

Міністерство освіти і науки України
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Методична серія. Випуск 460

Заснована в 2016 році

О. В. Щесюк, О. Ф. Прищепов, В. М. Шенкевич

**Основи термодинаміки, теплотехніки та
гідрогазодинаміки
(розділ «Променистий теплообмін»)**

Методичні вказівки



Миколаїв – 2025

Рекомендовано до друку кафедрою автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Чорноморського національного університету імені Петра Могили (протокол № 6 від 26 січня 2024 р).

Рецензент:

І. О. Калініна, доктор технічних наук, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем ЧНУ імені Петра Могили.

Щесюк О. В.

Щ 69 Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Променистий теплообмін») : метод. вказівки / О. В. Щесюк, О. Ф. Прищепов, В. М. Шенкевич. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ імені Петра Могили, 2025. – 40 с. – (Методична серія ; вип. 460).

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

УДК 536. 24

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. Променистий теплообмін	8
2.1 Основні положення і визначення	8
2.2 Основні закони випромінювання абсолютно чорного тіла.....	13
2.3 Випромінювання реальних тіл. Закон Кірхгофа	16
2.4 Оптична пірометрія	19
3. Приклади розв'язання задач і задачі для самостійної роботи.....	22
3.1 Приклад 1.....	22
3.2 Приклад 2.....	23
3.3 Приклад 3.....	24
3.4 Приклад 4.....	26
3.5 Приклад 5.....	29
Додаток	34
Перелік джерел посилання	38

Список основних позначень

α – коефіцієнт теплообміну (коефіцієнт тепловіддачі), Вт/(м²·К);
 β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹;
 ε – коефіцієнт теплового випромінювання матеріалу (ступінь чорноти);
 λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К) або довжина хвилі, мкм;
 μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;
 ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с;
 ρ – густина, кг/м³;
 a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;
 A – коефіцієнт поглинання;
 c – теплоємність, Дж/(кг·К);
 d – діаметр, м;
 E – поверхнева щільність (густина) теплового потоку випромінювання, Вт/м²;
 E_λ – спектральна інтенсивність випромінювання, Вт/м³;
 F – площа поверхні, м²;
 Gr – число (критерій) Грасгофа;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 H – висота, м;
 l – довжина;
 Nu – число (критерій) Нуссельта;
 Pr – число (критерій) Прандтля;
 Q – тепловий потік, Вт;
 q – питомий тепловий потік, Вт/м²;
 T – абсолютна температура, К;
 $t_{\text{пов}}$ – температура повітря, °С;
 $t_{\text{ст}}$ – температура стінки, °С;
 Δt – температурний напір (різниця температур), °С.

ВСТУП

Більшість сучасних автоматизованих виробництв супроводжуються теплотехнічними процесами, від правильного ведення яких залежить якість продукції, охорона навколишнього середовища і створення безвідходних технологій. У зв'язку з цим значно зростає роль теплотехніки як науки. Вивчення процесів переносу теплоти і роботи в теплоенергетичному обладнанні наведено в курсах термодинаміки, теплотехніки та гідромеханіки [1-3]. При створенні різноманітного теплотехнічного обладнання необхідно виконувати теплові розрахунки. Саме основам розрахункових досліджень з променистого теплообміну присвячена робота авторів даного видання.

Виконання методичних вказівок з променистого теплообміну визначено навчальним планом спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» при вивченні дисципліни «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки».

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

Додаток містить довідковий матеріал у вигляді таблиць 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 методичними вказівками.

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 **5 задач** відповідно варіанту. Номер варіанта визначається залежно від номера студента по списку у журналі обліку. Наприклад, якщо в журналі студента записано під номером 10 по списку, то його варіант – 10.

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 буквену 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 наведені в одиницях СІ. Співвідношення між одиницями різних систем наведені в таблиці 3Д в Додатку. Для розв'язання задач в СІ всі дані, які наведені 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 одразу, як тільки замість буквених позначень підставляються числа, треба писати найменування одиниці фізичної величини. 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;
- перелік джерел посилання.

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 ДСТУ 3008.

Вибір теплофізичних властивостей, використання формул, запозичених із літературних джерел, мають супроводжуватися посиланнями на літературу, список якої подається в кінці звіту. Оформлення переліку джерел посилання згідно з ДСТУ 8302. 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. Променистий теплообмін

2.1 Основні положення і визначення

Променистий теплообмін (*теплове випромінювання, радіаційний теплообмін*) – спосіб перенесення теплоти в просторі, здійснюваний в результаті поширення електромагнітних хвиль, енергія яких при взаємодії з речовиною переходить в тепло. Радіаційний теплообмін пов'язаний з перетворенням енергії і відбувається в три етапи:

- спочатку внутрішня енергія тіла перетворюється на енергію електромагнітного випромінювання (енергію фотонів);
- потім промениста енергія переноситься електромагнітними хвилями в просторі, які в однорідному й ізотропному середовищі та у вакуумі поширюються прямолінійно із швидкістю світла (у вакуумі швидкість світла дорівнює $3 \cdot 10^8$ м/с), підкоряючись оптичним законам заломлення, поглинання і відбивання;
- після перенесення енергії електромагнітними хвилями відбувається другий перехід променистої енергії у внутрішню енергію тіла шляхом поглинання фотонів.

Тепловому випромінюванню відповідає інтервал довжин хвиль $\lambda = 0,4 \div 25$ мкм ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$), оскільки основна доля променистої енергії в теплотехнічних агрегатах передається саме в цьому діапазоні довжин хвиль. При цьому видимі світлові промені мають довжину хвилі $\lambda = 0,4 \div 0,8$ мкм, а до інфрачервоного випромінювання відносять діапазон довжин хвиль $\lambda = 0,8 \div 1000$ мкм.

Особливості радіаційного теплообміну:

- випромінюють енергію всі тіла (тверді тіла, рідини і променевопрозорі гази) з температурою вище 0 К;
- для передачі теплоти випромінюванням не потрібний тілопосередник, тобто промениста енергія може передаватися і у вакуумі;
- при температурах до 100°C промениста і конвективна (при вільній конвекції) складові теплообміну мають один порядок. У високотемпературних енергетичних (наприклад, парогенераторах) і високотемпературних теплотехнологічних (наприклад, металургійних печах) агрегатах променистий теплообмін є домінуючим (до 100%) в сумарному теплопереносі від гарячого теплоносія до споживача теплової енергії;
- розрізняють поверхневе випромінювання (тверді тіла) і об'ємне випромінювання (променевопрозорі гази).

Спектром випромінювання називають розподіл променистої енергії по довжині хвилі $E_\lambda = f(\lambda)$, де E_λ , Вт/м³, спектральна інтенсивність випромінювання тіла. У більшості твердих тіл спектри суцільні. В газів і полірованих металів спектри *лінійчаті* або *селективні*.

З погляду радіаційного теплообміну розрізняють два типи поверхонь: *дифузні* і *дзеркальні* поверхні. Дифузні поверхні розкладають все падаюче на них випромінювання в межах півсфери. У дзеркальних поверхонь кут падіння променя дорівнює куту його відбивання.

Параметри і характеристики теплового випромінювання

Як і будь-який інший спосіб перенесення теплоти, теплообмін випромінюванням характеризується *температурним полем* системи тіл, що беруть участь у радіаційному теплообміні (Т), і *тепловими потоками* випромінювання (Q, Вт) або поверхневою щільністю теплових потоків випромінювання (E, Вт/м²). Окрім цього, тілам, що беруть участь у радіаційному теплообміні, приписують деякі специфічні властивості, звані *радіаційними характеристиками* або *радіаційними властивостями* тіла.

Потоком випромінювання (Q, Вт) називають кількість променистої енергії, що проходить через задану поверхню площею S в *одиницю* часу.

