

Міністерство освіти і науки України
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

**Щесюк О. В., Прищепов О. Ф.,
Шенкевич В. М., Лісков Д. А.**

**Методичні вказівки до практичних
занять і самостійної роботи з курсу
«Основи термодинаміки, теплотехніки
та гідрогазодинаміки
(розділ «Теплопровідність»)**

Методичні вказівки

Випуск 441



Миколаїв – 2024

УДК 536. 24
ББК 31. 3(07)
Щ 69

Рекомендовано до друку вченою радою Чорноморського національного університету імені Петра Могили (протокол № 2 від 28 лютого 2023 р).

Рецензент:

О. П. Гожий, доктор технічних наук, професор, професор кафедри ІС Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Щ 69

Щесюк О. В. Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)» : метод. вказів. / О. В. Щесюк, О. Ф. Прищепов, В. М. Шенкевич, Д. А. Лісков. – Миколаїв : Вид-во ЧНУ імені Петра Могили, 2024. – 36 с. – (Методична серія ; вип. 441).

У методичних вказівках наведені основні поняття і визначення теплопровідності, розрахункові залежності, контрольні задачі та приклади їх розв'язання. Збірник складений відповідно до програми курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки». Призначений для спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», а також може бути корисний студентам інших технічних спеціальностей.

УДК 536. 24
ББК 31. 3(07)

ISSN 1811- 492X

© Щесюк О. В., Прищепов О. Ф.,
Шенкевич В. М, Лісков Д. А., 2024
© ЧНУ імені Петра Могили, 2024

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Методичні вказівки до розв'язання задач	6
1.1. Вимоги до оформлення звіту	6
1.2. Елементи теорії обчислень	7
2. Теплопровідність	8
2.1. Основні положення та визначення	8
2.2. Плоска стінка	9
2.3. Багатошарова стінка.....	9
2.4. Циліндрична стінка.....	10
2.5. Теплопровідність при граничних умовах третього роду	10
3. Приклади розв'язання задач для самостійної роботи	12
3.1. Приклад 1	12
3.2. Приклад 2	14
3.3. Приклад 3	15
3.4. Приклад 4	17
3.5. Приклад 5	19
3.6. Приклад 6	21
3.7. Приклад 7	23
3.8. Приклад 8	25
3.9. Приклад 9	27
Додаток А	30
Бібліографічний список	34

Вступ

Усі процеси, що протікають в часі і просторі, зв'язані з явищами переносу енергії і маси. Процеси переносу теплоти і маси, що протікають переважно в суцільних середовищах (у твердих тілах, рідинах і газах), є предметом вивчення загальнотехнічної дисципліни «теплотехніка» [1 - 3].

Відповідно до другого закону термодинаміки під дією різниці температур відбувається процес переносу теплоти в просторі у бік менших значень температури. Самовільний необоротний процес переносу теплоти в просторі, обумовлений різницею температур, називається теплообміном. Закономірності переносу теплоти і кількісні характеристики цього процесу вивчаються теорією теплообміну.

Перенос маси відбувається при різниці концентрації речовини, при випаровуванні, кипінні, конденсації і в багатьох інших процесах. Якщо має місце обмін як теплотою, так і масою, то процес називається тепломасообміном. У теорії тепломасообміну вивчають потоки теплоти і маси.

Теплообмін може здійснюватися трьома способами: теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням. Розрізняють також теплообмін при фазових перетвореннях (випаровуванні, кипінні, конденсації речовини)

Теплопровідність (кондуктивний теплообмін) — це перенос тепла при безпосередньому контакті тіл (або частин одного тіла), що мають різні температури. Теплопровідність обумовлена рухом мікрочасток речовини і можлива у твердих, рідких і газоподібних середовищах.

Конвекція - це процес переносу теплоти при переміщенні макрооб'ємів рідини або газу у просторі з області з одною температурою в область з іншою. При цьому на перенос тепла істотно впливає процес переносу самого середовища.

Тепловим випромінюванням називається процес переносу теплоти в просторі за допомогою електромагнітних хвиль. При цьому має місце подвійне взаємне перетворення: частина внутрішньої енергії випромінювача перетворюється в енергію електромагнітних хвиль, що поглинаються теплосприймаючим тілом, перетворюючись в теплову енергію.

У дійсності в природі і техніці випадки поширення тепла відбуваються лише одним способом — теплопровідністю, конвекцією і

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Теплопровідність»)»

тепловим випромінюванням зустрічаються рідко. Найчастіше один вид теплообміну супроводжується іншим.

Конвекція тепла завжди супроводжується теплопровідністю, тому, що при русі рідин і газів вони контактують з твердою поверхнею. Спільний процес конвекції і теплопровідності називається конвективним теплообміном. На практиці можуть мати місце більш складні процеси переносу теплоти.

У техніці і побуті проходять процеси теплообміну між різними рідинами (стисливими, або нестисливими), розділеними твердою стінкою. Процес передачі теплоти від однієї рідини до іншої, що мають різну температуру, через поділяючу їх стінку називається теплопередачею.

Виконання практикуму з теплопровідності визначено навчальним планом спеціальності 151 «Автоматизація та компютерно-інтегровані технології» при вивченні дисципліни «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки».

Практикум містить опис основних положень і визначень теплопровідності, розрахункові залежності, контрольні задачі для розв'язання і приклади робіт, які виконуються студентами за вказаним курсом.

Додаток містить довідковий матеріал у вигляді таблиць і діаграм та покликаний сприяти студентам набуванню навичок самостійного відшукування необхідних величин. Довідковий матеріал зібраний в обсязі, достатньому для розв'язання задач.

Автори висловлюють подяку доц. О.О. Сироті за допомогу в роботі над практикумом.

1. Методичні вказівки до розв'язання задач

1.1. Вимоги до оформлення звіту

Згідно з навчальним планом студенти виконують самостійну роботу, яка включає розв'язання 20 задач відповідно варіанту. Треба суворо дотримуватися свого варіанту. Номер варіанта визначається у залежності від номера студента по списку у журналі обліку. Наприклад, якщо в журналі по списку студента записано під номером 12, то його варіант – 12.

При розв'язанні задач необхідно, по-перше, встановити, які фізичні закономірності лежать в основі даної задачі. Потім, за допомогою формул, які виражають ці закономірності, знайти рішення задачі в буквеному вигляді. Після цього можна перейти до підстановки чисельних даних, які визначені обов'язково в одній і той же системі одиниць фізичних величин. У техніці крім Міжнародної системи одиниць (СІ) використовують одиниці інших систем, а також позасистемні одиниці (наприклад, тиск вимірюється в атмосферах, мм.вод.ст., мм.рт.ст. тощо). Тому в умовах задач фізичні величини не завжди приведені в одиницях СІ. Співвідношення між одиницями різних систем наведені в таблиці А.3 в додатку А. Для розв'язання задач в СІ всі дані, які приведені в умовах задач, а також взяті із довідкових таблиць, повинні бути переведені в одиниці СІ.

При отриманні чисельної відповіді треба звертати увагу на ступень точності кінцевого результату. Точність відповіді не повинна перевищувати точності, з якої приведені початкові величини. У чисельних відповідях відразу, як тільки замість буквених позначень підставляються числа, треба писати найменування одиниці фізичної величини.

У тих задачах, де треба накреслити графік, необхідно вибрати розмірність фізичної величини, масштаб і початок координат. В відповідях до деяких задач графіки даються без вказівки масштабу, тобто приводиться тільки якісний характер шуканої залежності.

Розв'язання задач слід супроводжувати стислими пояснюваннями та детальними розрахунками.

За результатами самостійної роботи студент оформляє індивідуальний звіт.

Звіт повинен містити:

- вступ;

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

- умови і розв'язання задач;
- висновки;
- список використаної літератури.

