$$

Знайти: α ; m

Розв'язок:

Коефіцієнт тепловіддачі визначимо з критеріального рівняння для плівкової конденсації:

$$Nu = C \cdot (Ga \cdot Ku \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

З таблиці 4 додатка при $p = 0,22 \text{ МПа}$ визначимо

$$t_n = 123 \text{ }^\circ\text{C}, \quad r = 2,19 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, \quad \Delta t = t_n - t_c = 123 - 60 = 63 \text{ }^\circ\text{C}.$$

З таблиці 3 при $t_n = 123 \text{ }^\circ\text{C}$, шляхом інтерполяції, визначаємо

$$\lambda = 0,686 \text{ Вт/(м К)}, \quad \nu = 0,245 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad C_p = 4255 \text{ Дж/кг}, \quad Pr = 1,44, \quad Pr_c = 2,98.$$

$$Ga = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} = \frac{9.81 \cdot 0.02^3}{(0.245 \cdot 10^{-6})^2} = 1.3 \cdot 10^9, \quad Ku = \frac{r}{Cp \cdot \Delta t} = \frac{219 \cdot 10^6}{4255 \cdot 63} = 8.2,$$

$$Nu = 0.728 \cdot (1.3 \cdot 10^9 \cdot 8.2 \cdot 1.44)^{0.25} \left(\frac{1.44}{2.98} \right)^{0.25} = 214,$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{214 \cdot 0.686}{0.02} = 7328 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Кількість насиченої пари, що може сконденсуватися на поверхні труби за одиницю часу, визначимо з формули

$$m = \frac{q}{r} = \frac{\alpha \cdot F \cdot \Delta T}{r} = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot \Delta T}{r} = \frac{7328 \cdot 3.14 \cdot 0.02 \cdot 1 \cdot 63}{219 \cdot 10^6} = 0.013 \text{ кг/с}.$$

Відповідь: $\alpha = 7328 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $m = 0,013 \text{ кг/с}$.

Задача 9

Знайти ефективний коефіцієнт тепловіддачі та питомий тепловий потік від повітря у кімнаті з температурою $t_k = 20^\circ\text{C}$ до стіни дома з $t_c = 16^\circ\text{C}$ висотою 2,5 м та ступіню чорноти стіни $\varepsilon = 0,9$.

Розв'язок:

Дано:

$$t_c = 16^\circ\text{C},$$

$$t_k = 20^\circ\text{C},$$

$$H = 2,5 \text{ м},$$

$$\varepsilon = 0,9$$

Знайти: α^e, q

Тепловтрати з кімнати до стіни дома є радіаційно-конвективними і створюються конвекцією та випромінюванням. Тоді

$$q_{sm} = q_k + q_\varepsilon = \alpha \cdot (t_k - t_c) + \varepsilon C_o \left[\left(\frac{T_k}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= \left\{ \alpha + \frac{\varepsilon C_o \left[\left(\frac{T_k}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{t_k - t_c} \right\} (t_k - t_c) = \alpha^e \cdot (t_k - t_c)$$

Ефективний коефіцієнт тепловіддачі: $\alpha^e = \alpha + \alpha_\varepsilon$.

Знайдемо зведений коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання поверхні стіни за малих $\Delta T = \Delta t$ ($\Delta T \ll T_m/20$), за спрощеною формулою, де T_m - середня абсолютна температура пристінного шару, ε - ступінь чорноти стіни

$$\alpha_\varepsilon = \frac{q_\varepsilon}{\Delta t} \approx 0,04 \cdot \varepsilon \cdot C_o \cdot \left(\frac{T_m}{100} \right)^3,$$

де середня температура пристінного шару біля стіни:

$$t_m = (t_c + t_k)/2 = (16 + 20)/2 = 18 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T_m = 18 + 273 = 291 \text{ K}.$$

Зведений коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання складає

$$\alpha_6 = 0,04 \cdot \varepsilon \cdot C_o \cdot \left(\frac{T_m}{100}\right)^3 = 0,04 \cdot 0,9 \cdot 5,67 \cdot 2,91^3 = 3,35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі з кімнати до поверхні стіни за спрощеною формулою

$$\alpha = 1,45 \Delta t^{n_k} = 1,45 \Delta t^{0,32 + 0,014 H}$$

де $n_k = 0,32 + 0,014 \cdot 2,5 = 0,355$, $\Delta t = 20 - 16 = 4 \text{ К}$.

$$\alpha = 1,45 \cdot 4^{0,355} = 2,37 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Розраховуємо значення ефективного коефіцієнта тепловіддачі до стіни:

$$\alpha^e = \alpha + \alpha_6 = 2,37 + 3,35 = 5,72 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$q = \alpha^e \Delta t = 5,72 \cdot 4 = 22,9 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Відповідь: $\alpha^e = 5,72 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $q = 22,9 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Задача 10

Знайти ефективний коефіцієнт тепловіддачі та питомий тепловий потік від стіни дома з температурою $t_c = -16 \text{ }^\circ\text{C}$ до навколишнього простору з температурою $t_{306} = -22 \text{ }^\circ\text{C}$. Ступінь чорноти стіни $\varepsilon = 0,9$.

Розв'язок:

Дано:

$$t_c = -16 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{306} = -22 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\varepsilon = 0,9$$

Знайти: α^e, q

Тепловтрати від стіни у навколишнє середовище створюються конвекцією та випромінюванням. Тоді

$$q_{вт} = q_l = q_k + q_6 = \alpha \cdot (t_c - t_{306}) + \varepsilon C_o \left[\left(\frac{T_c}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_n}{100}\right)^4 \right] =$$

$$= \alpha^e \cdot (t_c - t_{306}),$$

де ефективний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha^e = \alpha + \alpha_6.$$

Зведений коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання від стіни для малих температурних напорів ($\Delta t \ll T_m$) розраховуємо за наближеною формулою

$$\alpha_B = \frac{q_\varepsilon}{\Delta t} \approx 0,04 \cdot \varepsilon \cdot C_o \cdot \left(\frac{T_m}{100} \right)^3$$

де T_m - середня абсолютна температура пристінного шару, ε - ступінь чорноти стіни, $C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – стала випромінювання абсолютно чорного тіла.

Середня температура з вулиці:

$$t_m = (t_c + t_{308})/2 = (-16 - 22)/2 = -19 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T_m = -19 + 273 = 254 \text{ К.}$$

Зведений коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання

$$\alpha_\varepsilon = 0,04 \cdot \varepsilon \cdot C_o \cdot \left(\frac{T_m}{100} \right)^3 = 0,04 \cdot 0,9 \cdot 5,67 \cdot 2,54^3 = 3,35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі для зовнішньої поверхні стіни з критеріального рівняння при визначальних параметрах $t_m = -19 \text{ }^\circ\text{C}$, $l_o = 10 \text{ м}$. З таблиці 2 для повітря знаходимо при температурі t_m :

$$\nu = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda = 2,29 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К} \quad \text{та} \quad Pr = 0,716$$

Розраховуємо значення критеріїв для повітря:

$$Gr = \frac{g l_o^3}{\nu^2} \cdot \frac{(t_c - t_n)}{T_m} = \frac{9,81 \cdot 10^3}{(11,9 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{6}{254} = 1,64 \cdot 10^{12}$$

$$Gr \cdot Pr = 1,64 \cdot 10^{12} \cdot 0,716 = 1,17 \cdot 10^{12}$$

Даному значенню добутку $Gr \cdot Pr$ згідно таблиці 1 відповідають коефіцієнти $C = 0,135$ та $n = 1/3$. Вирішимо критеріальне рівняння для повітря:

$$Nu_m = C (Gr \cdot Pr)_m^n = 0,135 \cdot (1,17 \cdot 10^{12})^{1/3} = 1422$$

Знайдемо значення коефіцієнта тепловіддачі :

$$\alpha_{308} = Nu \cdot \lambda / l_o = 1422 \cdot 2,29 \cdot 10^{-2} / 10 = 3,26 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Розраховуємо значення ефективних коефіцієнтів тепловіддачі :

$$\alpha^\varepsilon = \alpha_{308} + \alpha_\varepsilon = 3,26 + 3,35 = 6,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Знайдемо питомий тепловий потік через стіну:

$$q = k (t_k - t_{308}) = 1,013 \cdot (21 + 22) = 43,6 \text{ Вт}/\text{м}^2$$

Відповідь: $q = 43,6 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Задача 11

Металева труба з внутрішнім діаметром $d_l = 200 \text{ мм}$ і товщиною стінки $\delta = 15 \text{ мм}$ омивається зовні гарячим газом і має температуру зовнішньої поверхні $t = 300 \text{ }^\circ\text{C}$. З середини труба охолоджується повітрям з середньою температурою $t_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ при тиску $p = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити швидкість руху повітря, що

забезпечує температуру внутрішньої поверхні труби $t_c = 200^\circ\text{C}$. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби $\lambda = 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$

Дано:

$$\begin{aligned} d_1 &= 0,2\text{м} \\ \delta &= 0,015\text{м} \\ \lambda &= 10\text{Вт/м}\cdot\text{К} \\ t &= 300^\circ\text{C} \\ t_c &= 200^\circ\text{C} \\ t_n &= 20^\circ\text{C} \\ p &= 0,1\text{МПа} \end{aligned}$$

Знайти : w

Рішення

У сталому режимі тепловий потік від зовнішньої до внутрішньої поверхні труби має дорівнювати тепловому потоку від внутрішньої поверхні труби до повітря в ній. Перша з цих двох величин виражається формулою для теплопровідності циліндричної стінки:

$$\alpha = \frac{\pi(t-t_c)}{\frac{I}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{\pi(t-t_c)}{\frac{I}{2\lambda} \ln \frac{d_1+2\delta}{d_1}}$$

Оскільки в даному випадку

$$\frac{2\delta}{d_1} = \frac{30}{200} = 0,15 \ll 1,$$

$$\ln \frac{d_1+2\delta}{d_1} = \ln\left(1 + \frac{2\delta}{d_1}\right) \approx \frac{2\delta}{d_1},$$

тоді

$$q_l = \frac{\pi(t-t_c)\lambda d_1}{\delta}$$

Для другого з вказаних теплових потоків використовуємо формулу для конвективної тепловіддачі в циліндричній трубі:

$$q_l = \frac{Q}{\ell} = \frac{\alpha(t_c-t_n)\pi d_1 \ell}{\ell} = \alpha(t_c-t_n)\pi d_1$$