Поверхневою щільністю потоку випромінювання (E, Вт/м²) називають кількість променистої енергії, що проходить через задану *одиничну* поверхню в *одиницю* часу. У розрахунках радіаційного теплообміну прийняті наступні позначення:

- $Q_{\text{пад}}$ і $E_{\text{пад}}$ – потік і густина потоку випромінювання, що падають на поверхню тіла;
- $Q_{\text{відб}}$ і $E_{\text{відб}}$ – потік і густина потоку випромінювання, відбиті від поверхні тіла;
- $Q_{\text{погл}}$ і $E_{\text{погл}}$ – потік і густина потоку випромінювання поглинені тілом;
- $Q_{\text{проп}}$ і $E_{\text{проп}}$ – потік і густина потоку випромінювання, що пропускаються тілом;
- $Q_{\text{вл}}$ і $E_{\text{вл}}$ – потік і густина потоку власного випромінювання тіла;
- $Q_{\text{еф}}$ і $E_{\text{еф}}$ – потік і густина потоку ефективного випромінювання тіла;
- $Q_{\text{рез}}$ і $E_{\text{рез}}$ – потік і густина потоку результуючого випромінювання тіла.

До радіаційних характеристик тіла відносять *поглинальну*, *відбивну* і *пропускну* здібності тіла, спектральну і інтегральну *ступінь чорноти* і *кутову ступінь чорноти*.

Поглинальна, відбивна і пропускна здатності

Для розгляду фізичного сенсу поглинальної, відбивної і пропускної властивостей тіла розглянемо напівпрозоре тіло, на поверхню якого падає потік випромінювання $Q_{\text{пад}}$ (рис. 2.1). Вочевидь, що для будь-якого напівпрозорого тіла із закону збереження енергії виходить

$$Q_{\text{погл}} + Q_{\text{відб}} + Q_{\text{проп}} = Q_{\text{пад}} \quad (2.1)$$

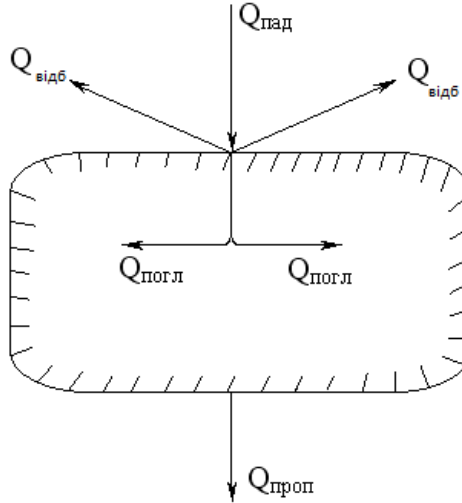


Рисунок 2.1 – Схема радіаційного теплообміну для напівпрозорого тіла

Розділивши ліву та праву частини рівності (2.1) на потік падаючого випромінювання, отримаємо

$$\frac{Q_{\text{погл}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{відб}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{проп}}}{Q_{\text{пад}}} = \frac{Q_{\text{пад}}}{Q_{\text{пад}}} \quad \text{або} \quad A + R + D = 1, \quad (2.2)$$

де $A = Q_{\text{погл}} / Q_{\text{пад}}$ – поглинальна здатність тіла, рівна долі падаючого випромінювання, поглиненого тілом;

$R = Q_{\text{відб}} / Q_{\text{пад}}$ – відбивна здатність тіла, рівна долі падаючого випромінювання, відбитого тілом;

$D = Q_{\text{проп}} / Q_{\text{пад}}$ – пропускна здатність тіла, рівна долі падаючого випромінювання, що проходить через тіло.

Залежно від числового значення A , R і D розрізняють *абсолютно чорні*, *абсолютно білі* та *променевопрозорі* або *діатермічні* тіла.

Тіло, яке поглинає все падаюче на нього випромінювання, називають *абсолютно чорним тілом* (АЧТ). Потік і густину потоку власного випромінювання АЧТ позначають Q_0 і E_0 відповідно. В абсолютно чорного тіла: $A = 1$, $R = D = 0$.

Тіло, яке *дифузно* відбиває все падаюче на нього випромінювання називають *абсолютно білим тілом*. В абсолютно білого тіла: $R = 1$, $A = D = 0$.

Тіло, яке пропускає все падаюче на нього випромінювання, називають *променевопрозорим* або *діатермічним*. Для діатермічного тіла: $D = 1$, $A = R = 0$

Вищезгаданих ідеальних тіл в природі не існує. Проте деякі реальні тіла за своїми радіаційними властивостями близькі до ідеальних. Наприклад, у сажі і окисленої шорсткої сталі $A \rightarrow 1$, в полірованих металів $R \rightarrow 1$, в двоатомних газів з симетричними молекулами (N_2 , O_2) і в сухого повітря $D \rightarrow 1$.

У непрозорих тіл: $D = 0$, $A + R = 1$. В газів: $R = 0$, $A + D = 1$.

Види променистих потоків

Випромінювання тіла, обумовлене його тепловим станом (мірою нагрятості), називають власним випромінюванням цього тіла. Потік власного випромінювання позначають $Q_{вл}$ або буквою Q без нижнього індексу. Щільність потоку власного випромінювання позначають

$$E_{вл} = \frac{dQ_{вл}}{dF} \quad \text{або} \quad E = \frac{dQ}{dF}, \quad \frac{Вт}{м^2} \quad (2.3)$$

і називають *випромінювальною здатністю* тіла. У величині $E_{вл}$ вміщена вся енергія, що випромінюється тілом в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0 \div \infty$, тобто енергія випромінювання всього спектру.

Долю випромінювальної здатності, вміщену в нескінченно малому спектральному діапазоні довжин хвиль називають *спектральною густиною потоку власного випромінювання* або *спектральною випромінювальною здатністю* тіла і позначають

$$E_\lambda = \frac{d^2Q}{dF \cdot d\lambda} = \frac{dE}{d\lambda}, \quad \frac{Вт}{м^3} \quad (2.4)$$

Знаючи функцію розподілу $E_\lambda = f(\lambda)$, випромінювальну здатність тіла E можна розрахувати, проінтегрувавши цю функцію по всьому спектру випромінювання:

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda \quad (2.5)$$

Тому випромінювальну здатність тіла також називають *інтегральною густиною* потоку власного випромінювання.

Далі розглянемо схему радіаційного теплообміну, зображену на рис. 2.2. На непрозоре тіло падає променистий потік $Q_{\text{пад}}$. Одна частина теплового потоку в кількості $Q_{\text{погл}}$ поглинається тілом, а інша – в кількості $Q_{\text{відб}}$ тілом відбивається. Тіло має і власне випромінювання $Q_{\text{вл}}$ або Q .

Радіаційний тепловий потік, що вирушає з поверхні тіла, рівний сумі власного і відбитого теплових потоків, називають ефективним тепловим потоком і позначають $Q_{\text{еф}}$. Ефективний тепловий потік за визначенням рівний:

$$Q_{\text{еф}} = Q_{\text{вл}} + Q_{\text{відб}} \quad (2.6)$$

Тепловий потік, що змінює тепловий стан тіла, називають результуючим тепловим потоком і позначають $Q_{\text{рез}}$ або з метою уніфікації позначень в розрахунках складного (радіаційно-конвективного) теплообміну Q_w . В результаті радіаційного теплообміну тіло отримує або віддає певну кількість енергії (див. рис. 2.2):

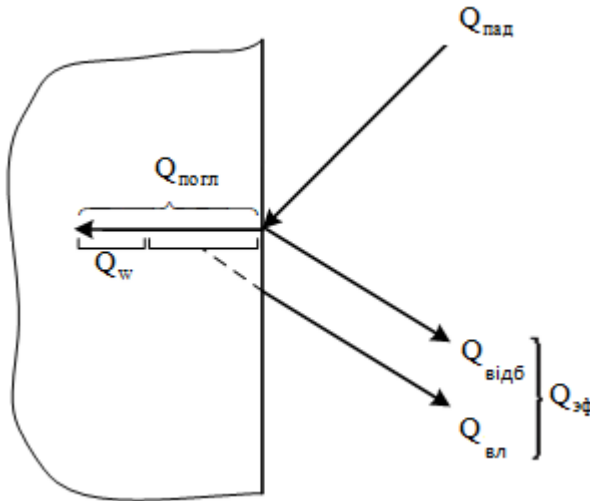


Рисунок 2. 2 – Схема радіаційного теплообміну для непрозорого тіла

$$Q_w \equiv Q_{\text{рез}} = Q_{\text{погл}} - Q_{\text{вл}} = A \cdot Q_{\text{пад}} - Q_{\text{вл}} \quad (2.7)$$

або

$$Q_w \equiv Q_{рез} = (Q_{погл} + Q_{відб}) - (Q_{вл} + Q_{відб}) = Q_{над} - Q_{эф} \quad (2.8)$$

