

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 «Конвективний теплообмін»)»**

Методичні вказівки

Випуск 439



Миколаїв – 2024

УДК 536. 24
ББК 31. 3(07)
М 54

Рекомендовано до друку вченою радою факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили (протокол № 3 від 15 січня 2024 р).

Рецензент:

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

М 54 Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Конвективний теплообмін»)» : метод. вказівки / О. В. Щесюк, О. Ф. Прищепов, В. М. Шенкевич, Д. А. Лісков. – Миколаїв : Вид-во ЧНУ імені Петра Могили, 2024. – 44 с. – (Методична серія ; вип. 439).

У цих методичних вказівках наведено основні поняття і визначення конвективного теплообміну, 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

Список основних позначень	4
Вступ.....	5
1. Методичні вказівки до розв'язання задач	6
1.1 Вимоги до оформлення звіту	6
1.2 Елементи теорії обчислень	7
2. Конвективний теплообмін	13
2.1 Основні положення і визначення	13
3. Приклади розв'язання задач і задачі для самостійної роботи	17
3.1 Приклад 1	17
3.2 Приклад 2	20
3.3 Приклад 3	23
3.4 Приклад 4	26
3.5 Приклад 5	27
3.6 Приклад 6	30
3.7 Приклад 7	32
3.8 Приклад 8	34
Додаток	36
Перелік джерел посилання	41

Список основних позначень

- α – коефіцієнт теплообміну (коефіцієнт тепловіддачі), Вт/(м²·К);
 β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹, або коефіцієнт масообміну, м/с;
 Δt – температурний напір (різниця температур), °С;
 λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
 μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;
 ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с;
 ρ – густина, кг/м³;
 τ – час, с;
 a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;
 Bi – число (критерій) Біо;
 c – теплоємність, Дж/(кг·К);
 d – діаметр, м;
 F – площа поверхні, м²;
 Fo – число (критерій) Фур'є;
 G – масова витрата рідини (газу), кг/с;
 Gr – число (критерій) Грасгофа;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 H – висота, м;
 l – довжина;
 Nu – число (критерій) Нуссельта;
 p – тиск, Па;
 p_n – тиск насиченої водяної пари, Па;
 Pe – число (критерій) Пекле;
 Pr – число (критерій) Прандтля;
 Q – тепловий потік, Вт;
 q – питомий тепловий потік, Вт/м²;
 r – радіус, м, або теплота пароутворення, Дж/кг;
 Re – число (критерій) Рейнольдса;
 T – температура, К;
 t_p – температура рідини, °С;
 t_c – температура стінки, °С;
 w – швидкість, м/с.

Вступ

Створення сучасних систем автоматизації різних технологічних об'єктів потребує знання теплотехнічних процесів, які в них відбуваються. Це може бути вирішено завдяки вивченню курсу технічної термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки [1-3]. Невід'ємною частиною теплотехнічних досліджень є розрахунки, результати яких широко використовуються при створенні теплових двигунів, холодильних машин та іншого теплотехнічного обладнання. Саме методологічним основам розрахункових досліджень з конвективного теплообміну присвячена робота авторів цих вказівок.

Виконання практичних завдань із конвективного теплообміну визначено навчальним планом спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» при вивченні дисципліни «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки».

Вказівки містять опис основних положень і визначень конвективного теплообміну, розрахункові залежності, контрольні задачі для розв'язання та приклади робіт, які виконуються студентами за вказаним курсом.

Додаток містить довідковий матеріал у вигляді таблиць та покликаний сприяти студентам набуванню навичок самостійного відшукання 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 до варіанту, якого необхідно суворо дотримуватися. Номер варіанту визначається залежно від номера студента за списком у журналі обліку. Наприклад, якщо в журналі за списком студента записано під номером 12, то його варіант – 12.

При розв'язанні задач необхідно, по-перше, встановити, які фізичні закономірності лежать в основі цієї задачі. Потім, за допомогою формул, які виражають ці закономірності, знайти рішення задачі в буквенному вигляді. Після цього можна перейти до підстановки чисельних даних, які визначені обов'язково в одній і тій 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 необхідно звертати увагу на ступінь точності кінцевого результату. Точність відповіді не повинна перевищувати точності, з якою наведені початкові величини. У чисельних відповідях одразу, як тільки замість буквених позначень підставляються числа, треба писати найменування одиниці фізичної величини.

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

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

За результатами самостійної роботи студент оформляє індивідуальний звіт.

Звіт повинен містити:

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

Звіт оформлюється 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) наведені нижче.

1.2.1 Правила наближених обчислень

При додаванні та відніманні наближених чисел обидва доданки заокруглюють до однакового порядку десяткових знаків. Кількість десяткових знаків, яку необхідно зберегти, визначається доданком, який утримує найменше число цих знаків.

Щоб штучно не збільшувати похибку за рахунок заокруглення, потрібно робити однакову кількість заокруглень як в сторону збільшення, так і в сторону зменшення доданків чисел або зберігати один зайвий десятковий знак.

Наприклад: $A = 19063,41 + 0,431 - 48,756 - 4,3678$.

Найменшу кількість десяткових знаків має число 19063,41 (два). Після заокруглення всіх чисел отримаємо $A = 19063,41 + 0,43 - 48,76 - 4,37 = 19010,71$.

При множенні та діленні наближених чисел всі співмножники заокруглюють до однакового числа значущих цифр. Кількість значущих цифр, яку необхідно залишити, визначається числом, яке утримує найменшу кількість знаків.

Значущими цифрами (або просто знаками) називаються всі цифри поданого числа, починаючи з першої зліва, від'ємної від нуля, до остан-

ньої, яка може бути і нулем. Наприклад, число 0,00047 утримує дві значущі цифри (4 і 7), а число 0,00320 – три цифри (3; 2; 0).

При послідовному множенні та діленні, а також додаванні та відніманні декількох наближених чисел проміжні результати треба заокруглити, залишаючи одну зайву значущу цифру. Кінцевий результат заокруглюють, залишаючи в ньому стільки значущих цифр, скільки їх має наближене число з найменшою кількістю знаків. Нехай, наприклад, треба обчислити

$$A = \frac{14.75}{8.6 \cdot 1.27 \cdot 0.5256}$$

Найменшу кількість знаків має число 8,6. Тому заокруглюємо всі числа до двох значущих цифр

$$A = \frac{15}{8.6 \cdot 1.3 \cdot 0.53}$$

Проміжні обчислення: $8,6 \cdot 1,3 = 11,18$. Заокруглюємо число 11,18, залишаючи один зайвий знак до третьої значущої цифри, і множимо на 0,53:

$$11,2 \cdot 0,53 = 5,936 = 5,94. \text{ Тоді } A = \frac{15}{5,94} = 2,52$$

Після заокруглення кінцевого результату до двох значущих цифр отримаємо $A = 2,5$. В цьому прикладі ділення виконали з одним зайвим знаком, щоб знати, в яку сторону заокруглювати кінцевий результат.

При заокругленні остання цифра, яка зберігається, не змінюється, якщо перша відкинута менше 5. Остання цифра, яка зберігається, збільшується на одиницю, якщо перша відкинута більше або дорівнює 5 (за виключенням тих випадків, коли сама п'ятірка є результатом заокруглення в сторону збільшення).

При піднесенні до ступеню (не вище четвертого) в результаті треба зберігати стільки значущих цифр, скільки їх має основа.

При добуванні кореня (не вище четвертого степеня) в результаті потрібно зберігати стільки значущих цифр, скільки їх має підкореневе число.

Для вказівки границь, в яких лежить шукана величина, вирішальне значення має перша значуща цифра абсолютної похибки. Тому похибка обчислюється до другої значущої цифри, а потім заокруглюється до першої.

В отриманому наближеному значенні шуканої величини зберігають правильний та сумнівний знаки, а останні заокруглюють.

Сумнівним знаком називається знак, що збігається по розряду з першою значущою цифрою абсолютної похибки. Всі знаки ліворуч від сумнівного будуть правильними.

Наприклад, в результаті обчислень отримано: $a = 6,786$, $\Delta a = 0,026$. Тут цілі та десяткові є правильними знаками, соті – сумнівними, а тисячні лежать в області помилки. Округлюючи похибку до першої значущої цифри, а саме число до сумнівного знаку, отримаємо $a = 6,79 \pm 0,03$.

Якщо в десятковому дробі останні правильні знаки – нулі, то при запису дробу вони зберігаються. Знаки, які лежать в області помилки та відкинуті при заокругленні, нулями не замінюються. Наприклад, $B = 4,502$; $\Delta B = 0,01$. Якщо округлити наближене значення величини B до сумнівного знаку, то маємо $B = 4,50 \pm 0,01$. При заокругленні цілого числа відкинуті знаки потрібно не замінювати нулями, а застосувати множення на 10 у відповідному ступені. Наприклад, $c = 847625$, $\Delta c = 235$. Тут сотні є сумнівним знаком, оскільки перша ліворуч значуща цифра абсолютної похибки знаходиться у розряді сотень. Тому, заокругливши похибку до першої значущої цифри $\Delta c = 2 \cdot 10^2$, а саме число до сумнівного знаку ($8476 \cdot 10^2$), отримаємо $c = (8476 \pm 2) \cdot 10^2$, тобто $c = (8,476 \pm 0,002) \cdot 10^5$.

