

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра физики

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ  
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Методические указания  
к лабораторной работе по физике

Минск 2006

УДК 536.521.2(076.5)  
ББК 22.317я7  
И 39

Составители:  
П.Г. Кужир, В.А. Потачид, В.А. Самойлюкович

Рецензенты:  
В.И. Кудин, кандидат физ.-мат. наук., доцент

В методических указаниях приведены основные законы теплового излучения. Описана методика измерения температуры с помощью оптического пирометра.

Издание предназначено для студентов инженерно-технических специальностей всех видов обучения.

© БНТУ, 2006

**Цель работы:** изучить законы теплового излучения, освоить методику измерения температуры пирометром с исчезающей нитью.

**Используемое оборудование:** пирометр с исчезающей нитью, источник тока для нагревания нити накала лампы, температуру которой измеряют.

## 1. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Тепловое излучение** – это электромагнитное излучение, вызванное тепловым хаотическим движением атомов, молекул вещества.

Тепловое излучение существует при любой температуре, так как тепловое движение имеет место при любой температуре выше абсолютного нуля.

В проблемах теплового излучения особо важное значение имеет понятие так называемого **равновесного излучения**. Для установления этого понятия рассмотрим полость с неподвижными и непрозрачными стенками, температура которых поддерживается постоянной.

Опыт показывает, что в замкнутой полости тела, поддерживаемого при постоянной температуре, всегда существует электромагнитное излучение. Это излучение очень быстро достигает равновесного состояния, как в отношении общей плотности энергии, так и в отношении распределения его по длинам волн. Атомы и молекулы стенок переходят в возбужденные состояния за счет энергии теплового движения, а при обратных переходах в менее возбужденные состояния вызывают излучение, заполняющее полость. Падая на стенки полости, лучистая энергия частично отражается, частично поглощается. Происходит изменение направления распространения, спектрального состава, поляризации, интенсивности излучения. В результате всех этих процессов в полости в конце концов устанавливается равновесное излучение, при котором за каждый промежуток времени количество излученной энергии волнами определенной частоты, направления распространения и поляризации в среднем равно количеству поглощенной энергии волн той же частоты, направления распространения и поляризации. Как всякое равновесное состояние, оно характеризуется тем, что

каждому микропроцессу, происходящему в системе, с той же вероятностью соответствует микропроцесс, идущий в обратном направлении (принцип детального равновесия).

**Равновесное излучение однородно, изотропно, неполяризовано.**

Все свойства равновесного излучения зависят только от температуры стенок полости и не зависят от материала стенок. Поскольку излучение находится в тепловом равновесии со стенками полости, то можно говорить о температуре самого излучения, считая ее равной температуре стенок. Следует, подчеркнуть, что температура равновесного излучения есть свойство самого излучения, а не стенки, с которой оно находится в тепловом равновесии. О температуре излучения имеет смысл говорить и тогда, когда вообще нет никаких стенок. Плотность энергии равновесного излучения однозначно определяет его температуру.

Введем теперь некоторые величины, характеризующие тепловое излучение. Энергетической светимостью или интегральной плотностью излучения  $R_T$  называется величина, численно равная энергии, излучаемой с единицы поверхности тела за одну секунду во всем интервале длин волн от нуля до бесконечности и по всем направлениям.

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda, \quad [R_T] = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}, \quad (1)$$

где  $r_{\lambda,T}$  – лучеиспускательная способность или спектральная плотность излучения тела, численно равная энергии, излучаемой с единицы поверхности тела в единицу времени, приходящейся в расчете на единичный интервал длин волн вблизи данной длины волны.

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_{\lambda,T}}{d\lambda}, \quad (2)$$

где  $R_{\lambda,T}$  – энергия, излучаемая единицей поверхности тела в единицу времени в интервале длин волн  $d\lambda$  вблизи волны  $\lambda$ .

Спектральная плотность излучения есть функция распределения излучения по спектру, зависящая от длины волны и температуры тела.

Пусть на элементарную площадку  $ds$  поверхности тела падает поток лучистой энергии  $d\Phi_{\lambda,T}$ , обусловленный электромагнитными волнами, длины волн которых заключены в интервале  $d\lambda$  вблизи длины волны  $\lambda$ . Часть этого потока  $d\Phi'_{\lambda,T}$  будет поглощена телом. Безразмерная величина, равная отношению поглощенной части потока ко всему потоку называется поглотительной способностью:

$$a_{\lambda,T} = \frac{d\Phi'_{\lambda,T}}{d\Phi_{\lambda,T}}. \quad (3)$$

Поглотительная способность зависит от природы тела, от длины волны и температуры. По определению поглотительная способность  $a_{\lambda,T}$  не может быть больше единицы.

