**ЛЕКЦИЯ 6 (АИ 2 курс)**

**ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

План

1. Тепловое излучение и его характеристики.

2. Характеристики излучающих тел. Абсолютно черное и абсолютно белое тела.

3. Законы теплового излучения.

4. Квантовая гипотеза Планка.

5. Оптическая пирометрия.

**1.10**

Наиболее распространенным в природе видом электромагнитного излучения является тепловое.

***Тепловое излучение*** - испускание электромагнитныхволн нагретыми телами за счет их внутренней энергии**.** Тепловое излучение свойственно всем телам при температуре выше 0 К и имеет сплошной спектр частот.

При этом излучение всех длин волн обусловлено колебаниями электрических зарядов, входящих в состав вещества, т.е. ионов и электронов. Колебания ионов дает излучение с низкими частотами (инфракрасное) вследствие их значи­тельной массы. Движение электронов, входящих в состав атомов или молекул, создает высокочастотное излучение (видимое и ультрафиолетовое).

Излучение сопровождается потерей энергии телом. Следовательно, тело охлаждается. Но, одновременно, тело поглощает часть энергии, испускаемой другими телами. Поглощение энергии приводит к увеличению внутренней энергии тела, следовательно, к его нагреванию.

Постоянное испускание и поглощение энергии телами приводит к тому, что в изолированной термодинамической системе в конце концов устанавливается такая температура, при которой уменьшение энергии телом при испускании компенсируется ее увеличением при поглощении, спектр излучаемой и поглощаемой энергии остается неизменным во времени. Такого типа излучение называется ***равновесным***.

Тепловое излучение − единственный вид излучения, который является равновесным. Все другие виды излучений – неравновесные. Тепловое излучение зависит от температуры тела, так как является следствием хаотического теплового движения молекул и атомов.

Тепловое или равновесное излучение подчиняется определенным общим закономерностям, вытекающим из принципов термодинамики. Однако прежде чем перейти к рассмотрению законов теплового излучения, необходимо ввести его основные характеристики.

Рассмотрим основные характеристики теплового излучения.

***Поток излучения*** − скалярная физическая величина, равная количеству энергии, излучаемой нагретым телом со всей поверхности в единицу времени:

 . (1.10)

Основной единицей измерения потока излучения является .

***Энергетическая светимость тела*** - энергия, излучаемая в единицу времени с единицы площади нагрето­го тела во всем интервале длин волн (0 < λ< ∞):

 . (2.10)

Основной единицей измерения энергетической светимости тела является .

Поток излучения и энергетическая светимость – функции температуры и не учитывают спектральный состав излучения.

Излучение нагретого тела при данной температуре *Т* состоит из волн различной длины волны (или частоты), причем волны разных длин несут отличающуюся друг от друга энергию. Поэтому в различных частях спектра излучения энергия, приходящаяся на единичный интервал длин волн, различна. Следовательно, должна существовать функция распределения, отражающая зависимость энергии излучения от длины волны, около которой взят этот единичный интервал. Такой функцией является спектральная плотность энергетической светимости (излучательности) *r*λ,*T*.

***Спектральная плотность энергетической светимости***  - скалярная физическая величина, численно равная энергии, излучаемой нагретым телом в единицу времени с единицы площади и приходящаяся на единичный интервал длин волн, взятый около заданной длины волны:

 (3.10)

Основной единицей измерения спектральной плотности энергетической светимости тела является .

Энергетическая светимость *RT*, является интегральной характеристикой излучения, и связана со спектральной плотностью энергетической светимости соотношениями

 и . (4.10)

Индекс *“T”* у *RT* и *r*λ,T подчеркивает зависимость этих величин от температуры.

Так как длина волны и частота связаны известным соотношением , спектральные характеристики излучения можно характеризовать также и частотой. Тогда участку спектра dλ будет соответствовать интервал частот dν.

**2.10**

Любое тело не только излучает, но и частично поглощает падающую на него энергию, то есть все тела способны в той или иной степени обмениваться энергией (теплообмен излучением). Спектральной характеристикой поглощения является поглощательная способность*.*

***Поглощательная способность (коэффициент поглощения) тела*** − безразмерная скалярная физическая величина, показывающая, какая доля энергии, падающей в единицу времени на единицу поверхности тела в интервале длин волн от λ до λ*+*dλ, им поглощается:

 . (5.10)

Опыт показывает, что *r*λ,*T* и *a*λ,*T* твердых тел зависят не только от длины волны и температуры, но и от химического состава тела и состояния его поверхности.