Звіт оформляється на аркушах формату А4. Титульний аркуш повинен бути оформлений відповідно до ГОСТ 2.04, форма 2, наступні аркуші звіту – за формою 2а. Шрифт Times New Roman, розмір 14, інтервал між строками 1,5. Формули повинні мати нумерацію. Рисунки, графіки і таблиці повинні мати нумерацію і назву відповідно до правил оформлення технічної документації за ЄСКД.

Вибір теплофізичних властивостей, використання формул, запозичених із літературних джерел, мають супроводжуватися посиланнями на літературу, список якої подається в кінці звіту. Умовні літерні позначення і термінологія повинні відповідати загальноприйнятим стандартам.

1.2. Елементи теорії обчислень

Елементи теорії обчислень (правила наближених обчислень, графічне оформлення робіт, побудова поля похибок, користування довідковими таблицями, лінійне інтерполювання) наведено в роботі [4].

2. Теплопровідність

2.1. Основні положення і визначення

Відповідно до основного закону теплопровідності — закону Фур'є — кількість тепла dQ , що проходить за одиницю часу через елемент ізотермічної поверхні dF , пропорційна температурному градієнтуві $\frac{\partial t}{\partial n}$, Вт:

$$dQ = -n_0 \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF, \quad (2.1)$$

де λ — коефіцієнт пропорційності, який називається коефіцієнтом теплопровідності, Вт/(м·К), n_0 — одиничний вектор нормалі до поверхні. Щільність теплового потоку є вектор, що визначається співвідношенням: $\vec{q} = -n_0 \lambda \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda \text{ grad } t$.

Скалярна величина вектора щільності теплового потоку буде дорівнювати, Вт/м²:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (2.3)$$

Знак мінус у рівняннях (2.2) і (2.3) обумовлений різноспрямованістю векторів \vec{q} і $\text{grad } t$: \vec{q} спрямований убік спадання температури, а вектор $\text{grad } t$ за визначенням — убік її зростання.

З рівняння (2.3) випливає, що теплопровідність λ дорівнює кількості теплоти, що проходить за одиницю часу через одиницю ізотермічної поверхні при градієнті температури, що дорівнює одиниці.

Теплопровідність є важливим фізичним параметром речовини. Величину коефіцієнта теплопровідності первинно визначають експериментальним шляхом. У загальному випадку теплопровідність залежить від роду речовини, її температури, тиску.

Теплопровідність газів знаходиться в межах $\lambda = (0,006 - 0,06)$ Вт/(м·К). Для газів λ майже не залежить від тиску і збільшується з підвищенням температури. Теплопровідність водяної пари та інших реальних газів істотно відрізняється від теплопровідності ідеальних газів і помітно залежить від тиску.

Теплопровідність краплинних рідин знаходиться в межах від 0,07 Вт/(м·К) до 0,7 Вт/(м·К). Для більшості рідин, крім води і гліцерину, з підвищенням температури теплопровідність зменшується.

Теплопровідність металів лежить у межах від 20 Вт/(м·К) до 400 Вт/(м·К). Найбільш теплопровідним металом є срібло ($\lambda = 410$ Вт/(м·К)) і чиста мідь ($\lambda = 395$ Вт/(м·К)). Сторонні домішки в металах помітно

знижують значення теплопровідності. Для більшості металів з підвищенням температури теплопровідність зменшується.

Теплопровідність будівельних і теплоізоляційних матеріалів має значення від 0,01 Вт/(м·К) до 2,9 Вт/(м·К). Матеріали з низьким значенням теплопровідності (менше 0,2 Вт/(м·К)), звичайно застосовуювані для теплової ізоляції, називаються теплоізоляційними.

Розглянемо деякі задачі теплопровідності, що найбільш часто зустрічаються на практиці.

2.2. Плоска стінка

Розглянемо однорідну і ізотропну стінку товщиною δ з постійною теплопровідністю λ . На зовнішніх поверхнях стінки підтримуються постійні температури відповідно t_{c1} і t_{c2} , де $t_{c1} > t_{c2}$.

При заданих умовах температура змінюється тільки в одному напрямку — по товщині стінки.

Для даної задачі диференціальне рівняння теплопровідності записується так: $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0$. (2.4)

Граничні умови формулюються таким чином:

$$\text{при } x = 0 \quad t = t_{c1}; \quad \text{при } x = \delta \quad t = t_{c2}. \quad (2.5)$$

$$\text{Загальне рішення рівняння (2.4) буде } t = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} x. \quad (2.6)$$

З рівняння (2.6) випливає, що при постійному коефіцієнті теплопровідності температура в стінці змінюється за лінійним законом.

Питомий тепловий потік визначається з урахуванням (2.3):

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}). \quad (2.7)$$

З рівняння (2.7) можна зробити висновок, що питомий тепловий потік прямо пропорційний теплопровідності і різниці температур на зовнішніх поверхнях стінки і обернено пропорційний товщині стінки.

Відношення $\frac{\lambda}{\delta}$, Вт/(м²·К) називають *тепловою провідністю стінки*, а зворотну величину $\frac{\delta}{\lambda}$, м²·К/Вт — термічним опором теплопровідності стінки.

Загальна кількість теплоти Q , що передається через стінку площею F за одиницю часу, дорівнює, Вт:

$$Q = qF = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) F. \quad (2.8)$$

2.3. Багатощарова стінка

Формулою (2.7) можна користуватися і для розрахунку теплового потоку через стінку, що складається з декількох плоских щільно

прилягаючих один до одного різнорідних матеріалів. Прикладом може служити конструкція стіни будівлі, що складається з цегельної кладки, ізоляційного шару і шару штукатурки зовні й усередині приміщення.

У межах кожного шару спостерігається лінійний розподіл температури.

2.4. Циліндрична стінка

Дуже часто теплоносії рухаються по трубах циліндричної форми.

Розглянемо задачу про поширення теплоти через одношарову однорідну ізотропну стінку при відомих постійних температурах на внутрішній і зовнішній поверхнях. Прийемо для визначеності, що температура на внутрішній поверхні t_{c1} більша температури на зовнішній поверхні t_{c2} . Температура міняється тільки уздовж радіуса (по координаті r) і тому в циліндричних координатах ця задача одномірна.

Для труби довжиною l і радіуса r маємо:

$$t_{c1} - t_{c2} = \frac{q}{2\pi\lambda l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.9)$$

де r_1 і r_2 - відповідно внутрішній і зовнішній радіуси труби.

З формули (2.9) випливає, що в товщі циліндричної стінки розподіл температури підкоряється логарифмічному закономі, а не лінійному, як у плоскій стінці.

2.5. Теплопровідність при граничних умовах третього роду

На практиці часто мають місце процеси передачі теплоти від одного середовища (газів або рідин) до іншого середовища через розділяючу їх стінку, тобто процеси теплопередачі. Середовища, розділені твердою стінкою, називають *теплоносіями*. При теплопередачі тепло послідовно переноситься спочатку від середовища, що гріє, до стінки за рахунок конвективного теплообміну, потім шляхом теплопровідності через стінку (одношарову або багатошарову) і, нарешті, знову за рахунок конвективного теплообміну від поверхні стінки до теплоносія, що підігрівається.

Розглянемо процес стаціонарної теплопередачі через плоску одношарову стінку з теплопровідністю λ і товщиною δ . Температуру теплоносія по один бік стінки позначимо через t_{p1} , по інший t_{p2} , температури поверхні стінок відповідно рівні t_{c1} і t_{c2} . Значення коефіцієнта теплообміну з боку тіла, що гріє, дорівнює α_1 , а з боку тіла, що підігрівається — α_2 .