Тело называется абсолютно черным, если его поглотительная способность  $a_{\lambda,T} = 1$  для всех длин волн при любой температуре.

Абсолютно черное тело это идеализированный объект. Наилучшим приближением к абсолютно черному телу является замкнутая полость, в стенке которой сделано малое отверстие, через которое излучение из полости может выходить наружу. Если стенки полости непрозрачны, то при достаточно малых размерах отверстия в полости установится излучение лишь бесконечно мало отличающееся от равновесного. Через отверстие будет выходить практически такое же излучение, какое испускалось бы абсолютно черной площадкой по размерам и форме совпадающей с размерами и формой отверстия.

Луч света, вошедший в полость через отверстие, будет претерпевать многократные отражения от стенок полости (рис.1). При каждом отражении часть лучистой энергии поглощается. После многократных отражений луч либо совсем не выйдет наружу через отверстие, либо выйдет лишь ничтожная часть лучистой энергии, вступившей в полость. Практически вся энергия поглощается стенками полости. Это значит, что полость с малым отверстием в отношении поглощения ведет себя как абсолютно черное тело.

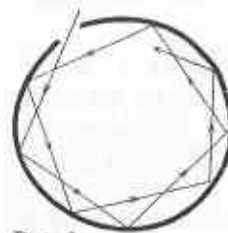


Рис.1

Если стенки полости с малым отверстием ярко осветить снаружи, то отверстие будет выделяться своей чернотой на светлом фоне освещенных стенок. Такими представляются, например, окна зданий. Если же раскалить стенки полости, то отверстие будет светиться ярче стенок полости.

У реальных тел поглощательная способность  $a_{\lambda,T} < 1$ .

**Если поглощательная способность не зависит от длины волны и меньше единицы, то такое тело называется серым.**

$$a_{\lambda,T} = a_T < 1.$$

## 2. ЗАКОН КИРХГОФА ДЛЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Между излучательной и поглощательной способностью тела имеется определенная связь. Рассмотрим следующий эксперимент. Пусть внутри замкнутой полости (рис.2), поддерживаемой при постоянной температуре  $T$ , помещены три тела.

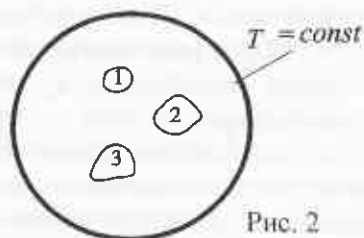


Рис. 2

Внутри полости вакуум, так что тела могут обмениваться энергией между собой и со стенками полости путем испускания и поглощения электромагнитных волн. Опыт показывает, что такая система придет через некоторое время в состояние теплового равновесия – все тела будут иметь одну и ту же температуру, равную температуре стенок полости  $T$ . Это возможно только в том случае, если тело, испускающее больше энергии, также и больше поглощает.

**Отношение лучеиспускательной способности тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел не зависит от их природы и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела, которая является универсальной функцией длины волны и температуры.**

$$\left( \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_1 = \left( \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_2 = \left( \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_3 = \dots u_{\lambda,T} = f(\lambda, T), \quad (4)$$

где  $u_{\lambda,T}$  – лучеиспускательная способность абсолютно черного тела. Этот закон был установлен в 1859 году Кирхгофом и носит его имя.

Из закона Кирхгофа следует, что лучеиспускательная способность реального тела  $r_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} u_{\lambda,T}$ ,

где  $a_{\lambda,T}$  – поглощательная способность реального тела, а  $u_{\lambda,T}$  – лучеиспускательная способность абсолютно черного тела.

Так как для реальных тел  $a_{\lambda,T} < 1$ , то  $r_{\lambda,T} < u_{\lambda,T}$ , т.е. лучеиспускательная способность реального тела всегда меньше лучеиспускательной способности абсолютно черного тела для той же длины волны и при одинаковой температуре.

Если тело не поглощает данные длины волны ( $a_{\lambda,T} = 0$ ), то оно при тех же условиях не будет их излучать

$$r_{\lambda,T} = 0 \cdot u_{\lambda,T} = 0.$$

Если тело хорошо поглощает данные волны, то оно необязательно будет их излучать, потому что может оказаться, что абсолютно черное тело не излучает ( $u_{\lambda,T} = 0$ ) эти длины волн при тех же условиях:  $r_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} \cdot 0 = 0$ .

Для того чтобы тело излучало какие-либо волны необходимо, чтобы оно поглощало, а абсолютно черное тело излучало их при этих же условиях. Например, зеленый лист хорошо поглощает фиолетовое излучение при комнатной температуре, но зеленый лист не излучает фиолетовые лучи при этой температуре, так как при комнатной температуре у абсолютно черного тела фиолетовое излучение отсутствует.