Якщо розрахунок радіаційного теплообміну проводять, використовуючи густини відповідних радіаційних потоків, то в цьому випадку формули набудуть вигляду:

$$E_{эф} = E_{вл} + E_{відб} \quad (2.9)$$

$$q_w \equiv E_{рез} = E_{погл} - E_{вл} = A \cdot E_{над} - E_{вл} \quad (2.10)$$

$$q_w \equiv E_{рез} = (E_{погл} + E_{відб}) - (E_{вл} + E_{відб}) = E_{над} - E_{эф} \quad (2.11)$$

Формула зв'язку власного, результуючого і ефективного потоків випромінювання має вигляд:

$$Q_{эф} = \frac{1-A}{A} \cdot Q_w + \frac{Q_{вл}}{A} \quad \text{або} \quad E_{эф} = \frac{1-A}{A} \cdot q_w + \frac{E_{вл}}{A} \quad (2.12)$$

2.2 Основні закони випромінювання абсолютно чорного тіла

Абсолютно чорне тіло (АЧТ) поглинає все падаюче випромінювання ($A_\lambda = 1$) і одночасно є ідеальним випромінювачем, в якого $\epsilon_\lambda = 1$. Абсолютно чорних тіл в природі не існує. Як модель АЧТ використовують отвір в стінці непрозорої порожнини з розмірами набагато менше самої порожнини. При рівномірному нагріві всієї поверхні порожнини даний отвір по своїх властивостях наближається до абсолютно чорного тіла, тобто поглинає все падаюче на нього випромінювання і само при цьому є ідеальним випромінювачем – випромінює максимально можливу кількість енергії. Розрахунок власного випромінювання реальних тіл заснований на законах випромінювання АЧТ.

Закон Кірхгофа

У реальних тіл між випромінювальною здатністю E_λ і його поглинальною здатністю A_λ існує однозначний зв'язок. Цей зв'язок встановив німецький фізик Кірхгоф в 1859 році і тому його називають законом Кірхгофа. Згідно із законом Кірхгофа відношення спектральної густини потоку власного випромінювання (спектральної випромінювальної здатності) будь-якого тіла до його спектральної поглинальної здатності є величина постійна і рівна спектральній щільності потоку АЧТ, що має ту ж температуру:

$$\frac{E_{\lambda}}{A_{\lambda}} = E_{0,\lambda} \quad (2.13)$$

Порівнюючи вирази (2.12) і (2.13), нескладно зробити висновок про те, що спектральна поглинальна здатність дорівнює спектральній мірі чорноти:

$$A_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \quad (2.14)$$

Ця рівність є наслідком закону Кірхгофа і строго справедлива при локальній термодинамічній рівновазі між випромінюванням і речовиною, що на практиці не виконується. Проте припущення про локальну термодинамічну рівновагу в розрахунках радіаційного теплообміну підтверджується результатами експериментів.

Закон Стефана-Больцмана

Закон Стефана-Больцмана за умови термодинамічної рівноваги встановлює зв'язок густини потоку власного випромінювання поверхні АЧТ (E_0) з його абсолютною температурою (T):

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0,\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} C_1 \cdot \lambda^{-5} / [\exp(C_2 / \lambda \cdot T) - 1] d\lambda = \sigma_0 \cdot T^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.15)$$

де $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постійна Стефана–Больцмана.

У розрахунках закон Стефана-Больцмана зручно застосовувати в наступному вигляді:

$$E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (2.16)$$

де $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Закон Стефана-Больцмана був експериментально встановлений Стефаном в 1879 році, а теоретично обґрунтований Больцманом в 1884 і Планком в 1901 роках.

Закон Віна

Графік залежності спектральна густина потоку випромінювання АЧТ від довжини хвилі і абсолютної температури $E_{0,\lambda} = f(\lambda, T)$ зображений на рис. 2.3. Аналіз цього графіка дозволяє зробити такі висновки:

- залежність має екстремальний характер;
- зі зростанням температури довжина хвилі, при якій спостерігається максимум спектральної густини потоку випромінювання АЧТ, зменшується.

Довжина хвилі, при якій спостерігається максимальне значення спектральної густини потоку власного випромінювання ($\lambda_{\max}$), і температура зв'язані обернено-пропорційною залежністю:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2897,82 \text{ мкм} \cdot \text{К} \approx 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} \quad (2.17)$$

Цей закон є наслідком закону Планка. Проте він був отриманий Віном раніше (у 1893 році) і тому носить його ім'я. Знаючи $\lambda_{\max}$, по формулі (2.17) легко знайти температуру випромінювача.

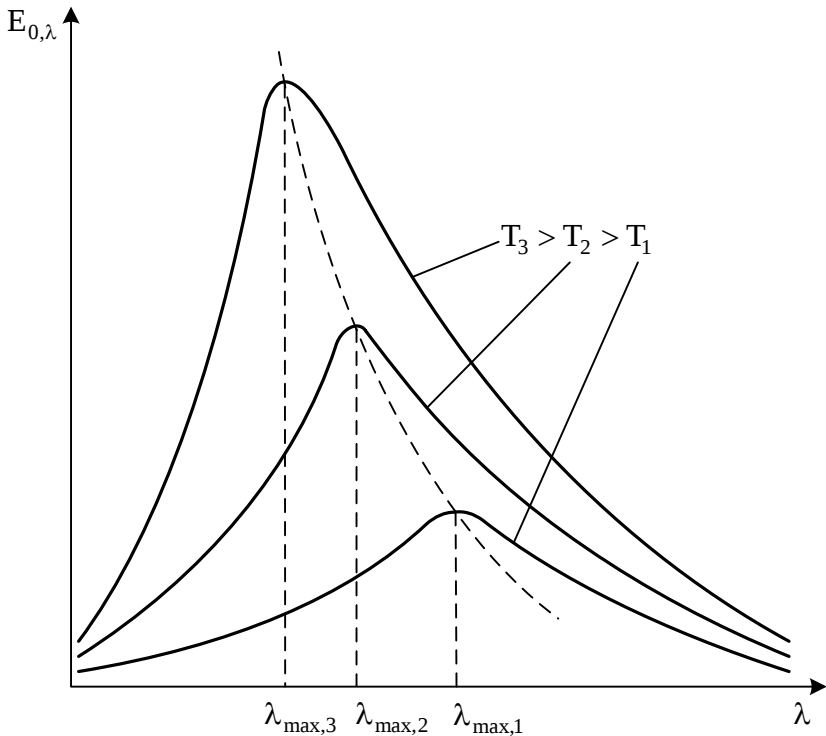


Рисунок 2.3 – Спектральна густина потоку випромінювання АЧТ
Закон Планка

У 1900 році на основі квантової теорії німецький фізик Макс Планк вивів закон, що встановлює залежність спектральної інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла ($E_{0,\lambda}$) від довжини хвилі (λ) і температури (T), $E_{0,\lambda} = f(\lambda, T)$. Цей закон носить ім'я Планка і має вигляд:

$$E_{0,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}, \quad (2.18)$$

де T – абсолютна температура абсолютно чорного тіла, K ; C_1 і C_2 – коефіцієнти, пов'язані з універсальними фізичними константами наступними співвідношеннями:

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot c_0^2 = 3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2;$$

$$C_2 = h \cdot c_0 / k = 1,438786 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К},$$

у яких $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – швидкість світла у вакуумі;
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – стала Планка; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – стала Больцмана.

2.3 Випромінювання реальних тіл. Закон Кірхгофа

Випромінювання реальних тіл відрізняється від випромінювання абсолютно чорного тіла, як по спектральному складу, так і по величині (рис. 2.4, а). При рівних температурах реальні тіла випромінюють теплової енергії менше, ніж АЧТ. І при цьому максимум спектральної густини потоку випромінювання в металів зміщений у бік короткохвильової частини спектру, а в діелектриків – у бік довгохвильової частини спектру відносно максимуму спектральної щільності потоку випромінювання АЧТ.