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

При сталому режимі кількість тепла, переданого від гарячого теплоносія дорівнює кількості тепла, сприйнятого холодним теплоносієм. Отже, рівняння для щільності теплового потоку має вид:

$$q = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2.10)$$

$$\text{Позначимо } k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2.11)$$

Тоді рівняння (2.10) можна записати так:

$$q = k(t_{p1} - t_{p2}). \quad (2.12)$$

$$\text{Для теплового потоку } Q = kF(t_{p1} - t_{p2}), \quad (2.13)$$

де F – площа стінки

У випадку багатшарової стінки рівняння (2.10) приймає вид:

$$q = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2.14)$$

У вище записаних рівняннях α називається *коефіцієнтом теплообміну*, Вт/(м² · К). Він дорівнює кількості тепла, переданого за одиницю часу через одиницю площі поверхні при різниці температур між поверхнею і рідиною в один градус.

Рівняння (2.13) називають *рівнянням теплопередачі*, а коефіцієнт k — *коефіцієнтом теплопередачі*, Вт/(м² · К).

Величина, яка чисельно рівна оберненому значенню коефіцієнта теплопередачі, називається *термічним опором*.

3. Приклади розв'язання задач для самостійної роботи

3.1 Приклад 1. Стіна з будівельного матеріалу цегли силікатної товщиною $b = 250$ мм має з однієї сторони температуру $t_1 = 20$ °С, а з другої – температуру $t_2 = -30$ °С. Знайти густину теплового потоку q через стіну і глибину її промерзання $b_{пр}$ до температури $t_{пр} = 0$ °С (рис. 3.1.1). Коефіцієнт теплопровідності матеріалу стіни приймається постійним.

Розв'язання.

1. З таблиці 3.1.2 знаходимо коефіцієнт теплопровідності λ для цегли силікатної, який дорівнює $\lambda = 0,82$ Вт/(м·К)

2. Густина теплового потоку визначається з формули (2.7)

$$q = \lambda (t_1 - t_2) / b = 0,82 (20 - (-30)) / 0,25 = 164 \text{ Вт/м}^2$$

3. Знаходимо глибину промерзання $b_{пр}$:

- густина теплового потоку на товщині b^1 буде

$$q = \lambda (t_1 - t_{пр}) / b^1 \quad (3.1.1)$$

$$\text{- з рівняння (3.1.1) товщина } b^1 = \lambda (t_1 - t_{пр}) / q \quad (3.1.2)$$

$$\text{- з рис. 3.1.1 видно, що } b_{пр} = b - b^1 \quad (3.1.3)$$

- підставляємо формули (3.1.2) і (2.7) в рівняння (3.1.3) і отримуємо

$$b_{пр} = b - \frac{\lambda(t_1 - t_{пр})}{q} = b - \frac{\lambda(t_1 - t_{пр})}{\lambda(t_1 - t_2)} b = b \left(1 - \frac{t_1 - t_{пр}}{t_1 - t_2}\right) = 0,25 \left(1 - \frac{20 - 0}{20 - (-30)}\right) = 0,15 \text{ м}$$

Відповідь: густина теплового потоку 164 Вт/м² ; глибина промерзання $0,15$ м.

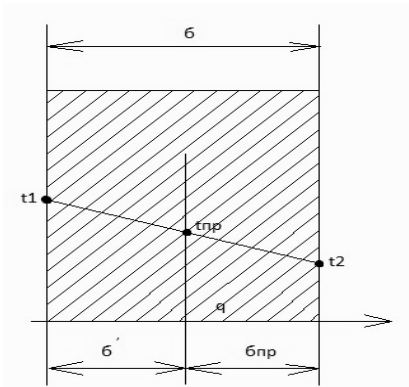


Рисунок 3.1.1 – Стационарний розподіл температури по товщині плоскої стінки

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

Задача 1 для самостійної роботи. Стіна з будівельного матеріалу М товщиною δ , мм має з однієї сторони температуру t_1 , °С, а з другої – температуру t_2 , °С. Знайти густину теплового потоку q через стіну і глибину її промерзання до температури $t_{пр}$, °С. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу стіни приймається постійним. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.1.1.

Таблиця 3.1.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№	М	δ , мм	t_1 , °С	t_2 , °С	$t_{пр}$, °С	№	М	δ , мм	t_1 , °С	t_2 , °С	$t_{пр}$, °С
1	бетон	500	30	-25	0	16	ц в	560	29	-14	-3
2	цегла червона	450	29	-27	-1	17	б	460	22	-18	-4
3	цегла силікатна	400	28	-22	-2	18	ц ч	410	21	-20	-5
4	цегла вогнетривка	600	35	-20	-3	19	ц с	360	20	-15	0
5	бетон	490	28	-23	-4	20	ц в	550	27	-13	-1
6	цегла червона	440	27	-25	-5	21	б	450	20	-17	-2
7	цегла силікатна	390	26	-20	0	22	ц ч	400	19	-19	-3
8	цегла вогнетривка	580	33	-18	-1	23	ц с	350	18	-14	-4
9	бетон	480	26	-21	-2	24	ц в	540	25	-12	-5
10	цегла червона	430	25	-23	-3	25	б	440	18	-16	0
11	цегла силікатна	380	24	-18	-4	26	ц ч	390	18	-18	-1
12	цегла вогнетривка	570	31	-16	-5	27	ц с	340	23	-13	-2
13	бетон	470	24	-19	0	28	ц в	530	16	-11	-3
14	цегла червона	420	23	-21	-1	29	б	430	16	-15	-4
15	цегла силікатна	370	22	-16	-2	30	ц ч	380	17	-15	-5

Примітка. Скорочення в таблиці вихідних даних для самостійної роботи: б-бетон; цч – цегла червона; цс – цегла силікатна; цв – цегла вогнетривка.

Таблиця 3.1.2

Коефіцієнти теплопровідності матеріалів	
Коефіцієнт теплопровідності матеріалу λ , Вт/(м·К)	
Матеріал	Значення коефіцієнта λ
Бетон	1,21
Цегла червона	0,76
Цегла силікатна	0,82
Цегла вогнетривка	1,75

3.2 Приклад 2. Лід на річці має товщину $b_1 = 300$ мм та покритий шаром снігу товщиною $b_2 = 200$ мм. Температура на зовнішній поверхні снігу $t = -15$ °С, а на поверхні льоду, який контактує з водою $t_1 = 0$ °С. Визначити густину теплового потоку через ці два шари (рис. 3.2.1).

Розв'язання.

1. З таблиці А.1 Додатку А знаходимо коефіцієнти теплопровідності λ для льоду, який дорівнює $\lambda_1 = 2,22$ Вт/(м·К) і для снігу ущільненого - $\lambda_2 = 0,46$ Вт/(м·К).

2. Густина теплового потоку визначається з формули (2.7)

$$q = (t-t_1) / (\sum_1^n R), \text{ де} \quad (3.2.1)$$

$\sum_1^n R = R_1 + R_2$ - термічний опір теплопровідності шарів льоду і снігу.

3. Термічний опір теплопровідності шару льоду

$$R_1 = b_1 / \lambda_1 = b_1 / 2,22 = 0,450 \text{ б}_1 \quad (3.2.2)$$

4. Термічний опір теплопровідності шару снігу

$$R_2 = b_2 / \lambda_2 = b_2 / 0,46 = 2,174 \text{ б}_2 \quad (3.2.3)$$

5. Підставляємо формули (3.2.2) і (3.2.3) в рівняння (3.2.1) і отримуємо густину теплового потоку через ці два шари

$$q = (t-t_1) / (0,450 \text{ б}_1 + 2,174 \text{ б}_2) = (0 - (-15)) / (0,450 \times 0,3 + 2,174 \times 0,2) = 26,4 \text{ Вт/м}^2$$

Відповідь: густина теплового потоку $q = 26,4$ Вт/м².

