

ТЕМА 10_ТОПЛИННО ИЗЛЪЧВАНЕ

1. Излъчване. Видове излъчване.

При определени условия телата придобиват възможността да преобразуват различни видове енергия в електромагнитна, която се излъчва под формата на електромагнитни вълни. При наличие на видима светлина в спектъра на излъчването телата светят. Частичите, които преобразуват приетата енергия в електромагнитна са атомите. Приемайки определен вид енергия, те минават във високоенергетично (възбудено) състояние, след което спонтанно (при определени случаи може и принудено) се връщат в основно състояние, излъчвайки всичката или част от приетата енергия под формата на електромагнитни вълни.

Ако излъчването става за сметка на енергията на топлинното движение на градивните частици на веществото (атоми или молекули) то се нарича **топлинно излъчване**. В останалите случаи говорим за **луминесценция**. Когато енергията се внася в атома в резултат на химическа реакция, излъчването се нарича **хемилуминесценция** (светене на окисляващ се фосфор). Излъчването под действие на електрично поле носи названието **електролуминесценция** (светене на газовете при ударна йонизация при самостоятелен електричен разряд). При електролуминесценцията енергията се внася в атома чрез удар с електрон, набрал достатъчно енергия при ускоряване в електрично поле. Някои вещества светят при облъчване с достатъчно бързи електрони от предварително формиран електронен сноп, което се нарича

катодолуминесценция (светене на луминифора на кинескопа). Светенето, което се наблюдава при поглъщане на достатъчно енергетично лъчение се нарича **фотолуминесценция**. Например светенето на луминифора на луминесцентните лампи се дължи на облъчване му с ултравиолетови лъчи, получени при газов разряд в наситени живачни пари в балона на лампата.

2. Характеристики на излъчването и поглъщането.

Излъчването и поглъщането на електромагнитни вълни са процеси, които са характерни за всички тела. Тези процеси протичат с различна скорост при лъчения с различни дължини на вълната. Поради това се въвеждат два вида характеристики на тези явления: спектрални и интегрални. Спектралните характеристики се отнасят за достатъчно малък интервал $d\lambda$, избран около определена дължина на вълната λ . Тези характеристики зависят от дължината на вълната и тази зависимост определя техния спектър на излъчване и поглъщане. Интегралните характеристики се отнасят за всички дължини на вълната (теоретически от нула до безкрайност).

Нека ΔS е равномерно излъчващ равнинен елемент от повърхност на тяло с температура T . С $dW_{\text{И}}$ означаваме енергията, излъчена от единица площ от ΔS за единица време в цялото полупространство над него и в интервала от дължини на вълната $\lambda, \lambda + d\lambda$. Величината $e_{\lambda T}$, определена от равенството

$$e_{\lambda T} = \frac{dW_{\text{И}}}{d\lambda} \quad (10.1)$$

е излъчената енергия, приведена към единичен интервал от дължина на вълната, и се нарича **спектрална излъчвателна способност** на елемента ΔS .

В най-общият случай $e_{\lambda T}$ зависи от: местоположението (координатите) на елемента ΔS върху излъчващата повърхност, времето, дължината на вълната λ и температурата T . Зависимостта $e_{\lambda T} = f(\lambda)$ се нарича **спектр на излъчване** на ΔS при температура T . В частност ΔS може да е цялата повърхност или част от повърхността на излъчващото тяло. В SI $e_{\lambda T}$ се измерва с единицата W/m^3 .

Нека dW е енергията падаща за единица време върху единица площ от равномерно облъчен елемент ΔS от повърхността на тяло и която съответства на интервала $\lambda, \lambda + d\lambda$. С $dW_{\text{П}}$ и $dW_{\text{Р}}$ означаваме съответно погълнатата и отразената енергия за същото време от същата площ и за същия интервал от λ .

Величината $a_{\lambda T}$, определена чрез израза

$$a_{\lambda T} = \frac{dW_{\text{П}}}{dW} \quad (10.2)$$

се нарича **спектрална поглъщателна способност** на тялото (спектрален коефициент на поглъщане). Аналогично величината

$$R_{\lambda T} = \frac{dW_{\text{Р}}}{dW} \quad (10.3)$$

се нарича **спектрална отражателна способност** на тялото (спектрален коефициент на отражение).