По определению не может быть больше единицы. Для тела, полностью поглощающего падающее на него излучение всех длин волн, *.* Такое тело называется ***абсолютно черным***. Для тела, полностью отражающего упавшее на него излучение всех длин волн, . Такое тело называется ***абсолютно белым****.* Тело, для которого поглощательная способность одинакова для всех длин волн и зависит только от температуры, называют серым: .

*Рис. 1.10.*

*Схема модели*

*абсолютно черного тела*

В природе не существует абсолютно черных тел. Но можно найти тела, очень близкие по своим свойствам к абсолютно черным телам (сажа, черный бархат). Наиболее совершенной моделью абсолютно черного тела может служить небольшое отверстие в непрозрачной стенке замкнутой плоскости (рис. 1.10). Луч света, попадающий внутрь полости через отверстие, претерпевает многократные отражения от стенок полости, поглощается ими и практически полностью остается внутри полости.

Модель абсолютно черного тела позволяет понять, почему узкий вход в пещеру или открытые окна домов снаружи кажутся черными, хотя внутри достаточно светло. По этой же причине ворсистые ткани обладают большей поглощательной способностью, чем гладкие.

**3.10**

Если система состоит из нескольких тел, нагретых до различной температуры, то спустя некоторое время произойдет выравнивание температур. Горячие тела, излучая, передают холодным энергии больше, чем получают от них, так происходит до тех пор, пока не наступит равновесное состояние.

Закон Кирхгофа: В состоянии термодинамического равновесия у тел, обменивающихся энергией лишь путем излучения и поглощения, отношение спектральной плотности энергетической светимости к коэффициенту поглощения является величиной постоянной, не зависящей от природы тела:

, (6.10)

где *r*\*λ,*T  - универсальная функция Кирхгофа.*

(Здесь и далее характеристики, отмеченные звездочкой, относятся к абсолютно черному телу).

Смысл закона Кирхгофа: тело поглощает электромагнитные волны преимущественно в том интервале, в котором само их испускает.

Из закона Кирхгофа следует, что чем больше тело поглощает, тем больше оно излучает энергии, то есть спектральная плотность энергетической светимости любого тела в любой области спектра всегда меньше спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при тех же значениях λ и *Т*, так как *a*λ,*T* < 1. Так, например, если раскаленную белую чашку с черным рисунком быстро достать из печи в светлой комнате, то сначала темный рису­нок светится ярче белого фона. После охлаждения, когда собственное излучение чашки становится исчезающе малым, вновь становится видным темный узор на белом фоне.

Кроме того, из закона Кирхгофа следует, что если тело не поглощает электромагнитные волны какой-то частоты, то оно их и не излучает, так как при *a*λ,*T  =* 0, *r*λ,*T  =* 0*.*

Из закона Кирхгофа видно, что основной задачей при описании теплового излучения являлось нахождение зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от температуры и длины волны (частоты), так как она универсальна для всех тел. Интерес представляет и зависимость энергетической светимости *R\*T*  от температуры.

Зависимость функции *R\*T* от температуры была получена Д.Стефаном (1879 г.) из анализа экспериментальных данных, а затем Л.Больцманом (1884 г.) − теоретическим путем.

Закон Стефана – Больцмана: энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна его абсолютной температуре в четвертой степени:

,  (7.10)

где σ = 5,67⋅10-8 Вт/(м2⋅К4) − постоянная Стефана-Больцмана (найденная экспериментально).

Значительно сложнее оказалась задача отыскания универсальной функции Кирхгофа, то есть зависимости *r*\*λ,*T* от длины волны и температуры. Попытка получить теоретически вид функции *r*\*λ,*T* на основе представлений классической физики не увенчалась успехом. Экспериментально же была получена система кривых (рис. 2.10), дающих распределения *r*\*λ,*T* по длинам волн при фиксированных температурах (*Т* = const).

λmax

Ультрафи-

олетовое

излучение

*Т=*1000 *K*

λ



*Т*>6000 *K*

*Т=*6000 *K*

*Т=*4000 *K*

*Т=*3500 *K*

Инфракрасное

излучение

*Рис. 2.10.*

*Температурная и спектральная зависимости универсальной функции Кирхгофа. Выделена область видимого излучения.*

Исследование хода кривых на рис. 2.10 устанавливает следующие закономерности:

1. Зависимость *r*\*λ,T от длины волны изображается непрерыв­ной кривой, обращающейся в нуль при малых и больших длинах волн.

2. Энергия излучения абсолютно черного тела распределена по длинам волн неравномерно: кривая имеет ярко выраженный максимум.

3. По мере повышения температуры тела максимум кривой смещается в область коротких длин волн.

4. Площадь, ограниченная кривой и осью абсцисс, равна энергетической светимости абсолютно черного тела *R*\**T* .