1.2.2 Графічне оформлення робіт. Побудова поля похибок

Часто метою роботи виявляється отримання графічної залежності одної фізичної величини від другої $A = f(x)$. Наприклад, потрібно дослідити залежність коефіцієнта внутрішнього тертя рідини від температури $\eta = f(t)$. Для цього при різних температурах роблять виміри і обчислюють коефіцієнт внутрішнього тертя.

Роботу оформлюють графічно, по осі абсцис відкладають температуру (аргумент), а по осі ординат коефіцієнт внутрішнього тертя (функцію). Графік бажано будувати на міліметрівці. Масштаб вибирається так, щоб було легко переходити до нього від природи, тобто, щоб в одному сантиметрі укладалося $1 \cdot 10^n$ або $2 \cdot 10^n$, або $4 \cdot 10^n$, або $5 \cdot 10^n$ одиниць вимірюваної величини, де n – будь-яке ціле число. Для зручності користування графіком по осям проставити число одиниць через кожні (1-2) см.

Співвідношення між масштабами по осям повинно бути таким, щоб крива не була дуже похилою і дуже крутою. Це означає, що якщо ви-

мірювання аргументу викликає невелике змінювання функції, то по осі ординат потрібно взяти більший масштаб, ніж по осі абсцис.

Після нанесення експериментальних точок на графік будують поле похибок, тобто, в масштабі графіка відкладають ліворуч і праворуч від експериментальних точок похибку виміру аргументу Δx , а вгору і вниз похибку виміру шуканої величини ΔA . Потім проводять горизонтальні та вертикальні лінії довжиною $2\Delta x$ і $2\Delta A$ або будують прямокутники зі сторонами $2\Delta x$ і $2\Delta A$. Довжина цих ліній повинна бути порядку 1-5 мм.

В експериментальних кривих часто спостерігається деякий розкид точок, обумовлений похибками вимірів. При побудові графіка необхідно нанести всі точки (розмір точок повинен бути не менше 1 мм) відповідно вимірам; побудувати поле похибок для кожної точки, а потім провести плавну криву так, щоб точки рівномірно розташовувалися по обидві сторони кривої і крива проходила через поле похибок експериментальних точок. Якщо поле похибок однієї-двох точок не перетинаються пальною кривою, то це свідчить про грубу похибку в поданому вимірі.

Приклад. Нехай при вимірній залежності в'язкості гліцерину від температури отримані такі значення в'язкості з відносною похибкою 3%:

$t, ^\circ\text{C}$	11	12	14	15	18	20	23	25	28	30
$\eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$	3,8	3,3	2,68	2,30	1,80	1,35	1,20	1,06	1,00	1,00
$\Delta\eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$	0,1	0,1	0,08	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03

Похибка вимірювання температури $\Delta t = 0,5 ^\circ\text{C}$. Інтервал вимірювання температури $(10-30)^\circ\text{C}$, тобто 20°C . Вибираємо масштаб 10°C на 5 см, тоді довжина графіка буде 10 см, а $2\Delta t$ зобразиться лінією довжиною 5 мм.

Інтервал вимірювання $\eta = 1,0 - 3,8 \text{ мПа} \cdot \text{с}$, тобто $2,8 \text{ мПа} \cdot \text{с}$; вибравши масштаб $1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ на 5 см, отримаємо розмір графіка по вертикалі 14 см; довжина лінії при $2\Delta\eta = 0,2 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ буде 1 см. Для того, щоб не збільшувати розміри креслення, початок осі t вибираємо в точ-

ці 10°C , а початок осі η в точці $1,0 \text{ МПа} \cdot \text{с}$, потім проводимо осі координат, на осях відмічаємо значення аргументу і функції через 1-2 см так, щоб навпроти п'ятисантиметрових ліній стояли округлені значення; наносимо експериментальні точки, будуюмо поле похибок і проводимо гладку криву.

1.2.3 Користування довідковими таблицями

Часто в робочу формулу окрім вимірних величин входять і такі величини, які беруться з довідкових таблиць (теплоємність питома, прискорення сили тяжіння g , число π та інші).

Оскільки в числових значеннях, які наведені в таблицях, залишені лише правильні знаки, то абсолютна похибка числа, яке взято з таблиці, не може перевищувати половини одиниці останньої значущої цифри цього числа.

Наприклад, в таблиці вказано, що питома теплоємність міді $c = 395 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. В цьому випадку її абсолютна похибка $\Delta c = 0,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

У деяких випадках в таблиці приведено більше значущих цифр, ніж потрібно для розрахунку (відповідно правилам наближених обчислень). Тоді табличну величину заокруглюють, залишаючи в ній необхідну кількість знаків, а абсолютну похибку заокруглення вважають рівною похибці заокруглення.

Наприклад, при визначенні об'єму циліндра його висота і діаметр були виміряні до четвертої значущої цифри. Тоді число π , яке дорівнює 3,1415826525, потрібно заокруглити до такої ж кількості знаків, тобто, воно буде дорівнювати 3,142. Похибка заокруглення в цьому випадку $\Delta \pi = -4 \cdot 10^{-4}$. Ця похибка вже лежить в п'ятому знаку, в той час, як останні в четвертому, тому нею можна знехтувати.

У константах краще залишити кількість знаків, яка дорівнює чи більше на один, ніж в вимірних величинах. В останньому випадку похибкою заокруглення можна знехтувати.

У деяких таблицях відображена залежність двох фізичних величин, одна з яких вимірюється безпосередньо. Наприклад, залежність густини рідини від температури, температури кипіння, від тиску тощо.

Абсолютна похибка такої величини обумовлена похибкою вимірювання аргументу. Наприклад, температура води $t = 22^{\circ}\text{C}$; $\Delta t = 0,5^{\circ}\text{C}$. Потрібно знайти абсолютну похибку визначення густини води ($\Delta \rho$).

За таблицями визначаємо: при $t = 23^{\circ}\text{C}$; $\rho = 997,80 \text{ кг}/\text{м}^3$ $t_1 = 21^{\circ}\text{C}$; $\rho_1 = 998,02 \text{ кг}/\text{м}^3$; $t_2 = 23^{\circ}\text{C}$, $\rho_2 = 997,57 \text{ кг}/\text{м}^3$. Знаходимо b – середню швидкість вимірювання функції.

$$b = \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} = \frac{997,57 - 998,02}{23 - 21} = -0,225 \text{ кг/м}^3$$

Похибка

$$\Delta\rho = b \cdot \Delta t = 0,225 \cdot 0,5 = 0,113 \text{ кг/м}^3$$

Заокругливши абсолютну похибку до першої значущої цифри, а саме значення густини до сумнівного знаку, отримаємо

$$\rho = (997,8 \pm 0,1) \text{ кг/м}^3$$

1.2.4 Лінійне інтерполювання

Часто в таблицях немає значення аргументу, для якого знаходиться функція, а є значення аргументу більше або менше. Знаходження значення функції в цьому випадку робиться методом інтерполювання.

Лінійне інтерполювання можна застосовувати у тих випадках, з достатньою точністю залежність функції від аргументу виявляється лінійною, тобто має вигляд $f(x) = f(x_1) + b(x - x_1)$. В інших випадках застосовується більш складніше інтерполювання.

В таблиці подані такі залежності: при $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ $\alpha_1 = 73,26 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; при $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\alpha_2 = 72,53 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Приймаючи, що в межах $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ α залежить від температури лінійно, тобто

$$\alpha = \alpha_1 + b \cdot (t - t_1),$$

знаходимо

$$b = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$$

відповідно зміні температури на $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (1 К). Для цього різницю сусідніх значень функції поділимо на «крок» таблиці («крок» таблиці дорівнює різниці значень аргументу), тобто

$$b = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t_2 - t_1} = \frac{(72,53 - 73,26) \cdot 10^{-3}}{20 - 15} = -0,146 \cdot 10^{-3} \text{ Н/(м} \cdot \text{К)}$$

Потім знаходимо значення функції α по формулі

$$\alpha = \alpha_1 + b \cdot (t - t_1),$$

$$\alpha = 73,26 \cdot 10^{-3} - 0,146 \cdot 10^{-3} \cdot (18 - 15) = 72,822 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

Якщо температура була виміряна з похибкою Δt , то отримаємо:

$$\Delta\alpha = |b| \cdot \Delta t = 0,146 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 = 0,073 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

Заокруглимо абсолютну похибку до першої значущої цифри

$$\Delta\alpha = 0,07 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

Кінцевий результат визначення α записується так:

$$\alpha \pm \Delta\alpha = (72,82 \pm 0,07) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м.}$$

2. Конвективний теплообмін

2.1 Основні положення і визначення

Теплообмінні пристрої, призначені для передачі і використання теплоти, знаходять широке застосування у всіх галузях виробництва й у побуті. Прикладом можуть служити нагрівальні прилади для опалення приміщення, системи охолодження двигунів, водонагрівальні і парові теплопередаючі установки і т. д. У цих пристроях процес переносу тепла зв'язаний із переносом самого середовища. Рухоме середовище, що використовується для передачі тепла, називається *теплоносієм*. Гази і краплинну рідину, що використовують як теплоносії в процесі передачі теплоти у теплотехніці прийнято називати одним терміном – *рідиною*.