Както величината $e_{\lambda T}$, така и величините $a_{\lambda T}$ и $R_{\lambda T}$ зависят от: местоположението на ΔS върху повърхността на тялото, времето, дължината на вълната и температурата на тялото. Зависимостите $a_{\lambda T} = f(\lambda)$ и $R_{\lambda T} = f(\lambda)$

се наричат съответно **спектр на поглъщане** и **спектр на отражение** на елемента ΔS при температура T . Величините $a_{\lambda T}$ и $R_{\lambda T}$ са безразмерни, могат да имат стойности от 0 до 1 и ако няма пропускане на лъчението

$$a_{\lambda T} + R_{\lambda T} = 1 \quad (10.4)$$

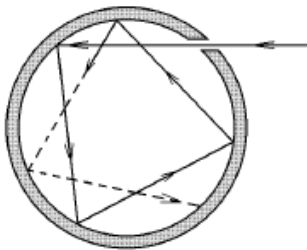
Величината

$$e_T = \int_0^{\infty} e_{\lambda T} d\lambda \quad (10.5)$$

се нарича **интегрална излъчвателна способност** при дадена температура T . Тя е общата енергия (за всички λ), излъчена от единица площ от ΔS за единица време в цялото полупространство над елемента ΔS от повърхността на тялото. Единицата за e_T в SI е W/m^2 .

Интегралната поглъщателна способност a_T (**интегрален коефициент на поглъщане**) се дефинира като отношение на погълната енергия W_{Π} (отнасяща се за единица площ, за единица време и за всички λ) и падащата енергия W , взета при същите условия, т.е. $a_T = W_{\Pi}/W$.

Интегралната отражателна способност R_T (**интегрален коефициент на отражение**) се дефинира по аналогичен начин, като вместо W_{Π} се използва W_R . Величината W_R е сумарната енергия (за всички λ), отразена от единица площ, за единица време, т.е. $R_T = W_R/W$.



Фиг.10.1.

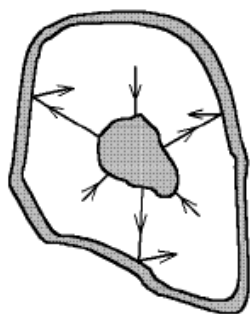
Тяло, за което $a_{\lambda T} = 1$ за всички дължини на вълната и всички температури се нарича **абсолютно черно тяло**. Очевидно е, че при абсолютно черното тяло и $a_T = 1$. С известно приближение като модел за абсолютно черно тяло може да се смята затворена кухня с малък отвор и с почернени вътрешни стени (фиг. Error! Reference source not found..1). Лъчението попаднало в този отвор, след неколkokратно отражение постепенно се поглъща напълно от стените на кухнята. Площта на отвора е много по-малка от вътрешната повърхност на сферата, поради което вероятността лъчението да излезе обратно през отвора преди да се е погълнало е много малка. Като реален пример за приблизително абсолютно черно тяло е Слънцето.

Ако $a_{\lambda T}$ е еднаква за всички λ , но $a_{\lambda T} < 1$ тялото се нарича **сиво**. Неговата поглъщателна способност зависи от температурата, веществото и състоянието на повърхността му. Спектърът на поглъщане и отражение на реалните тела в най-общия случай има сложен вид, специфичен за повърхността. Поради това, във видимата област например, повърхностите на телата имат различни цветове съответстващи на отражение на светлинните вълни от един или друг диапазон от дължината на вълната.

3. Топлинно излъчване. Равновесен характер на топлинното излъчване. Закон на Кирхоф.

Топлинното излъчване е резултат от превръщането на топлинната енергия в електромагнитна и се наблюдава при всички температури по-високи от

абсолютната нула. При ниски температури (например под 1000 K) излъчените електромагнитни вълни са от инфрачервената област на спектъра, а силно загретите тела (над 3000 K) излъчват интензивно и видима светлина. Освен, че изменя спектралния състав на лъчението, загряването води и до повишаване на неговия интензитет. Топлинното излъчване води до понижаване на температурата на тялото поради превръщане на топлинната енергия в електромагнитна, а поглъщането повишава температурата на тялото поради обратния процес на превръщане на електромагнитната енергия в топлинна. Тези особености на топлинното излъчване и поглъщане дават възможност при определени условия да се достигне равновесно термодинамично състояние, при което мощността на излъчване е равна на мощността на поглъщане. Споменатите мощности са излъчената или погълната енергия от тялото за единица време.



Фиг.10.2.