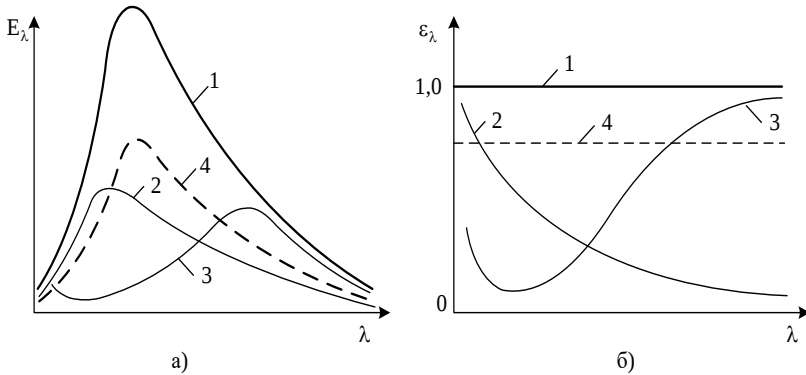


Рисунок 2.4 – Спектральний розподіл енергії випромінювання (а) і міри чорноти (б) різних тіл: 1 – АЧТ; 2 – метал; 3 – діелектрик; 4 – сіре тіло

Для характеристики випромінювання реальних тіл введено поняття спектральної міри чорноти, яка характеризує співвідношення між спектральною щільністю потоків власного випромінювання реального тіла і АЧТ:

$$\epsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{0,\lambda}} \quad (2.19)$$

Коефіцієнт ϵ_λ змінюється в межах від 0 до 1 і для кожної довжини хвилі λ характеризує долю, яку E_λ даного тіла складає від $E_{0,\lambda}$ абсолютно чорного тіла при одній і тій же температурі. Зміна спектральної міри чорноти ϵ_λ різних тіл показана на рис. 2.4, б. З формули (2.19) виходить, що спектральна міра чорноти абсолютно чорного тіла дорівнює одиниці.

Спектральна міра чорноти реального непрозорого тіла залежить від довжини хвилі, природи тіла, стану його поверхні і температури.

Поняття сірого тіла

Густину потоку власного випромінювання тіла у вузькому елементарному спектральному діапазоні $d\lambda$ – спектральну густину теплового потоку можна розрахувати, застосувавши формулу

$$E_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot E_{0,\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (2.20)$$

Потім, експериментально встановивши залежність спектральної міри чорноти від довжини хвилі і температури $\varepsilon_{\lambda} = f(\lambda, T)$ для даного матеріалу, можна знайти і випромінювальну здатність реального тіла:

$$E = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \cdot E_{0,\lambda} d\lambda \quad (2.21)$$

Такий підхід до розрахунку власного випромінювання реальних тіл досить складний через необхідність експериментального визначення спектрів випромінювання реальних тіл, які при даній температурі залежать не лише від природи речовини, але і від його структури і стану поверхні. Тому в інженерних розрахунках з метою їх спрощення, як правило, випромінювання реальних тіл моделюють випромінюванням ідеального *сірого* тіла. Випромінювання *сірого* тіла володіє всіма властивостями випромінювання абсолютно чорного тіла. При цьому спектр випромінювання *сірого* тіла подібний до спектру випромінювання АЧТ (штрихова лінія на рис. 2.4, а), а його спектральна щільність потоку випромінювання E_{λ} менше спектральної щільності потоку випромінювання АЧТ $E_{0,\lambda}$ в однакове число разів. Тобто спектральна міра чорноти *сірого* тіла при даній температурі не залежить від довжини хвилі: $\varepsilon_{\lambda} = \text{const}$ (штрихова лінія на рис. 2.4, б). у *сірого* тіла випромінювальна здатність буде рівна:

$$E = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \cdot E_{0,\lambda} d\lambda = \varepsilon \cdot \int_0^{\infty} E_{0,\lambda} d\lambda = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (2.22)$$

У формулі (2.22): $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постійна Стефана-Больцмана; $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; $C = \varepsilon \cdot C_0$ – коефіцієнт випромінювання *сірого* тіла, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon = \varepsilon_{\lambda} = \text{const}$ – інтегральна міра чорноти тіла. З формули (2.22) виходить, що інтегральна міра чорноти дорівнює відношенню випромінювальної здатності *сірого* тіла (E) до випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла (E_0):

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} \quad (2.23)$$

Інтегральна міра чорноти сірого тіла або міра чорноти залежить від природи тіла, стану його поверхні і температури.

Закон Кірхгофа для сірого тіла набирає вигляду

$$\frac{E}{A} = E_0 \quad (2.24)$$

і формулюється таким чином: «Відношення щільності потоку власного випромінювання (випромінювальній здатності) сірого тіла до його поглинальної здатності є величина постійна і рівна густині потоку випромінювання АЧТ за умови рівності температур обох тіл».

Порівнюючи вирази можна зробити вивід про те, що міра чорноти сірого тіла рівна його поглинальній здатності:

$$\varepsilon = A \quad (2.25)$$

2.4 Оптична пірометрія

Пірометрія – це сукупність методів вимірювання високих температур (1000–3000 °С і більше) за допомогою пірометрів. При цьому безпосередній контакт із нагрітим тілом не потрібен, що є перевагою методу. Залежно від того, який закон теплового випромінювання використовується при вимірюванні температури тіл, розрізняють *радіаційну, колірну і яскравісну температури*.

Радіаційна температура T_p

Радіаційна температура – це величина, що характеризує енергетичну світність досліджуваного тіла. *Радіаційна температура – це така температура чорного тіла, при якій його енергетична світність R , дорівнює енергетичній світності R_T досліджуваного тіла.* Радіаційна температура

$T_p = \sqrt[4]{\frac{R_T}{\sigma}}$ тіла менше його дійсної температури T . Прилад для вимірювання – радіаційний пірометр.

Колірна температура T_k

Колірна температура – це величина, яка інтегрально характеризує спектральний склад випромінювання джерела світла. *Колірна температура – це температура абсолютно чорного тіла, при якій його випромінювання має такий же спектральний склад і розподіл енергії по спектру, як і випромінювання даного джерела.*

$$T_K = \frac{6}{\lambda_{\max}} \quad (2.26)$$

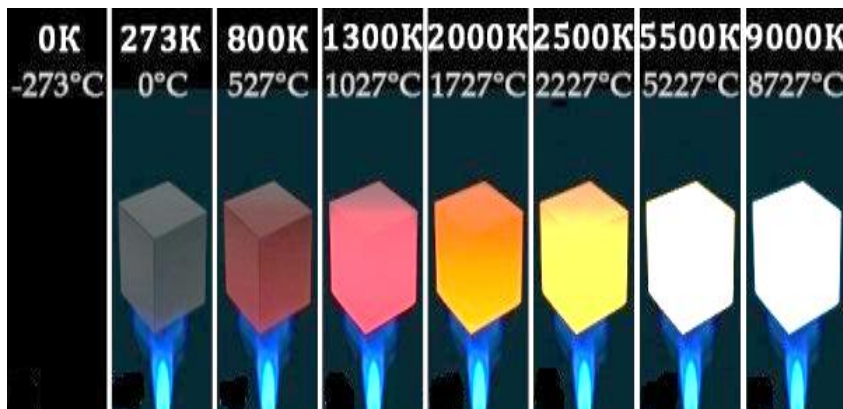


Рисунок 2.5 - Колір абсолютно чорного тіла залежно від температури нагрівання

Колір абсолютно чорного тіла залежно від температури нагрівання показано на рис. 2.5. Денним світлом вважається випромінювання з температурою 6500 К. Кольору з температурою нижче денного – теплі кольори (жовтуваті), вище – холодні (голубуваті). Колірна температура ламп розжарювання – 2800-3200 К. Колірна температура блакитного неба – 9000-15000 К. Колірна температура полум'я свічки – 1200-1700 К. Прилад для вимірювання колірної температури – пірометр.

Яскравісна температура T_b

Яскравісна температура – це фотометрична величина, що характеризує інтенсивність випромінювання і не є температурою в звичному розумінні. Вона характеризує випромінювання, і залежно від механізму випромінювання може значно відрізнятися від фізичної температури випромінюючого тіла. Для чисто теплових джерел температура яскравості збігається з їх фізичної температурою. *Яскравісна температура – це температура T_b в діапазоні частот $\Delta\nu$ яка відповідає температурі абсолютно чорного тіла, що має такою ж інтенсивністю в даному діапазоні частот*

$$T_b = \frac{hc}{k\lambda} \cdot \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{2hc^2}{I_\lambda \cdot \lambda^5}\right)}, \quad (2.27)$$

де λ – довжина світла, c – швидкість світла, k – постійна Больцмана, h – постійна Планка.