Прирівнюючи у сталому режимі ці дві останні формули, отримаємо:

$$\frac{\pi(t-t_c)\lambda d_1}{\delta} = \alpha(t_c-t_n)\pi d_1.$$

Звідки необхідне по умові значення коефіцієнта тепловіддачі визначається як

$$\alpha = \frac{\lambda(t-t_c)}{\delta(t_c-t_n)} = \frac{10(300-200)}{0,15(200-20)} = 370 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

Таке велике значення коефіцієнта тепловіддачі може бути забезпечене лише при турбулентному режимі руху повітря (при ламінарному режимі значення альфа на 1-2 порядки нижче), по цій формулі:

$$Nu = 0,018 Re^{0,8}, \quad \text{де } Re = \frac{w d_1}{\nu}, \quad Nu = \frac{\alpha d_1}{\lambda_e}.$$

Значення параметрів λ і ν знаходимо з таблиці 2 при $t_l = 20^\circ\text{C}$:

$$\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, \quad \nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Знайдемо Nu :

$$Nu = \frac{370 \cdot 0,2}{2,59 \cdot 10^{-2}} = 2850$$

За спрощеною формулою для газів $Nu = 0,018Re^{0,8}$ знаходимо Re :

$$Re = \left(\frac{Nu}{0,018}\right)^{1,25} = \left(\frac{2850}{0,018}\right)^{1,25} = 3,2 \cdot 10^6$$

Визначаємо шукану швидкість руху повітря у трубі

$$w = \frac{Re \cdot \nu_g}{d_1} = \frac{3,2 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-6}}{0,2} = 240 \text{ (м/с)}$$

Відповідь: $w = 240 \text{ м/с}$.

Задача 12

Визначити годинну втрату тепла від бокової поверхні варильного котла в навколишнє середовище шляхом конвекції і випромінювання, якщо діаметр котла $d = 75 \text{ см}$, висота $h = 80 \text{ см}$, температура нагрівальної поверхні $t = 65^\circ\text{C}$, температура навколишнього повітря $t_n = 25^\circ\text{C}$, ступінь чорноти поверхні котла $\varepsilon = 0,75$. Прийняти, що площа поверхні стін приміщення F_{np} велика і набагато більша площі бокової поверхні котла F .

Дано:

$$\begin{aligned} \tau &= 3600 \text{ с} \\ d &= 0,75 \text{ м} \\ h &= 0,8 \text{ м} \\ t_n &= 25^\circ\text{C} \\ t &= 65^\circ\text{C} \\ T &= 338 \text{ К} \\ \varepsilon &= 0,75 \\ F &\ll F_{np} \end{aligned}$$

Знайти: $Q_{\text{сум}}$

Рішення

Шукана величина $Q_{\text{сум}}$ складається з 2 доданків :

$$Q = Q_k + Q_p$$

Конвективна складова Q_k обчислюється за формулою :

$$Q_k = \alpha F (t - t_l) \tau, \text{ де } F = \pi d l.$$

Радіаційна складова Q_p дорівнює

$$Q_p = \varepsilon_{36} C_o F \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_n}{100}\right)^4 \right] \cdot \tau,$$

де

$$\varepsilon_{36} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \approx \varepsilon_1 \approx \varepsilon$$

за умови $\frac{F_1}{F_2} = \frac{F}{F_{np}} \ll 1.$

Для обчислення коефіцієнта тепловіддачі α , що входить у формулу для Q_k , використовуємо критеріальне рівняння

$$Nu = c (Gr Pr)^n,$$

де критерії $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$, $Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t$.

Визначальним розміром тут є висота котла: $l = h$. Визначальною температурою є середня температура пристінного шару

$$t_m = \frac{t + t_g}{2} = \frac{65 + 25}{2} = 45^\circ C, \quad T_m = 318 \text{ К.}$$

З таблиці 2 шляхом інтерполяції знаходимо при температурі $t = 45^\circ C$:

$$\nu = 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad \lambda = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad Pr = 0,7.$$

Крім того,
$$\beta = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{318} = 3,14 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}.$$

$$\Delta t = t - t_g = 65 - 25 = 40^\circ C$$

Обчислюємо $Gr Pr$:

$$Gr \cdot Pr = \frac{9,81 \cdot 0,8^3}{(17,5 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 0,7 = 1,44 \cdot 10^9$$

Тоді в рівнянні для Nu слід покласти з таблиці 1: $c = 0,135$, $n = 1/3$.

Знаходимо критерій Nu , а потім α :

$$Nu = 0,135 (1,44 \cdot 10^9)^{1/3} = 152,$$

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{h} = \frac{2,8 \cdot 10^{-2} \cdot 152}{0,8} = 5,3 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right)$$

Записуємо повний вираз для втрат теплоти $Q_{\text{сум}}$:

$$\begin{aligned} Q_{\text{сум}} &= \alpha \cdot F(t - t_g)\tau + \varepsilon \cdot c_0 F \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 \right] \tau = F\tau \left\{ \alpha(t - t_g) + \varepsilon \cdot c_0 \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 \right] \right\} = \\ &= \pi d l \tau \left\{ \alpha(t - t_g) + \varepsilon \cdot c_0 \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 \right] \right\} \end{aligned}$$

Проводимо розрахунок:

$$\begin{aligned} Q_{\text{сум}} &= 3,14 \cdot 0,75 \cdot 0,8 \cdot 3,6 \cdot 10^3 \left\{ 5,3(65 - 25) + 0,75 \cdot 5,67 \cdot \left[\left(\frac{338}{100} \right)^4 - \left(\frac{288}{100} \right)^4 \right] \right\} = \\ &= 3 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3 \text{ МДж} \end{aligned}$$

Відповідь: $Q_{\text{сум}} = 3 \text{ МДж}$.

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 1

Як зміниться критерій Рейнольдса при течії всередині труби, якщо діаметр труби зменшити у 2 рази при незмінній витраті ?

Задача 2

Як зміниться критерій Грасгофа, якщо сила тяжіння збільшиться у 8 разів, а характерний лінійний розмір зменшується у 2 рази ?

Задача 3

Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі при конденсації на вертикальній стінці в умовах збільшеної у 16 разів сили тяжіння ?

Задача 4

Як зміниться число Рейнольдса при течії у трубі, якщо її діаметр та витрата рідини зменшаться у 2 рази ?

Задача 5

Як зміниться число Прандтля, якщо при охолодженні рідини коефіцієнт динамічної в'язкості збільшився у 2 рази ?

Задача 6

Визначити добові втрати теплоти у навколишнє середовище шляхом конвекції з зовнішньої поверхні горизонтального бойлера. Зовнішній діаметр 1,0 м, довжина 3 м, поверхня вкрита теплоізоляцією товщиною 20 мм. Температура поверхні 40°C , температура навколишнього середовища 20°C .

Задача 7

Знайти ефективний коефіцієнт тепловіддачі та питомий тепловий потік від стіни дома з температурою $t_c = -20^{\circ}\text{C}$ до навколишнього простору з температурою $t_{\text{зов}} = -25^{\circ}\text{C}$. Ступінь чорноти стіни $\varepsilon = 0,92$.

Задача 8

По сталевій трубі, що має внутрішній діаметр $d = 100$ мм, тече вода з середньою температурою $t_g = 110^{\circ}\text{C}$ та швидкістю $w = 2$ м/с. Температура внутрішньої поверхні труби $t_c = 105^{\circ}\text{C}$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від води до труби та тепловий потік на 1 м довжини труби.

Задача 9

Визначити коефіцієнт тепловіддачі та кількість насиченої пари, яка може сконденсуватися на поверхні горизонтально розміщеної труби за одиницю часу. Діаметр труби $d = 20$ мм, довжина $l = 1$ м, тиск пари $p = 0,22$ МПа, середня температура зовнішньої поверхні труби $t_c = 60^{\circ}\text{C}$.

ТЕМА 3. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Теплове випромінювання - складний процес, який полягає у перетворенні внутрішньої енергії тіла на енергію електромагнітних хвиль, розповсюдження цих хвиль у просторі та поглинання енергії електромагнітних хвиль іншими тілами.

Тепловий потік, який випромінюється на всіх довжинах хвиль з одиниці поверхні тіла по всіх напрямках, є поверхнева густина потоку інтегрального випромінювання E , Вт/м².

Відбивна здатність поверхні непрозорого тіла R зв'язана з коефіцієнтом поглинання A співвідношенням $A + R = 1$. Згідно закону *Кірхгофа* $A = \varepsilon$.

Спектральна густина потоку випромінювання абсолютно чорного тіла виражається законом *Планка*

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1},$$

Згідно закону *зміщення Віна* ця залежність має максимум для довжини хвилі λ_m :

$$\lambda_m = \frac{2.8978 \cdot 10^{-3}}{T} \text{ (м)}, \quad \text{або} \quad \lambda_m = \frac{2898}{T} \text{ (мкм)}.$$

Згідно до закону *Стефана-Больцмана* інтегральне випромінювання тіла

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

де ε - ступінь чорноти поверхні тіла,

$C_0 = 5,67$ Вт/(м²К⁴) - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,

T - абсолютна температура тіла, К.

Тепловий потік між двома тілами, що мають температури T_1 та T_2 , ступені чорноти ε_1 та ε_2 і площі поверхонь F_1 та F_2 , розраховується як

$$Q = C_0 \varepsilon_{36} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1,$$

де $\varepsilon_{36} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$ - зведена ступінь чорноти системи двох тіл.

Якщо між тілами розміщують екрани, які зменшують тепловий потік, то

$$\varepsilon^{ne} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + 2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{ei}} + \frac{1}{\varepsilon_2} - (n+1)},$$

де n - кількість екранів, ε_{ei} - ступінь чорноти екранів. Найбільше зменшення теплового потоку відбудеться за умови: $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2 \gg \varepsilon_{ei}$.

За умови $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{ei}$ зменшення теплового потоку складає $n + 1$ рази

$$q^{ne} = \frac{q}{n+1}, \text{ або } \varepsilon_{3e}^{ne} = \varepsilon_{12}/(n+1).$$

За умови $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2 \gg \varepsilon_e$ зменшення теплового потоку більше: $\varepsilon_{3e}^{ne} \approx \varepsilon_e/2n$.