На практиці конвекція супроводжується теплопровідністю. Процес теплообміну між поверхнею твердого тіла або поверхнею розділу фаз і рідиною, що рухається, називається *тепловіддачею*. Поверхня тіла, через яку переноситься теплота, зветься *поверхнею теплообміну*.

На інтенсивність тепловіддачі великий вплив чинить швидкість руху теплоносія відносно поверхні теплообміну. У зв'язку з цим розрізняють вимушену і вільну конвекцію. *Вимушена конвекція* відбувається під дією зовнішніх поверхневих сил (насос, вентилятор, вітер), прикладених на границях системи, або масових сил, прикладених до рідини, або за рахунок запасу кінетичної енергії, набутої рідиною поза системою. *Вільна конвекція* з'являється під дією неоднорідного поля зовнішніх сил (сил гравітаційного, електричного або інерційного поля), прикладених до рідини усередині системи.

Надалі буде розглядатися гравітаційна вільна конвекція при фіксованій величині прискорення сили ваги і відсутності інших масових сил. Крім того, будуть розглянуті тільки стаціонарні процеси руху рідини і тепловіддачі. Умовою стаціонарності є незмінність у часі швидкості і температури в будь-якій точці рідини.

Залежно від фізичних властивостей рідини процес тепловіддачі протікає по-різному. Особливий вплив на теплообмін чинять наступні фізичні параметри: теплопровідність λ , питома теплоємність c , густина ρ , коефіцієнт температуропровідності a і коефіцієнт в'язкості μ .

Величини λ , c , a , ρ аналізувалися при розгляді теплопровідності. На процес переносу тепла істотно впливає в'язкість рідини. Між частками або шарами рідини, що рухаються з різними швидкостями, вини-

кає сила вимушеного тертя, що протидіє рухові. Сила тертя має місце при русі рідини по поверхні тіла. Відповідно до закону Ньютона, дотична сила, що виникала, віднесена до одиниці поверхні, пропорційна зміні швидкості в напрямку нормалі до руху рідини. Коефіцієнт пропорційності цієї закономірності називається динамічним коефіцієнтом в'язкості і позначається через μ . Його одиниця виміру: Па · с.

При дослідженні тепловіддачі використовують кінематичний коефіцієнт в'язкості ν , м²/с, який дорівнює відношенню динамічного коефіцієнта в'язкості μ до густини ρ .

Відповідно до закону Ньютона-Ріхмана, тепловий потік у процесі тепловіддачі пропорційний поверхні теплообміну і різниці температур поверхні стінки (t_c) і рідини (t_p), узятій за абсолютною величиною:

$$Q = \alpha F |t_c - t_p|. \quad (2.1)$$

Для густини теплового потоку q , Вт/м² рівняння (2.1) приймає вигляд

$$q = \alpha |t_c - t_p|. \quad (2.2)$$

Коефіцієнт пропорційності α в рівнянні (2.2) має розмірність Вт/(м² · К), називається *коефіцієнтом теплообміну* (користуються також і таким терміном – коефіцієнт тепловіддачі). Коефіцієнт тепловіддачі дорівнює густині теплового потоку q на поверхні тіла, віднесеної до різниці температур поверхні тіла і навколишнього середовища. Він характеризується інтенсивністю тепловіддачі між рідиною і поверхнею теплообміну.

Значення *місцевого (локального) коефіцієнта теплообміну* відносяться до певної точки поверхні тіла. У розрахунках зручніше користуватися поняттям середнього коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}$, який дорівнює тепловому потоку Q , поділеному на площу поверхні теплообміну F і середній температурний напір:

$$\bar{\alpha} = \frac{Q}{F \Delta t_{cp}}. \quad (2.3)$$

Подібність процесів конвективного теплообміну визначається наступними критеріями (числами) подібності.

Критерій (число) Нуссельта (Nu) характеризує інтенсивність процесу конвективного теплообміну:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (2.4)$$

де α – коефіцієнт теплообміну; l – характерний геометричний розмір (довжина для пластини, діаметр або радіус для труби); λ – коефіцієнт теплопровідності теплоносія.

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

Критерій (число) Рейнольдса (Re) являє собою відношення сил інерції до сил в'язкого тертя:

$$Re = \frac{wl}{\nu} - \text{для пластини, } Re = \frac{wd}{\nu} - \text{для труби} \quad (2.5)$$

Критерій (число) Прандтля (Pr) виражає теплофізичні властивості рідини або газу:

$$Pr = \frac{\nu}{a}. \quad (2.6)$$

Критерій (число) Пекле (Pe) характеризує відношення густини потоку теплоти, який переносить рухома рідина (газ), до густини потоку теплоти, зумовленої теплопровідністю:

$$Pe = \frac{wl}{a} = Pr \cdot Re \quad (2.7)$$

Критерій (число) Грасгофа (Gr) характеризує відношення підйомної сили, що виникає внаслідок різниці густин рідини безпосередньо біля стінки й у далечині від неї і сили в'язкості:

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta (t_c - t_p). \quad (2.8)$$

Критерій (число) Фур'є (Fo) являє собою комплекс, що визначає масштаб часу, у якому протікає процес:

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2}. \quad (2.9)$$

Критерій Фур'є використовується при вивченні нестационарних (несталих) процесів.

Критерій (число) Біо (Bi) являє собою відношення термічного опору стінки до термічного опору передачі тепла на поверхні і характеризує стаціонарний теплообмін між нагрітим/охолодженим твердим тілом і навколишнім середовищем.

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (2.10)$$

Критерій Біо має такий же зміст, що і критерій Нуссельта, але застосовується тоді, коли число Nu використовується для характеристики конвективного теплообміну. Для геометрично подібних тіл рівність чисел Біо визначає подібність розподілу температури (температурних полів).

У рівняннях (2.4-2.10) прийняті позначення: w – швидкість руху м/с;

l – характерний розмір, м; ν – кінематична в'язкість, м²/с; a – температуропровідність, м²/с; g – прискорення вільного падіння, м/с²;

β – температурний коефіцієнт, 1/град; t_c, t_p – температура рідини біля стінки і у ядрі потоку, °С; τ – час, с.

При вивченні тепловіддачі в умовах вимушеного руху рідини, усередненої по всій поверхні теплообміну і неускладненої фазовими і хімічними перетвореннями, критеріальне рівняння має вигляд:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2.11)$$

Для тепловіддачі в умовах вільного руху критеріальне рівняння записується так:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (2.12)$$

З критеріального рівняння спочатку знаходять значення Nu , а потім розраховують коефіцієнт теплообміну:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l}. \quad (2.13)$$

3. Приклади розв'язання задач і задачі для самостійної роботи

3.1. Приклад 1.

Визначити значення чисел Нуссельта Nu , Рейнольдса Re , Пекле Pe для слідуючих умов: середовище рухається по трубі діаметром $d_{\text{тр}}=24 \times 2$ мм і довжиною $l = 2$ м, його витрата $G = 50$ кг/год. На вході температура середовища $t_{w1} = 80^\circ\text{C}$ на виході $t_{w2} = 40^\circ\text{C}$, середня температура стінки $t_{\text{ст}} = 25^\circ\text{C}$. Як середовище прийняти воду і повітря. Визначальні параметри – середня температура середовища і внутрішній діаметр труби (рис. 3.1.1).

Розв'язання:

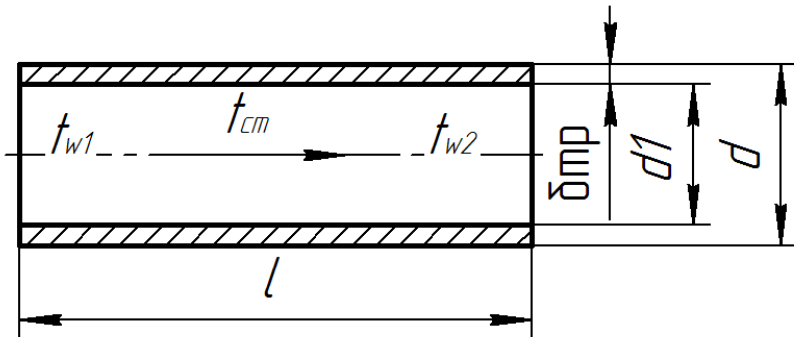


Рисунок 3.1.1 – Схема для визначення значення чисел Nu , Re , Pe при русі середовища в трубі

А. Визначення числа Нуссельта Nu

1. Визначаємо значення числа Nu за формулою (2.4)

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad (3.1.1)$$

2. Для визначення коефіцієнта теплообміну α треба знати густину теплового потоку (питомий тепловий потік) q і середній температурний напір $\Delta t_{\text{сеп}}$, які знаходимо із формул (3.1.2 -3.1.3)

$$q = \alpha \Delta t_{\text{сеп}} \quad (3.1.2)$$

$$\Delta t_{\text{сеп}} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{t_{w1} - t_{\text{ст}}}{t_{w2} - t_{\text{ст}}}} \quad (3.1.3)$$

3. Обчислюємо середній температурний напір $\Delta t_{\text{сер}}$, °C

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{80 - 40}{\ln \frac{80 - 25}{40 - 25}} = 10,9 \text{ °C}$$

4. Формула для визначення коефіцієнта теплообміну α з рівняння (3.1.2)

$$\alpha = \frac{q}{\Delta t_{\text{сер}}} \quad (3.1.4)$$

5. Густина теплового потоку (питомий тепловий потік) q , Вт/м²

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (3.1.5)$$

де Q – кількість теплоти, яке передається через поверхню труби, Вт;

F – внутрішня поверхня теплообміну труби, м².