Прилад для вимірювання яскравісної температури – пірометр яскравості.

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

3.1 Приклад 1. Визначити втрати теплоти випромінюванням з 1 пог. м паропроводу, якщо зовнішній діаметр паропроводу $d_1 = 300$ мм, коефіцієнт поглинання $A_1 = 0,9$, температура стінки $t_{cm} = 450$ °С, температура повітря навколишнього середовища $t_{нов} = 50$ °С.

Розв'язання:

1. Визначаємо площу поверхні 1 пог. м паропроводу F , м²

$$F = \pi d_1 l = 3,14 \cdot 0,3 \cdot 1 = 0,942 \text{ м}^2, \quad (3.1.1)$$

де $l = 1$ погонний метр (1 пог. м = 1 метр довжини паропроводу).

2. Втрати теплоти випромінюванням Q_e , Вт розраховуємо по формулі (2.16) для необмеженого простору

$$Q_e = A_1 C_o F \left[\left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.1.2)$$

де $C_o = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $T_{ст}$, $T_{пов}$ – відповідно, абсолютна температура стінки і повітря навколишнього середовища, К.

3. Обчислюємо втрати теплоти випромінюванням Q_e , Вт підставляючи в формулу (3.1.2) значення A_1 , C_o , F , $T_{ст}$ і $T_{пов}$

$$Q_e = 0,9 \cdot 5,67 \cdot 0,942 \left[\left(\frac{773}{100} \right)^4 - \left(\frac{323}{100} \right)^4 \right] = 16640 \text{ Вт}$$

Відповідь: Втрати теплоти випромінюванням з 1 пог. м паропроводу $Q_e = 16640$ Вт.

Задача 1 для самостійної роботи. Визначити втрати теплоти випромінюванням з 1 пог. м паропроводу, якщо зовнішній діаметр паропроводу d_1 , мм, коефіцієнт поглинання A_1 , температура стінки t_{cm} , °С, температура повітря навколишнього середовища $t_{нов}$, °С. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Вихідні дані для самостійної роботи

№ вар	d_1 , мм	A_1	t_{cm} , °С	$t_{нов}$, °С	№ вар	d_1 , мм	A_1	t_{cm} , °С	$t_{нов}$, °С
1	300	0,880	550	40	5	355	0,865	505	39
2	310	0,870	560	41	6	345	0,875	500	38
3	320	0,860	570	42	7	335	0,885	490	37
4	330	0,850	580	43	8	325	0,895	495	36

№ вар	$d_1, \text{мм}$	A_1	$t_{cm}, ^\circ\text{C}$	$t_{nos}, ^\circ\text{C}$	№ вар	$d_1, \text{мм}$	A_1	$t_{cm}, ^\circ\text{C}$	$t_{nos}, ^\circ\text{C}$
9	340	0,840	590	44	20	315	0,900	480	35
10	350	0,830	600	45	21	305	0,905	485	34
11	360	0,820	595	46	22	300	0,910	470	33
12	370	0,810	585	47	23	290	0,915	475	32
13	380	0,800	575	48	24	280	0,920	460	31
14	390	0,805	565	49	25	270	0,925	465	30
15	400	0,815	555	50	26	260	0,930	450	32.5
16	395	0,825	545	51	27	265	0,935	455	33.5
17	385	0,835	535	52	28	275	0,940	440	34.5
18	375	0,845	525	53	29	285	0,945	445	35.5
19	365	0,855	515	54	30	295	0,920	440	36.6

3.2 Приклад 2. Внутрішня поверхня топки котла зроблена з шамотної цегли і ззовні обшита сталлю. Між цеглою та обшивкою є повітряний прошарок товщиною 40 мм. В умовах стаціонарного режиму визначити втрати тепла у навколишнє середовище між цегляною кладкою та обшивкою внаслідок променистого теплообміну. Температура зовнішньої поверхні шамотної цегли $t_1 = 137^\circ\text{C}$, а температура сталевोї обшивки $t_2 = 60^\circ\text{C}$. Ступінь чорноти шамоту $\varepsilon_1 = 0,8$, а листової сталі $\varepsilon_2 = 0,6$.

Розв'язання:

1. Визначаємо втрату тепла $q_{1,2}$ по формулі (2,16) для теплового потоку випромінювання між двома безмежними плоскопаралельними поверхнями з різними температурами, які розділені прозорим середовищем

$$q_{1,2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_o \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3.2.1)$$

де $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений ступінь чорноти системи двох тіл, $C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, T_1, T_2 – відповідно, абсолютна температура зовнішньої поверхні шамотної цегли і сталевोї обшивки, К.

2. Розраховуємо приведенний ступінь чорноти $\varepsilon_{\text{пр}}$ по формулі для двох тіл з паралельними поверхнями великих розмірів (п.16, табл. 10.1 [5])

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,6} - 1} = 0,52 \quad (3.2.2)$$

3. Підставляючи значення відповідних величин в формулу (3.2.1) обчислюємо втрати тепла $q_{1,2}$, Вт/м² у навколишнє середовище між цегляною кладкою та обшивкою внаслідок променистого теплообміну

$$q_{1,2} = 0,52 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{137+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{60+273}{100} \right)^4 \right] = 471 \text{ Вт/м}^2$$

Відповідь: Втрати тепла у навколишнє середовище між цегляною кладкою та обшивкою внаслідок променистого теплообміну $q_{1,2} = 471$ Вт/м².

Задача 2 для самостійної роботи. Внутрішня поверхня топки котла зроблена з шамотної цегли і ззовні обшита сталлю. Між цеглою та обшивкою є повітряний прошарок товщиною 40 мм. В умовах стаціонарного режиму визначити втрати тепла у навколишнє середовище між цегляною кладкою та обшивкою внаслідок променистого теплообміну. Температура зовнішньої поверхні шамотної цегли t_1 , °С, а температура сталеві обшивки t_2 , °С. Ступінь чорноти шамоту $\varepsilon_1 = 0,8$, а листової сталі $\varepsilon_2 = 0,6$. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

Вихідні дані для самостійної роботи

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
t_1 , °С	120	125	127	130	135	140	145	150	152	155	157	160	162	165	167
t_2 , °С	40	42	43	44	45	47	48	49	50	52	54	55	58	59	60
№ вар	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
t_1 , °С	164	163	161	159	158	156	153	147	142	138	134	128	126	124	122
t_2 , °С	58	56	53	51	50	49	47	45	44	43	42	41	40	39	38

3.3 Приклад 3. Внутрішня поверхня топки котла зроблена з шамотної цегли і ззовні обшита сталлю. Між цеглою та обшивкою є повітряний прошарок товщиною 40 мм, в якому встановлено сталевий екран (ступінь чорноти $\varepsilon_e = 0,6$). В умовах стаціонарного режиму визначити втрати тепла у навколишнє середовище між цегляною кладкою та обшивкою внаслідок променистого теплообміну. Температура зовнішньої поверхні шамотної цегли $t_1 = 137$ °С, а температура сталеві обшивки $t_2 = 60$ °С. Ступінь чорноти шамоту $\varepsilon_1 = 0,8$, а листової сталі $\varepsilon_2 = 0,6$.

Розв'язання:

1. Визначаємо втрату тепла $q_{1,2}$, Вт/м² по формулі (п.12, табл. 10.1 [5]) для теплового потоку випромінювання між двома безмежними плоскопаралельними поверхнями з різними температурами, які розділені прозорим середовищем, в якому встановлений екран

$$q_{1,2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3.3.1)$$

де $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений ступінь чорноти системи двох тіл при наявності екранів між ними, $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, T_1 , T_2 – відповідно, абсолютна температура зовнішньої поверхні шамотної цегли і сталевोї обшивки, К.

2. Розраховуємо приведений ступінь чорноти $\varepsilon_{\text{пр}}$ по формулі для двох тіл з паралельними поверхнями великих розмірів при наявності n плоских екранів між ними (п.16, табл. 10.1 [5])

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{ei}} - (n+1)}, \quad (3.3.2)$$

де ε_{ei} – ступінь чорноти i -го екрана.