## 3. ЗАКОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА

### 3.1 Закон Стефана-Больцмана

После установления закона Кирхгофа стало очевидно, что первоочередная задача теплового излучения состоит в нахождении вида функции Кирхгофа, т.е. в выяснении вида зависимости лучеиспускательной способности  $u_{\lambda,T}$  абсолютно черного тела от его температуры и длины волны излучения  $\lambda$ . Однако, сначала удалось решить более простую задачу: найти зависимость интегральной плотности излучения  $R_T$  абсолютно черного тела от его температуры. В 1884 году Л.Больцман, применив термодинамический метод к исследованию равновесного теплового излучения внутри замкнутой

полости, теоретически показал, что интегральная плотность излучения  $R_T$  абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$R_T = \sigma T^4. \quad (5)$$

Этот закон получил название Стефана-Больцмана, так как еще в 1874 году Д. Стефан на основе анализа экспериментальных данных пришел к аналогичному выводу. Однако Стефан ошибочно считал, что интегральная плотность излучения любого тела также пропорциональна четвертой степени их абсолютной температуры. Коэффициент пропорциональности  $\sigma$  называется постоянной Стефана-Больцмана.

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

### 3.2 Закон смещения Вина

Закон Стефана-Больцмана касается лишь интенсивности интегрального излучения абсолютно черного тела и ничего не говорит относительно спектрального распределения энергии. Тщательные измерения излучения абсолютно черного тела привели к экспериментальному установлению распределения энергии излучения по длинам волн.

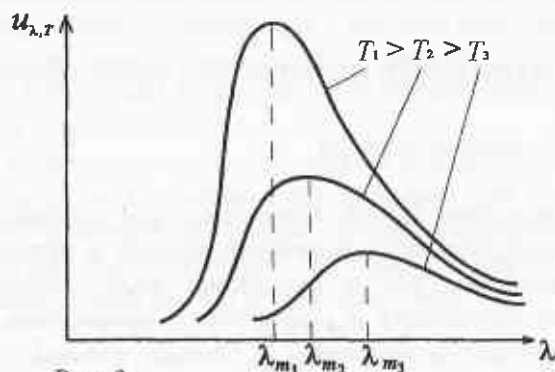


Рис. 3

Эксперименты показали, что зависимость спектральной плотности излучения  $u_{\lambda, T}$  от длины волны  $\lambda$  при разных температурах  $T$  абсолютно черного тела имеют вид, изображенный на рис. 3.

Существование на каждой кривой максимума свидетельствует о том, что энергия излучения абсолютно черного тела распределена по спектру неравномерно: абсолютно черное тело почти не излучает энергии в области очень малых и очень больших длин волн. По мере повышения температуры тела максимум  $u_{\lambda, T}$  смещается в сторону малых длин волн.

Такое распределение спектральной плотности излучения обусловлено распределением скоростей хаотического движения атомов молекул вещества при различных температурах.

В 1893 году В. Вин теоретически установил, что длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум спектральной плотности излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (6)$$

где постоянная  $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ .

Площадь, ограниченная кривой зависимости  $u_{\lambda, T}$  от  $\lambda$  и осью абсцисс, пропорциональна интегральной плотности излучения  $R_T$  абсолютно черного тела. Поэтому в соответствии с законом Стефана-Больцмана она возрастает пропорционально  $T^4$ .

## 4. ОПТИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЯ. ПИРОМЕТР С ИСЧЕЗАЮЩЕЙ НИТЬЮ

Для измерения температуры раскаленных тел ( $T > 2000^\circ \text{К}$ ), а также самосветящихся тел, удаленных от наблюдателя (например, звезд) нельзя пользоваться обычными методами, основанными на применении термометров расширения, электрических термометров сопротивления и термопар. В этих случаях о температуре тела можно судить только по его излучению. Совокупность методов измерения высоких температур, основанных на использовании зависимости лучеиспускательной способности исследуемого тела или его интегральной излучательной способности от температуры,

называется оптической пирометрией. Приборы, применяемые для этих целей, называются пирометрами.

В качестве примера рассмотрим пирометр с исчезающей нитью, принципиальная схема которого изображена на рис.4.

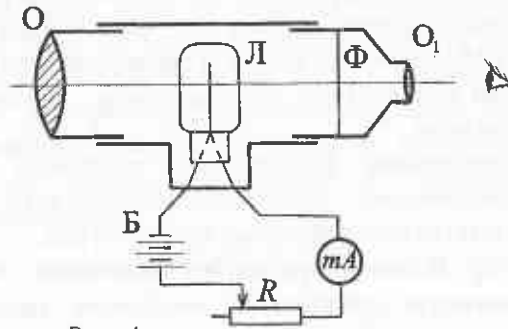


Рис. 4

С помощью объектива *O* изображение светящейся поверхности исследуемого тела совмещается с плоскостью нити накала фотометрической лампы *Л*. Нить и изображение тела рассматриваются через окуляр *O<sub>1</sub>* и светофильтр *Ф*, пропускающий красный свет с длиной волны в вакууме  $\lambda_0=660\text{нм}$ . Яркость накала нити можно регулировать путем изменения идущего по ней тока с помощью реостата *R*.

