**РОЗДІЛ 6. Теплообмін випромінюванням**

**6.1. Основні поняття і визначення**

*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 подвійним перетворенням енергії і відбувається в три етапи:

— спочатку внутрішня енергія тіла перетворюється на енергію електромагнітного випромінювання (енергію фотонів або квантів);

— потім, промениста енергія переноситься електромагнітними хвилями в просторі, які в однорідному і ізотропному середовищі і у вакуумі поширюються прямолінійно із швидкістю світла (у вакуумі швидкість світла дорівнює  м/с) підкоряючись оптичним законам заломлення, поглинання і віддзеркалення;

— після перенесення енергії електромагнітними хвилями, відбувається другий перехід променистої енергії у внутрішню енергію тіла шляхом поглинання фотонів.

Тепловому випромінюванню відповідає інтервал довжин хвиль  мкм (1 мкм = 10-6 м), оскільки основна доля променистої енергії в теплотехнічних агрегатах передається саме в цьому діапазоні довжин хвиль. Відмітимо, що видимі світлові промені мають довжину хвилі  мкм, а до інфрачервоного або теплового випромінювання в загальному випадку відносять діапазон довжин хвиль  мкм.

Особливості радіаційного теплообміну:

— всі тіла з температурою вище 0 К володіють власним тепловим випромінюванням, тобто енергію випромінюють всі тіла (тверді тіла, рідини і променевопрозорі гази);

— для передачі теплоти випромінюванням не потрібний тілопосередник, тобто промениста енергія може передаватися і у вакуумі;

— при температурах до 100 0С 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 , де , Вт/м3, спектральна інтенсивність випромінювання тіла. У більшості твердих тіл спектри суцільні. В газів і полірованих металів спектри *лінійчаті* або *селективні*.

З точки зору 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 віддзеркалення.

*Параметри і характеристики теплового випромінювання*

Як і будь-який інший спосіб перенесення теплоти, теплообмін випромінюванням характеризується *температурним полем* системи тіл, що беруть участь в радіаційному теплообміні (T), і *тепловими потоками* випромінювання (Q, Вт) або поверхневою щільністю теплових потоків випромінювання (E, Вт/м2). Окрім цього, тілам, що беруть участь в 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 F 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:

— Qпад і Eпад потік і щільність потоку випромінювання, що падають на поверхню тіла;

— Qотр і Eотр потік і щільність потоку випромінювання, відбиті від поверхні тіла;

— Qпогл і Eпогл потік і щільність потоку випромінювання поглинені тілом;

— Qпроп і Eпроп потік і щільність потоку випромінювання, що пропускаються тілом;

— Qсоб і Eсоб потік і щільність потоку власного випромінювання тіла;

— Qэф і Eэф потік і щільність потоку ефективного випромінювання тіла;

— Qрез і Eрез потік і щільність потоку результуючого випромінювання тіла

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

*Поглинальна, відбивна і пропускльна здібності*

Для розгляду фізичного сенсу поглинальної, відбивної і пропускальної здібностей тіла розглянемо напівпрозоре тіло, на поверхню якого падає потік випромінювання **Qпад** (рис. 6.1). Вочевидь, що для будь-якого напівпрозорого тіла із закону збереження енергії виходить

. (6.1)



Рис. 6.1. Схема радіаційного теплообміну для напівпрозорого тіла

Розділивши ліву та праву частині рівності (6.1) на потік падаючого випромінювання, отримаємо

 або  (6.2)

де  – *поглинальна здатність* тіла, рівна долі падаючого випромінювання, поглиненого тілом;

 – *відбивна здатність* тіла, рівна долі падаючого випромінювання, відбитого тілом;

 – *пропускальна здатність* тіла, рівна долі падаючого випромінювання, що проходить через тіло.

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

Тіло, яке поглинає все падаюче на нього випромінювання, називають *абсолютно чорним тілом* (АЧТ). Потік і щільність потоку власного випромінювання АЧТ позначають  і  відповідно. В абсолютно чорного тіла: .

Тіло, яке *дифузійно* відражає все падаюче на нього випромінювання називають *абсолютно білим тілом*. В абсолютно білого тіла: .

