

Лабораторная работа № 1

Проверка законов абсолютно черного тела

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование зависимостей:

1. Спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от температуры внутри печи.
2. Напряжения на термостолбике от температуры внутри печи с помощью термопары.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

- Измерительное устройство ФПК11
- Объект исследования (печь)
- Термостолбик
- Штатив.



Рис. 1. Экспериментальная установка

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Законы теплового излучения

Тепловым излучением называется перенос теплоты с помощью электромагнитных волн. Теплообмен между телами происходит путем испускания и поглощения теплового излучения. Все нагретые тела излучают электромагнитные волны.

Электромагнитное излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с веществом, называется *равновесным тепловым излучением*, которое характеризуется следующими свойствами:

- *Однородность*, т.е. имеет одинаковую плотность во всех точках внутри полости;
- *Изотропность*, т.е. все возможные направления излучения внутри полости равновероятны;
- *Неполяризованность*, т.е. направления векторов напряженности электрического \mathbf{E} и магнитного поля \mathbf{H} хаотически меняются во времени во всех точках пространства полости.

Рассмотрим замкнутую полость, стенки которой имеют одинаковую температуру T . При равновесном излучении, стенки полости будут излучать и поглощать электромагнитные волны так, что в 1 с количество излученной энергии будет равно поглощенной энергии.

Так как излучение распространяется с конечной скоростью, то внутри полости будет электромагнитное поле с постоянной объемной плотностью энергии:

$$U = \frac{1}{2} (\epsilon \epsilon_0 E^2 + \mu \mu_0 H^2)$$

Плотность энергии можно представить в виде разложения по частоте ω или длине волны μ :

$$U = \int_0^{\infty} U_{\omega} d\omega = \int_0^{\infty} U_{\lambda} d\lambda$$

где $U_{\omega} d\omega$ и $U_{\lambda} d\lambda$ – объемные плотности энергии излучения, приходящиеся на интервал частот $(\omega, \omega + d\omega)$ или длин волн $(\lambda, \lambda + d\lambda)$;

U_{ω} и U_{λ} – спектральные плотности лучистой энергии.

$$U_{\lambda} = \frac{\omega}{\lambda} U_{\omega}, \quad \lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$$

В случае равновесного излучения спектральная плотность U_{ω} зависит от частоты ω , температуры измерений T и свойств среды, занимающей полость. *Основная задача изучения* теплового излучения состоит в нахождении функции $U_{\omega} = U_{\omega}(\omega, T)$

Для характеристики процесса теплового излучения тела вводят понятия об излучательной и поглощательной способности поверхности тела.

Поток лучистой энергии $d\omega$ (с частотами между ω и $\omega + d\omega$), излучаемой за время dt площадкой dS телесного угла $d\Omega$ по определению равен:

$$dW = R_{\Omega} \cdot dS \cdot \cos \Omega \cdot d\Omega \cdot d\omega \cdot dt$$

где R_{Ω} – называется **излучательной способностью** тела в направлении угла Ω .

Излучательная способность тела – энергия, излучаемая с единицы поверхности тела за единицу времени в интервале частот единичной ширины.

Единица измерения R_{Ω} – **джоуль на квадратный метр** – Дж/м².

Поглощательной способностью A_ω поверхности тела называется доля падающего потока излучения dW_0 в данном интервале частот $(\omega, \omega + d\omega)$, которая поглощается телом и превращается в теплоту:

$$A_\omega = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_0}$$

где $1 \leq A_\omega \leq 0$; A_ω – величина безразмерная.

Закон Кирхгофа

Излучательная и поглощательная способность тела для равновесного излучения с частотой ω связаны с удельной интенсивностью r_ω соотношением, называемым **законом Кирхгофа** (1859 г).

$$\frac{R_\Omega}{A_\omega} = r_\omega$$

Отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела, оно является для всех тел универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры.

Так как величина r_ω не зависит от вещества, из которого изготовлено тело, а является функцией только частоты и температуры T , то r_ω для всех тел *одинаково*.

Закон Кирхгофа дает количественное описание **правила Прево**:

Если поглощательные способности двух тел различны, то будут различны и их излучательные способности.

Наибольшее значение R_Ω имеет тело, у которого для всех частот ω поглощательная способность равна единице:

$$A_{\omega} = 1, \quad R_{\Omega \max} = r_{\omega, T}$$

Абсолютно черным телом (АЧТ) называется тело, которое поглощается все падающее на него тепловое излучение.

Из закона Кирхгофа следует:

- излучательная способность АЧТ $r_{\omega, T}$ является функцией частоты ω и температуры T

$$r_{\omega, T} = r(\omega, T)$$

- излучательная способность АЧТ при данной частоте ω и температуре T максимальна

$$R_{\Omega \max}^{AЧТ} = r_{\omega, T}$$

- излучательная способность *любого тела* равна произведению поглощательной способности и излучательной способности АЧТ $r_{\omega, T}$

$$R_{\Omega} = A_{\omega} r_{\omega, T}$$

Зная R_{Ω} , можно вычислить распределение энергии R_{Ω} по частотам для *любого тела*, если известна его поглощательная способность.