6. Кількість теплоти Q , яке передається через поверхню труби

$$Q = \frac{G}{3600} C_p \Delta t_{\text{сер}} \cdot 10^3 \quad (3.1.6)$$

7. Внутрішня поверхня теплообміну труби F , м²

$$F = \pi d_1 l \quad (3.1.7)$$

8. Визначаємо густину теплового потоку (питомий тепловий потік) q , підставляючи вирази формул (3.1.6) і (3.1.7) у формулу (3.1.5)

$$q = \frac{G C_p \Delta t_{\text{сер}} \cdot 10^3}{\pi d_1 l \cdot 3600}; \quad (3.1.8)$$

9. Коефіцієнт теплообміну α знаходимо, підставляючи формулу (3.1.8) у формулу (3.1.4)

$$\alpha = \frac{G C_p \Delta t_{\text{сер}} \cdot 10^3}{3600 \pi d_1 l \Delta t_{\text{сер}}} = \frac{G C_p \cdot 10^3}{3600 \pi d_1 l}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (3.1.9)$$

10. Після підстановки формули (3.1.9) у формулу (3.1.1) отримуємо рівняння для розрахунку числа Nu

$$Nu = \frac{G C_p \cdot 10^3 d_1}{3600 \pi d_1 l \lambda} = 0,0885 \frac{G}{l} \cdot \frac{C_p}{\lambda} \quad (3.1.10)$$

11. Обчислюємо значення числа Nu для води і повітря за формулою (3.1.10)

$Nu = 0,0885 \frac{50 C_p}{2 \cdot \lambda} = 2,21 \frac{C_p}{\lambda}$ $Nu_{\text{вода}} = 2,21 \frac{4,179}{0,650} = 14,2$ $Nu_{\text{повітря}} = 2,21 \frac{1,005}{2,90 \cdot 10^{-2}} = 76,6$	<p>В формулі (3.1.10): c_p – ізобарична теплоємність при $t_{\text{сер}} = \frac{80+40}{2} = 60 \text{ °C}$; λ – коефіцієнт середовища при $t_{\text{сер}} = 60 \text{ °C}$</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>вода</th> <th>повітря</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C_p</td> <td>4,179</td> <td>1,005</td> <td>$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$</td> </tr> <tr> <td>$\lambda$</td> <td>0,650</td> <td>$2,90 \cdot 10^{-2}$</td> <td>$\frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{К}}$</td> </tr> </tbody> </table>		вода	повітря		C_p	4,179	1,005	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	λ	0,650	$2,90 \cdot 10^{-2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
	вода	повітря											
C_p	4,179	1,005	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$										
λ	0,650	$2,90 \cdot 10^{-2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{К}}$										

В. Визначення числа Рейнольдса Re

1. Визначаємо значення числа Рейнольдса Re за формулою (2.5)

$$Re = \frac{wd}{\nu} \quad (3.1.11)$$

2. Швидкість середовища в трубі w , м/с

$$w = \frac{G}{3600\rho F} = \frac{4G}{3600\rho\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 50}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,02^2 \rho} = \frac{44,23}{\rho}, \quad (3.1.12)$$

де $F = \frac{\pi d_1^2}{4}$ – внутрішня поверхня теплообміну труби.

3. Підставляємо формулу (3.1.12) в рівняння (3.1.11) і отримуємо вираз для визначення числа Рейнольдса

$$Re = \frac{wd_1}{\nu} = \frac{44,23 \cdot 0,02}{\rho\nu} = \frac{0,885}{\rho\nu}, \quad (3.1.13)$$

де ρ – густина середовища, береться із таблиць теплофізичних характеристик середовища при середній температурі; при $t_{cp} = 60^\circ\text{C}$ для води $\rho = 983,1 \text{ кг/м}^3$; для повітря – $1,06 \text{ кг/м}^3$; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, який береться із таблиць теплофізичних характеристик середовища при середній температурі; при $t_{cp} = 60^\circ\text{C}$ для води $\nu = 0,478 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; для повітря – $18,97 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

4. Визначаємо значення числа Re для води, підставляючи величини ρ і ν у формулу (3.1.13)

$$Re_{\text{води}} = \frac{0,885 \cdot 10^6}{983,1 \cdot 0,478} = 1883 \quad (3.1.14)$$

5. Визначаємо значення числа Re для повітря, підставляючи величини ρ і ν у формулу (3.1.13)

$$Re_{\text{повітря}} = \frac{0,885 \cdot 10^6}{1,06 \cdot 18,97} = 44011 \quad (3.1.14)$$

С. Визначення числа Пекле Pe

1. Визначаємо значення числа Пекле Pe за формулою (2.7)

$$Pe = \frac{wl}{a} = PrRe \quad (3.1.15)$$

2. Число Прандтля Pr розраховується, або береться з таблиць теплофізичних характеристик середовища, при середній температурі; при $t_{cp} = 60^\circ\text{C}$ для води $Pr = 3,03$; для повітря – $0,696$.

3. Визначаємо значення числа Пекле Pe для води, підставляючи величини Pr і Re в формулу (3.1.15)

$$Pe_{\text{води}} = Pr_{\text{води}} \cdot Re_{\text{води}} = 1883 \cdot 3,03 = 5705$$

4. Визначаємо значення числа Пекле Pe для повітря, підставляючи величини Pr і Re в формулу (3.1.15)

$$Pe_{\text{повітря}} = Pr_{\text{повітря}} \cdot Re_{\text{повітря}} = 44011 \cdot 0,696 = 30632$$

Відповідь: значення чисел Нуссельта Nu , Рейнольдса Re , Пекле Pe для води, відповідно, 14,2;1883 та 5705, а для повітря, відповідно, 76,6; 44011 та 30632.

Задача 1 для самостійної роботи.

Визначити значення чисел Nu , Re , Pe для таких умов: середовище рухається по трубі діаметром $d\chi\delta_{тр}$, мм і довжиною l , м, його витрата G , кг/год. На вході температура середовища t_{w1} , °С на виході t_{w2} , °С, середня температура стінки $t_{ст}$, °С. В якості середовища прийняти воду і повітря. Визначальні параметри – середня температура середовища і внутрішній діаметр труби. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.1.1.

Таблиця 3.1.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ вар.	$d\chi\delta_{тр}$, мм	l , м	G , кг/год	t_{w1} , °С	t_{w2} , °С	$t_{ст}$, °С	№ вар.	$d\chi\delta_{тр}$, мм	l , м	G , кг/год	t_{w1} , °С	t_{w2} , °С	$t_{ст}$, °С
1	24x2	2,0	50	80	40	25	16	48x4	1,6	56	90	32	16
2	25x2	2,2	55	81	41	26	17	50x5	1,5	66	88	33	17
3	26x2	2,4	60	82	42	27	18	52x5	1,4	57	86	34	18
4	27x2	2,6	65	83	43	28	19	54x5	1,3	67	84	35	19
5	28x2	2,8	70	84	42	29	20	56x5	1,2	58	83	36	20
6	29x2	2,9	51	85	45	30	21	58x8	1,1	68	82	37	21
7	30x3	3,0	61	86	44	28	22	60x6	1	59	81	38	22
8	32x3	2,8	52	88	42	26	23	62x6	0,9	69	80	39	23
9	34x3	2,7	62	89	41	27	24	64x6	0,8	60	79	40	24
10	36x3	2,5	53	87	43	28	25	66x6	0,7	70	78	32	19
11	38x3	2,3	63	85	47	31	26	68x6	0,6	62	77	33	20
12	40x4	2,1	54	86	48	32	27	70x7	0,5	58	76	34	21
13	42x4	1,9	64	87	49	26	28	72x7	0,4	56	75	35	22
14	44x4	1,8	55	88	50	27	29	74x7	0,3	54	74	32	18
15	46x4	1,7	65	89	30	15	30	75x7	0,2	55	73	30	19

3.2 Приклад 2.

Речовина трансформаторна олія з температурою $t_w = 90$ °С охолоджується, коли протікає зі швидкістю $w = 0,4$ м/с уздовж металевої плити, температура якої підтримується $t_{ст} = 20$ °С. Визначити коефіцієнт тепловіддачі, якщо довжина плити по напрямленню потоку дорівнює $l = 500$ мм (рис. 3.2.1).

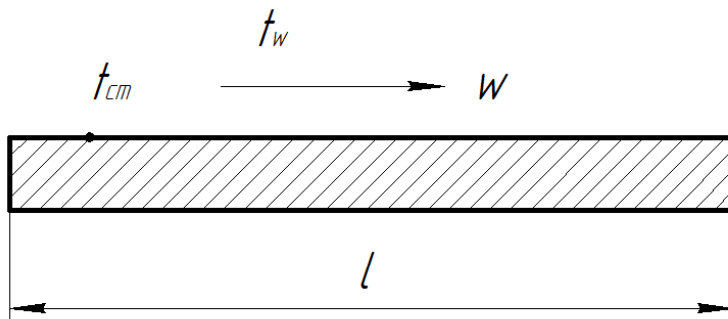


Рисунок 3.2.1 – Схема для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при русі потоку уздовж плити

Розв’язання:

1. Визначаємо середню температуру речовини (трансформаторна олія)

$$t_{cp} = \frac{t_w + t_{ct}}{2} = \frac{90 + 20}{2} = 55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Розраховуємо число Рейнольдса Re за формулою (2.5)

$$Re = \frac{wl}{\nu} = \frac{0,4 \cdot 0,5 \cdot 10^6}{6,68} = 29940, \quad (3.2.1)$$

де ν – кінематичний коефіцієнт в’язкості, який береться з таблиць теплофізичних характеристик середовища при середній температурі, $\text{м}^2/\text{с}$; l – характерний геометричний розмір (довжина пластини), м .