Тіло, яке пропускає все падаюче на нього випромінювання, називають *променевопрозорим* або *діатермічним*. Для діатермічного тіла: .

Вищезгаданих ідеальних тіл в природі не існує. Проте деякі реальні тіла по своїх радіаційних властивостях близькі до ідеальних. Наприклад, в сажі і окисленої шорсткої сталі , в полірованих металів , в двоатомних газів з симетричними молекулами () і в сухого повітря .

В непрозорих тіл: . В газів: .

*Види променистих потоків*

Випромінювання тіла, обумовлене його тепловим станом (мірою нагрітості), називають власним випромінюванням цього тіла. Потік власного випромінювання позначають **Qсоб** або буквою **Q** без нижнього індексу. Щільність потоку власного випромінювання позначають

 або ,  (6.3)

і називають *випромінювальною здатністю* тіла. У величині Eсоб вміщена вся енергія, що випромінюється тілом в діапазоні довжин хвиль , тобто енергія випромінювання всього спектру. Долю випромінювальної здатності, вміщену в нескінченно малому спектральному діапазоні довжин хвиль називають *спектральною щільністю потоку власного випромінювання* або *спектральною випромінювальною здатністю* тіла і позначають

, . (6.4)

Знаючи функцію розподілу , випромінювальну здатність тіла Е можна розрахувати, проінтегрував цю функцію по всьому спектру випроміню-вання:

. (6.5)

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

Далі розглянемо схему радіаційного теплообміну, зображену на рис.6.2. На непрозоре тіло падає променистий потік **Qпад**. Одна частина теплового потоку в кількості **Qпогл** поглинається тілом, а інша – в кількості **Qотр** тілом відбивається. Тіло володіє і власним випромінюванням **Qсоб** або **Q**.

Радіаційний тепловий потік, що вирушає з поверхні тіла, рівний сумі власного і відбитого теплових потоків, називають ефективним тепловим потоком і позначають **Qэф**. Ефективний тепловий потік за визначенням рівний:

. (6.6)

Тепловий потік, що йде на зміну теплового стану тіла, називають результуючим тепловим потоком і позначають **Qрез** або з метою уніфікації позначень в розрахунках складного (радіаційно-конвективного) теплообміну **Qw**. В результаті радіаційного теплообміну тіло отримує або віддає кількість енергії (див. рис.6.2):

 (6.7)

або

 (6.8)



Рис. 6.2. Схема радіаційного теплообміну для непрозорого тіла

Якщо розрахунок радіаційного теплообміну проводять, використовуючи щільності відповідних радіаційних потоків, то в цьому випадку формули (6.6) - (6.8) наберуть вигляду:

 (6.9)

 (6.10)

 (6.11)

На закінчення ввідного пункту без виводу приведемо формулу зв'язку власного, результуючого і ефективного потоків випромінювання:

 або  (6.12)

**6.2. Основні закони випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ)**

Абсолютно чорних тіл в природі не існує. Як модель АЧТ використовують отвір в стінці непрозорої порожнини з розмірами багато 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 Планка*

У 1900 році на основі квантової теорії німецький фізик Макс Планк вивів закон, що встановлює залежність спектральної інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла () від довжини хвилі () і абсолютної температури (Т), –. Цей закон носить ім'я Планка і має вигляд:

,  (6.13)

де T – абсолютна температура абсолютно чорного тіла, К;

 С1 і С2 – коефіцієнти, пов'язані з універсальними фізичними константами наступними співвідношеннями:

;

,

у яких  м/с – швидкість світла у вакуумі;

  Дж·с – постійна Планка;

  Дж/k – постійна Больцмана.

Графік залежності зображений на рис. 6.3. Аналіз цього графіка дозволяє зробити наступні виводи:

— залежність має екстремальний характер;

— із зростанням температури довжина хвилі, при якій спостерігається максимум спектральної щільності потоку випромінювання АЧТ, зменшується.



Рис. 6.3. Спектральна щільність потоку випромінювання АЧТ

*Закон Віна*

Довжина хвилі, при якій спостерігається максимальне значення спектраль-ної щільності потоку власного випромінювання  і температура зв'язані зворотньо пропорційною залежністю:

. (6.14)

Цей закон є наслідком закону Планка. Проте він був отриманий Віном раніше (у 1893 році) і тому носить його ім'я. Знаючи , по формулі (6.14) легко знайти температуру випромінювача.