3. Для одного екрана ($n = 1$) з формули (3.3.2) приведений ступінь чорноти $\varepsilon_{\text{пр}}$ буде

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \frac{1}{\varepsilon_e} - 2} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,6} + 2 \left(\frac{1}{0,6} - 1 \right)} = 0,24 \quad (3.3.3)$$

4. Підставляючи значення відповідних величин в формулу (3.3.1) обчислюємо втрати тепла $q_{1,2}$, Вт/м² у навколишнє середовище між цегляною кладкою та обшивкою внаслідок променистого теплообміну при наявності одного плоского екрана між ними

$$q_{1,2} = 0,24 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{137+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{60+273}{100} \right)^4 \right] = 221 \text{ Вт/м}^2$$

Відповідь: Втрати тепла у навколишнє середовище внаслідок променистого теплообміну між цегляною кладкою та обшивкою при наявності одного плоского екрана між ними $q_{1,2} = 221$ Вт/м².

Задача 3 для самостійної роботи. Внутрішня поверхня топки котла зроблена з шамотної цегли і ззовні обшита сталлю. Між цеглою та обшивкою є повітряний прошарок товщиною 40 мм, в якому встановлено сталевий екран (ступінь чорноти $\varepsilon_e = 0,6$). В умовах стаціонарного режиму визначити втрати тепла у навколишнє середовище між цегляною кладкою та обшивкою внаслідок променистого теплообміну. Температура зовнішньої поверхні шамотної цегли t_1 , °С, а температура сталевोї обшивки t_2 , °С. Ступінь чорноти шамоту $\varepsilon_1 = 0,8$, а листової сталі $\varepsilon_2 = 0,6$. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Вихідні дані для самостійної роботи

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t_1, ^\circ\text{C}$	120	125	127	130	135	140	145	150	152	155	157	160	162	165	167
$t_2, ^\circ\text{C}$	40	42	43	44	45	47	48	49	50	52	54	55	58	59	60
№ вар	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$t_1, ^\circ\text{C}$	164	163	161	159	158	156	153	147	142	138	134	128	126	124	122
$t_2, ^\circ\text{C}$	58	56	53	51	50	49	47	45	44	43	42	41	40	39	38

3.4 Приклад 4. У виробничому приміщенні, де температура повітря і стін $t_{\text{пов}} = 3^\circ\text{C}$, розташована горизонтальна труба з матеріалу *алюміній шорсткий* зовнішнім діаметром $d = 180$ мм і довжиною $l = 10$ м. Вона має температуру на поверхні $t_{\text{ст}} = 70^\circ\text{C}$ і охолоджується за рахунок теплового випромінювання і вільного руху повітря. Визначити: а) умовний коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання; б) коефіцієнт тепловіддачі природною (вільною) конвекцією; в) тепловий потік від труби сумарний і окремо від вільної конвекції і теплового випромінювання.

Розв'язання:

1. В цьому прикладі є променево-конвективний теплообмін між двома тілами з температурами $t_{\text{ст}} = 70^\circ\text{C}$ і $t_{\text{пов}} = 3^\circ\text{C}$.

2. Сумарний тепловий потік Q_Σ , Вт визначається рівняння

$$Q_\Sigma = Q_{\text{вип}} + Q_{\text{к}}, \quad (3.4.1)$$

де $Q_{\text{вип}}$ і $Q_{\text{к}}$ – відповідно, тепловий потік від променистого теплообміну і вільної конвекції, Вт.

3. Тепловий потік від випромінювання $Q_{\text{вип}}$, Вт розраховуємо по формулі (2.16) для необмеженого простору

$$Q_{\text{вип}} = \varepsilon C_o F \left[\left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.4.2)$$

де $\varepsilon = 0,055$ – ступінь чорноти матеріалу труби (алюміній шорсткий), знаходимо з табл. 1Д Додаток; $C_o = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; F – площа зовнішньої поверхні труби; $T_{\text{ст}}$, $T_{\text{пов}}$ – відповідно, абсолютна температура стінки труби і повітря навколишнього середовища, К.

4. Знаходимо площу зовнішньої поверхні труби F , м² з рівняння

$$F = \pi d l = 3,14 \cdot 0,18 \cdot 10 = 5,652 \text{ м}^2, \quad (3.4.3)$$

5. Обчислюємо тепловий потік від випромінювання $Q_{\text{вип}}$, Вт підставляючи в формулу (3.4.2) значення ε , C_o , F , $T_{\text{ст}}$ і $T_{\text{пов}}$

$$Q_{\text{вип}} = 0,055 \cdot 5,67 \cdot 5,652 \left[\left(\frac{343}{100} \right)^4 - \left(\frac{276}{100} \right)^4 \right] = 142 \text{ Вт} \quad (3.4.4)$$

6. Умовний коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання $\alpha_{\text{вип}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ визначаємо з формули (2.3 [4])

$$\alpha_{\text{вип}} = Q_{\text{вип}} / (t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}}) F = 142 / (70 - 3) \cdot 5,652 = 0,375 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (3.4.5)$$

7. Коефіцієнт тепловіддачі природною (вільною) конвекцією визначаємо з рівняння для критерія (числа) Нуссельта (Nu) при вільній конвекції у великому об'ємі. Для тепловіддачі в умовах вільного руху критеріальне рівняння має загальний вид

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (3.4.6)$$

де $Gr = gd^3\beta(t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}})/\nu^2$ – критерій (число) Грасгофа, $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$ – прискорення вільного падіння, Pr – критерій (число) Прандтля.

Для горизонтальної труби зовнішнім діаметром d , яка охолоджується повітрям, вид критеріального рівняння (3.4.6) залежить від значення комплексу $Gr \cdot Pr$ [добуток числа Грасгофа (Gr) на число Прандтля (Pr)] :

$$\text{при } (Gr \cdot Pr) = (10^{-3} - 10^3) \text{ критерій } Nu = 1,18 (Gr \cdot Pr)^{0,125} \quad (3.4.7)$$

$$\text{при } (Gr \cdot Pr) = (10^3 - 10^9) \text{ критерій } Nu = 0,46 (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (3.4.8)$$

З критеріального рівняння спочатку знаходять значення Nu , а потім розраховують коефіцієнт тепловіддачі α , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}, \quad (3.4.9)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності теплоносія (в нашому прикладі – повітря), d – характерний (визначальний) геометричний розмір (в нашому прикладі – зовнішній діаметр труби).

8. За характерну (визначальну) температуру приймемо температуру пограничного шару $t_{\text{ни}}, ^\circ\text{C}$ над поверхнею труби, яка є середньоарифметичним значенням між температурами стінки і повітря

$$t_{\text{ни}} = 0,5 (t_{\text{ст}} + t_{\text{пов}}) = 0,5 (70 + 3) = 36,5 ^\circ\text{C}$$

9. Для повітря при температурі $t_{\text{ни}} = 36,5 ^\circ\text{C}$ з таблиці 1Д знаходимо наступні теплофізичні характеристики: кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 16,62 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 2,73 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; коефіцієнт об'ємного розширення $\beta = 1/(t_{\text{ни}} + 273) = 1/(36,5 + 273) = 3,23 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$; число Прандтля $Pr = 0,7$.

10. Обчислюємо значення комплексу $Gr \cdot Pr$

$$Gr \cdot Pr = gd^3\beta(t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}})Pr/\nu^2 = 9,8 \cdot 0,18^3 \cdot 3,23 \cdot 10^{-3} \cdot (70 - 3) \cdot 0,7 / (16,62 \cdot 10^{-6})^2 = 3,12 \cdot 10^7$$

11. Так як комплекс $Gr \cdot Pr < 10^9$, то для визначення числа Нуссельта (Nu) берем рівняння (3.4.8)

$$Nu = 0,46 (Gr \cdot Pr)^{0,25} = 0,46 (3,12 \cdot 10^7)^{0,25} = 35,4$$

12. Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі природною (вільною) конвекцією $\alpha_k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ по формулі (3.4.9)

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / d = 35,4 \cdot 2,73 \cdot 10^{-2} / 0,18 = 5,37 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

13. Тепловий потік від труби при вільній конвекції Q_k , Вт обчислюємо відповідно до закону Ньютона – Ріхмана по формулі (2.1 [4])

$$Q_k = \alpha_k F(t_{ct} - t_{пов}) = 5,37 \cdot 5,652 (70 - 3) = 2034 \text{ Вт} \quad (3.4.10)$$

14. Сумарний тепловий потік Q_Σ , Вт від труби до повітря приміщення при вільній конвекції і тепловому випромінюванні визначаємо з рівняння (3.4.1), підставляючи значення з формул (3.4.4) і (3.4.10)

$$Q_\Sigma = Q_{\text{вип}} + Q_k = 142 + 2034 = 2176 \text{ Вт}$$

Відповідь: Умовний коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання $\alpha_{\text{вип}} = 0,375 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; коефіцієнт тепловіддачі природною (вільною) конвекцією $\alpha_k = 5,37 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; тепловий потік від труби при вільній конвекції $Q_k = 2034 \text{ Вт}$; тепловий потік від труби випромінюванням $Q_{\text{вип}} = 142 \text{ Вт}$; сумарний тепловий потік від труби до повітря приміщення при вільній конвекції і тепловому випромінюванні $Q_\Sigma = 2176 \text{ Вт}$.