Приклади розв'язання задач

Задача 1

За якої температури інтенсивність власного випромінювання абсолютно чорного тіла дорівнює $5,67 \cdot 10^4$ Вт/м² ?

Розв'язок

Дано:

$$E = 5,67 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$$

Знайти: T

Згідно з законом Стефана-Больцмана інтенсивність власного випромінювання тіла

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

де ε - ступінь чорноти поверхні тіла, $\varepsilon = 1$ для абсолютно чорного тіла;
 $C_0 = 5,67$ Вт/(м²К⁴) - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,
 T - абсолютна температура, К.

Знаходимо вираз для температури та його величину

$$\left(\frac{T}{100} \right)^4 = \frac{E}{\varepsilon \cdot C_0}, \quad T = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{E}{\varepsilon \cdot C_0}}$$

$$T = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{5,67 \cdot 10^4}{1 \cdot 5,67}} = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ К}.$$

Відповідь: $T = 1000$ К.

Задача 2

Визначити випромінюючу здатність поверхні Сонця та довжину хвилі, що відповідає максимуму спектральної яскравості випромінювання Сонця при температурі 5800 К і якщо випромінювання близьке до абсолютно чорного тіла.

Розв'язок

Дано:

$$T = 5800 \text{ К}$$
$$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$$
$$b = 2,8978 \text{ мм}\cdot\text{К}$$
$$\varepsilon = 1$$

Знайти: E, λ

Згідно з законом Стефана-Больцмана інтенсивність випромінювання Сонця

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4,$$

де $\varepsilon = 1$ - ступінь чорноти поверхні абсолютно чорного тіла; T - абсолютна температура, К.

Знаходимо величину інтенсивності випромінювання Сонця

$$E = 1 \cdot 5,67 \cdot \left(\frac{5800}{100}\right)^4 = 5,67 \cdot 58^4 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Згідно закону зміщення Віна визначимо положення довжини хвилі, що відповідає максимуму теплового випромінювання та його величині

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad \text{де } b - \text{ стала Віна.}$$

$$\lambda_m = \frac{b}{T} = \frac{2,8978 \cdot 10^{-3}}{5800} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Відповідь: $E = 64 \text{ МВт}/\text{м}^2, \lambda = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$

Задача 3

При температурі $727 \text{ }^\circ\text{С}$ інтегральне випромінювання виробу зі сталі дорівнює $40 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Визначити відбивну здатність поверхні виробу

Розв'язок

Дано:

$$T = 1000 \text{ К}$$
$$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$$
$$E = 40 \text{ кВт}/\text{м}^2$$

Знайти: R

Згідно з законом Стефана-Больцмана інтенсивність випромінювання

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4,$$

Відбивна здатність поверхні виробу зв'язана з коефіцієнтом поглинання співвідношенням $A + R = 1$, де воночас $A = \varepsilon$.

Знаходимо величину ступені чорноти поверхні виробу

$$\varepsilon = E / \left(C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \right) = 40 \cdot 10^3 / 5,67 / \left(\frac{1000}{100}\right)^4 = 4 / 5,67 = 0,7 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Знаходимо відбивну здатність поверхні виробу

$$R = 1 - A = 1 - \varepsilon = 1 - 0,7 = 0,3.$$

Відповідь: $R = 0,3$.

Задача 4

Знайти коефіцієнт поглинання для сталеві поверхні, якщо за температури 1000 К її випромінююча здатність дорівнює 45 кВт/м²

Дано:

$$T = 1000 \text{ К}$$
$$E = 45 \text{ кВт/м}^2$$

Знайти: E_2/E_1

Розв'язок

За законом Стефана-Больцмана

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

Коефіцієнт поглинання для поверхні тіла зв'язаний зі ступенем чорноти співвідношенням $A = \varepsilon$.

Знаходимо величину ступеня чорноти поверхні

$$\varepsilon = E / \left(C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right) = 45 \cdot 10^3 / 5.67 / \left(\frac{1000}{100} \right)^4 = 4.5 / 5.67 = 0.8.$$

Відповідь: $A = \varepsilon = 0,8$.

Задача 5

У скільки разів зменшиться інтенсивність випромінювання теплообміну між двома плоскими поверхнями, якщо між ними поставити 4 екрана, ступінь чорноти яких така ж, як і у самих поверхонь?

Дано:

$$n = 4$$
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{ei}$$

Знайти: q/q^{ne}

Розв'язок

Згідно з законом Стефана-Больцмана інтенсивність випромінювання дорівнює

$$Q = C_0 \varepsilon_{3\phi} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1,$$

Зведена ступінь чорноти системи тіл

$$\varepsilon_{3\phi} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + 2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{ei}} + \frac{1}{\varepsilon_2} - (n+1)},$$

За умови $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{ei}$ зменшення теплового потоку складає

$$q^{ne} = \frac{q}{n+1}, \quad \text{тобто у } n+1 = 4+1 = 5 \text{ разів.}$$

Відповідь: тепловий потік за наявності 4 екранів зменшиться у 5 разів.

Задача 6

Визначити випромінюючу здатність поверхні нагрівача, якщо його температура 127°C , ступінь чорноти $0,9$.

Дано:

$$t = 127^{\circ}\text{C}$$

$$T = 400 \text{ K}$$

$$\varepsilon = 0,9.$$

Знайти: E

Розв'язок

За законом Стефана-Больцмана випромінююча здатність поверхні тіла

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

Знаходимо випромінюючу здатність поверхні тіла

$$E = 0,9 \cdot 5,67 \cdot 4,00^4 = 1306 \text{ Вт/м}^2.$$

Відповідь: $E = 1306 \text{ Вт/м}^2$.

Задача 7

Визначити втрати теплоти за одиницю часу випромінюванням з поверхні труби, що має ступінь чорноти $\varepsilon = 0,8$, діаметр $d = 0,1 \text{ м}$, довжину $l = 4 \text{ м}$. Температура поверхні труби $T_1 = 500 \text{ К}$, оточуючого середовища $t_2 = 27^{\circ}\text{C}$.

Розв'язання:

Дано:

$$\varepsilon = 0,8,$$

$$d = 0,1 \text{ м},$$

$$l = 4 \text{ м},$$

$$T_1 = 500 \text{ К},$$

$$t_2 = 27^{\circ}\text{C},$$

$$T_2 = 300 \text{ К}$$

$$C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$$

Знайти: Q

Витрати теплоти з поверхні труби випромінюванням

$$Q = C_0 \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F \cdot \tau,$$

де площа поверхні труби $F = \pi d l$.

$$F = 3,14 \cdot 0,1 \cdot 4 = 1,26 \text{ м}^2,$$

$$Q = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 1,26 \cdot \left[\left(\frac{500}{100} \right)^4 - \left(\frac{300}{100} \right)^4 \right] \cdot 1 = 3100 \text{ Вт}.$$

Відповідь: $Q = 3100 \text{ Вт}$.

Задача 8

Визначити добові втрати теплоти у навколишнє середовище шляхом природної конвекції та випромінювання з зовнішньої поверхні конвеєрної шахтної печі. Зовнішній діаметр $4,5 \text{ м}$, висота 12 м , поверхня сталь вуглецева. Температура поверхні 80°C , температура навколишнього середовища 20°C . Розрахунок провести класичним методом.

Розв'язок:**Дано:**

$d = 4,5 \text{ м}$

$L = 12 \text{ м}$

$t_n = 80^\circ\text{C}$

$t_{nc} = 20^\circ\text{C}$

$\tau = 86400 \text{ с}$

Знайти: Q_{em} Визначальний розмір $l_o = 12 \text{ м}$.Визначальна температура $(80+20)/2 = 50^\circ\text{C}$.Розрахуємо критерій Грасгофа $Gr = \frac{g l_o^3}{\nu^2} \beta(t_n - t_{nc})$

$$Gr = \frac{9,8 \cdot 12^3}{(17,96 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1}{273 + 50} \cdot (80 - 20) = 9,75 \cdot 10^{12}.$$

Значення критерій Прандтля обираємо в таблиці 2 для заданої температури $Pr = 0,698$.

Розраховуємо добуток критеріїв

$$Gr Pr = 0,698 \cdot 9,75 \cdot 10^{12} = 6,81 \cdot 10^{12}$$

та обираємо з таблиці 1 константи у рівняння Міхеєва $c = 0,135$; $n = 1/3$.

За критеріальним рівнянням Міхеєва знаходимо критерій Нуссельта

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)^n = 0,135(6,81 \cdot 10^{12})^{\frac{1}{3}} = 2,56 \cdot 10^3.$$

За визначеним значенням критерія Нуссельта розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{l_o} = \frac{2,56 \cdot 10^3 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{12} = 5,33 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Площа бокової поверхні шахтної печі

$$F_n = \pi \cdot d \cdot L = 4,5 \cdot 12 \cdot 3,14 = 169,6 \text{ м}^2.$$

Знаходимо конвективні втрати теплоти

$$Q_k = \alpha (t_{нов} - t_{сеп}) F \tau = 5,33 \cdot (80 - 20) \cdot 86400 \cdot 169,6 = 4,69 \cdot 10^9 \text{ Дж}.$$

Теплові втрати випромінюванням розраховуємо за рівнянням Стефана-Больцмана, ступінь чорноти вибираємо в таблиці 6 Додатку $\varepsilon = 0,8$.

$$Q_s = \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varepsilon_s \cdot c_0 \cdot F \cdot \tau = \left[\left(\frac{80 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \times \\ \times 0,8 \cdot 5,67 \cdot 169,65 \cdot 86400 = 5,424 \cdot 10^9 \text{ Дж}.$$

Повні теплові втрати становлять

$$Q_{em} = Q_k + Q_s = 4,69 \cdot 10^9 + 5,42 \cdot 10^9 = 1,01 \cdot 10^{10} \text{ Дж}.$$

Відповідь: $Q_{em} = 1,0 \cdot 10^{10} \text{ Дж}.$

Задача 9

Визначити питомий променистий тепловий потік між двома паралельно розміщеними плоскими стінками, що мають температури $t_1 = 210^\circ\text{C}$ та $t_2 = 23^\circ\text{C}$, ступені чорноти $\varepsilon_1 = 0,9$ та $\varepsilon_2 = 0,8$, якщо між ними немає екрана та за наявності екрана з ступенем чорноти $\varepsilon_e = 0,5$. Визначити як зміниться тепловий потік.