5. Зависимость длины волны λmax , соответствующей максимуму функции *r*\*λ,*T* от температуры, устанавливающая смещение λmax в коротковолновый диапазон длин волн при увеличении температуры тела была установлена немецким физиком В.Вином (1893 г.)*:*

, (8.10)

где *b*1 = 2,9⋅10-3 м⋅*K* − постоянная Вина.

Закон смещения Вина: длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной темпера­туре этого тела.

Этот закон объясняет, почему доля энергии, приходящейся на видимые лучи, возрастает, и свечение тела при нагревании переходит от красного к белому калению.

**4.10**

Аналитически установить вид функции *r*\*λ,*T*  долгое время не удавалось. Только в 1900 году немецкий физик Макс Планк предположил, что энергия излучения испускается телом не непрерыв­но в виде волн, а отдельными порциями – квантами. Энергия одного кванта:

 , (9.10)

где ν − частота излучения, а *h* = 6,62⋅10-34 [Дж⋅с] – константа, получившая название постоянной Планка.

Исходя из этого предположения, М. Планк получил распределение для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела:

, (10.10)

где λ − длина волны излучения, *c* = 3⋅108 м/с − скорость света, *k* =1,38⋅10-23 Дж/К − постоянная Больцмана.

Из формулы Планка можно получить все законы теплового излучения. Действительно, интегрируя *r*\*λ,*T*  по всем длинам волн от 0 до ∞, получим значение энергетической светимости абсолютно черного тела *R*\**T* (площади под кривой *r*\*λ,*T* =*f*(λ)):

.

Полученное выражение совпадает с законом Стефана – Больцмана.

Взяв производную по λ от функции Планка и приравняв её к нулю, найдем положение максимума этой функции:

 ,

Полученное выражение совпадает с законом смещения Вина.

Если подставить в формулу Планка значение длины волны λ, то получим выражение, определяющее зависимость между значением максимальной спектральной плотности энергетической светимости и температурой

, (11.10)

где *b*2 = 1,29⋅10-5 Вт/(м3⋅K5), а выражение называется *вторым законом Вина.*

Второй закон Вина: максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного те­ла при данной температуре пропорционально абсолютной температуре этого тела в пятой степени.

Таким образом, формула Планка хорошо согласуется с экспери­ментальными данными, а также содержит в себе все законы теплового излучения. Кроме того, она позволяет вычислить постоянные в законах теплового излучения.

Выдвижением гипотезы о дискретности излучения М.Планк заложил основы квантовой теории.

**5.10**

Законы теплового излучения используются для измерения температуры раскаленных и самосветящихся тел, удаленных от наблюдателя (например, звезд), когда нельзя пользоваться обычными методами (термометрами, термопарами). В этих случаях можно судить о температуре тела только по его излучению.

Совокупность методов измерения высоких температур, основанных на использовании зависимости спектральной плотности энергетической светимости, или энергетической светимости исследуемого тела от температуры, называется ***оптической пирометрией***, а приборы, применяемые для этой цели, называются ***оптическими пирометрами***.

В качестве примера рассмотрим принцип работы оптического пирометра с исчезающей нитью.

На фоне исследуемого нагретого тела размещают нить (ленточку) лампы накаливания. Нить рассматривают на фоне излучающего нагретого тела. Изменяя ток накала нити, добиваются, чтобы яркости тела и нити были одинаковыми (нить становится неразличимой на фоне тела). Это происходит *при равенстве температур* излучающего тела и нити. Если проградуировать прибор, связав силу тока, проходящего через нить, с её температурой, можно получить удобный способ измерения температур.

Примером использования излучения черного тела является оцен­ка поверхностной температуры Солнца, которое вполне можно считать абсолютно черным телом. Область максимального излучения Солнца приходится на длину волны λmax = 480 нм, поэтому по формуле Вина можно найти температуру поверхности Солнца, называемую цветовой температурой (*Т*ц = 5800 К). Использование закона Стефана − Больцмана позволяет по энергии излучения абсолютно черного тела определить его энергетическую температуру .

Закон Кирхгофа позволяет производить анализ слоев вещества, испускающих свет (если слои достаточно горячи) или поглощающих проходящий свет (если слои холодны). Зная, какой спектр отвечает тому или иному веществу (а все атомные или молекулярные спектры индивидуальны), можно по спектрам испускания или поглощения судить о химическом составе тела. Этот способ послужил основой широко используемого спектрального исследования веществ. Так, с помощью спектрального анализа был открыт на Солнце гелий, а аст­рономы убедились в том, что в состав небесных тел входят те же вещества, которые встречаются и на Земле.

Свечение раскаленных тел используется для создания ламп на­каливания, дуговых ламп.