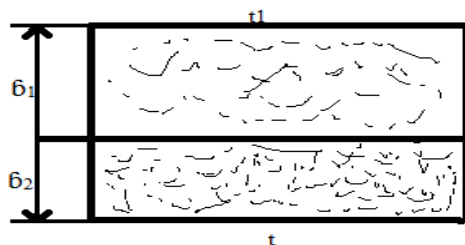


Рисунок 3.2.1 – Схема для розрахунку теплопровідності двошарової плоскої стінки

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

Задача 2 для самостійної роботи. Лід на річці має товщину $b_1, \text{мм}$, та покритий шаром снігу товщиною $b_2, \text{мм}$. Температура на зовнішній поверхні снігу $t, \text{°C}$, а на поверхні льоду, який контактує з водою, 0°C . Визначити густину теплового потоку через ці два шари. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.2.1.

Таблиця 3.2.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ Вар	$b_1, \text{мм}$	$b_2, \text{мм}$	$t_1, \text{°C}$	№ Вар	$b_1, \text{мм}$	$b_2, \text{мм}$	$t_1, \text{°C}$
1	300	200	-15	16	220	380	-30
2	350	220	-16	17	215	390	-31
3	400	240	-17	18	210	400	-32
4	280	250	-18	19	205	410	-33
5	270	270	-19	20	360	420	-34
6	260	280	-20	21	355	430	-35
7	370	290	-21	22	340	440	-36
8	380	300	-22	23	335	450	-37
9	250	310	-23	24	330	460	-38
10	240	320	-24	25	325	470	-39
11	235	330	-25	26	320	190	-40
12	375	340	-26	27	315	180	-14
13	372	350	-27	28	310	170	-13
14	230	360	-28	29	200	160	-12
15	225	370	-29	30	195	150	-10

3.3 Приклад 3. Плоску поверхню з температурою $t_1 = 400 \text{°C}$ необхідно ізолювати матеріалом азбестом так, щоб витрати теплоти не перевищували $q = 450 \text{Вт/м}^2$ при температурі на зовнішній поверхні ізоляції $t_2 = 43 \text{°C}$. Визначити товщину ізоляції $b_{із}$.

Розв'язання.

1. З таблиці А.1 Додатку А знаходимо коефіцієнти теплопровідності λ для азбесту, який дорівнює $\lambda_{із} = 0,151 \text{Вт/(м·К)}$.

2. Визначаємо товщину ізоляції з формули (2.7) для густини теплового потоку

$$q = (\lambda_{із} / \delta_{із}) \cdot (t_1 - t_2)$$

(3.3.1)

3. Товщина ізоляції з формули (3.3.1) буде

$$\delta_{із} = (\lambda_{із} / q) \cdot (t_1 - t_2) = (0,151/450) \cdot (400 - 43) = 0,12 \text{ м} = 120 \text{ мм.}$$

Відповідь: товщина ізоляції $\delta_{із} = 120 \text{ мм.}$

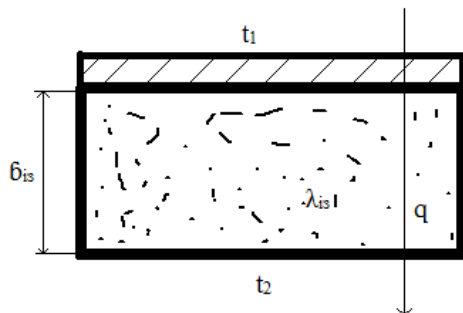


Рисунок 3.2.1 – Схема для розрахунку товщини ізоляції двошарової плоскої стінки

Задача 3 для самостійної роботи. Плоску поверхню з температурою t_1 , °С необхідно ізолювати матеріалом Уз. так, щоб витрати теплоти не перевищували q , Вт/м², при температурі на зовнішній поверхні ізоляції t_2 , °С. Визначити товщину ізоляції $\delta_{із}$. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.3.1.

Таблиця 3.3.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ Вар	Уз	t_1 , °С	t_2 , °С	q , Вт/м ²	№ Вар	Уз	t_1 , °С	t_2 , °С	Q , Вт/м ²
1	азбест	400	45	450	16	пробкова плита	350	40	400
2	вата мінеральна	410	46	460	17	скловата	340	39	390
3	вініпласт	420	47	470	18	альфоль А7	330	38	420
4	пінопласт	430	48	480	19	азбест	320	37	415
5	пінополіуретан	440	49	490	20	вата мінеральна	310	36	410

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

№ Вар	Уз	t ₁ , °C	t ₂ , °C	q, Вт/м ²	№ Вар	Уз	t ₁ , °C	t ₂ , °C	Q, Вт/м ²
6	поліетілен	450	50	500	21	вініпласт	300	35	400
7	пробкова плита	460	51	550	22	пінопласт	290	34	395
8	скловата	470	52	510	23	пінополіуретан	280	33	385
9	альфоль А7	480	53	520	24	поліетілен	270	32	375
10	азбест	490	54	530	25	пробкова плита	260	31	365
11	вата мінеральна	500	55	540	26	скловата	250	30	360
12	вініпласт	390	44	440	27	альфоль А7	240	40	350
13	пінопласт	380	43	430	28	азбест	230	41	340
14	пінополіуретан	370	42	420	29	вата мінеральна	220	42	330
15	поліетілен	360	41	410	30	скловата	210	43	320

3.4 Приклад 4. Віконна рама складається з двох шарів скла товщиною $b_1 = 5$ мм, кожний. Між ними знаходиться шар сухого нерухомого повітря товщиною $b_2 = 6$ мм з середньою температурою $t_{cp} = 0$ °C (рис. 3.4.1). Площа поверхні вікна складає $F = 4,5$ м². Визначити втрату теплоти теплопровідності через вікно, якщо різниця температур на зовнішніх поверхнях складає $\Delta t = t_1 - t_2 = 25$ °C.

Розв'язання.

1. Визначаємо коефіцієнт теплопровідності скла $\lambda_{ск}$ по табл. А.1 Додатку А

$$\lambda_{ск} = 0,745 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

2. Визначаємо з табл. А.1 Додатку А коефіцієнт теплопровідності повітря $\lambda_{пов}$ при середній температурі $t_{cp} = 0$ °C

$$\lambda_{пов.} = 0,024 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

3. Втрату теплоти теплопровідності через вікно Q визначаємо з рівняння (2.8):

$$Q = q \cdot F, \text{ де} \quad (3.4.1)$$

q - густина теплового потоку.

4. Густина теплового потоку q визначається з формули (2.7)

$$q = (t_1 - t_2) / \left(\sum_1^n R \right), \text{ де} \quad (3.4.2)$$

$\sum_1^n R = R_1 + R_2 + R_3$ - термічний опір теплопровідності шарів скла, повітря і скла.

5. Термічний опір теплопровідності шару скла

$$R_1 = R_3 = b_1/\lambda_{\text{ск}} = 0,005/0,745 = 0,007 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт} \quad (3.4.3)$$

6. Термічний опір теплопровідності шару повітря

$$R_2 = b_1/\lambda_{\text{пов}} = 0,006/0,024 = 0,250 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт} \quad (3.4.4)$$

7. Підставляємо значення термічних опорів скла і повітря в формулу (3.4.2) і отримуємо густину теплового потоку через віконну раму

$$q = (t_1 - t_2) / (R_1 + R_2 + R_3) = 25 / (0,007 + 0,250 + 0,007) = 94,7 \text{ Вт/м}^2 \quad (3.4.5)$$

8. Підставляємо значення q в формулу (3.4.1) і отримуємо втрату теплоти теплопровідності через вікно

$$Q = q \cdot F = 94,7 \cdot 4,5 = 426 \text{ Вт.}$$

Відповідь: втрата теплоти теплопровідності через вікно $Q = 426 \text{ Вт}$

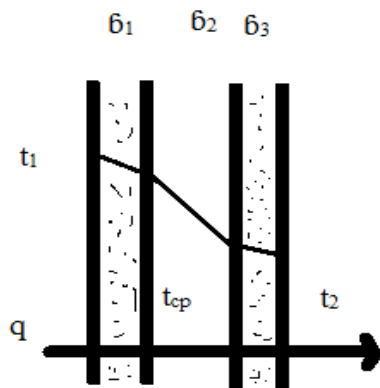


Рисунок 3.4.1 – Схема для розрахунку втрати теплоти теплопровідності через вікно

Задача 4 для самостійної роботи. Віконна рама складається з двох шарів скла товщиною b_1 , мм кожний. Між ними знаходиться шар сухого нерухомого повітря товщиною b_2 , мм з середньою температурою t_{cp} , °С (рис. 3.4.1). Площа поверхні вікна складає $F, \text{ м}^2$. Визначити втрату теплоти теплопровідності через вікно, якщо різниця температур на зовнішніх поверхнях складає $\Delta t = t_1 - t_2$, °С. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.4.1.