Дано:

$$\varepsilon_1 = 0,9$$

$$\varepsilon_2 = 0,8$$

$$\varepsilon_e = 0,5$$

$$t_1 = 210^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 483 \text{ K}$$

$$t_2 = 23^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 296 \text{ K}$$

Знайти: q , q' , q/q'

Розв'язання:

Тепловий потік між стінками без екрану

$$q = C_o \varepsilon_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де для однакових за площею пластин

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,9} + \frac{1}{0,8} - 1} = 0,735,$$

$$q = 0,735 \cdot 5,67 \cdot \left[\left(\frac{483}{100} \right)^4 - \left(\frac{296}{100} \right)^4 \right] = 1,94 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2.$$

Якщо між тілами розміщено екран, то

$$\varepsilon'_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + 2 \cdot \frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 2} = \frac{1}{\frac{1}{0,9} + \frac{2}{0,5} + \frac{1}{0,8} - 2} = 0,229,$$

$$q' = C_o \varepsilon'_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 5,67 \cdot 0,229 \cdot \left[\left(\frac{483}{100} \right)^4 - \left(\frac{296}{100} \right)^4 \right] = 607 \text{ Вт/м}^2.$$

Визначимо зміну теплового потоку

$$q/q' = 1940/607 = 3,2 \text{ рази.}$$

Відповідь: $q = 1940 \text{ Вт/м}^2$, $q' = 607 \text{ Вт/м}^2$, $q/q' = 3,2$ рази.

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 1

У скільки разів зменшиться інтенсивність випромінювання теплообміну між двома плоскими поверхнями, якщо між ними поставити 4 екрана, ступінь чорноти яких така ж, як і у самих поверхонь?

Задача 2

За якої температури інтенсивність власного випромінювання абсолютно чорного тіла дорівнює $5,67 \text{ Вт/м}^2$?

Задача 3

При температурі $727 \text{ }^\circ\text{C}$ інтегральне випромінювання виробу зі сталі дорівнює 33 кВт/м^2 . Визначити поглинаючу здатність поверхні виробу.

Задача 4

Визначити випромінюючу здатність поверхні нагрівача, якщо його температура 327°C , ступінь чорноти $0,9$.

Задача 5

Визначити питомий променистий тепловий потік між двома паралельно розміщеними плоскими стінками, що мають температури $t_1 = 160^\circ\text{C}$ та $t_2 = 20^\circ\text{C}$, ступені чорноти $\varepsilon_1 = 0,9$ та $\varepsilon_2 = 0,8$, якщо між ними немає екрана та за наявності екрана зі ступенем чорноти $\varepsilon_e = 0,1$. Визначити як зміниться тепловий потік.

Задача 6

Визначити добові втрати теплоти у навколишнє середовище шляхом випромінювання з зовнішньої поверхні вертикального бойлера. Зовнішній діаметр $1,2 \text{ м}$, висота 2 м , матеріал поверхні фарбована сталь. Температура поверхні бойлера 50°C , температура навколишнього середовища 20°C .

Задача 7

Визначити випромінюючу здатність поверхні пічі та довжину хвилі, що відповідає максимуму спектрального випромінювання при температурі $300 \text{ }^\circ\text{C}$ і ступені чорноти $\varepsilon = 0,9$.

Задача 8

Визначити втрати теплоти за одиницю часу випромінюванням з поверхні труби, що має ступінь чорноти $\varepsilon = 0,8$, діаметр $d = 0,1 \text{ м}$, довжину $l = 4 \text{ м}$. Температура поверхні труби $T_1 = 500 \text{ К}$, оточуючого середовища $t_2 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 9

Визначити питомий променистий тепловий потік між двома паралельно розміщеними плоскими стінками, що мають температури $t_1 = 250^\circ\text{C}$ та $t_2 = 23^\circ\text{C}$, ступені чорноти $\varepsilon_1 = 0,9$ та $\varepsilon_2 = 0,75$, якщо між ними немає екрана та за наявності екрана з ступенем чорноти $\varepsilon_e = 0,3$. Визначити як зміниться тепловий потік.

ТЕМА 4. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ

Теплообмін від одного теплоносія до іншого через тверду стінку має назву **теплопередача**.

Основне рівняння теплопередачі має вигляд

$$q = k (t_1 - t_2),$$

де t_1, t_2 - температури теплоносіїв, k - коефіцієнт теплопередачі.

Для плоскої стінки з n шарів термічний опір теплопередачі R дорівнює

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Коефіцієнт теплопередачі для багатошарої плоскої стінки

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Для циліндричної багатошарої стінки

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\pi \alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\pi \cdot \alpha_2 \cdot d_{n+1}}}$$

де α_1, α_2 - коефіцієнти тепловіддачі теплоносіїв;

λ_i - коефіцієнти теплопроводності шарів стінки;

δ_i - товщини шарів стінки;

d_1, d_{n+1} - внутрішній та зовнішній діаметри циліндричної стінки.

Температура на межі k -го та $(k+1)$ -го шару

- для плоскої стінки
$$t_{k+1} = t_1 - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^k \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right);$$

- для циліндричної стінки
$$t_{k+1} = t_1 - \frac{q}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^k \frac{1}{2\pi \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right).$$

Теплообмінними апаратами або *теплообмінниками* називаються пристрої, що призначені для передачі теплоти від гарячого до холодного теплоносія. Найбільш широко застосовуються рекуперативні теплообмінники, у яких реалізується явище теплопередачі.

Тепловий розрахунок рекуперативного теплообмінника, залежно від його мети може бути *конструктивним* (проектним) або *повірочним*. Мета конструктивного розрахунку полягає у визначенні площі робочої поверхні теплообмінника. Повірочний розрахунок виконується для теплообмінника з вже відомою величиною робочої поверхні. При цьому розрахунку визначають температури теплоносіїв на виході з теплообмінника і його теплові потоки.

Температурні поля прямиотечійного та протитечійного теплообмінників представлені на рис. 1 а і б, відповідно. Індексми 1 і 2 відзначаються температура та інші параметри гарячого і холодного теплоносіїв, відповідно, а одним і двома штрихами – параметри теплоносія на вході та виході апарата.

При тепловому розрахунку теплообмінника використовуються два основних рівняння – теплового балансу і теплопередачі.

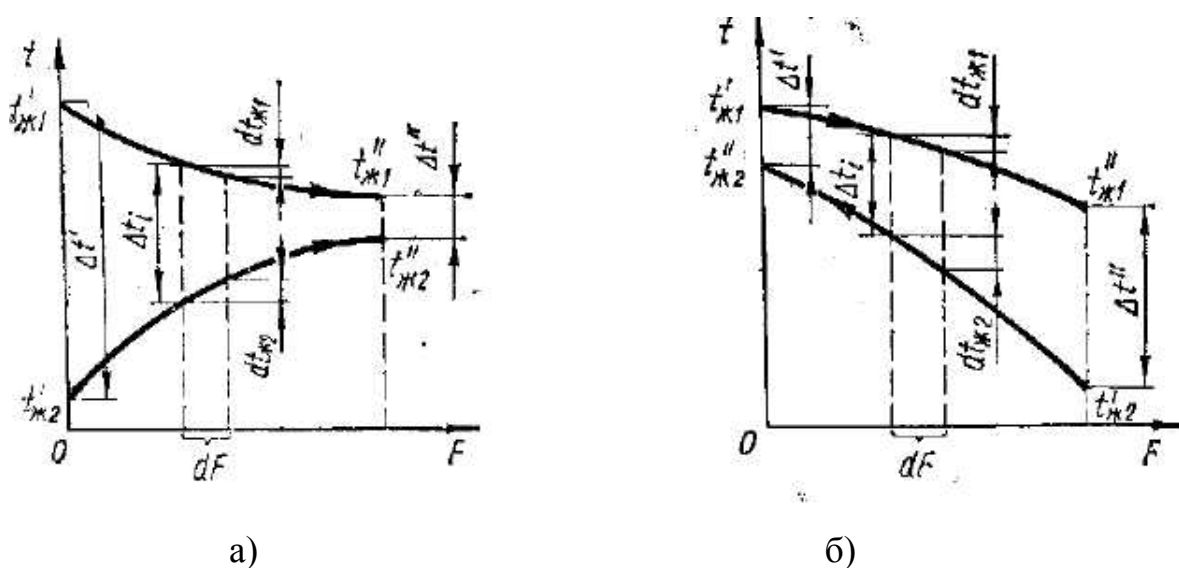


Рисунок 1 – Схеми руху теплоносіїв у теплообмінних апаратах:
а) – прямиотечія, б) – протитечія

Рівняння теплового балансу теплообмінника при відсутності в ньому фазових переходів має вигляд:

$$Q = M_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') \eta = M_2 c_{p2} (t_2'' - t_2').$$

У разі наявності кипіння або конденсації переданий тепловий потік:

$$Q_i = M_i r,$$

де M – масова витрата теплоносія, кг/с; η – коефіцієнт використання теплоти (0,97...0,99), що враховує втрати теплоти у навколишнє середовище, r – питома теплота пароутворення.

Оскільки різниця температур між теплоносіями змінюється за довжиною апарата (рис. 1), то *рівняння теплопередачі*, що є другим основним рівнянням теплообмінного апарату, слід записати у вигляді:

$$Q = \int_0^F k \Delta t \cdot dF = k \cdot F \Delta \bar{t} ,$$

де k і Δt – середні значення коефіцієнта теплопередачі та температурного напору для всієї робочої поверхні F теплообмінного апарата.

Середній температурний напір для усього теплообмінного апарата визначається за формулою *середньологарифмічного температурного напору*

$$\Delta t = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{2.3 \cdot \lg \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} ,$$

де сенс величин $\Delta t'$ і $\Delta t''$ видно з наведеного вище рисунку 1 – це температурні напори на вході та виході теплообмінного апарату. Якщо величини напорів $\Delta t'$ і $\Delta t''$ близькі один до одного (відношення напору «більшого» Δt_{δ} до «меншого» Δt_{μ} – менше 1,5 – тобто: $2/3 < \Delta t'/\Delta t'' < 3/2 = 1,5$, то для середнього Δt можна використати більш просту формулу *середньоарифметичного температурного напору* (похибка цього розрахунку менша за 2%)

$$\Delta t_a = (\Delta t' + \Delta t'')/2.$$

Приклади розв'язання задач

Задача 1

Як зміниться питомий тепловий потік при теплопередачі крізь одношарову плоску стінку, якщо коефіцієнти тепловіддачі та теплопровідності зменшити у 2 рази?