*Закон Стефана-Больцмана*

Закон Стефана-Больцмана за умови термодинамічної рівноваги встановлює зв'язок щільності потоку власного випромінювання поверхні АЧТ (Е0) з його абсолютною температурою (Т):

, Вт/м2 (6.15)

де  = 5,67⋅10-8 Вт/(м2⋅К4) – постійна Стефана–Больцмана.

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

, (6.16)

де  = 5,67 Вт/(м2⋅К4) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

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

**6.3. Випромінювання реальних тіл. Закон Кирхгофа**

Випромінювання реальних тіл відрізняється від випромінювання абсолютно чорного тіла, як по спектральному складу – вигляду функції , так і по величині (рис.6.4, а). При рівних температурах реальні тіла випромінюють теплової енергії менше, ніж АЧТ. І при цьому максимум спектральної щільності 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.

 Рис.6.4. 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:

. (6.16)

Коефіцієнт  змінюється в межах від 0 до 1 і для кожної довжини хвилі **λ** характеризує долю, яку  даного тіла складає від  абсолютно чорного тіла при одній і тій же температурі. Зміна спектральної мірі чорноти  різних тіл показана на рис. 6.4, б. З формули (6.16) виходить, що спектральна міра чорно-ти абсолютно чорного тіла дорівнює одиниці.

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

*Закон Кирхгофа*

Абсолютно чорне тіло поглинає все падаюче на нього випромінювання () і одночасно є ідеальним випромінювачем в якого . Дана обставина наводить на думку, що і в реальних тіл між випромінювальною здатністю  і його поглинальною здатністю  існує однозначний зв'язок. Цей зв'язок встановив німецький фізик Кирхгоф в 1859 році і тому його називають законом Кирхгофа. Згідно із законом Кирхгофа відношення спектральної щільності 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:

. (6.17)

Порівнюючи вирази (6.16) і (6.17), нескладно зробити висновок про те, що спектральна поглинальна здатність дорівнює спектральній мірі чорноти:

. (6.18)

Рівність (6.17) є слідством із закону Кирхгофа і строго справедливо при локальній термодинамічній рівновазі між випромінюванням і речовиною, що на практиці не виконується. Проте допущення про локальну термодинамічну рівновагу в розрахунках радіаційного теплообміну підтверджується результата-ми експериментів.

*Поняття сірого тіла*

Щільність потоку власного випромінювання тіла у вузькому елементарному спектральному діапазоні  – спектральну щільність теплового потоку можна розрахувати, застосувавши формулу (6.16):

. (6.19)

Потім, експериментально встановивши залежність спектральної міри чорноти від довжини хвилі і температури  для даного матеріалу, можна знайти і випромінювальну здатність реального тіла:

. (6.20)

Такий підхід до розрахунку власного випромінювання реальних тіл вельми складний із-за необхідності 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. 6.4, а), а його спектральна щільність потоку випромінювання  менше спектральної щільності потоку випромінювання АЧТ  в однакове число разів. Тобто спектральна міра чорноти *сірого* тіла при даній температурі не залежить від довжини хвилі:  (штрихова лінія на мал. 6.4, б). В сірого тіла випромінювальна здатність буде рівна:

. (6.21)

 У формулі (6.21): σ0 = 5,67⋅10-8 Вт/(м2⋅К4) – постійна Стефана–Больцмана;  = 5,67 Вт/(м2⋅К4) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; – коефіцієнт випромінювання сірого тіла, Вт/(м2(К4);  – інтегральна міра чорноти тіла. З формули (6.21) виходить, що інтегральна міра чорноти дорівнює відношенню випромінювальної здатності сірого тіла (E) до випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла ():

. (6.22)

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

Закон Кирхгофа для сірого тіла набирає вигляду:

 (6.23)

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

Порівнюючи вирази (6.22) і (6.23) можна зробити вивід про те, що міра чорноти сірого тіла рівна його поглинальній здатності:

. (6.24)