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

Таблиця 3.4.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ вар	δ_1 , мм	δ_2 , мм	$t_{cp.}$, °C	$\Delta t = t_2 - t_1$, °C	F, м ²	№ вар	δ_1 , мм	δ_2 , мм	$t_{cp.}$, °C	$\Delta t = t_2 - t_1$, °C	F, м ²
1	3,0	7,0	8	20	5	16	3,5	8,0	10	19	6,5
2	3,5	8,0	7	22	6	17	3,0	7,0	9	15	5,5
3	4,0	9,0	6	24	7	18	3,5	6,0	8	17	5,0
4	4,5	10,0	5	26	8	19	4,0	5,0	7	20	6,5
5	5,0	11,0	4	30	9	20	4,5	8,0	6	24	7,2
6	5,5	12,0	3	32	10	21	5,0	9,0	3	32	8,1
7	6,0	13,0	2	35	13	22	5,5	10,0	3,5	41	9,4
8	6,5	14,0	1	38	14	23	6,0	11,0	4,0	44	10,2
9	7,0	15,0	0	40	15	24	6,5	12,0	4,5	46	10,8
10	6,5	6,0	1,5	37	13	25	7,0	13,0	5,0	50	12,2
11	6,0	13,0	2,5	34	11	26	6,5	14,0	5,3	46	9,3
12	5,5	12,0	3,5	33	12	27	6,0	15,0	6,0	44	8,1
13	5,0	11,0	4,5	31	9,5	28	5,5	12,0	6,5	42	7,8
14	4,5	10,0	5,5	29	8,5	29	5,0	10,0	7,0	39	6,4
15	4,0	9,0	6,5	28	7,5	30	4,5	6,0	8,0	37	6,1

3.5 Приклад 5. Труба з вуглецевої сталі діаметром $d \times b_{тр} = 45 \times 2,5$ мм покривається ззовні і всередині шарами емалі відповідно товщиною $\delta_1 = 0,5$ мм і $\delta_2 = 2,5$ мм. У скільки разів збільшується термічний опір стінки після емалювання? Розрахунок зробити по формулам для плоскої стінки (рис. 3.5.1).

Розв'язання.

1. Визначаємо коефіцієнт теплопровідності емалі $\lambda_{ем}$ по табл. А.1 Додатку А

$$\lambda_{ем} = 1,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

2. Для вуглецевої сталі (матеріал труби) по табл. А.1 Додатку А визначаємо коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{тр}$

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

3. Визначаємо термічний опір стінки труби без емалювання $R_{тр}$

$$R_{тр} = \delta_{тр} / \lambda_{тр} = 0,0025 / 50 = 0,00005 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт} \quad (3.5.1)$$

4. Термічний опір стінки труби з емалюванням R_e

$$R_e = \sum_1^3 R = R_1 + R_2 + R_3 = R_1 + R_{тр} + R_3, \quad (3.5.2)$$

де R_1 , $R_{тр}$, R_3 – термічні опори, відповідно, шару емалі зовні труби, матеріалу стінки труби і шару емалі всередині труби.

5. Термічний опір шару емалі зовні труби R_1

$$R_1 = b_1/\lambda_{ем} = 0,0005/1,05 = 0,00048 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт} \quad (3.5.3)$$

6. Термічний опір шару емалі всередині труби R_3

$$R_3 = b_2/\lambda_{ем} = 0,0025/1,05 = 0,00238 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт} \quad (3.5.4)$$

7. Підставляємо значення термічних опорів з формул (3.5.1), (3.5.3), (3.5.4) в рівняння (3.5.2) і отримуємо термічний опір стінки труби з емалюванням R_e

$$R_e = R_1 + R_{тр} + R_3 = 0,00048 + 0,00005 + 0,00238 = 0,00291 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$$

8. Визначаємо у скільки разів N збільшується термічний опір сталеві стінки після емалювання

$$N = R_e / R_{тр} = 0,00291 / 0,00005 = 58$$

Відповідь: термічний опір сталеві стінки після емалювання збільшується у 58 разів.

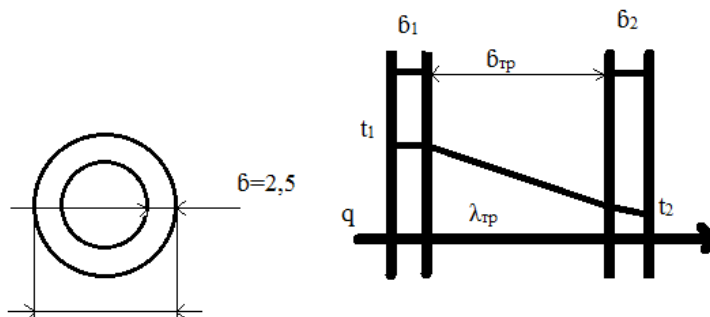


Рисунок 3.5.1 – Схема для розрахунку термічного опору сталеві стінки після емалювання

Задача 5 для самостійної роботи. Труба з матеріалу M діаметром d х $b_{тр}$, мм покривається зовні і всередині шарами емалі відповідно товщиною b_1 , мм і b_2 , мм. У скільки разів збільшується термічний опір стінки після емалювання? Розрахунок зробити по формулам для плоскої стінки (рис. 3.5.1). Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.5.1.

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

Таблиця 3.5.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ вар	М	dx _{тр} , мм	b ₁ , мм	b ₂ , мм	№ вар	М	dx _{тр} , мм	b ₁ , мм	b ₂ , мм
1	алюміній	40x2	1,5	3,5	16	бронза	60x3,5	1,3	2,7
2	бронза	45x2,5	1,2	3,2	17	латунь	100x6	1,25	2,6
3	латунь	50x3	1,6	3,0	18	мідь	70x4	1,0	2,5
4	мідь	60x3,5	1,4	2,8	19	чавун	80x5	1,6	3,0
5	чавун	100x6	1,3	2,7	20	Сталь вуглицева	45x2,5	1,2	3,2
6	Сталь вуглицева	70x4	1,25	2,6	21	Сталь легована	40x2	1,5	3,5
7	Сталь легована	80x5	1,0	2,5	22	алюміній	60x3,5	1,3	2,7
8	алюміній	45x2,5	1,6	3,0	23	бронза	100x6	1,25	2,6
9	бронза	50x3	1,4	2,8	24	латунь	70x4	1,0	2,5
10	латунь	60x3,5	1,3	2,7	25	мідь	80x5	1,5	3,5
11	мідь	100x6	1,25	2,6	26	чавун	45x2,5	1,2	3,2
12	чавун	70x4	1,0	2,5	27	Сталь вуглицева	50x3	1,6	3,0
13	Сталь вуглицева	80x5	1,5	3,5	28	Сталь легована	60x3,5	1,4	2,8
14	Сталь легована	40x2	1,2	3,2	29	алюміній	100x6	1,25	2,6
15	алюміній	50x3	1,4	2,8	30	бронза	40x2	1,0	2,5

3.6 Приклад 6. Визначити густину теплового потоку, який проходить через трьохшарову стінку. Товщина першого шару $\delta_1 = 250$ мм, другого $\delta_2 = 125$ мм, третього $\delta_3 = 250$ мм, відповідні значення коефіцієнтів теплопровідності $\lambda_1 = 1,28$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 0,15$ Вт/(м·К), $\lambda_3 = 0,8$ Вт/(м·К). Температура на внутрішній поверхні стінки $t_{ст1} = 1527$ °С на зовнішній – $t_{ст4} = 47$ °С. Знайти температуру на границях зіткнення шарів (рис. 3.6.1).