Дано:

$$\alpha_2 = \alpha_1 / 2$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 / 2$$

Знайти: q_2 / q_1

Розв'язок

У рівнянні теплопередачі $q = k (t_1 - t_2)$ коефіцієнт теплопередачі плоскої стінки k дорівнює

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = 1/R$$

де δ - товщина стінки, λ - її коефіцієнт теплопровідності, α_1, α_2 - коефіцієнти тепловіддачі теплоносіїв, R - термічний опір теплопередачі

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

Знаходимо вираз для нового термічного опору

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_1/2} + \frac{\delta}{\lambda/2} + \frac{1}{\alpha_2/2} = 2 \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = 2R_1.$$

Знаходимо вираз для відношення теплових потоків q_2/q_1 :

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\Delta t_2}{R_2} \cdot \frac{R_1}{\Delta t_1} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \cdot \frac{R_1}{R_2} = 1 \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

Відповідь: тепловий потік при теплопередачі зменшиться у 2 рази.

Задача 2

Як зміниться питомий тепловий потік при теплопередачі крізь плоску стінку, якщо коефіцієнти тепловіддачі збільшити у 2 рази, а товщину стінки та температурний напір зменшити у 2 рази ?

Дано:

$$\alpha_2/\alpha_1 = 2$$

$$\delta_2/\delta_1 = 1/2$$

$$\Delta t_2/\Delta t_1 = 1/2$$

Знайти: q_2/q_1

Розв'язок

У рівнянні теплопередачі

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R} = \frac{\Delta t}{R},$$

термічний опір теплопередачі R плоскої стінки дорівнює

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}.$$

Знаходимо новий термічний опір

$$R_2 = \frac{1}{2\alpha_1} + \frac{\delta/2}{\lambda} + \frac{1}{2\alpha_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = R_1/2.$$

Знаходимо вираз для відношення теплових потоків q_2/q_1 :

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\Delta t_2}{R_2} \cdot \frac{R_1}{\Delta t_1} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \cdot \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{2} \cdot 2 = 1$$

Відповідь: тепловий потік при теплопередачі не зміниться.

Задача 3

Як зміниться питомий тепловий потік при теплопередачі крізь плоску стінку, якщо коефіцієнти тепловіддачі, теплопровідності та температурний напір зменшити у 2 рази?

Дано:

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= \lambda_1 / 2 \\ \alpha_2 &= \alpha_1 / 2 \\ \Delta t_2 &= \Delta t_1 / 2\end{aligned}$$

Знайти: q_2 / q_1

Розв'язок

У рівнянні теплопередачі

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R} = \frac{\Delta t}{R},$$

термічний опір теплопередачі R стінки дорівнює

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}.$$

Знаходимо новий термічний опір

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_1/2} + \frac{\delta}{\lambda/2} + \frac{1}{\alpha_2/2} = 2 \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = 2R_1.$$

Знаходимо вираз для відношення теплових потоків q_2 / q_1 :

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\Delta t_2}{R_2} \cdot \frac{R_1}{\Delta t_1} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \cdot \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$$

Відповідь: тепловий потік при теплопередачі зменшиться у 4 рази.

Задача 4

Теплопередача у котлі від димових газів до води, що кипить, відбувається через сталеву стінку. Товщина стінки $\delta = 2$ мм, $\lambda = 40$ Вт/(м К). Температура димових газів $t_1 = 300^\circ\text{C}$, води $t_2 = 100^\circ\text{C}$, коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки $\alpha_1 = 20$ Вт/(м² К), від стінки до води $\alpha_2 = 2500$ Вт/(м²·К). Визначити питомий тепловий потік через стінку.

Дано:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 20 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}, \\ \alpha_2 &= 2500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \\ t_1 &= 300^\circ\text{C}, \\ t_2 &= 100^\circ\text{C}, \\ \delta &= 0,002 \text{ м}, \\ \lambda &= 40 \text{ Вт/(м К)}\end{aligned}$$

Знайти: q

Розв'язання:

Питомий тепловий потік при теплопередачі через плоску стінку

$$q = k (t_1 - t_2),$$

де коефіцієнт теплопередачі через стінку

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Визначимо питомий тепловий потік через стінку

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{300 - 100}{\frac{1}{20} + \frac{0.002}{40} + \frac{1}{2500}} = 3964 \text{ Вт/м}^2.$$

Відповідь: $q = 3964 \text{ Вт/м}^2$.

Задача 5

Передача теплоти в котлі від димових газів до киплячої води відбувається через сталеву стінку, вкриту сажою. Товщина стінки $\delta_{cm} = 15 \text{ мм}$, $\lambda_{cm} = 40 \text{ Вт/(м К)}$, шару сажі $\delta_c = 3 \text{ мм}$, $\lambda_c = 0,08 \text{ Вт/(м К)}$. Температура димових газів $t_1 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, киплячої води $t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, коефіцієнт теплопередачі від газів до стінки $\alpha_1 = 50 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$, від стінки до киплячої води $\alpha_2 = 4500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Визначити питомий тепловий потік через стінку за наявності та відсутності шару сажі.

Дано:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 50 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}, \\ \alpha_2 &= 4500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \\ t_1 &= 1000 \text{ }^\circ\text{C}, \\ t_2 &= 100 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \delta_{cm} &= 0,015 \text{ м}, \\ \lambda_{cm} &= 40 \text{ Вт/(м К)}, \\ \delta_c &= 0,003 \text{ м}, \\ \lambda_c &= 0,08 \text{ Вт/(м К)} \end{aligned}$$

Знайти: $q_1, q_2, q_2/q_1$

Розв'язок:

Питомий тепловий потік через двошарову (сталь-сажа) плоску стінку

$$q_1 = k_1 (t_1 - t_2),$$

$$\text{де } k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Коли прибрано шар сажі $q_2 = k_2 (t_1 - t_2)$,

$$\text{де } k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}};$$

Рахуємо питомі теплові потоки:

$$q_1 = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1000 - 100}{\frac{1}{50} + \frac{0.015}{40} + \frac{0.003}{0.08} + \frac{1}{4500}} = 1.55 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2,$$

$$q_2 = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1000 - 100}{\frac{1}{50} + \frac{0.015}{40} + \frac{1}{4500}} = 4.36 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Таким чином, після очищення стінки від шару сажі теплопередача через стінку збільшується в $q_2/q_1 = 4,36/1,55 = 2,8$ рази.

Відповідь: $q_1 = 1,55 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, $q_2 = 4,36 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, q збільшується у 2,8 рази.

Задача 6

Визначити за повним розрахунком добові втрати теплоти з цехового ізолюваного паропроводу довжиною 50 м, зовнішнім діаметром 60 мм та товщиною стінки 5 мм. Температура перегрітої пари 220°C, температура зовнішнього середовища 20°C. Коефіцієнт теплопровідності сталі 50 Вт/мК, ізоляції 0,07 Вт/мК. Шар ізоляції 20 мм. Коефіцієнт тепловіддачі від пари до внутрішньої стінки паропроводу $\alpha_1 = 2000$ Вт/м²К, від зовнішньої поверхні у навколишнє середовище $\alpha_2 = 40$ Вт/м²К.

Дано:

$L = 50$ м
 $d_{зов} = 60$ мм
 $\delta_c = 5$ мм
 $\lambda_{ст} = 50$ Вт/мК
 $\delta_{из} = 20$ мм
 $\lambda_{из} = 0,07$ Вт/мК
 $t_n = 220^\circ\text{C}$
 $t_{nc} = 20^\circ\text{C}$
 $\alpha_1 = 2000$ Вт/м²К
 $\alpha_2 = 40$ Вт/м²К
 $\tau_{доб} = 86400$ с

Знайти: Q_d

Розв'язок:

Розрахуємо лінійний коефіцієнт теплопередачі ізолюваного трубопроводу за формулою

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{mp}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}}$$

Розрахуємо діаметри шарів

$$d_1 = d_{зов}, \quad d_2 = d_1 + 2\delta_c = (60 + 2 \cdot 5) \cdot 10^{-3} = 70 \text{ мм},$$

$$d_3 = d_2 + 2\delta_{из} = (70 + 2 \cdot 20) \cdot 10^{-3} = 110 \text{ мм},$$

$$k = \left(\frac{1}{2000 \cdot 60 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 50} \ln \frac{70 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 0,07} \ln \frac{110 \cdot 10^{-3}}{70 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{40 \cdot 110 \cdot 10^{-3}} \right)^{-1} = 4,31 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

Розрахуємо лінійну густину втрат теплового потоку

$$q = K\pi(t_n - t_{nc}) = 4,31 \cdot 3,14 \cdot (220 - 20) = 2707 \text{ Вт/м}.$$

Добові втрати теплоти

$$Q_d = q \cdot L \cdot \tau_{доб} = 2707 \cdot 50 \cdot 86400 = 1,17 \cdot 10^{10} \text{ Дж}.$$

Відповідь: $Q_d = 1,17 \cdot 10^{10}$ Дж.

Задача 7

Знайти площу поверхні теплообміну конденсатора, якщо суха насичена пара, що конденсує на зовнішній поверхні труб, має тиск $p = 0,15$ МПа, а вода йде по трубах та нагрівається від $t_1 = 15^\circ\text{C}$ до $t_2 = 80^\circ\text{C}$, витрата води $M_e = 5$ кг/с. Середній коефіцієнт теплопередачі $k = 2500$ Вт/(м²·К).

Дано:

$$p = 0,15 \text{ МПа}$$

$$t_2 = 80^\circ\text{C}$$

$$t_1 = 15^\circ\text{C}$$

$$M_g = 5 \text{ кг/с}$$

$$k = 2500 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$$

Знайти: F

Розв'язок

Площа поверхні теплообміну визначається по формулі:

$$F = \frac{Q}{k\Delta t} = \frac{c_p M_g (t_2 - t_1)}{k\Delta t}$$

Де теплоємність c_p визначається за даними табл. 3

при середній температурі води $t_g = \frac{1}{2}(t_2 + t_1) = 47,5^\circ\text{C}$

шляхом інтерполяції $c_p = 4,17 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, Δt – середньологарифмічний температурний напір, рівний:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_g - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_g}{\Delta t_m}},$$

причому у даному випадку більший та менший напори дорівнюють

$$\Delta t_g = t_n - t_1$$

$$\Delta t_m = t_n - t_2$$

де t_n – температура насичення, визначена з таблиці 4 залежно від тиску пари p .