Задача 4 для самостійної роботи. У виробничому приміщенні, де температура повітря і стін $t_{\text{пов}}$, °С, розташована горизонтальна труба з матеріалу $M_{\text{тр}}$ зовнішнім діаметром d , мм і довжиною l , м. Вона має температуру на поверхні $t_{\text{ст}}$, °С і охолоджується за рахунок теплового випромінювання і вільного руху повітря. Визначити: а) умовний коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання; б) коефіцієнт тепловіддачі природною (вільною) конвекцією; в) тепловий потік від труби сумарний і окремо від вільної конвекції і теплового випромінювання. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4.

Вихідні дані для самостійної роботи

№ Вар.	Матеріал труби, $M_{\text{тр}}$	$t_{\text{пов}}$, °С	d , мм	$t_{\text{ст}}$, °С	l , м	№ Вар	Матеріал труби, $M_{\text{тр}}$	$t_{\text{пов}}$, °С	d , мм	$t_{\text{ст}}$, °С	l , м
1	Алюміній шорсткий	5	125	75	8	4	Чавун шорсткий	7	350	90	25
2	Алюміній окиснений	7	180	117	10	5	Залізо лите необроблене	27	380	140	10
3	Алюміній полірований	10	220	86	12	6	Нікель окиснений	4	400	90	12

№ Вар.	Матеріал труби, $M_{тр}$	$t_{пов}, ^\circ C$	d , мм	$t_{ст}, ^\circ C$	l , м	№ Вар	Матеріал труби, $M_{тр}$	$t_{пов}, ^\circ C$	d , мм	$t_{ст}, ^\circ C$	l , м
7	Латунь окиснена	15	270	80	14	19	Свинець окиснений	18	360	84	14
8	Латунь полірована	12	230	152	16	20	Цинк окиснений	5	340	75	16
9	Латунь прокатана	20	250	130	18	21	Цинк полірований	22	320	112	7
10	Мідь окислена	17	400	100	13	22	Алюмінієва фарба	6	300	68	13
11	Мідь полірована	25	300	150	20	23	Залізо поліроване	29	280	133	8
12	Нікель окислений	23	260	133	18	24	Залізо окислене	8	260	74	6
13	Срібло поліроване	14	240	179	15	25	Золото поліроване	33	240	153	11
14	Сталь окислена	10	200	110	12	26	Нікель окислений	9	250	115	18
15	Сталь шорстка	12	190	108	13	27	Хромонікель	34	270	94	20
16	Сталь полірована	18	210	98	17	28	Олово лужене	10	290	106	22
17	Хром	20	240	116	19	29	Алюміній шорсткий	28	310	104	6
18	Чавун обточений	23	270	99	22	30	Сталь полірована	12	330	96	5

3.5 Приклад 5. У виробничому приміщенні, де температура повітря і стін $t_{пов} = 3 ^\circ C$, знаходиться у вертикальному стані труба з матеріалу *алюміній шорсткий* зовнішнім діаметром $d = 180$ мм і висотою $H = 10$ м. Вона має температуру на поверхні $t_{ст} = 70 ^\circ C$ і охолоджується за рахунок теплового випромінювання і вільного руху повітря. Визначити: а) умовний коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання; б) коефіцієнт тепловіддачі природною (вільною) конвекцією; в) тепловий потік від труби сумарний і окремо від теплового випромінювання і вільної конвекції.

Розв'язання:

1. В цьому прикладі є променево-конвективний теплообмін між двома тілами з температурами $t_{ст} = 70 ^\circ C$ і $t_{пов} = 3 ^\circ C$.

2. Сумарний тепловий потік Q_{Σ} , Вт визначається рівняння

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{вип}} + Q_{\text{к}}, \quad (3.5.1)$$

де $Q_{\text{вип}}$ і $Q_{\text{к}}$ – відповідно, тепловий потік від променистого теплообміну і вільної конвекції, Вт.

3. Тепловий потік від випромінювання $Q_{\text{вип}}$, Вт розраховуємо по формулі (2.16) для необмеженого простору

$$Q_{\text{вип}} = \varepsilon C_o F \left[\left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.5.2)$$

де $\varepsilon = 0,055$ – ступінь чорноти матеріалу труби (алюміній шорсткий), знаходимо з табл. 1Д Додаток; $C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; F – площа зовнішньої поверхні труби; $T_{\text{ст}}$, $T_{\text{пов}}$ – відповідно, абсолютна температура стінки труби і повітря навколишнього середовища, К.

4. Знаходимо площу зовнішньої поверхні труби F , м^2 з рівняння

$$F = \pi d H = 3,14 \cdot 0,18 \cdot 10 = 5,652 \text{ м}^2, \quad (3.5.3)$$

5. Обчислюємо тепловий потік від випромінювання $Q_{\text{вип}}$, Вт підставляючи в формулу (3.4.2) значення ε , C_o , F , $T_{\text{ст}}$ і $T_{\text{пов}}$

$$Q_{\text{вип}} = 0,055 \cdot 5,67 \cdot 5,652 \left[\left(\frac{343}{100} \right)^4 - \left(\frac{276}{100} \right)^4 \right] = 142 \text{ Вт} \quad (3.5.4)$$

6. Умовний коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання $\alpha_{\text{вип}}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ визначаємо з формули (2.3 [4])

$$\alpha_{\text{вип}} = Q_{\text{вип}} / (t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}}) F = 142 / (70 - 3) \cdot 5,652 = 0,375 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (3.5.5)$$

7. Коефіцієнт тепловіддачі природною (вільною) конвекцією визначаємо з рівняння для критерія (числа) Нуссельта (Nu) при вільній конвекції у великому об'ємі. Для тепловіддачі в умовах вільного руху критеріальне рівняння має загальний вид

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (3.5.6)$$

де $Gr = g d^3 \beta (t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}}) / \nu^2$ – критерій (число) Грасгофа, $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$ – прискорення вільного падіння, Pr – критерій (число) Прандтля.

Для вертикальної труби зовнішнім діаметром d , яка охолоджується повітрям, вид критеріального рівняння (3.5.6) залежить від значення комплексу $Gr \cdot Pr$ [добуток числа Грасгофа (Gr) на число Прандтля (Pr)] :

$$\text{при } (Gr \cdot Pr) = (10^3 - 10^9) \text{ критерій } Nu = 0,75 (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (3.5.7)$$

$$\text{при } (Gr \cdot Pr) > 6 \cdot 10^{10} \text{ критерій } Nu = 0,15 (Gr \cdot Pr)^{0,33} \quad (3.5.8)$$

З критеріального рівняння спочатку знаходять значення Nu , а потім розраховують коефіцієнт тепловіддачі α , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}, \quad (3.5.9)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності теплоносія (в нашому прикладі – повітря), d – характерний (визначальний) геометричний розмір (в нашому прикладі – зовнішній діаметр труби).

8. За характерну (визначальну) температуру прийемо температуру повітря $t_{\text{пов}} = 3^\circ\text{C}$.

9. Для повітря при температурі $t_{\text{ми}} = 3^\circ\text{C}$ з таблиці 1Д знаходимо наступні теплофізичні характеристики: кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 13,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 2,46 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; коефіцієнт об'ємного розширення $\beta = 1/(t_{\text{ми}} + 273) = 1/(3 + 273) = 3,62 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$; число Прандтля $Pr = 0,7$.