Розв'язання.

1. Визначаємо густину теплового потоку для багатошарової стінки з рівняння (2.7)

$$q = \frac{t_{ст1} - t_{ст4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1527 - 47}{\frac{0,25}{1,28} + \frac{0,125}{0,15} + \frac{0,25}{0,8}} = 1100 \text{ Вт/м}^2 \quad (3.6.1)$$

2. Визначаємо температуру на границях шарів

$$t_{ст2} = t_{ст1} - q \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 1527 - \frac{1100 \cdot 0,25}{1,28} = 1312 \text{ } ^\circ\text{C} \quad t_{ст3} = t_{ст2} - q \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 1312 - \frac{1100 \cdot 0,125}{0,15} = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Відповідь: густина теплового потоку $q = 1100 \text{ Вт/м}^2$; температура на границях зіткнення шарів: першого і другого - $t_{\text{ст}2} = 1312 \text{ }^\circ\text{C}$, другого і третього - $t_{\text{ст}3} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$

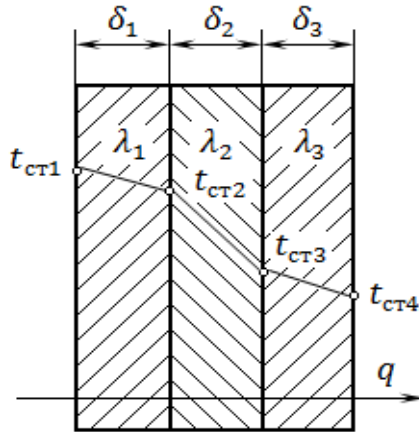


Рисунок 3.6.1 – Схема для розрахунку величини теплового потоку і температур на границях зіткнення шарів

Задача 6 для самостійної роботи. Визначити густину теплового потоку, який проходить через трьохшарову стінку. Товщина першого шару δ_1 , мм, другого δ_2 , мм; третього δ_3 , мм; відповідні значення коефіцієнтів теплопровідності λ_1 , Вт/(м·К), λ_2 , Вт/(м·К), λ_3 , Вт/(м·К). Температура на внутрішній поверхні стінки $t_{\text{ст}1}$, $^\circ\text{C}$ на зовнішній – $t_{\text{ст}4}$, $^\circ\text{C}$. Знайти температуру на границях зіткнення шарів (рис. 3.6.1). Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.6.1.

Таблиця 3.6.1

Вихідні дані для самостійної роботи

δ_3 мм	λ_1 Вт/(м·К)	λ_2 Вт/(м·К)	λ_3 Вт/(м·К)	$t_{\text{ст}1}$ $^\circ\text{C}$	$t_{\text{ст}4}$ $^\circ\text{C}$
160	160	160	160	160	160
155	155	155	155	155	155
130	135	140	145	150	155
230	225	220	215	210	205
300	290	280	270	260	250
0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
0,67	0,69	0,71	0,73	0,75	0,72
920	500	550	600	650	700
42	41	40	39	38	37
130	135	140	145	150	155
230	225	220	215	210	205
300	290	280	270	260	250
0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

№	δ_1 мм	δ_2 мм	δ_3 мм	λ_1 Вт (м·К)	λ_2 Вт (м·К)	λ_3 Вт (м·К)	$t_{ср1}$ °С	$t_{ср4}$ °С	δ_1 мм	δ_2 мм
1.	240	240	240	240	240	240	240	240	1.	160
2.	230	230	230	230	230	230	230	230	2.	155
3.	225	225	225	225	225	225	225	225	3.	120
4.	220	220	220	220	220	220	220	220	4.	240
5.	215	215	215	215	215	215	215	215	5.	280
6.	175	180	185	190	195	200	205	210	6.	0,20
7.	185	180	175	170	165	160	155	150	7.	0,15
8.	220	200	210	190	200	180	190	180	8.	0,65
9.	0,80	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,02	1,08	9.	1120
10.	0,085	0,08	0,075	0,070	0,06	0,06	0,05	0,05	10.	44
11.	0,64	0,62	0,58	0,56	0,53	0,51	0,47	0,45	11.	120
12.	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	12.	240
13.	33	30	32	34	35	36	37	38	13.	280
14.	175	180	185	190	195	200	205	210	14.	0,20
15.	185	180	175	170	165	160	155	150	15.	0,15

3.7 Приклад 7. Визначити втрату теплоти з 1 м трубопроводу діаметром $\frac{d_1}{d_2} = 150/165$ мм, покритого шаром ізоляції товщиною $\delta_{із} = 60$ мм. Коефіцієнт теплопровідності труби $\lambda_{тр} = 50$ Вт/(м·К), ізоляції $\lambda_{із} = 0,15$ Вт/(м·К). Температура води у трубопроводі $t_w = 90$ °С, коефіцієнт тепловіддачі від води до внутрішньої поверхні труби $\alpha_1 = 1000$ Вт/(м²·К). Температура навколишнього повітря $t_{пов} = -15$ °С, коефіцієнт тепловіддачі від поверхні ізоляції до повітря $\alpha_2 = 8$ Вт/(м²·К). Визначити температуру на зовнішній поверхні ізоляції $t_{із}$.

Розв'язання.

1. Визначаємо коефіцієнт теплопровідності багатшарової циліндричної стінки з формули

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}} \quad (3.7.1)$$

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

№	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм	$\frac{d_1}{d_2}$ мм
1.	200 210	185 200	180 195	175 190	170 185	165 180	160 175	155 170	50	50	50	50	50	50	50
2.	85	80	75	70	65	60	55	50	50	50	50	50	50	50	50
3.	120	110	100	90	80	70	60	50	50	50	50	50	50	50	50
4.	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
5.	90	92	93	94	95	96	97	98	98	98	98	98	98	98	98
6.	23	24	25	26	27	28	29	30	30	30	30	30	30	30	30
7.	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
8.	9,5	9	8,5	8	7,5	7	6,5	6	6	6	6	6	6	6	6
9.	200 210	185 200	180 195	175 190	170 185	165 180	160 175	155 170	50	50	50	50	50	50	50
10.	85	80	75	70	65	60	55	50	50	50	50	50	50	50	50
11.	120	110	100	90	80	70	60	50	50	50	50	50	50	50	50
12.	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
13.	90	92	93	94	95	96	97	98	98	98	98	98	98	98	98
14.	23	24	25	26	27	28	29	30	30	30	30	30	30	30	30
15.	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

3.8 Приклад 8. Теплоносієм з температурою на вході $t_{w1} = 300$ °С і на виході $t_{w2} = 200$ °С нагрівається нафта від $t_1 = 25$ °С до $t_2 = 175$ °С. Визначити середній арифметичний і логарифмічний температурні напори між теплоносієм і нафтою в теплообмінному апараті для прямого і протитоків (рис. 3.8.1).

Розв'язання:

1. Середній арифметичний напір $\Delta t_{ар}$ між робочими середовищами в теплообмінному апараті визначається по формулі

$$\Delta t_{ар} = (\Delta t_6 + \Delta t_m) / 2, \quad (3.8.1)$$

де Δt_6 , Δt_m - більша і менша різниця температур двох теплоносіїв на кінцях теплообмінника (див. рис. 3.8.1).

2. Логарифмічний напір $\Delta t_{л}$ між робочими середовищами в теплообмінному апараті визначається по формулі

$$\Delta t_{л} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}, \quad (3.8.2)$$

де Δt_6 , Δt_m - більша і менша різниця температур двох теплоносіїв на кінцях теплообмінника (див. рис. 3.8.1).