Для трансформаторної олії $\nu = 6,68 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ при $t_{cp} = 55^\circ\text{C}$.

Оскільки число $Re < 10^5$, тому використовуємо формулу для числа Nu при ламінарному режимі течії.

3. При ламінарному режимі течії значення числа Nu визначають по наступним рівнянням:

Для рідини

$$Nu_{\text{рід}} = 0,66 Re_{\text{рід}}^{0,5} \cdot Pr_{\text{рід}}^{0,33} \left(\frac{Pr_{\text{рід}}}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25}, \quad (3.2.2)$$

де $Pr_{\text{рід}}$, $Pr_{\text{ст}}$ – числа Прандтля (див. формулу (2.6)) при середніх температурах, відповідно, рідини і стінки.

Для повітря

$$Nu_{\text{пов}} = 0,57 Re_{\text{пов}}^{0,5} \quad (3.2.3)$$

4. Визначаємо число Прандтля Pr для рідини (трансформаторна олія) і стінки (метал)

$$Pr_{\text{рід}} = 99,4 \text{ при } t_{\text{ср}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}; Pr_{\text{ст}} = 298 \text{ при } t_{\text{ст}} = 20^\circ\text{C} \quad (3.2.4)$$

5. Знаходимо число Nu , підставляючи в формулу (3.2.2) значення чисел Рейнольдса Re (3.2.1) і Прандтля Pr (3.2.4)

$$Nu_{\text{рід}} = 0,66 \cdot 29940^{0,5} \cdot 99,4^{0,33} \left(\frac{99,4}{298}\right)^{0,25} = 395,8 \quad (3.2.5)$$

6. Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м² · К) з рівняння (2.4)

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \text{ тоді } \alpha = \frac{Nu_{\text{рід}} \lambda}{l}, \quad (3.2.6)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності рідини або газу, який береться з таблиць теплофізичних характеристик середовища при середній температурі. Для трансформаторної олії $\lambda = 0,1077 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ при $t_{\text{ср}} = 55^\circ\text{C}$.

7. Знаходимо значення коефіцієнта тепловіддачі α , з формули (3.2.6)

$$\alpha = \frac{395,8 \cdot 0,1077}{0,5} = 85 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

8. При турбулентному режимі течії ($Re > 10^5$) значення числа Nu визначають по наступним рівнянням:

Для рідини

$$Nu_{\text{рід}} = 0,037 Re_{\text{рід}}^{0,8} Pr_{\text{рід}}^{0,43} \left(\frac{Pr_{\text{рід}}}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25}; \quad (3.2.7)$$

Для повітря

$$Nu_{\text{пов}} = 0,032 Re_{\text{пов}}^{0,8} \quad (3.2.8)$$

Відповідь: значення коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 85 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Задача 2 для самостійної роботи. Речовина з температурою t_w , °С охолоджується, коли протікає зі швидкістю w , м/с уздовж металевої плити, температура якої підтримується $t_{\text{ср}}$, °С. Визначити коефіцієнт тепловіддачі, якщо довжина плити по напрямленню потоку дорівнює l , мм. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.2.1.

Таблиця 3.2.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ Вар.	Речовина	t_w , °С	w , м/с	$t_{\text{ср}}$, °С	l , мм	№ Вар	Речовина	t_w , °С	w , м/с	$t_{\text{ср}}$, °С	l , мм
1	трансформаторна олія	90	0,4	20	500	16	повітря	92	0,44	20	700
2	олія МК	90	0,38	20	450	17	трансформаторна олія	95	0,48	19	630
3	вода	98	0,36	25	550	18	олія МК	95	0,49	19	640

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

№ Вар.	Речовина	$t_w, ^\circ\text{C}$	$w, \text{м/с}$	$t_{cp}, ^\circ\text{C}$	$l, \text{мм}$	№ Вар	Речовина	$t_w, ^\circ\text{C}$	$w, \text{м/с}$	$t_{cp}, ^\circ\text{C}$	$l, \text{мм}$
4	повітря	88	0,4	18	650	19	вода	93	0,50	18	650
5	трансформаторна олія	92	0,45	22	550	20	повітря	91	0,46	17	710
6	олія МК	92	0,43	22	560	21	трансформаторна олія	93	0,4	18	660
7	вода	96	0,42	23	570	22	олія МК	93	0,41	18	670
8	повітря	90	0,46	21	680	23	вода	91	0,42	17	680
9	трансформаторна олія	94	0,46	18	580	24	повітря	89	0,43	16	720
10	олія МК	94	0,47	18	58\90	25	трансформаторна олія	87	0,44	15	690
11	вода	94	0,44	18	600	26	олія МК	87	0,45	15	700
12	повітря	92	0,45	16	690	27	вода	85	0,46	14	710
13	трансформаторна олія	96	0,47	21	610	28	повітря	80	0,47	13	750
14	олія МК	96	0,48	21	620	29	олія МК	90	0,35	19	720
15	вода	96	0,45	20	630	30	вода	90	0,32	18	730

3.3 Приклад 3.

Для експериментального дослідження розподілу температур у сталевому валу при нагріві його в печі використовувалась геометрично подібна модель валу.

Діаметр сталевого валу $d = 400$ мм; матеріал валу – вуглецева сталь Ст 5; $\tau = 2,5$ год – час, через який виміряють розподіл температури у валу після розміщення в печі.

Матеріал моделі валу – легувана сталь 12Х18Н10Т.

Коефіцієнти теплопровідності для валу $\lambda = 42$ Вт/(м·К). для моделі – $\lambda_m = 16$ Вт/(м·К); коефіцієнти температуропровідності для валу $a = 1,18 \cdot 10^{-5}$ м²/с, для моделі - $a = 0,53 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Коефіцієнти тепловіддачі до валу в печі $\alpha = 116$ Вт/(м²·К), до моделі – $\alpha_m = 150$ Вт/(м²·К).

Необхідно визначити діаметр d_m моделі валу і час τ_m , через який необхідно виміряти розподіл температури у моделі після розміщення її в печі.

Розв'язання:

1. При рівності чисел Біо і Фур'є буде подібність температурних полів валу і моделі, тобто

$$Bi_M = Bi \quad (3.3.1)$$

$$Fo_M = Fo \quad (3.3.2)$$

2. Визначаємо число Біо для валу за формулою (2.10)

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda} = \frac{116 \cdot 0,2}{42} = 0,552,$$

де $r = 0,2$ м – радіус валу.

3. Знаходимо діаметр d_M моделі валу за умови рівняння чисел Біо валу і моделі з рівняння (3.3.1)

$$d_M = 2 r_M = 2 \frac{\lambda_M}{\alpha_M} Bi = 2 \frac{16}{150} 0,552 = 0,118 \text{ м}$$

4. Визначаємо число Фур'є для валу за формулою (2.9)

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{r^2} = \frac{1,18 \cdot 10^{-5} \cdot 9 \cdot 10^3}{0,2^2} = 2,655$$

5. Визначаємо час τ_M , через який необхідно виміряти розподіл температури у моделі після розміщення її в печі, за умови рівняння чисел Фур'є валу і моделі з рівняння (3.3.2)

$$\tau_M = \frac{r_M^2}{\alpha_M} Fo = \frac{0,118^2}{4 \cdot 0,53 \cdot 10^{-5}} 2,66 = 1747 \text{ с} = 29 \text{ хв}$$

Відповідь: діаметр моделі валу $d_M = 0,118$ м; час, через який необхідно виміряти розподіл температури у моделі після розміщення її в печі, $\tau_M = 29$ хв.

Задача 3 для самостійної роботи. Для експериментального дослідження розподілу температур у сталевому валу при нагріві його в печі використовувалась геометрично подібна модель валу.

Діаметр сталевого валу d , мм; матеріал валу – вуглецева сталь Ст 5; τ , год – час, через який виміряють розподіл температури у валу після розміщення в печі.

Матеріал моделі валу – легована сталь 12Х18Н10Т.

Коефіцієнти теплопровідності для валу $\lambda = 42$ Вт/(м·К). для моделі – $\lambda_M = 16$

Вт/(м·К); коефіцієнти температуропровідності для валу $a = 1,18 \cdot 10^{-5}$ м²/с, для

моделі - $a = 0,53 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Коефіцієнти тепловіддачі до валу в печі α , Вт/(м²·К), до моделі – α_M , Вт/(м²·К).

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

Необхідно визначити діаметр d_m моделі валу і час τ_m , через який необхідно виміряти розподіл температури у моделі після розміщення її в печі. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.3.1.