Всякое тело при данной температуре излучает электромагнитные волны той частоты, которые оно поглощает при этой же температуре.

Абсолютно черное тело (АЧТ) – *идеализация*. Наилучшее приближение к АЧТ дает замкнутая полость, окруженная равномерно нагретыми непрозрачными стенками. Для входа излучения полость должна иметь малое отверстие.

Закон Стефана-Больцмана

Закон устанавливает зависимость плотности энергии R , характеризующей излучательную способность нагретых тел от температуры T .

Для АЧТ излучательная способность пропорциональна четвертой степени температуры

$$R(T) = \sigma \cdot T^4,$$

где σ – универсальная постоянная, называемая постоянной Стефана-Больцмана.

$$\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$$

Теорема Вина

Равновесное излучение в оболочке с идеально отражающими внутренними поверхностями остается равновесным при бесконечно медленном адиабатическом увеличении или уменьшением ее объема.

Следствия теоремы Вина, которые являются адиабатическими инвариантами:

$$\omega^2 V = const, \quad \frac{\omega^2}{U} = const, \quad \frac{\omega}{T} = const,$$

где V – объем полости, в которой заключено излучение с частотой ω ;
 U – плотность энергии излучения с температурой T .

Закон смещения Вина

Длина волны λ_{\max} , соответствующая максимальной энергии в спектре излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре T

$$\left(\frac{\partial U_\lambda}{\partial \lambda} \right)_{T=const, \lambda=\lambda_{\max}} = 0, \quad \lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} \cdot T = const, \quad \lambda_{\max} \cdot T = b,$$

где $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ (экспериментальное значение).

При повышении температуры максимум функции U_λ смещается в сторону более коротких волн (рис. 2).

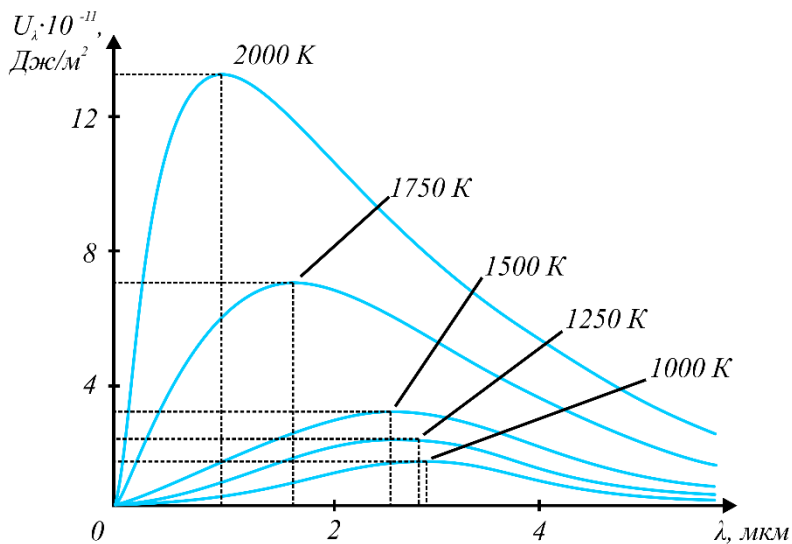


Рис. 2

При переменных λ и T формула Вина имеет вид:

$$U_\lambda(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{1}{\lambda^5} \cdot \varphi(\lambda, T) \cdot d\lambda$$

$$U_\lambda = \frac{\varphi(\lambda, T)}{\lambda^5} \quad (1)$$

Максимальная излучательная способность АЧТ возрастает пропорционально пятой степени:

$$U_{\lambda \max} = \frac{\varphi(\lambda, T)}{\lambda^5}, \quad U_{\lambda \max} = \sigma' \cdot T^5, \quad \sigma' = 1.3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \text{К}^5}$$



Рис. 3

Формула Рэлея-Джинса

В классической физике равновесное излучение в полости представляет собой систему стоячих волн с разными частотами ω , направлениями и поляризациями. При равновесии между стенками полости и электромагнитными полями на каждую колебательную степень свободы (т.е. на каждую элементарную волну) приходится средняя энергия $\varepsilon = kT$.

Количество энергии поля для данного интервала частот ($\omega, \omega + d\omega$) в полости объемом V равно $VU_\omega d\omega$.

Или спектральная плотность U_ω лучистой энергии, равна числу степеней свободы dN в полости V (числу стоячих волн с частотами в указанном интервале), умноженному на $\varepsilon = kT$

$$dN = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \cdot V \cdot d\omega$$

И объемная плотность энергии излучения $U_\omega d\omega$ определяется формулой Рэлея – Джинса:

$$U_{\omega}d\omega = \frac{kT}{\pi^2 c^3} \cdot \omega^2 \cdot d\omega,$$

$$U_{\omega} = \frac{kT}{\pi^2 c^3} \cdot \omega^2 \tag{2}$$

Распределение энергии по длинам волн λ дается выражением

$$U_{\lambda}d\lambda = \frac{8\pi \cdot kT}{\lambda^4} \cdot d\lambda, \quad U_{\lambda} = \frac{8\pi \cdot kT}{\lambda^4}$$

Эти соотношения согласуются с формулой Вина (1), если положить

$$f(\lambda, T) = 8\pi \cdot kT \cdot \lambda$$

Формула Рэля-Джинса (2) описывает эксперимент только в области малых частот ω или больших длин волн λ (рис. 4).