Наблюдая через окуляр, подбирают с помощью реостата *R* такой накал нити, чтобы ее яркость совпала с яркостью изображения излучателя. В этом случае нить «исчезает», т.е. становится неразличимой на фоне изображения излучателя. Предварительно прибор градуируют по абсолютно черному телу, нанося против делений шкалы гальванометра соответствующие деления температуры. Поэтому с помощью оптического пирометра определяется так называемая яркостная температура исследуемого тела, т.е. такая температура абсолютно черного тела, при которой его лучеиспускательная способность  $\epsilon_{\lambda,T_n}$  для монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  равна лучеиспускательной способности  $\epsilon_{\lambda,T}$  исследуемого тела:  $\epsilon_{\lambda,T_n} = \epsilon_{\lambda,T}$ , где  $T$  — истинная температура исследуемого тела.

Это возможно только тогда, когда температура исследуемого тела  $T$  выше температуры абсолютно черного тела  $T_n$ . Следовательно, истинная температура  $T$  исследуемого тела всегда выше яркостной температуры  $T_n$ , измеренной с помощью пирометра с исчезающей нитью. Для определения истинной температуры тела по его яркостной температуре необходимо знать поглощательную способность тела  $a_{\lambda,T}$ . Значения  $a_{\lambda,T}$  можно найти для разных излучателей в справочниках.

Истинная температура тела определяется по формуле:

$$T = \frac{T_n}{1 + \frac{k\lambda}{hc} \ln a_{\lambda,T} \cdot T_n}, \quad (7)$$

$k$  — где постоянная Больцмана,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света в вакууме,  $a_{\lambda,T}$  — поглощательная способность исследуемого излучателя, т.к.  $a_{\lambda,T} < 1$  то  $\ln a_{\lambda,T} < 0$ .

Из формулы (7) следует, что истинная температура не абсолютно черных тел всегда больше яркостной температуры, так как для них  $a_{\lambda,T} < 1$ , значит  $\ln a_{\lambda,T} < 0$ .

При измерении температуры в процессе выполнения лабораторной работы значение  $\frac{1}{1 + \frac{k\lambda}{hc} \ln a_{\lambda,T} \cdot T_n}$  считается

$$\frac{1}{1 + \frac{k\lambda}{hc} \ln a_{\lambda,T} \cdot T_n}$$

величиной постоянной и оно приводится в инструкции по выполнению лабораторной работы.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Количество лучистой энергии, передаваемой единицей поверхности в единицу времени серым телом в окружающую среду

$$R_T = a_T \sigma (T^4 - T_1^4), \quad (8)$$

где  $a_T$  — поглощательная способность серого тела,  $T$  — его температура,  $T_1$  — температура окружающей среды.

Так как  $T^4 \gg T_1^4$ , то в формуле (8) можно пренебречь  $T_1^4$  и тогда

$$R = a_T \sigma T^4. \quad (9)$$

Если тело (нить лампы) нагревать электрическим током силой  $I$  при напряжении  $U$ , то мощность, выделяемая в теле, равна  $P = IU$ . Будем считать, что вся мощность расходуется телом только на излучение. Тогда согласно определению энергетической светимости

$$R_T = \frac{IU}{S}, \quad (10)$$

где  $S$  – площадь поверхности тела.

Из (9) и (10) следует, что

$$\sigma = \frac{IU}{a_T S T^4}.$$

Значение  $a_T$  для исследуемого материала приведены в инструкции по выполнению лабораторной работы.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое излучение называется тепловым?
2. Что называется энергетической светимостью или интегральной плотностью излучения?
3. Что называется лучеиспускательной способностью или спектральной плотностью излучения?
4. Что называется поглощательной способностью?
5. Какое тело называется абсолютно черным, серым?
6. Сформулируйте закон Кирхгофа для теплового излучения.
7. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана для излучения абсолютно черного тела.
8. Сформулируйте закон смещения Вина для излучения абсолютно черного тела.
9. Что называется оптической пирометрией?
10. Изложите методику измерения температуры пирометром с исчезающей нитью.
11. Изложите методику определения постоянной Стефана-Больцмана.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова, Г.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2003.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн.4. – М.: Астрель, АСТ, 2003.
3. Детлаф, А.А., Яворский, Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2001 – 2002.
4. Наркевич, И.И., Волмянский, Э.И., Лобко, С.И. Физика. – Мн.: Новое знание, 2004.