Таблиця 3.3.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ Вар	d , мм	τ , год	α , Вт/(м ² ·К)	α_m , Вт/(м ² ·К)	№ Вар	d , мм	τ , год	α , Вт/(м ² ·К)	α_m , Вт/(м ² ·К)
1	50	0,5	10	30	16	150	2,0	60	30
2	55	1,0	20	40	17	160	3,0	70	40
3	60	1,5	30	50	18	170	0,5	80	50
4	65	2,0	40	60	19	180	1,0	90	60
5	70	2,5	50	70	20	190	1,5	100	70
6	75	3,0	60	80	21	200	2,0	10	80
7	80	0,5	70	90	22	225	2,5	20	90
8	85	1,0	80	100	23	250	3,0	30	100
9	90	1,5	90	110	24	275	0,5	40	110
10	95	2,0	100	120	25	300	1,0	50	120
11	100	2,5	10	130	26	350	1,5	60	130
12	110	3,0	20	140	27	400	2,0	70	140
13	120	0,5	30	150	28	450	2,5	80	150
14	130	1,0	40	160	29	500	3,0	90	160
15	140	1,5	50	170	30	600	3,5	100	170

3.4 Приклад 4.

В приміщенні, де температура повітря $t = 50^\circ\text{C}$, розміщений горизонтальний паропровід з круглої труби зовнішнім діаметром $d = 200$ мм і довжиною $l = 20$ м. Температура зовнішньої поверхні труби $t_c = 150^\circ\text{C}$. Визначити втрати теплоти від паропроводу в приміщення при вільній конвекції (тепловим випромінюванням знехтувати).

Розв'язання:

1. При передачі теплоти вільною конвекцією для горизонтальної труби за визначальний розмір беруть зовнішній діаметр труби ($d = 200$ мм), а за визначальну температуру – температуру повітря в приміщенні ($t = 50^\circ\text{C}$).

2. Для повітря при температурі $t = 50^\circ\text{C}$ з таблиці 1Д знаходимо такі теплофізичні характеристики: кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 17,95 \cdot 10^{-6}$ м²/с; коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 2,83 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К); коефіцієнт об'ємного розширення $\beta = 1/(t + 273) = 1/(50 + 273) = 3,1 \cdot 10^{-3}$ 1/К; число Прандтля $Pr = 0,698$; поправка на змінність фізичних властивостей для газів (Pr/Pr_c) = 1.

3. Розраховуємо значення комплексу $Gr Pr$ (добуток числа Грасгофа (Gr) на число Pr):

$$Gr Pr = g d^3 \beta (t_c - t) Pr / \nu^2 = 9,8 \cdot 0,2^3 \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot (150 - 50) \cdot 0,698 / (17,95 \cdot 10^{-6})^2 = 5,27 \cdot 10^7$$

4. Оскільки комплекс $Gr Pr < 10^9$, то для визначення числа Нуссельта (Nu), беремо наступне рівняння (п.6 табл. 7.1 [4]):

$$Nu = 0,5 (Gr Pr)^{0,25} = 0,5 (5,27 \cdot 10^7)^{0,25} = 42,6$$

5. Коефіцієнт тепловіддачі α обчислюємо за формулою (2.4)
 $\alpha = Nu \cdot \lambda / d = 42,6 \cdot 2,83 \cdot 10^{-2} / 0,2 = 6,03$ Вт/(м²·К)

6. Визначаємо втрати теплоти Q від паропроводу в приміщення при вільній конвекції за формулою (2.1)

$$Q = \alpha F (t_c - t) = \alpha \pi d l (t_c - t) = 6,03 \cdot 3,14 \cdot 0,2 \cdot 20 (150 - 50) = 7574 \text{ Вт.}$$

Відповідь: втрати теплоти від паропроводу в приміщення $Q = 7574$ Вт.

Задача 4 для самостійної роботи. В приміщенні, де температура повітря t , °С, розміщений горизонтальний паропровід із круглої труби зовнішнім діаметром d , мм і довжиною l , м. Температура зовнішньої поверхні труби t_c , °С. Визначити втрати теплоти від паропроводу в приміщення при вільній конвекції (тепловим випромінюванням знехтувати). Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.4.1.

Таблиця 3.4.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ Вар	$t, ^\circ\text{C}$	$d, \text{мм}$	$l, \text{м}$	$t_c, ^\circ\text{C}$	№ Вар	$t, ^\circ\text{C}$	$d, \text{мм}$	$l, \text{м}$	$t_c, ^\circ\text{C}$
1	50	100	30	150	16	20	125	25	80
2	45	125	25	140	17	15	150	30	70
3	40	150	20	130	18	10	175	25	160
4	35	175	15	120	19	45	200	20	150
5	30	200	10	110	20	50	225	15	140
6	25	225	15	100	21	40	250	10	130
7	20	250	20	90	22	35	300	15	120
8	15	300	25	80	23	30	250	20	110
9	10	250	30	70	24	25	225	25	100
10	50	225	25	140	25	20	200	30	90
11	45	200	20	130	26	15	175	25	80
12	40	175	15	120	27	10	150	20	70
13	35	150	10	110	28	50	125	15	160
14	30	125	15	100	29	40	100	10	150
15	25	100	20	90	30	30	125	30	140

3.5 Приклад 5.

По трубці з внутрішнім діаметром $d = 8 \text{ мм}$ і довжиною $l > 50d$ рухається вода зі швидкістю $w = 1,2 \text{ м/с}$. Температура поверхні трубки $t_{\text{ст}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$, середня температура води в трубці $t_w = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки трубки до води і середню по довжині трубки густину теплового потоку.

Розв'язання:

1. По таблиці 3Д визначаємо при середній температурі води в трубці $t_w = 30^\circ\text{C}$ такі її теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності $\lambda_w = 0,612$ Вт/(м·К); кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu_w = 0,805 \cdot 10^{-6}$ м²/с; число Прандтля $Pr_w = 5,45$; число Прандтля $Pr_{ст} = 1,97$ для води при $t_{ст} = 90^\circ\text{C}$.

2. Визначаємо число Рейнольдса за формулою (2.5)

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{1,2 \cdot 0,008}{0,805 \cdot 10^{-6}} = 1,19 \cdot 10^4$$

3. Оскільки число Рейнольдса $Re > 10^4$, то режим руху води – турбулентний. Тоді критерій Нуссельта Nu розраховуємо з наступного критеріального рівняння (п.6 табл. 6.2 [4])

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_w}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l = \\ = 0,021 \cdot (1,19 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot 5,45^{0,43} \cdot \left(\frac{5,45}{1,97}\right)^{0,25} \cdot 1 = 101,$$

де $\varepsilon_l = 1$ при $\frac{l}{d} > 50$.

4. Коефіцієнт тепловіддачі α обчислюємо за формулою (2.4)

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} = 101 \cdot \frac{0,612}{0,008} = 7727 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

5. Середня по довжині трубки густина теплового потоку:

$$q_l = \alpha p d (t_{ст} - t_w) = 7727 \cdot 3,14 \cdot 0,008 \cdot (90 - 30) = 11646 \text{ Вт}/\text{м}.$$

Відповідь: коефіцієнт тепловіддачі від стінки трубки до води $\alpha = 7727$ Вт/(м²·К); середня по довжині трубки густина теплового потоку $q_l = 11646$ Вт/м.

Задача 5 для самостійної роботи. По трубці з внутрішнім діаметром d , мм і довжиною $l > 50d$ рухається вода зі швидкістю w , м/с. Температура поверхні трубки $t_{ст}$, °С, середня температура води в трубці t_w , °С. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки трубки до води і середню по довжині трубки густину теплового потоку. 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 «Конвективний теплообмін»)»

Таблиця 3.5.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ варіанту	$d, \text{мм}$	$w, \text{м/с}$	$t_{\text{ст}}^{\circ\text{C}}$	$t_w^{\circ\text{C}}$	№ варіанту	$d, \text{мм}$	$w, \text{м/с}$	$t_{\text{ст}}^{\circ\text{C}}$	$t_w^{\circ\text{C}}$
1	8	1,2	90	30	16	9,6	2,7	90	28
2	8,2	1,3	92	31	17	9,7	2,8	91	29
3	8,3	1,4	93	32	18	9,8	2,9	92	30
4	8,4	1,5	94	33	19	9,9	3,0	93	31
5	8,5	1,6	95	34	20	10,0	2,9	94	32
6	8,6	1,7	96	35	21	7,9	1,1	95	33
7	8,7	1,8	97	36	22	7,8	1,0	94	34
8	8,8	1,9	98	37	23	7,7	0,95	93	35
9	8,9	2,0	99	38	24	7,6	0,93	92	34
10	9,0	2,1	91	30	25	7,5	0,91	91	33
11	9,1	2,2	89	29	26	7,4	0,90	90	32
12	9,2	2,3	88	28	27	7,3	0,88	89	31
13	9,3	2,4	87	27	28	7,2	0,86	88	30
14	9,4	2,5	86	26	29	7,1	0,84	87	29
15	9,5	2,6	85	25	30	7,0	0,82	86	28

3.6 Приклад 6.

На зовнішній поверхні вертикальної труби діаметром $d = 20$ мм і висотою $H = 2$ м конденсується суха насичена водяна пара при тиску $p = 0,1$ МПа. Температура поверхні труби $t_{ст} = 94,5$ °С. Визначити середній по висоті коефіцієнт тепловіддачі від пари до труби і кількість пари, яка конденсується на поверхні труби.