Топлинното излъчване е единственият вид излъчване, при което може да се достигне топлинно равновесие. Нека в топлинно изолирана вакуумирана кухня, с идеално отразяващи стени (коефициента на отражение е единица за всяко λ) мислено поставим нагрятото тяло (фиг.10.2). Тялото започва да излъчва и поради идеалното отражение от стените на кухината плътността на електромагнитната енергия вътре в нея непрекъснато расте. Това води до нарастване и на обратния процес на поглъщане (мощността на поглъщането е пропорционална на плътността на лъчението в кухината). В крайна сметка се достига равновесно състояние, при което енергията излъчена от тялото за единица време е равна на енергията, която то поглъща за същото време и температурата на тялото остава постоянна. Това е състояние на **топлинно равновесие**. Равновесието е устойчиво, тъй като всяко, достатъчно малко отклонение от равновесното състояние води до процеси, които възстановяват равновесието. Например увеличението на температурата на тялото над равновесната води до увеличаване на скоростта на излъчване в сравнение с тази на поглъщане, тялото изстива и равновесието се възстановява.

От всички видове излъчвания, разгледани в началото на тази глава, топлинното излъчване е единственото равновесно излъчване.

За система от тела, които са в топлинно равновесие е валиден закона на Кирхоф (Густав Кирхоф, 1824 – 1887 г.), който изразява връзката между спектралните излъчвателна и поглъщателна способност на телата в тази система.

За да формулираме закона на Кирхоф ще използваме следния мислен експеримент. Във вакуумирана кухня с топлонепроницаеми и идеално отразяващи вътрешни стени са поставени n тела, едното от които (например n -тото) е абсолютно черно. Всяко от телата е покрито с филтър, така че да излъчва и поглъща лъчение с определена дължина на вълната (например λ). След известно време настъпва топлинно равновесие, при което температурата T във всяка точка от системата е една и съща и не зависи от времето. Такава е и температурата на всяко от телата. От казаното следва, че за разглежданата дължина на вълната по-голямата спектрална излъчвателна способност е съпроводена с по-голяма спектрална поглъщателна способност, като

$$\left(\frac{e_{\lambda T}}{a_{\lambda T}}\right)_1 = \left(\frac{e_{\lambda T}}{a_{\lambda T}}\right)_2 = \dots = \left(\frac{e_{\lambda T}}{a_{\lambda T}}\right)_{n-1} = \left(\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}}\right)_n \quad (10.6)$$

Това съотношение изразява **закона на Кирхоф**. С $E_{\lambda T}$ и $A_{\lambda T}$ са означени съответно спектралните излъчвателна и поглъщателна способност на абсолютно черното тяло. Отчитайки, че $A_{\lambda T} = 1$, законът на Кирхоф може да се формулира по следният начин:

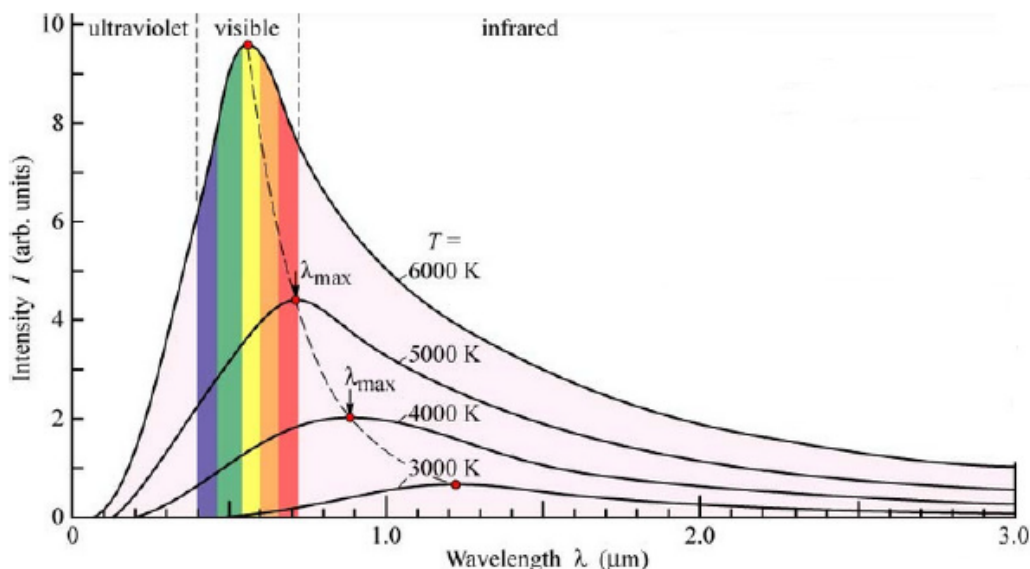
Отношението на спектралната излъчвателна способност и спектралната поглъщателна способност при дадена дължина на вълната и дадена температура за всяко тяло е едно и също и е равно на спектралната излъчвателна способност на абсолютно черното тяло при същата дължина на вълната и същата температура, т.е.

$$\frac{e_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} = E_{\lambda T} \quad (10.7)$$

Функцията $E_{\lambda T}$ е универсална функция на λ и T и се нарича още функция на Кирхоф. Познаването на нейния вид е от съществено значение за изясняване на процесите на излъчване и поглъщане на телата.