При $p = 0,15 \text{ МПа}$: $t_n = 111,0^\circ\text{C}$,

$$\Delta t_g = 111 - 15 = 96^\circ\text{C}, \quad \Delta t_m = 111 - 80 = 31^\circ\text{C}, \quad \text{тоді}$$

$$\Delta t = \frac{96 - 31}{\ln \frac{96}{31}} = 57,5^\circ\text{C}$$

(відзначимо, що середньоарифметичний напір

$$\Delta t_a = \frac{1}{2}(\Delta t_g + \Delta t_m) = \frac{1}{2}(96 + 31) = 63,5^\circ\text{C}$$

відрізняється від середньологарифмічного на 10% оскільки $\frac{\Delta t_g}{\Delta t_m} = 3,1 > 1,5$).

Площа поверхні теплообміну дорівнює:

$$F = \frac{4,17 \cdot 10^3 \cdot 5(80 - 15)}{2,5 \cdot 10^3 \cdot 57,5} = 9,7 \text{ (м}^2\text{)}$$

Відповідь: $F = 9,7 \text{ м}^2$.

Задача 8

Розрахувати пароводяний теплообмінний апарат з вертикальним розташуванням латунних трубок товщиною 1 мм. Тиск насиченої пари $p = 0,21$ МПа, температура води на вході $t_2' = 16$ °С, на виході $t_2'' = 77$ °С, витрата води $M_2 = 2,0$ кг/с. Коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_1 = 6250$ Вт/(м²·К), $\alpha_2 = 4000$ Вт/(м²·К). Знайти повну поверхню теплообміну.

Дано:

Вертикальне
 $p = 0,21$ МПа;
 $t_2' = 16$ °С;
 $t_2'' = 77$ °С;
 $\alpha_1 = 6250$ Вт/(м²·К)
 $\alpha_2 = 4000$ Вт/(м²·К)
 $M_2 = 2,0$ кг/с
 $\delta = 0,001$ м
 $\lambda = 115$ Вт/(м·К)

Знайти: Q_2, F

Розв'язок

Обчислюємо коефіцієнт теплопередачі для апарата:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{1/6250 + 0,001/115 + 1/4000} = 2394 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Знаходимо температурні напори на вході і виході та середньологарифмічний температурний напір апарату:

$$\Delta t' = 109,3 - 15 = 94,3 \text{ °С}; \quad \Delta t'' = 109,3 - 70 = 39,3 \text{ °С}.$$

$$\Delta t_{\text{л}} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{94,3 - 39,3}{\ln (94,3/39,3)} = 62,8 \text{ °С}$$

Знаходимо середню температуру води: $t_2 = (15 + 70) / 2 = 42,5$ °С.

За цієї температури знаходимо теплоємність води $C_p = 4180$ Дж/кг·К.

Розраховуємо теплову потужність апарату Q_2 :

$$Q_2 = 2,0 \cdot 4180 \cdot (77 - 16) = 510 \text{ кВт}.$$

Знайдемо площу поверхні теплообміну згідно з формулою (24):

$$F = \frac{510 \cdot 10^3}{2394 \cdot 62,8} = 3,39 \text{ м}^2.$$

Відповідь: $Q_2 = 510$ кВт, $F = 3,39$ м².

Задача 9

Визначити за наближеним розрахунком добові втрати теплоти з паропроводу без теплової ізоляції (коефіцієнт теплопередачі $K_1 = 2,6$ Вт/м²·К) та за наявності теплової ізоляції ($K_2 = 0,6$ Вт/м²·К). Визначити у скільки разів

зменшуються втрати. Температура пари 180°C, температура навколишнього середовища 18°C, довжина труби 30 м, діаметр 50 мм, шар ізоляції 20 мм.

Дано:

$$\begin{aligned} L &= 30 \text{ м} \\ d &= 50 \text{ мм} \\ t_n &= 180^\circ\text{C} \\ t_c &= 18^\circ\text{C} \\ K_1 &= 2,6 \text{ Вт/м}^2\text{К} \\ K_2 &= 0,6 \text{ Вт/м}^2\text{К} \\ \delta_{\text{ізол}} &= 20 \text{ мм} \\ \tau_{\text{доб}} &= 86400 \text{ с} \end{aligned}$$

Знайти: Q_1/Q_2

Розв'язок:

Площа поверхні труби без ізоляції

$$F_1 = \pi d L = 3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 4,71 \text{ м}^2.$$

Добові втрати теплоти з паропроводу без ізоляції

$$\begin{aligned} Q_1 &= K_1(t_n - t_c) F_1 \tau_{\text{доб}} = \\ &= 2,6 \cdot (180 - 18) \cdot 4,71 \cdot 86400 = 1,72 \cdot 10^8 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Площа поверхні труби з ізоляцією

$$F_2 = \pi(d + 2\delta)L = 3,14 \cdot (50 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3}) \cdot 30 = 8,48 \text{ м}^2.$$

Добові втрати теплоти з паропроводу з ізоляцією

$$\begin{aligned} Q_2 &= K_2(t_n - t_c) F_2 \tau_{\text{доб}} = \\ &= 0,6 \cdot (180 - 18) \cdot 8,48 \cdot 86400 = 7,12 \cdot 10^7 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Зменшення тепловтрат при наявності ізоляції

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1,72 \cdot 10^8}{7,12 \cdot 10^7} = 2,41$$

Відповідь: $Q_1/Q_2 = 2,41$.

Задача №10

Металева труба з внутрішнім діаметром $d_1 = 200$ мм і товщиною стінки $\delta = 15$ мм омивається зовні гарячим газом і має температуру зовнішньої поверхні $t = 300^\circ\text{C}$. З середини труба охолоджується повітрям з середньою температурою $t_n = 20^\circ\text{C}$ при тиску $p = 0,1$ МПа. Визначити швидкість руху повітря, що забезпечує температуру внутрішньої поверхні труби $t_c = 200^\circ\text{C}$. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби $\lambda = 10$ Вт/м·К.

Дано:

$$\begin{aligned} d_1 &= 0,2 \text{ м} \\ \delta &= 0,015 \text{ м} \\ \lambda &= 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \\ t &= 300^\circ\text{C} \\ t_c &= 200^\circ\text{C} \\ t_n &= 20^\circ\text{C} \\ p &= 0,1 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Знайти: w

Розв'язок:

У сталому режимі тепловий потік від зовнішньої до внутрішньої поверхні труби має дорівнювати тепловому потоку від внутрішньої поверхні труби до повітря в ній. Перша з цих двох величин виражається формулою для теплопровідності циліндричної стінки:

$$\alpha = \frac{\pi(t - t_c)}{\frac{I}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{\pi(t - t_c)}{\frac{I}{2\lambda} \ln \frac{d_1 + 2\delta}{d_1}}$$

Оскільки в даному випадку $\frac{2\delta}{d_1} = \frac{30}{200} = 0,15 \ll 1$,

те $\ln \frac{d_1 + 2\delta}{d_1} = \ln(1 + \frac{2\delta}{d_1}) \approx \frac{2\delta}{d_1}$,

тоді $q = \frac{\pi(t - t_c)\lambda d_1}{\delta}$

Для другого з вказаних теплових потоків використовуємо формулу для конвективної тепловіддачі в циліндричній трубі:

$$q_\ell = \frac{Q}{\ell} = \frac{\alpha(t_c - t_n)\pi d_1 \ell}{\ell} = \alpha(t_c - t_n)\pi d_1$$

Прирівнюючи праві частини двох останніх формул, отримаємо:

$$\frac{\pi(t - t_c)\lambda d_1}{\delta} = \alpha(t_c - t_n)\pi d_1.$$

Звідки необхідне по умові значення коефіцієнта тепловіддачі визначається як

$$\alpha = \frac{\lambda(t - t_c)}{\delta(t_c - t_n)} = \frac{10(300 - 200)}{0,15(200 - 20)} = 370 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

Таке велике значення коефіцієнта тепловіддачі може бути забезпечене лише при турбулентному режимі руху повітря (за ламінарного режиму значення тепловіддачі на 1...2 порядки нижче), по цій формулі:

$$N_n = 0,018 \text{Re}^{0,8} \quad \text{Re} = \frac{\omega d_1}{\nu_\epsilon} \quad N_u = \frac{\alpha d_1}{\lambda_\epsilon}$$

Значення λ_ϵ і ν_ϵ знаходимо по таблиці 2 при $t_l = 20^\circ\text{C}$:

$$\lambda_\epsilon = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}), \quad \nu_\epsilon = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Знайдемо Nu :

$$Nu = \frac{370 \cdot 0,2}{2,59 \cdot 10^{-2}} = 2850$$

За спрощеною формулою для газів $Nu = 0,018 \text{Re}^{0,8}$ знаходимо Re :

$$\text{Re} = \left(\frac{Nu}{0,018}\right)^{1,25} = \left(\frac{2850}{0,018}\right)^{1,25} = 3,2 \cdot 10^6$$

Визначаємо шукану швидкість руху повітря в трубі.

$$w = \frac{\text{Re} \cdot \nu_\epsilon}{d_1} = \frac{3,2 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-6}}{0,2} = 240 \text{ (м/с)}$$

Відповідь: $w = 240 \text{ м/с}$

Задача № 11

Визначити середньологарифмічний та середньоарифметичний температурні напори і площу поверхні теплообміну для прямоточного рекуперативного теплообмінника за наступних умов: температури гарячого теплоносія на вході і виході $t_1' = 400^\circ\text{C}$ і $t_1'' = 200^\circ\text{C}$, холодного теплоносія (води) $t_2' = 15^\circ\text{C}$ і $t_2'' = 95^\circ\text{C}$. Секундна витрата води $M_B = 3$ кг/с. Коефіцієнт теплопередачі від гарячого носія до холодного $k = 1200$ Вт/($\text{м}^2\cdot\text{K}$). Дати графічне зображення температурного поля теплообмінника.