Розв'язання:

1. З таблиці фізичних властивостей водяної пари на лінії насичення (табл. 2Д) при тиску $p = 0,1$ МПа визначаємо температуру насичення пари $t_n = 99,62$ °С і питому теплоту пароутворення $r = 2257,5$ кДж/кг

2. При $t_n = 99,62$ °С з таблиці (табл. 12Д [4]) знаходимо значення комплексів фізичних величин для розрахунку тепловіддачі при конденсації водяної пари $A=51,18$ (м·К)⁻¹ і $B=0,00625$ м/Вт

3. Визначаємо приведену висоту труби за формулою (п.13 табл.8.1 [4])

$$Z = \Delta t \cdot H \cdot A = (99,62 - 94,5) \cdot 2 \cdot 51,18 = 524 < 2300,$$

тобто режим руху плівки ламінарний.

4. Обчислюємо значення числа Рейнольдса Re для ламінарного режиму течії плівки конденсату за формулою (п.13 табл.8.1 [4]) $Re_e = 3,8 \cdot z^{0,78} = 3,8 \cdot 524^{0,78} = 500$

5. Визначаємо середній по висоті коефіцієнт тепловіддачі α від пари до труби при плівковій конденсації пари на вертикальній поверхні і ламінарному режимі течії по рівнянню (п.13 табл.8.1 [4])

$$\alpha = \frac{R_e}{\Delta t \cdot H \cdot B} = \frac{502}{(99,62 - 94,5) \cdot 2 \cdot 0,00625} = 7844 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

6. Кількість пари G , яка сконденсується на поверхні труби:

$$G = \pi d H \frac{\alpha \Delta t}{r} = 3,14 \cdot 0,02 \cdot 2 \frac{7884(99,62-94,5)}{2257,5 \cdot 10^3} = 2,23 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{с}.$$

Відповідь: середній по висоті коефіцієнт тепловіддачі від пари до труби $\alpha = 7844$ Вт/(м² · К); кількість пари, яка конденсується на поверхні труби $G = 2,23 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Задача 6 для самостійної роботи. На зовнішній поверхні вертикальної труби діаметром d , мм і висотою H , м конденсується суха насичена водяна пара при тиску p , МПа. Температура поверхні труби $t_{ст}$ °С. Визначити середній по висоті коефіцієнт тепловіддачі від пари до труби і кількість пари, яка конденсується на поверхні труби. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.6.1.

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

Таблиця 3.6.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ варіанту	d, мм	H, м	p, МПа	t_{ст} °C	№ варіанту	d, мм	H, м	p, МПа	t_{ст} °C
1	20	2,8	0,11	94,5	16	35	1,3	0,094	86
2	21	2,7	0,105	95	17	36	1,3	0,095	87
3	22	2,6	0,100	94	18	37	1,4	0,096	88
4	23	2,5	0,099	93	19	38	1,5	0,097	89
5	24	2,4	0,098	92	20	39	1,6	0,098	90
6	25	2,3	0,097	91	21	40	1,7	0,099	91
7	26	2,2	0,096	90,5	22	38	1,8	0,10	92
8	27	2,1	0,095	90	23	36	1,9	0,102	92,5
9	28	2,0	0,094	89,5	24	35	2,0	0,103	93
10	29	1,9	0,093	89	25	32	2,1	0,104	93,5
11	30	1,8	0,092	88,5	26	30	2,2	0,105	94
12	31	1,7	0,090	88	27	28	2,4	0,106	94,5
13	32	1,6	0,091	87,5	28	26	2,6	0,107	95
14	33	1,5	0,092	87	29	24	2,8	0,108	95,5
15	34	1,4	0,093	86,5	30	22	3,0	0,109	96

3.7 Приклад 7.

Над горизонтальною поверхнею води рухається повітря зі швидкістю $w = 3$ м/с. Протяг поверхні уздовж потоку $l = 0,1$ м. Температура води на поверхні $t_w = 15^\circ\text{C}$, температура повітря $t_{нов} = 20^\circ\text{C}$. Визначити кількість води, яка випаровується за 1 годину з 1 м^2 поверхні, а також густину теплового потоку, який передається від води до повітря.

Розв'язання:

1. За таблицею 1Д визначаємо при температурі повітря $t_{нов} = 20^\circ\text{C}$ наступні його теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності

$\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К); кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с; число Прандтля $Pr = 5,45$.

2. За таблицею 2Д при температурі води на поверхні $t_w = 15^\circ\text{C}$ тиск насиченої водяної пари буде $p_{н} = 1703$ Па; теплота пароутворення $r = 2465,6$ кДж/кг, парціальний тиск водяної пари $p_{п} = 800$ Па.

3. Визначаємо число Рейнольдса Re за формулою (2.5)

$$Re = \frac{wl}{\nu} = \frac{3 \cdot 0,1}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 19920$$

4. Оскільки число Рейнольдса $Re < 10^5$, то режим руху повітря – ламінарний. Тоді критерій Нуссельта Nu розраховуємо з наступного критеріального рівняння (п.1 табл. 6.1 [4]):

$$Nu = 0,67 Re^{0,5} Pr^{0,33} = 0,67(19920)^{0,5} \cdot (0,703)^{0,33} = 82,9 \quad (3.7.1)$$

5. Коефіцієнт тепловіддачі α обчислюємо за формулою (2.4)

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l} = 8,29 \frac{2,59 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 21,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (3.7.2)$$

6. Визначаємо коефіцієнт дифузії D

$$D = \frac{2,1}{p_{п}} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,89} = \frac{2,1}{800} \left(\frac{293}{273}\right)^{1,89} = 2,39 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$

7. Дифузійне число Прандтля розраховуємо за формулою:

$$Pr_D = \frac{\nu}{D} = \frac{15,06 \cdot 10^{-6}}{2,39 \cdot 10^{-5}} = 0,63$$

8. Відповідно по аналогії з теплообміном обчислюємо число Нуссельта Nu_D при масообміні між водою і повітрям за формулою (3.7.1):

$$Nu_D = 0,67 Re^{0,5} Pr_D^{0,33} = 0,67(19920)^{0,5} (0,63)^{0,33} = 79,98$$

9. Коефіцієнт масообміну β між водою і повітрям визначаємо по аналогії з теплообміном за формулою (3.7.2):

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

$$\beta = Nu_D \frac{D}{l} = 79,98 \frac{2,39 \cdot 10^{-5}}{0,1} = 1,91 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$$

10. Густина потоку j маси води, яка випаровується

$$j = \frac{\beta}{R_n T} (p_n - p_n) = \frac{1,91 \cdot 10^{-2}}{462 \cdot 293} (1703 - 800) = 1,267 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$$

11. Кількість води M , яка випаровується за 1 годину з 1 м² поверхні води

$$M = jr = 1,267 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 = 0,456 \text{ кг/м}^2$$

12. Густина теплового потоку q , який передається від води до повітря

$$q = q_\beta + q_\alpha = rj - \alpha(t_{\text{пов}} - t_w) = 2466 \cdot 10^3 \cdot 1,267 \cdot 10^{-4} - 21,5(20 - 15) = 205 \text{ Вт/м}^2$$

Відповідь: кількість води, яка випаровується за 1 годину з 1 м² поверхні води $M = 0,456 \text{ кг/м}^2$; густина теплового потоку, який передається від води до повітря $q = 205 \text{ Вт/м}^2$.

Задача 7 для самостійної роботи. Над горизонтальною поверхнею води рухається повітря зі швидкістю w , м/с. Протяг поверхні уздовж потоку l , м. Температура води на поверхні t_w , С, температура повітря $t_{\text{пов}}$, С. Визначити кількість води, яка випаровується за 1 годину з 1 м² поверхні, а також густину теплового потоку, який передається від води до повітря. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.7.1.

Таблиця 3.7.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ варіанту	w , м/с	l , м	t_w , С	$t_{\text{пов}}$, °С	№ варіанту	w , м/с	l , м	t_w , С	$t_{\text{пов}}$, °С
1	3,3	0,12	15	20	16	2,1	0,12	30	35
2	3,2	0,11	16	21	17	2,2	0,11	29	35
3	3,1	0,10	17	22	18	2,3	0,10	28	34
4	3,0	0,22	18	24	19	2,4	0,09	27	31
5	2,9	0,21	19	25	20	2,5	0,08	26	30
6	2,8	0,20	20	26	21	2,6	0,12	25	29
7	2,7	0,19	21	28	22	2,7	0,13	24	28
8	2,6	0,18	22	27	23	2,8	0,14	23	27
9	2,5	0,17	23	28	24	2,9	0,15	22	26
10	2,4	0,16	24	29	25	3,0	0,16	21	25
11	2,3	0,15	25	30	26	3,1	0,15	20	24

№ варіанту	w , м/с	l , м	t_w , С	$t_{нов}$, °С	№ варіанту	w , м/с	l , м	t_w , С	$t_{нов}$, °С
12	2,2	0,14	26	31	27	3,2	0,14	19	23
13	2,1	0,13	27	32	28	3,3	0,13	18	22
14	2,0	0,14	28	33	29	3,4	0,12	17	21
15	2,2	0,13	29	34	30	3,3	0,11	16	20

3.8 Приклад 8.

В паровому котлі при температурі його стінки $t_c = 190^\circ\text{C}$ кипить вода при тиску $p = 9,8$ бар. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і питомий тепловий потік від стінки котла до киплячої води.