4. Спектър на излъчване на абсолютно черно тяло. Закони на Стефан-Болцман и Вин.

Експерименталните изследвания на спектъра на излъчване на абсолютно черно тяло, т.е. на зависимостта $E_{\lambda T} = f(\lambda)$, при постоянна температура, проведени в края на 19 век, показват, че функцията $E_{\lambda T}$ има вида, илюстриран на фиг.10.3. Представените криви се отнасят за няколко характерни температури.



Фиг. 10.3. Спектрално разпределение на излъчената енергия от абсолютно черно тяло при различни температури (в относителни единици).

Експериментално са установени два закона за излъчването на абсолютно черно тяло:

а) **Интегралната излъчвателна способност на абсолютно черното тяло е право пропорционална на четвъртата степен на абсолютната му температура T :**

$$E_T = \int_0^{\infty} E_{\lambda T} d\lambda = \sigma T^4. \quad (10.8)$$

Този закон е установен най-напред експериментално от австрийския физик Йозеф Стефан (1835 – 1893), а по-късно е получен теоретично от Людвиг Болцман (1844 - 1906). Поради това той носи названието **закон на Стефан-Болцман**. Величината σ е универсална физична константа и се нарича **константа на Стефан-Болцман**.

Законът на Стефан – Болцман е в сила с достатъчна за практиката точност и за сиви тела, ако оптичните им свойства не се изменят с температурата – тогава такива тела се наричат идеално сиви тела. Приема се, че собственото им излъчване е пропорционално на четвърта степен на температурата им, но е по-слабо от това на абсолютно черното тяло:

$$E/E_T = \varepsilon = \text{const} \leq 1 \quad (10.9)$$

Отношението ε на интегралната излъчвателна способност на дадено сиво тяло към интегралната излъчвателна способност на абсолютно черно тяло при същите условия показва относителната способност на излъчване на реалното тяло и се нарича **интегрална степен на чернота** (emissivity в англоезичната литература) на това тяло.

Тогава за сиви тела законът на Стефан – Болцман придобива вида:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (10.10)$$

б) **Дължината на вълната λ_m , при която функцията $E_{\lambda T} = f(\lambda)$ има максимум (фиг. 10.3) е обратно пропорционална на абсолютната температура т.е.**

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad (10.11)$$

Таблица 10.1

Условия	T, K	λ_m , μm
Стайна температура	300	10
Температура на нагрятата нишка на лампа	3000	1
Температура на слънчевата повърхност	6000	0.5

Известно време след установяването ѝ, зависимостта (10.11) е получена теоретично от немския физик Вилхелм Вин (1864 - 1928), поради което се нарича **закон на Вин** за отнемстването на максимума на спектъра на излъчване на абсолютно черното тяло. Константата $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$ е също универсална константа и се нарича **константа на Вин**. Ако λ_m се измерва в микрометри, а T – в келвини, $b = 3000 \mu\text{m.K}$; тогава $\lambda_m \approx 3000/T, \mu\text{m}$. За някои характерни температури стойността на λ_m е дадена в Таблица 10.1.

5. Квантова природа на излъчването. Закон на Планк.

Един от най-големите проблеми, стоящи пред физиката в края на 19 век е бил проблема за намирането на аналитичния вид на функцията $E_{\lambda T} = f(\lambda)$. Оказва се, че класическата физика, която приема, че излъчването и поглъщането са непрекъснати процеси, т.е. лъчението се излъчва и поглъща във вид на електромагнитна вълна, не е в състояние да се справи с тази задача. Всички опити да бъде получен теоретично спектъра на излъчване на

абсолютно черно тяло от гледища на класическата физика се оказват безуспешни.