Дано:

$$t_1' = 400^\circ\text{C}$$

$$t_1'' = 200^\circ\text{C}$$

$$t_2' = 15^\circ\text{C}$$

$$t_2'' = 95^\circ\text{C}$$

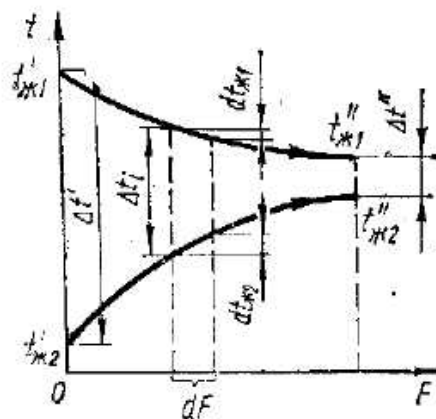
$$M_B = 3 \text{ кг/с}$$

$$k = 1200 \text{ Вт/}(\text{м}^2\cdot\text{K})$$

Знайти: Δt , F

Розв'язок

Схема температур у прямоточному теплообміннику



$$\Delta t' = \Delta t_0 = t_1' - t_2' = 400 - 15 = 385^\circ\text{C}$$

$$\Delta t'' = \Delta t_m = t_1'' - t_2'' = 200 - 95 = 105^\circ\text{C}$$

Середньологарифмічний температурний напір дорівнює:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_0}{\Delta t_m}} = \frac{385 - 105}{\ln \frac{385}{105}} = 215^\circ\text{C}$$

Середньоарифметичний напір дорівнює:

$$\Delta t = (\Delta t_0 + \Delta t_m) / 2 = (385 + 105) / 2 = 245^\circ\text{C}$$

Тобто суттєво відрізняється від середньологарифмічного напору. Це пояснюється тим що, в даному випадку $\frac{\Delta t_0}{\Delta t_m} = 3,7 > 1,67$.

Площа поверхні тепловіддачі дорівнює

$$F = \frac{Q}{k\Delta t} = \frac{C_p M_B (t_2'' - t_2')}{k\Delta t}$$

Значення теплоємності C_p для води при середній температурі

$$t_2 = (t_2' + t_2'') / 2 = (95 + 15) / 2 = 55^\circ\text{C}$$

визначаємо з табл. 3: $C_p = 4,17 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)

Тоді

$$F = \frac{4.17 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot (95 - 15)}{1200 \cdot 215} = 3.9 \text{ м}^2.$$

Відповідь: $F = 3,9 \text{ м}^2$.

f

Задача № 12

Визначити площу поверхні теплообміну газоводяного теплообмінника що працює за протитечійною схемою. Гарячий тепловиток димові газу з початковою температурою $t_1' = 400^\circ\text{C}$ і кінцевою $t_1'' = 165^\circ\text{C}$. Температура води на вході та виході теплообмінника $t_2' = 20^\circ\text{C}$, $t_2'' = 120^\circ\text{C}$. Витрата води 2 кг/с. Коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки прийняти рівним $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ від стінки труби до води $\alpha_2 = 3500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. Труба теплообмінника зроблена із сталі (коефіцієнт теплопровідності матеріала $\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) з зовнішнім діаметром $d_n = 50 \text{ мм}$ і товщиною стінки $\delta = 4 \text{ мм}$.

Розв'язок

Дано:

$$t_1' = 400^\circ\text{C}$$

$$t_1'' = 165^\circ\text{C}$$

$$t_2' = 20^\circ\text{C}$$

$$t_2'' = 120^\circ\text{C}$$

$$M_B = 2 \text{ кг/с}$$

$$\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$$

$$\alpha_2 = 3500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$$

$$\delta = 4 \text{ мм} = 0,004 \text{ м}$$

$$\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$$

$$d_n = 0,05 \text{ м}$$

Знайти: F

Схема розподілу температур у теплообміннику аналогічна рис. 1,б.

Площа поверхні теплообміну визначається за формулою:

$$F = \frac{Q}{k\Delta t} = \frac{C_p M_B (t_2'' - t_2')}{k\Delta t}.$$

Враховуючи, що стінка труби тонка: $\delta / d_n = 4/50 = 0,08 \ll 1$, для коефіцієнта теплопередачі приймаємо більш просту формулу для плоскої стінки:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{0.004}{50} + \frac{1}{3500}} =$$

$$1,16 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}).$$

Середньологаріфмічний напір дорівнює $\Delta t = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}$, причому для

протитечійної схеми напори $\Delta t' = \Delta t_\delta = t_1' - t_2'$, $\Delta t'' = \Delta t_m = t_1'' - t_2''$

$$\Delta t' = 400 - 15 = 385^\circ\text{C}; \Delta t'' = 400 - 120 = 280^\circ\text{C}.$$

$$\Delta t = \frac{280 - 145}{\ln \frac{280}{145}} = 205^\circ\text{C}.$$

Відмітимо, що в цьому випадку $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m} = 1,9 > 1,67$, середньоарифметичний напір $\Delta t = (\Delta t_{\delta} + \Delta t_m) / 2 = 212^{\circ}\text{C}$ відрізняється від середньологарифмічного приблизно на 3,5%.

Значення теплоємності c_p визначаємо з табл. 3 при $t_2 = (20 + 120) / 2 = 70^{\circ}\text{C}$: $c_p = 4190 \text{ Дж}(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Обчислюємо площу поверхні теплообміну F :

$$F = \frac{4,19 \cdot 10^3 \cdot (120 - 20)}{1,16 \cdot 10^3 \cdot 205} = 3,5 (\text{м}^2)$$

Відповідь: $F = 3,5 \text{ м}^2$

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 1

Як зміниться питомий тепловий потік при теплопередачі крізь плоску стінку, якщо коефіцієнти тепловіддачі збільшити у 2 рази, а товщину стінки та температурний напір зменшити у 2 рази ?

Задача 2

Як зміниться питомий тепловий потік при теплопередачі крізь плоску стінку, якщо коефіцієнти тепловіддачі та температурний напір зменшити у 2 рази, а товщину стінки збільшити у 2 рази ?

Задача 3

Як зміниться питомий тепловий потік при теплопередачі крізь плоску стінку, якщо коефіцієнти тепловіддачі збільшити у 2 рази, а товщину стінки зменшити у 2 рази ?

Задача 4

Як зміниться тепловий потік при теплопередачі через двошарову плоску стінку, якщо товщини слоїв зменшити у 2 рази, а коефіцієнти тепловіддачі та температурний напір збільшити у 2 рази ?

Задача 5

Визначити добову втрату теплоти із цехового ізольованого й неізольованого паропроводу довжиною 50 метрів з зовнішнім діаметром 60 мм. Товщина стінки труби 5 мм. Температура перегрітої пари 220°C , температура навколишнього середовища 20°C . Коефіцієнт теплопровідності сталі 50 Вт/мК , ізоляції $0,07 \text{ Вт/мК}$. Товщина ізоляції 20 мм. Коефіцієнт тепловіддачі від пари

до внутрішньої стінки труби $2000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, від зовнішньої стінки в навколишнє середовище $100 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Задача 6

Визначити за повним розрахунком добові втрати теплоти з цехового неізольованого паропроводу довжиною 50 м, зовнішнім діаметром 60 мм та товщиною стінки 5 мм. Температура перегрітої пари 220°C , температура зовнішнього середовища 20°C . Коефіцієнт теплопровідності сталі 50 Вт/мК . Коефіцієнт тепловіддачі від пари до внутрішньої стінки паропроводу $\alpha_1 = 5000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, від зовнішньої поверхні у навколишнє середовище $\alpha_2 = 20 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Задача 7

Визначити втрати теплоти за добу з цехового паропроводу без теплової ізоляції за наближеним розрахунком. Температура пари 220°C , температура навколишнього середовища 20°C , довжина труби 80 м, діаметр труби 0,1 м. Коефіцієнт теплопередачі $K = 20 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Задача 8

Розрахувати пароводяний теплообмінний апарат з вертикальним розташуванням трубок. тиск насиченої пари $p = 0,25 \text{ МПа}$, температура води на вході $t_2' = 22^\circ\text{C}$, на виході $t_2'' = 80^\circ\text{C}$ та витрата води $M_2 = 2,0 \text{ кг/с}$. Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_1 = 5250 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$, $\alpha_2 = 3000 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$. Знайти повну поверхню теплообміну.

Задача 9

Передача теплоти в котлі від димових газів до киплячої води відбувається через сталеву стінку, вкриту сажею. Товщина стінки $\delta_{cm} = 10 \text{ мм}$, $\lambda_{cm} = 40 \text{ Вт/(м К)}$, шару сажі $\delta_c = 2 \text{ мм}$, $\lambda_c = 0,08 \text{ Вт/(м К)}$. Температура димових газів $t_1 = 800^\circ\text{C}$, киплячої води $t_2 = 120^\circ\text{C}$, коефіцієнт теплопередачі від газів до стінки $\alpha_1 = 50 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$, від стінки до киплячої води $\alpha_2 = 4200 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$. Визначити питомий тепловий потік через стінку за наявності та відсутності шару сажі.

Задача 10

Металева труба з внутрішнім діаметром $d_1 = 100 \text{ мм}$ і товщиною стінки $\delta = 10 \text{ мм}$ омивається зовні гарячим газом і має температуру зовнішньої поверхні $t = 300^\circ\text{C}$. З середини труба охолоджується повітрям з середньою температурою $t_n = 20^\circ\text{C}$ при тиску $p = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити швидкість руху повітря, що забезпечує температуру внутрішньої поверхні труби $t_c = 200^\circ\text{C}$. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби $\lambda = 30 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ТА ПОВТОРЕННЯ З ТЕОРІЇ ТЕПЛООБМІНУ

1. Механізми теплообміну. Повна кількість теплоти, тепловий потік та густина теплового потоку. Визначення та одиниці вимірювання.
2. Температурне поле. Визначення градієнта температури, його розмірність.
3. Теплопровідність. Закон Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності, розмірність.
4. Диференціальне рівняння теплопровідності.
5. Граничні умови першого, другого та третього роду. Математичний вираз граничних умов третього роду.
6. Теплопровідність. Закон Фур'є. Градієнт температури. Коефіцієнт теплопровідності.
7. Теплопровідність плоскої одно- та багатосшарової стінки.
8. Теплопровідність циліндричної одно- та багатосшарової стінки.
9. Конвективний теплообмін. Закон Ньютона - Ріхмана.
10. Механізм конвективного теплообміну та основне рівняння. Вільна та вимушена конвекція. Динамічна та кінематична в'язкості рідини.
11. Диференційне рівняння тепловіддачі.
12. Основи теорії подібності. Критерії подібності Nu , Re , Pr , Gr , Ga та їх фізичний сенс. Загальний вигляд критеріального рівняння.
13. Природна (вільна) конвекція. Критеріальне рівняння.
14. Вимушена конвекція при течії в трубах. Ламінарний та турбулентний режими течії. Критеріальне рівняння, його залежність від режиму течії.
15. Тепловіддача при поперечному обтіканні труб.
16. Тепловіддача при кипінні. Режими кипіння. Критеріальне рівняння.
17. Тепловіддача при конденсації. Критеріальне рівняння.
18. Теплообмін випромінюванням. Механізм та основні поняття і визначення.
19. Випромінювання абсолютно чорного тіла.
20. Закони Планка та зміщення Віна.
21. Закон Стефана - Больцмана. Випромінювання сірого тіла. Закон Кірхгофа.
22. Теплообмін випромінюванням між двома стінками в прозорому середовищі.
23. Захисна дія теплового екрана від випромінювання.
24. Що називається теплопередачею?
25. З яких процесів перенесення теплоти складається теплопередача?
26. Теплопередача через плоску одно- та багатосшарову стінку. Коефіцієнт теплопередачі.
27. Теплопередача через циліндричну одно- та багатосшарову стінку.
28. Інтенсифікація теплопередачі. Ребрення. Коефіцієнти ребрення та ефективності ребра.
29. Теплообмінні апарати, їх види, загальна характеристика.
30. Основи розрахунку рекуперативного теплообмінного апарату.