10. Обчислюємо значення комплексу $Gr \cdot Pr$

$$Gr \cdot Pr = g d^3 \beta (t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}}) Pr / \nu^2 = 9,8 \cdot 0,18^3 \cdot 3,62 \cdot 10^{-3} \cdot (70 - 3) \cdot 0,7 / (13,54 \cdot 10^{-6})^2 = 5,26 \cdot 10^7$$

11. Оскільки комплекс $Gr \cdot Pr < 10^9$, то для визначення числа Нуссельта (Nu) берем рівняння (3.5.7)

$$Nu = 0,75 (Gr \cdot Pr)^{0,25} = 0,75 (5,26 \cdot 10^7)^{0,25} = 63,9$$

12. Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі природною (вільною) конвекцією α_k , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ по формулі (3.5.9)

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / d = 63,9 \cdot 2,46 \cdot 10^{-2} / 0,18 = 8,73 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

13. Тепловий потік від труби при вільній конвекції Q_k , Вт обчислюємо відповідно до закону Ньютона – Ріхмана по формулі (2.1 [4])

$$Q_k = \alpha_k F (t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}}) = 8,73 \cdot 5,652 (70 - 3) = 3306 \text{ Вт} \quad (3.5.10)$$

14. Сумарний тепловий потік Q_Σ , Вт від труби до повітря приміщення при вільній конвекції і тепловому випромінюванні визначаємо з рівняння (3.5.1), підставляючи значення з формул (3.5.4) і (3.5.10)

$$15. Q_\Sigma = Q_{\text{вип}} + Q_k = 142 + 3306 = 3448 \text{ Вт}$$

Відповідь: Умовний коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання $\alpha_{\text{вип}} = 0,375 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; коефіцієнт тепловіддачі природною (вільною) конвекцією $\alpha_k = 8,73 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; тепловий потік від труби при вільній конвекції $Q_k = 3306 \text{ Вт}$; тепловий потік від труби випромінюванням $Q_{\text{вип}} = 142 \text{ Вт}$; сумарний тепловий потік від труби до повітря приміщення при вільній конвекції і тепловому випромінюванні $Q_\Sigma = 3448 \text{ Вт}$.

Задача 5 для самостійної роботи. У виробничому приміщенні, де температура повітря і стін $t_{\text{пов}}$, $^\circ\text{C}$, знаходиться у вертикальному стані труба з матеріалу $M_{\text{тр}}$ зовнішнім діаметром d , мм і висотою H , м. Вона має температуру на поверхні $t_{\text{ст}}$, $^\circ\text{C}$ і охолоджується за рахунок теплового випромінювання і вільного руху повітря. Визначити: а) умовний коефіцієнт тепловіддачі теплового випромінювання; б) коефіцієнт тепловіддачі природною (вільною) конвекцією; в) тепловий потік від труби сумарний і окремо від вільної конвекції і теплового випромінювання. Вихідні дані для самостійної роботи наведено в табл. 3.5.

Таблица 3.5.

Вихідні дані для самостійної роботи

№ Вар.	Матеріал труби, $M_{тр}$	$t_{пов}, ^\circ C$	$d, мм$	$t_{ст}, ^\circ C$	$H, м$	№ Вар	Матеріал труби, $M_{тр}$	$t_{пов}, ^\circ C$	$d, мм$	$t_{ст}, ^\circ C$	$H, м$
1	Латунь окиснена	0	70	20	0,7	14	Залізо лите необроблене	7	62	90	3,2
2	Латунь полірована	5	75	70	3	15	Залізо поліроване	27	84	140	0,4
3	Латунь прокатана	10	80	25	0,8	16	Алюміній шорсткий	4	86	90	2,3
4	Мідь окислена	15	50	80	3,5	17	Алюміній окиснений	10	88	52	0,5
5	Мідь полірована	12	60	152	0,4	18	Алюміній полірований	5	90	75	2,6
6	Нікель окислений	25	65	105	2,5	19	Свинець окислений	22	46	112	0,3
7	Нікель полірований	30	70	60	0,3	20	Цинк окислений	6	55	68	4,1
8	Срібло поліроване	35	46	125	4	21	Цинк полірований	30	63	64	0,7
9	Сталь окислена	23	62	133	0,2	22	Золото поліроване	35	80	133	3
10	Сталь шорстка	35	66	135	3,6	23	Олово лужене	40	88	72	0,7
11	Сталь полірована	30	70	70	0,6	24	Алюмінієва фарба	35	92	131	3,3
12	Хром	25	72	130	2,1	25	Латунь прокатана	30	94	59	0,7
13	Хромо-нікель	20	84	65	0,5	26	Сталь шорстка	10	66	106	2,4

№ Вар.	Матеріал труби, $M_{тр}$	$t_{пов}, ^\circ C$	$d, мм$	$t_{ст}, ^\circ C$	$H, м$	№ Вар	Матеріал труби, $M_{тр}$	$t_{пов}, ^\circ C$	$d, мм$	$t_{ст}, ^\circ C$	$H, м$
27	Чавун обточений	15	74	125	1,8	29	Алюміній окислений	28	68	104	0,2
28	Чавун шорсткий	10	68	60	0,2	30	Хромонікель	15	82	103	2,8

ДодатокТаблиця 1Д – Коефіцієнт теплового випромінювання
(ступінь чорноти) матеріалів

№№	Матеріал	ε	№№	Матеріал	ε
1	Алюміній: шорсткий окислений полірований	0,055 0,15 0,048	9	Свинець окислений	0,281
2	Алюмінієва фарба	0,5	10	Срібло поліроване	0,02
3	Залізо: літе необроблене поліроване окислене	0,91 0,2 0,736	11	Сталь: шорстка окислена полірована	0,95 0,8 0,54
4	Золото поліроване	0,025	12	Хром	0,17
5	Латунь: окислена прокатана полірована	0,6 0,2 0,03	13	Хромонікель	0,7
6	Мідь: окислена полірована	0,62 0,02	14	Цинк: окислений полірований	0,11 0,05
7	Нікель: окислений полірований	0,4 0,08	15	Чавун: шорсткий обточений	0,96 0,65
8	Олово лужене	0,05	16	Шамотна цегла	0,8

Таблиця 2Д – Теплофізичні властивості сухого повітря при В = 760 мм рт. ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}^*\text{К)}$	$\lambda \times 10^2, \text{Вт/(м}^*\text{К)}$	$\alpha \times 10^5, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \times 10^6, \text{н} \times \text{с/м}^2$	$\nu \times 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	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

Таблиця 3Д – Співвідношення фізичних величин у 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
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
Величина	Система МКГСС		Система СІ
	Одиниця величини	Позначення	
Основні і похідні одиниці			
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	ат (кгс/см ²)	9,81 · 10 ⁴ Па
	міліметр ртутного стовпа	мм. рт. ст.	133,32 Па
	міліметр водяного стовпа	мм. вод. ст.	

Величина	Система МКГСС		Система СІ
	Одиниця величини	Позначення	
	бар	бар	$9,81 \text{ Па}$ 10^5 Па
Динамічний коефіцієнт в'язкості	пуаз	П	$0,1 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$
Кінематичний коефіцієнт в'язкості	стокс	Ст	$10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

Перелік джерел посилання

1. Вассерман О. А., Слинько О. Г. Технічна термодинаміка і теплообмін : підручник. – Одеса : Фенікс, 2019. – 496 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. Кущевська Н. Ф., Брускова Д-М. Я., Малишев В. В. Теоретичні основи термодинаміки, теплообміну та теплопередачі : підручник. – Київ : Вид-во Університет «Україна», 2022. - 424 с.
4. 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).
5. Димо Б. В. Практикум з тепломасообміну: навч. посіб. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 136 с.

ДЛЯ НОТАТОК

Виробничо-практичне видання

Методична серія. Випуск 460

***Олег Володимирович ЩЕСЮК,
Олег Федорович ПРИЩЕПОВ,
Володимир Миколайович ШЕНКЕВИЧ.***

**Основи термодинаміки, теплотехніки та гідро-
газодинаміки
(розділ «Променистий теплообмін»)**

Методичні вказівки

Редактор *О. Михайлова*

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

Підп. до друку 23.04.2025.

Формат 60х84 ¹/₁₆. Папір офсет.

Гарнітура «Times New Roman». Друк ризограф.

Ум. друк. арк. 2,3. Обл.-вид. арк. 1,2.

Тираж 50 пр. Зам. № 6997.

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 05.04.2020.