В 1900 г. видният немски физик Макс Планк (1858 - 1947) успява да получи аналитичния вид на функцията на Кирхоф ($E_{\lambda T} = f(\lambda)$). Той предполага, че електромагнитната енергия се излъчва не непрекъснато, а на отделни порции, които Планк нарича кванти. Енергията E на всеки квант е право пропорционална на честотата ν на лъчението

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (10.12)$$

където λ е дължината на вълната, c – скоростта на светлината във вакуум ($c = \lambda\nu$), а h е фундаментална физична константа, наречена по-късно константа на Планк, която има стойност $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Въз основа на предположението за квантовия характер на излъчването, Планк получава следната формула за зависимостта на излъчвателната способност на абсолютно черното тяло от дължината на вълната:

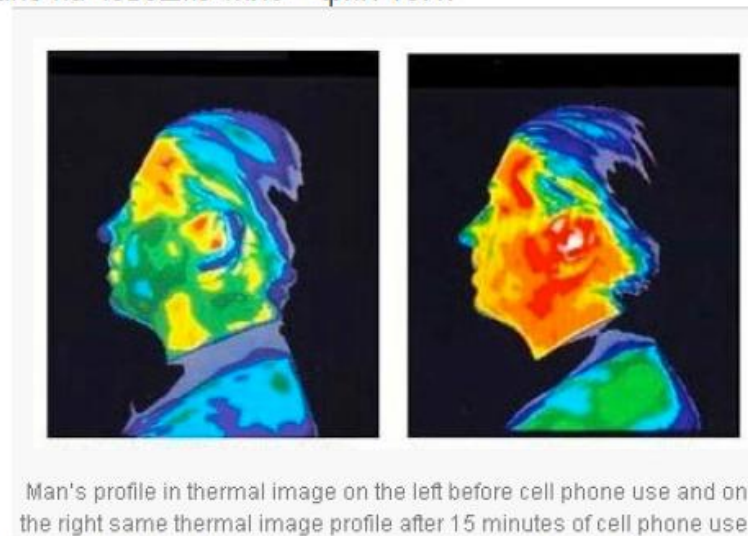
$$E_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} \quad (10.13)$$

В тази зависимост k е константата на Болцман. Другите величини са вече известни.

Сравнението на експерименталните стойности за $E_{\lambda T}$ с тези, пресметнати по формулата на Планк (10.13) показва пълно съответствие между теория и експеримент.

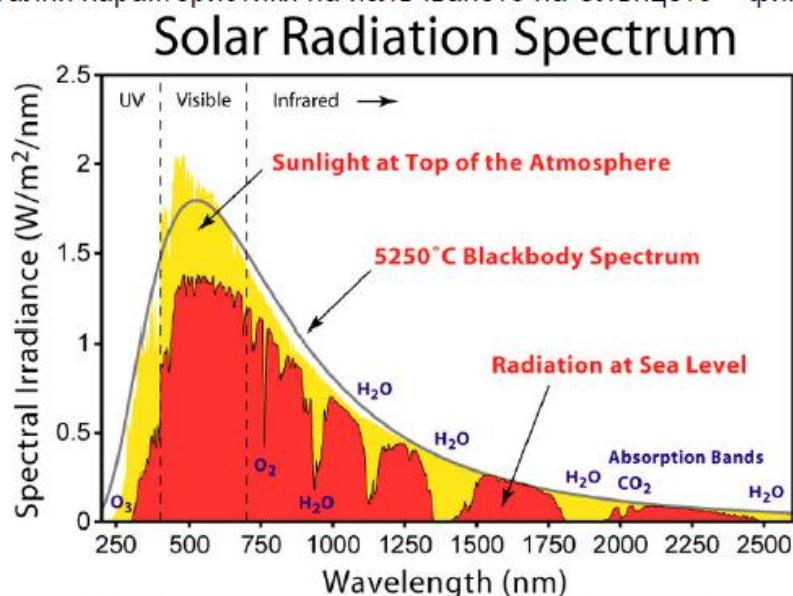
6. Примери.

а) Излъчване на човешко тяло – фиг. 10.4.



Фиг. 10.4. Излъчване на главата на човек, заснето с инфрачервена камера; вляво – преди телефонен разговор; вдясно – след 15 минути разговор по мобилен телефон.

б) Спектрални характеристики на излъчването на Слънцето – фиг. 10.5.



Фиг. 10.5. Спектър на излъчването на Слънцето.

Спектралните характеристики на излъчването на Слънцето практически съвпадат с тези на излъчването на абсолютно черно тяло при температури около 5500 – 6000 K – фиг.10.5. При преминаване през Земната атмосфера вследствие на селективното поглъщане от пари и газове – фиг. 10.5 (оцветено в жълто) спектърът на Слънчевото лъчение, което достига до морско ниво, се променя и придобива вида, показан на фиг. 10.5 – оцветен в червен цвят.