Розв'язання:

1. З таблиці теплофізичних властивостей водяної пари (табл. 2Д) при тиску $p = 9,8$ бар знаходимо значення температури насичення $t_n = 179^\circ\text{C}$.

2. Коефіцієнт тепловіддачі α при пазирковому кипінні води у великому об'ємі розраховуємо за наступним рівнянням (п. 6 табл. 9.1 [4]):

$$\alpha = 38,7(t_c - t_n)^{2,33} p^{0,5} = 38,7 (190 - 179)^{2,33} \cdot 9,8^{0,5} = 32342 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

3. Питомий тепловий потік q визначаємо за формулою (2.2)

$$q = \alpha(t_c - t_n) = 32342 (190 - 179) = 355162 \text{ Вт}/\text{м}^2 \approx 355 \text{ кВт}/\text{м}^2.$$

Відповідь: Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 32342 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, питомий тепловий потік $q \approx 355 \text{ кВт}/\text{м}^2$.

Задача 8 для самостійної роботи. В паровому котлі при температурі його стінки t_c , °С кипить вода при тиску p , бар. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і питомий тепловий потік від стінки котла до киплячої води. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.8.1.

Таблиця 3.8.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ варіанту	t , °С	p , бар	№ варіанту	t , °С	p , бар
1	150	3,5	1	200	12,4
2	160	4,5	2	190	9,7
3	170	6,0	3	180	7,7
4	180	7,8	4	170	5,9

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

№ варіанту	<i>t</i> , °C	<i>p</i> , бар	№ варіанту	<i>t</i> , °C	<i>p</i> , бар
5	190	9,6	5	160	4,7
6	200	12,3	6	150	3,4
7	210	15,0	7	160	4,6
8	220	19,0	8	170	5,8
9	230	23,0	9	180	7,6
10	240	27,7	10	190	9,5
11	250	33,0	11	200	12,5
12	240	27,8	12	210	15,2
13	230	22,8	13	220	18,7
14	220	18,8	14	230	22,7
15	210	15,4	15	240	27,6

Додаток
Таблиця 1Д

Теплофізичні властивості сухого повітря при В = 760 мм рт. ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda \times 10^2, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\alpha \times 10^5, \text{м}^2/\text{с}$	$\text{m} \times 10^6, \text{н} \times \text{с/м}^2$	$\nu \times 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,2	14,9	15,7	10,8	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	13,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,06	1,005	2,9	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,1	0,69
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,8	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26	34,85	0,68
250	0,674	1,038	4,27	61	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,6	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,5	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,21	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

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

Таблиця 2Д

Теплофізичні властивості водяної пари на лінії насичення										
t, °C	$P \cdot 10^{-5}$, Па	ρ'' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·K)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·K)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м ²	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,0061	0,00485	2501,0	2501,0	1,86	1,61	1790	8,75	1805	1,02
10	0,0123	0,00940	2519,4	2477,4	1,86	1,69	968	9,15	973,7	1,00
20	0,0234	0,0173	2537,7	2453,8	1,86	1,76	548	9,50	549,4	1,00
30	0,0424	0,0304	2555,9	2430,2	1,87	1,84	268	9,80	266,7	1,00
40	0,0737	0,0512	2574,0	2406,5	1,88	1,93	201	10,30	201,4	1,00
50	0,1234	0,0830	2591,8	2382,5	1,91	2,01	127	10,75	129,4	1,02
60	0,1992	0,130	2609,5	2358,4	1,93	2,10	83,5	11,20	86,0	1,03
70	0,3116	0,198	2626,8	2333,8	1,96	2,20	56,8	11,65	58,8	1,04
80	0,4736	0,293	2643,8	2308,9	1,98	2,30	39,6	11,85	41,1	1,04
90	0,7011	0,423	2660,3	2283,4	2,02	2,35	27,4	11,90	29,4	1,07
100	1,013	0,597	2676,3	2257,2	2,14	2,37	18,58	12,27	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,18	2,49	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,21	2,59	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,26	2,69	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,32	2,79	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,40	2,88	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,48	3,01	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,58	3,13	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,71	3,27	2,339	15,11	2,93	1,25

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

t, °C	$\rho \cdot 10^{-5}$, Па	ρ'' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	r, кДж/кг	c_p , кДж/(кг·K)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·K)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м ²	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,86	3,42	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,02	3,55	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,20	3,72	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,41	3,90	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,63	4,09	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,0	1766	3,88	4,29	0,658	17,75	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801	1716	4,16	4,52	0,544	18,24	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796	1661	4,47	4,80	0,453	18,83	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2790	1604	4,82	5,12	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2780	1543	5,23	5,49	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766	1476	5,69	5,83	0,261	20,59	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749	1404	6,28	6,27	0,216	21,28	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727	1325	7,12	6,84	0,176	21,97	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700	1238	8,21	7,51	0,141	22,85	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2666	1140	9,88	8,26	0,108	23,93	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2622	1027	12,35	9,30	0,0811	25,20	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564	893	16,24	10,70	0,0581	26,58	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481	720	23,03	12,79	0,0386	29,13	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2331	438	56,52	17,10	0,0150	33,73	0,166	11,10

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

Таблиця 3Д

Теплофізичні властивості води на лінії насичення

t, °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	ρ , кг/м ³	i , кДж/кг	c_p , Дж/(кг*К)	λ , Вт/(м*К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Н*с/м ²	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, 1/К	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	1,013	999,9	0	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	-0,63	756,4	13,5
10	1,013	999,7	42,04	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	+0,70	741,6	9,45
20	1,013	998,2	83,91	4,183	0,597	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,03
30	1,013	995,7	125,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21	712,2	5,45
40	1,013	992,2	167,5	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87	696,5	4,36
50	1,013	988,1	209,3	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	4,49	676,9	3,59
60	1,013	983,1	251,1	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	5,11	662,2	3,03
70	1,013	977,8	293,0	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	5,70	643,5	5,28
80	1,013	971,8	335,0	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	6,32	625,9	2,23
90	1,013	965,3	377,0	4,208	0,676	16,5	314,9	0,326	6,95	607,2	1,97
100	1,013	958,4	419,1	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	0,685	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	0,686	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	0,686	17,3	217,8	0,233	9,19	528,8	1,35
140	3,61	926,1	589,1	4,287	0,685	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	0,684	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	0,681	17,8	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,2	719,3	4,380	0,676	17,2	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,03

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

t, °C	$\rho \cdot 10^{-5}$, Па	ρ , кг/м ³	i, кДж/кг	c_p , кДж/(кг·K)	λ , Вт/(м·K)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м ²	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, 1/K	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
190	12,55	876,0	807,8	4,459	0,664	17,2	144,2	0,165	12,6	400,2	0,965
200	15,55	863,0	852,5	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,932
210	19,08	852,8	897,7	4,555	0,649	16,7	130,5	0,153	14,1	354,1	0,915
220	23,20	840,3	943,7	4,614	0,640	16,5	124,6	0,148	14,8	331,6	0,898
230	27,98	827,3	990,2	4,681	0,629	16,3	119,7	0,145	15,9	310,0	0,888
240	33,48	813,6	1037,5	4,76	0,617	16,0	114,8	0,141	16,8	285,5	0,883
250	39,78	799,0	1085,7	4,87	0,605	15,5	109,0	0,137	18,1	261,9	0,884
260	46,94	784,0	1135,7	4,98	0,593	15,2	105,9	0,135	19,7	237,4	0,892
270	55,05	767,9	1185,3	5,12	0,578	14,7	102,0	0,133	21,6	214,8	0,905
280	64,19	750,7	1236,8	5,30	0,565	14,3	98,1	0,131	23,7	191,3	0,917
290	74,45	732,3	1290,0	5,50	0,548	13,7	94,2	0,129	26,2	168,7	0,944
300	85,92	712,5	1344,9	5,76	0,532	13,0	91,2	0,128	29,2	144,2	0,986
310	98,70	691,1	1402,2	6,11	0,514	12,2	88,3	0,128	32,9	120,7	1,05
320	112,90	667,1	1462,1	6,57	0,494	11,3	85,3	0,128	38,2	98,10	1,14
330	128,65	640,2	1526,2	7,25	0,471	10,2	81,4	0,127	43,3	76,71	1,25
340	146,08	610,1	1594,8	8,20	0,446	8,95	77,5	0,127	53,4	56,70	1,42
350	165,37	574,4	1671,4	10,10	0,431	7,90	72,6	0,126	66,8	38,16	1,70
360	186,74	528,0	1761,5	14,65	0,367	4,2	66,7	0,126	109	20,21	2,66
370	210,53	450,5	1892,5	40,32	0,338	1,85	56,9	0,126	264	4,709	6,80

Перелік джерел посилання

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. Димо Б. В. Практикум з тепломасообміну: навч. посіб. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 136 с.

ДЛЯ НОТАТОК

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 «Конвективний теплообмін»)»**

Методичні вказівки

Випуск 439

Редактор *О. Михайлова*

Комп'ютерна верстка, дизайн обкладинки *К. Гросу-Грбарчук*
Друк *С. Волинець*. Фальцовально-палітурні роботи *О. Мішалкіна*.

Підписано до друку 02.05.2024.

Формат 60x841 /16. Папір офсет.

Гарнітура «Times New Roman». Друк ризограф.

Ум. друк. арк. 2,5. Обл.-вид. арк. 1,4.

Тираж 50 пр. Зам. № 6791.

Видавець 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 05.04.2018