Таблиця 1- Значення констант C і n в рівнянні Міхєєва для вільної конвекції

$Gr Pr$	C	n	Примітка
$< 10^{-3}$	0,5	0	Теплообмін теплопровідністю
$10^{-3} \dots 500$	1,18	1/8	Ламінарний рух теплоносія
$500 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	Перехідний режим руху теплоносія
$2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$	0,135	1/3	Турбулентний рух теплоносія

Таблиця 2 - Теплофізичні властивості сухого повітря

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\mu \cdot 10^5, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1,014	2,02	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,012	2,12	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,011	2,20	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	11,79	0,716
-10	1,342	1,008	2,36	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,007	2,44	1,72	13,28	0,707
10	1,247	1,006	2,51	1,77	14,16	0,705
20	1,205	1,006	2,59	1,81	15,06	0,703
30	1,165	1,006	2,67	1,86	16,00	0,701
40	1,128	1,006	2,76	1,91	16,96	0,699
50	1,093	1,006	2,83	1,96	17,96	0,698
60	1,060	1,006	2,90	2,01	18,97	0,696
70	1,029	1,007	2,97	2,06	20,02	0,694
80	1,000	1,007	3,05	2,11	21,09	0,692
90	0,972	1,008	3,13	2,15	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	2,19	23,13	0,688
120	0,898	1,012	3,34	2,28	25,5	0,686
140	0,854	1,015	3,38	2,37	27,8	0,684

Таблиця 3 - Теплофізичні властивості води

t , °C	p , бар	ρ , кг/м ³	C , кДж/(кг К)	λ , Вт/(м К)	$\nu 10^6$, м ² /с	$\beta 10^4$, К ⁻¹	Pr
За атмосферного тиску							
0	1.013	999.9	4.218	0.567	1.797	0.68	13.33
10	1.013	999.7	4.192	0.583	1.308	0.88	9.41
20	1.013	988.2	4.182	0.598	1.005	2.07	7.01
30	1.013	995.7	4.178	0.613	0.801	3.03	5.44
40	1.013	992.2	4.177	0.627	0.658	3.85	4.35
50	1.013	988.1	4.181	0.640	0.554	4.57	3.57
60	1.013	983.2	4.184	0.651	0.475	5.23	3.00
70	1.013	977.8	4.190	0.661	0.414	5.84	2.57
80	1.013	971.8	4.197	0.669	0.365	6.41	2.23
90	1.013	965.5	4.205	0.675	0.326	6.96	1.96
На лінії насичення							
100	1.013	958.4	4.216	0.680	0.295	7.50	1.75
110	1.433	951.0	4.233	0.683	0.268	8.04	1.60
120	1.958	943.7	4.250	0.685	0.252	8.64	1.47
130	2.701	934.8	4.266	0.686	0.233	9.19	1.35
140	3.614	926.1	4.287	0.685	0.217	9.72	1.26
150	4.760	917.0	4.313	0.684	0.203	10.3	1.17
160	6.108	907.4	4.346	0.681	0.191	10.7	1.10
170	7.920	897.2	4.380	0.676	0.181	11.3	1.05
180	10.03	886.3	4.417	0.672	0.173	11.9	1.03
190	12.55	876.0	4.459	0.664	0.165	12.6	0.97
200	15.55	863.0	4.505	0.568	0.158	13.3	0.93

Таблиця 4 – Термодинамічні властивості води та водяної пари на лінії насичення у залежності від тиску

p , бар	$t_{и}$, °C	ρ'' , кг/м ³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг
1,0	99,6	0,590	417,4	2675	2258
1,1	102,3	0,645	428,9	2678	2251
1,2	104,8	0,670	439,4	2683	2244
1,3	107,1	0,755	449,2	2687	2238
1,4	109,3	0,809	458,5	2691	2232
1,5	111,4	0,863	467,2	2694	2227
1,6	113,3	0,916	475,4	2697	2221
1,7	115,2	0,970	483,2	2700	2216
1,8	116,9	1,023	490,7	2702	2211
1,9	118,6	1,076	497,9	2704	2207
2,0	120,2	1,129	504,8	2707	2202
2,1	121,8	1,182	511,4	2709	2198
2,2	123,3	1,235	517,8	2711	2194
2,3	124,7	1,287	524,0	2713	2190
2,4	126,1	1,340	529,8	2715	2185
2,5	127,4	1,392	535,4	2717	2182
2,6	128,7	1,444	540,9	2719	2178
2,7	130,0	1,495	546,2	2721	2175
2,8	131,2	1,548	551,4	2722	2171
2,9	132,4	1,599	556,5	2724	2167
3,0	133,5	1,651	561,4	2725	2164

Таблиця 5 - Додатковий коефіцієнт для тепловіддачі для вимушеної конвекції у перехідному режимі течії

Re	2300	3000	4000	5000	6000	8000	≥ 10000
ϵ_d	0,40	0,57	0,72	0,81	0,88	0,96	1

Таблиця 6 - Теплопровідність та ступені чорноти деяких конструктивних та ізоляційних матеріалів при 0...100 °С

Найменування матеріалу	λ , Вт/(м·К)	ε
Азбест	0,1 ...0,16	0,93...0,96
Алюміній	205	0,04* ...0,8
Алюмінієві лаки і фарби		0,27...0,6
Бетон (сухий...вологий)	0,7...1,25	0,92
Бетон легкий (пінобетон)	0,1...0,3	
Глина вогнестійка	1,04	0,91
Дерево дуб (\perp волокнам)	0,20...0,21	0,90
Дерево сосна (\perp / \parallel волокнам)	0,15 / 0,4	0,8...0,9
Залізобетон	1,55	0,92
Залізо оцинковане	40	0,23...0,4
Іржа	1,1	
Латунь	102...118	0,03* ...0,6
Лід	2,25	0,96
Пенопласти	0,04	
Піношамот	0,29	0,75
Пробкова пластина	0,042...0,053	
Скло	0,8	0,74...0,94
Скловата	0,05...0,06	
Сніг втрамбований	0,35...0,46	0,96
Сталь вуглецева	40...45	0,5* ...0,8
Сталь легована	17...25	0,5* ...0,8
Тирса деревна	0,07...0,09	0,96
Фарби, лаки		0,8...0,98
Цегла будівельна	0,67...0,81	0,88...0,93
Цегла ізоляційна	0,14	0,75...0,9
Цегла силікатна	0,82...0,87	
Чавун	46...90	0,21 ...0,8
Штукатурка	0,78	0,91

Примітка: Якщо параметри змінюються в інтервалі, те найчастіше береться найбільше (найгірше) значення.

Для невідомих значень ε прийняти: $\varepsilon = 0,9$.

* - поліровані метали

Українсько-російський словник термінів з теплопередачі

Вільний	свободный
вимушений	вынужденный
випромінювання	излучение
витрата	расход
водяна пара	водяной пар
в'язкість	вязкость
густина	плотность
джерело	источник
добуток	произведение
зведений	приведенный
критеріальне рівняння	критериальное уравнение
навколишнє середовище	окружающая среда
насичена пара	насыщенный пар
обґрунтування	обоснование
об'ємне поширення	объемное расширение
пароутворення	парообразование
поверхня	поверхность
повітря	воздух
подібність	подобие
показник	показатель
потік	поток
пристінний шар	пограничный слой
речовина	вещество
рівняння	уравнение
рідина	жидкость
розв'язування	решение
розташування	расположение
стала	постоянная
ступінь чорноти	степень черноты
тепловіддача	теплоотдача
тепловтрати	теплопотери
теплоносій	теплоноситель
теплообмінник	теплообменник
термічний опір	термическое сопротивление
течія	течение
тиск	давление
шар	слой

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Підручники

1. Теплотехніка: Підручник /Б.Х. Драганов та ін., за ред. Б.Х. Драганова – Київ; ІНКОС., 2005.- 504 с.
2. Архаров А.М. Теплотехника: Учебник. - М., 2004. – 712 с.

Додаткова література

1. Мазур Л.С. Техническая термодинамика и теплотехника: Учебник. - М., 2003. – 671 с.

Методичні розробки кафедри.

1. “Теплотехніка”. Навчальний посібник. Склали: Торяник О.І., Малафаєв М.Т., Фощан А.Л. – Харків : ХДУХТ, 2008, 160 с.
2. “Лабораторний практикум з теплотехніки“. Методичний посібник. Склали: Малафаєв М.Т., Торяник О.І., Фощан А.Л., Чеканов М.А. - Харків.: ХДУХТ, 2011. – 87 с.
3. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу “Теплотехніка”. Склали: Торяник О.І., Фощан А.Л.- Харків.: ХДАТОХ, 1998. - 46 с.
4. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу “Теплотехніка”. Частина 1. Технічна термодинаміка (з електронною версією). Склали: Малафаєв М.Т., Торяник О.І., Чеканов М. А.- Харків.: ХДУХТ, 2012. - 56 с.
5. Російсько - український словник з теплотехніки - Склали: Малафаєв М.Т., Торяник О.І., Пахомов П.Л. - Харків: ХДАТОХ, 2002. - 38 с.