3. Для протитоків після підстановки чисельних значень в формулу (3.8.1) отримуємо середній арифметичний напір $\Delta t_{ар}$ між робочими середовищами (див. рис. 3.8.1, б)

$$\Delta t_{ар} = (\Delta t_6 + \Delta t_m) / 2 = (175 + 125) / 2 = 150$$
 °С,

$$\text{де } \Delta t_6 = t_{w2} - t_1 = 200 - 25 = 175$$
 °С,

$$\Delta t_m = t_{w1} - t_2 = 300 - 175 = 125$$
 °С.

4. Для протитоку після підстановки чисельних значень в формулу (3.8.2) отримуємо логарифмічний напір $\Delta t_{\text{л}}$ між робочими середовищами (див. рис. 3.8.1, б)

$$\Delta t_{\text{л}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{175 - 125}{\ln \frac{175}{125}} = 149 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5. Для протитоку значення середнього арифметичного $\Delta t_{\text{ар}}$ і логарифмічного температурних напорів $\Delta t_{\text{л}}$ приблизно однакові ($\Delta t_{\text{ар}} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\Delta t_{\text{л}} = 149 \text{ } ^\circ\text{C}$), тому в розрахунках теплообміну при протитоку середовищ можна використовувати значення середнього арифметичного температурного напору.

6. Для прямогоку після підстановки чисельних значень в формулу (3.8.1) отримуємо середній арифметичний напір $\Delta t_{\text{ар}}$ між робочими середовищами (див. рис. 3.8.1, б)

$$\Delta t_{\text{ар}} = (\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}) / 2 = (275 + 25) / 2 = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{де } \Delta t_{\text{б}} = t_{\text{w1}} - t_1 = 300 - 25 = 275 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{w2}} - t_2 = 200 - 175 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

7. Для прямогоку після підстановки чисельних значень в формулу (3.8.2) отримуємо логарифмічний напір $\Delta t_{\text{л}}$ між робочими середовищами (див. рис. 3.8.1, а)

$$\Delta t_{\text{л}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{275 - 25}{\ln \frac{275}{25}} = 104 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

8. Для прямогоку значення середнього арифметичного $\Delta t_{\text{ар}}$ і логарифмічного температурних напорів $\Delta t_{\text{л}}$ суттєво відрізняються ($\Delta t_{\text{ар}} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\Delta t_{\text{л}} = 104 \text{ } ^\circ\text{C}$), тому в розрахунках теплообміну при прямогоку середовищ використовують значення логарифмічного температурного напору.

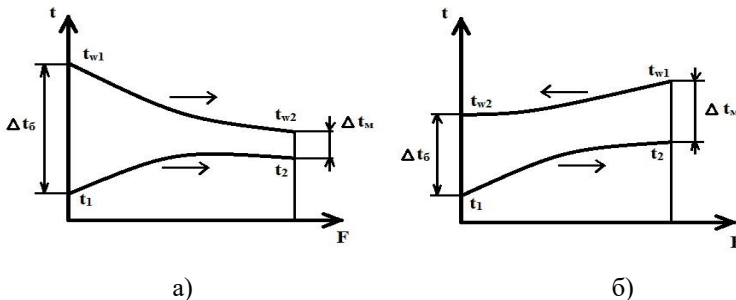


Рисунок 3.8.1 - Температурні напори для прямогоку (а) і протитоку (б) в теплообмінному апараті (F – площа теплообмінного апарату)

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

Задача 8 для самостійної роботи. Теплоносієм з температурою на вході $t_{w1}, ^\circ\text{C}$ і на виході $t_{w2}, ^\circ\text{C}$ нагрівається нафта від $t_1, ^\circ\text{C}$ до $t_2, ^\circ\text{C}$. Визначити середній арифметичний і логарифмічний температурні напори між теплоносієм і нафтою в теплообмінному апараті для прямого і протічного. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.8.1.

Таблиця 3.8.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ вар.	$t_{w1}, ^\circ\text{C}$	$t_{w2}, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	№ вар.	$t_{w1}, ^\circ\text{C}$	$t_{w2}, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
1	305	210	26	178	16	298	198	18	136
2	307	212	27	170	17	297	196	26	142
3	308	215	25	182	18	296	194	15	164
4	304	208	30	176	19	295	192	28	156
5	300	217	32	190	20	294	190	13	128
6	303	206	23	166	21	293	188	32	141
7	310	218	31	192	22	292	186	12	151
8	302	205	22	164	23	291	184	34	160
9	311	219	33	188	24	290	182	10	120
10	301	203	24	154	25	314	225	36	166
11	312	220	36	192	26	315	226	12	127
12	300	202	40	173	27	316	227	34	177
13	313	220	28	182	28	317	222	10	129
14	299	200	22	144	29	318	220	32	178
15	314	222	26	194	30	319	218	22	133

3.9 Приклад 9. Суха насичена пара з тиском $p_n = 6,18 \cdot 10^5$ Па конденсується в теплообмінному апараті на трубках, всередині яких рухається вода, яка нагрівається від $t_{w1} = 20$ °С до $t_{w2} = 70$ °С. Визначити логарифмічний і середній арифметичний температурні напори (рис. 3.9.1).

Розв'язання:

1. Суха насичена пара має тиск $p_n = 6,18 \cdot 10^5$ Па, якому відповідає температура насичення $t_n = 160$ °С (див. табл. А.2 в Додатку А).

2. Середній арифметичний напір $\Delta t_{ар}$ між робочими середовищами в теплообмінному апараті визначається по формулі

$$\Delta t_{ар} = (\Delta t_6 + \Delta t_m) / 2, \quad (3.9.1)$$

де $\Delta t_6, \Delta t_m$ - більша і менша різниця температур двох теплоносіїв на кінцях теплообмінника (див. рис. 3.9.1).

3. Логарифмічний напір $\Delta t_{\text{л}}$ між робочими середовищами в теплообмінному апараті визначається по формулі

$$\Delta t_{\text{л}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (3.9.2)$$

де $\Delta t_{\text{б}}$, $\Delta t_{\text{м}}$ - більша і менша різниця температур двох теплоносіїв на кінцях теплообмінника (див. рис. 3.9.1).

4. Після підстановки чисельних значень в формулу (3.9.1) отримуємо середній арифметичний напір $\Delta t_{\text{ар}}$ між робочими середовищами (див. рис. 3.9.1)

$$\Delta t_{\text{ар}} = (\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}})/2 = (140 + 90)/2 = 115 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\text{де } \Delta t_{\text{б}} = t_{\text{н}} - t_{\text{w1}} = 160 - 20 = 140 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{н}} - t_{\text{w2}} = 160 - 70 = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

5. Після підстановки чисельних значень в формулу (3.9.2) отримуємо логарифмічний напір $\Delta t_{\text{л}}$ між робочими середовищами (див. рис. 3.9.1)

$$\Delta t_{\text{л}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{140 - 90}{\ln \frac{140}{90}} = 113 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

6. При конденсації або кипінні одного із середовищ значення середнього арифметичного $\Delta t_{\text{ар}}$ і логарифмічного температурних напорів $\Delta t_{\text{л}}$ приблизно однакові ($\Delta t_{\text{ар}} = 115 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t_{\text{л}} = 113 \text{ }^{\circ}\text{C}$), тому в розрахунках теплообміну при незмінній температурі одного із середовищ можна використовувати значення середнього арифметичного температурного напору.