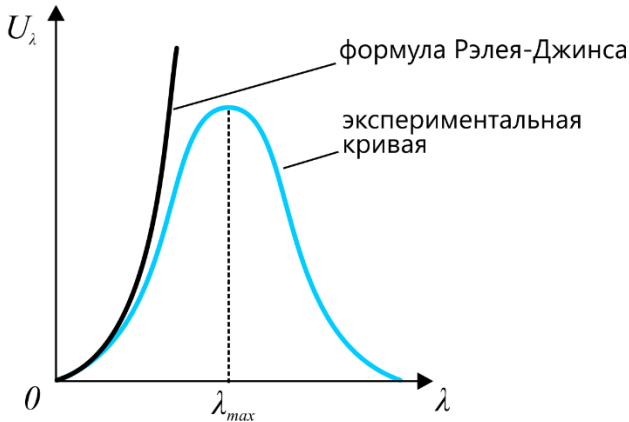


Рис. 4

Так как согласно формуле Рэля-Джинса в спектре теплового излучения большая часть энергии должна приходится коротковолновую часть спектра, то эффект обращения U в бесконечность получили название *ультрафиолетовой катастрофы*.

Классическая теория показала, что равновесие между веществом, имеющим конечное число степеней свободы, и излучением, имеющим бесконечное число степеней свободы, невозможно.

Формула Планка

Формула для спектральной плотности энергии равновесного излучения, которая правильно описывает всю совокупность экспериментальных данных, была приложена Планком (1890г.). Он учел, что излучение и поглощение электромагнитных волн веществом не непрерывно, а конечными порциями энергии, называемыми *квантами энергии*, равными

$$\varepsilon = \hbar\omega = h\nu ,$$

где $\omega = 2\pi\nu$;

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} ;$$

$$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} .$$

Формула Планка имеет вид:

в переменных ω , T :

$$U_{\omega} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2c^3} \frac{1}{\left(e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1 \right)} \quad (3)$$

в переменных ν , T :

$$U_{\nu} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)} \quad (4)$$

в переменных λ , T :

$$U_{\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (5)$$

Следствия формулы Планка:

- при низких частотах $\frac{\hbar\omega}{kT} \ll 1$ формула (3) переходит в формулу Рэля–Джинса (излучения в инфракрасной области);
- при высоких температурах $\frac{\hbar\omega}{kT} \gg 1$ получаем формулу Вина (излучение в ультрафиолетовой области спектра)

$$U_{\omega} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}}$$

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Установите термостолбик так, чтобы его отверстие находилось напротив отверстия на передней панели печи, а расстояние между плоскостями передней панели объекта исследования и термостолбика было минимально ($\approx 1\text{см}$).
2. Включите измерительное устройство выключателем «СЕТЬ» на его задней панели (на индикаторах «°C» и «мВ» должны устанавливаться значения 000 и 0,00 соответственно).
3. Включите печь (при этом выключатель «ВЕНТ» должен быть выключен) и дайте прогреться в течение 5 мин до 50 °C.
4. По мере нагрева печи снимите зависимость напряжения на термостолбике $U(T)$ от температуры (через каждые 50° до 500° C). Данные занесите в таблицу.
5. После достижения максимально заданной температуры печи выключите выключатель «СЕТЬ» и включите выключатель «ВЕНТ» на передней панели печи, при этом включится режим охлаждения печи.
6. Считая, что энергия излучения прямо пропорциональна напряжению на термостолбике, постройте график зависимости энергии излучения $U(T)$ от температуры T .
7. Рассчитайте энергетическую светимость АЧТ по закону Стефана-Больцмана для $R = \sigma \cdot T^4$ и постройте график $R(T)$.
8. Определите λ_{max} из закона Вина и постройте график $\lambda_{\text{max}}(T)$.
9. Сделайте вывод.

Таблица

$t, ^\circ C$	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
T, K										
$U, мВ$										
$R, \frac{Вт}{м^2}$										
$\lambda_{max}, м$										

Примечание: Если в процессе работы происходит переполнение индикатора «мВ» (после значения 9,99 индицируется значение 0,00) необходимо увеличить расстояние между плоскостями передней панели объекта и термостолбика на 1÷2 см, охладить печь и повторить измерения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое тепловое излучение?
2. Что называется энергетической светимостью тела?
3. Какая связь существует между излучательной и поглощательной способностями одного и того же тела?
4. Какое устройство может служить моделью АЧТ?
5. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана и поясните его.
6. Как, зная температуру АЧТ, определить энергию, излучаемую этим телом по всем направлениям в течение определенного времени?
7. Сформулируйте закон смещения Вина и поясните его.
8. Какой физический смысл имеет универсальная функция Кирхгофа?
9. Запишите формулу Планка и Рэлея-Джинса, объясните их смысл.