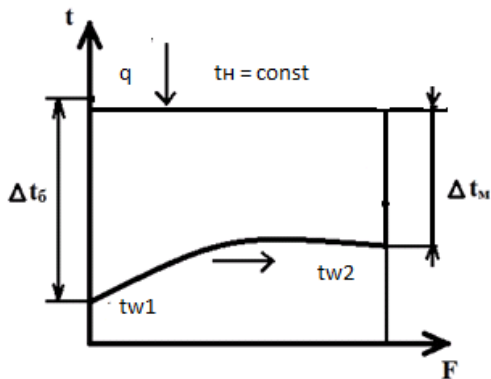


Рисунок 3.9.1 – Температурні напори в теплообміннику при конденсації водяної пари (F – площа теплообмінного апарату)

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

Задача 9 для самостійної роботи. Суха насичена пара з тиском p_n , Па конденсується в теплообмінному апараті на трубках, всередині яких рухається вода, яка нагрівається від $t_{w1}, ^\circ\text{C}$ до $t_{w2}, ^\circ\text{C}$. Визначити логарифмічний і середній арифметичний температурні напори. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.9.1.

Таблиця 3.9.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ вар	$p_n \cdot 10^{-4}$, Па	t_{w1} , $^\circ\text{C}$	t_{w2} , $^\circ\text{C}$	№ вар	$p_n \cdot 10^{-4}$, Па	t_{w1} , $^\circ\text{C}$	t_{w2} , $^\circ\text{C}$
1	7.92	18	68	16	7.05	20	65
2	8.975	16	66	17	6.18	21	67
3	10.03	17	71	18	5.47	22	70
4	12.55	19	73	19	4.76	23	74
5	15.55	19	73	20	4.76	23	74
6	17.315	21	76	21	3.61	25	71
7	19.08	16	77	22	15.305	26	82
8	21.14	15	78	23	2.70	27	84
9	23.2	14	79	24	2.34	28	86
10	25.59	13	80	25	1.98	29	77
11	27.98	12	65	26	1.705	30	87
12	30.73	11	64	27	1.43	28	88
13	33.48	10	63	28	10.03	27	89
14	36.59	9	62	29	19.08	26	90
15	39.78	8	66	30	30.73	25	91

Додаток А
Таблиця А.1

Теплопровідність матеріалів [5]

Матеріал	λ , Вт/(м·К)
Алюміній	204
Азбест	0,151
Альфоль А7	0,058
Бетон	1,208
Бронза	64
Вермикуліт	0,328
Вата мінеральна	0,052
Вініпласт	0,165
Латунь	93
Лід	2,22
Мідь	384
Пінопласт	0,05
Пінополіуретан	0,04
Поліетілен	0,29
Пробкові плити	0,047
Гума	0,16
Ржа	1,15
Сажа	0,09
Сніг ущільнений	0,46
Цегла червона	0,76
Цегла силікатна	0,82
Дерево уздовж волокон	0,35...0,41
Дерево поперек волокон	0,14...0,16

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

Матеріал	λ, Вт/(м·К)
Штукатурка	0,70...0,90
Емаль, плитка керамічна	1,05
Лінолеум	0,19
Скловата	0,047
Скло	0,745
Пластмаси	0,16...0,50
Чавун	90
Сталь вуглецева	50
Сталь легована	30
Руберойд	0,14...0,17
Накип	1,75
Цегла вогнетривка	1,75

Таблиця А.2

Суха насичена пара і вода на лінії насичення (по тискам) [6]

p, МПа	t, °С
0,012	49,44
0,014	52,57
0,016	55,34
0,018	57,82
0,020	60,08
0,025	64,99
0,030	69,12
0,040	75,87
0,050	81,33
0,060	85,94

<i>p</i> , МПа	<i>t</i> , °С
0,070	89,95
0,080	93,50
0,090	96,71
0,10	99,62
0,12	104,80
0,14	109,31
0,16	113,31
0,18	116,93
0,20	120,23
0,22	123,27
0,24	126,09
0,26	128,73
0,28	131,20
0,30	133,54
0,35	138,87
0,40	143,62
0,45	147,92
0,50	151,84
0,6	158,84

Таблиця А.3

Співвідношення фізичних величин в різних системах одиниць

Величина	Система МКГСС		Система СІ
	Одиниця величини	Позначення	
Основні і похідні одиниці			
Довжина	метр	м	1 м
Сила	кілограм-сила	кгс	9,81 Н
Час	секунда	с	1 с

Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Тепропровідність»)»

Величина	Система МКГСС		Система СІ
	Одиниця величини	Позначення	
Швидкість	метр в секунду	м/с	1 м/с
Прискорення	метр на секунду в квадраті	м/с ²	1 м/с ²
Кутова швидкість	радіан в секунду	1/с	1 с
Маса	кілограм-сила-секунда в квадраті на метр	кгс с ² /м	9,81 кг
Густина	кілограм-сила-секунда в квадраті на метр в четвертій степені	кгс с ² /м ⁴	9,81 кг/м ³
Робота	кілограм-сила-метр	кгс м	9,81 Дж
Потужність	кілограм-сила-метр на секунду	кгс м/с	9,81 Вт
Динамічний коефіцієнт в'язкості	кілограм-сила-секунда на квадратний метр	кгс с/м ²	9,81 Н · с/м ²
Кінематичний коефіцієнт в'язкості	квадратний метр на секунду	м ² /с	1 м ² /с
Тиск	кілограм-сила на квадратний метр	кгс/м ²	9,81 Н/м ² (Па)
Позасистемні одиниці			
Тиск	технічна атмосфера міліметр ртутного стовпа міліметр водяного стовпа бар	ат(кгс/см ²) мм. рт. ст. мм. вод. ст. бар	9,81 · 10 ⁴ Па 133,32 Па 9,81 Па 10 ⁵ Па
Динамічний коефіцієнт в'язкості	пуаз	П	0,1 П с/м ²
Кінематичний коефіцієнт в'язкості	стокс	Ст	10 ⁻⁴ м ² /с

Бібліографічний список

1. Драганов Б. Х. Теплотехніка : підручник / Б. Х. Драганов, А. А. Долінський, А. В. Міщенко, Є. М. Письменний. – К. : «ІНКОС». 2005. – 504 с.
2. Дубровська В.В. Термодинаміка та теплообмін: навч. посіб. / В.В. Дубровська, В.І. Шкляр. – К.: НТУУ «КПІ», Вид-во «Політехніка», 2016. – 152 с.
3. Константинов С.М. Теоретичні основи теплотехніки: підручник / С.М. Константинов, Є.М. Панов. – К.: «Золоті ворота», 2012. 592 с.
4. Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки» (розділ «Технічна термодинаміка») / О. В. Щесюк, О. Ф. Прищепов, В.М. Шенкевич, Д. А. Лісков. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2023. - 62 с. (Методична серія; Вип.).
5. Богданов С.Н. Холодильная техника. Свойства веществ: справочник / С.Н. Богданов, О.П. Иванов, А.В. Куприянова. – Л.: Машиностроение, 1976. – 168 с.
6. Рывкин С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник / С.Л. Рывкин, А.А. Александров. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с

ДЛЯ НОТАТОК

Навчальне видання

**Олег Володимирович ЩЕСЮК,
Олег Федорович ПРИЩЕПОВ,
Володимир Миколайович ШЕНКЕВИЧ,
Дмитро Анатолійович ЛІСКОВ**

**Методичні вказівки до практичних
занять і самостійної роботи з курсу
«Основи термодинаміки, теплотехніки
та гідрогазодинаміки
(розділ «Теплопровідність»)**

Методичні вказівки

Випуск 441

Редактор *О. Михайлова*
Комп'ютерна верстка, дизайн обкладинки *К. Гросу-Грабарчук*
Друк *С. Волинець*. Фальцювальньо-палітурні роботи *О. Мішалкіна*.

Підписано до друку 01.07.2024.
Формат 60x84¹/₁₆. Папір офсет.
Гарнітура «Times New Roman». Друк ризограф.
Ум. друк. арк. 2,2. Обл.-вид. арк. 1,1.
Тираж 50 пр. Зам. № 6853.

Видавць і виготовлювач: ЧНУ ім. Петра Могили.
54003, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10.
Тел.: 8 (0512) 50–03–32, 8 (0512) 76–55–81, e-mail: rector@chmnu.edu.ua.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6124 від 05.04.2020.