Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Естественных и математических наук»

ФИЗИКА

Методические указания к
выполнению лабораторной работы

“ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА”

для студентов направлений

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
09.03.04 «Программная инженерия»
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
15.03.05 «Конструкторско-технологическоеобеспечение машиностроительных производств»
18.03.01 «Химическая технология»
23.03.01 «Нефтегазовое дело»
29.03.05 «Конструирование изделий легкой промышленности»

очной и заочной формы обучения

Энгельс 2024

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:

- О*днородность*, т.е. имеет одинаковую плотность во всех точках внутри полости;

- *Изотропность*, т.е. все возможные направления излучения внутри полости равновероятны;
- Н*еполяризованость*, т.е. направления векторов напряженности электрического **E** и магнитного поля **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**:

$$U = \frac{1}{2}(\varepsilon\varepsilon_0 E^2 + \mu\mu_0 H^2)$$

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

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

где $U_\omega d\omega$ *и* $U_\lambda d\lambda$ – объемные плотности энергии излучения, приходящиеся на интервал частот (ω, ωdω) или длин волн (λ, λdλ);

U_ω и U_λ – спектральные плотности лучистой энергии.

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

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 ω+dω), 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/м^2.

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

$$A_\omega = \frac{dW_{поглащ}}{dW_0}$$

где $1 \le A_\omega \le 0$, 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.

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

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

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

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

- 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

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

где $\boldsymbol{\sigma}$ – универсальная постоянная, называемая постоянной СтефанаБольцмана.

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

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*:

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

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

Закон смещения Вина

Длина волны λ, соответствующая максимальной энергии в спектре излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре T

$$\left(\frac{dU_\lambda}{d\lambda}\right)_{\substack{T=const,\\ \lambda=\lambda\max}} = 0, \qquad \lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

Закон смещения Вина

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

где b=2,898*10^{-3}мК (экспериментальное значение).

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

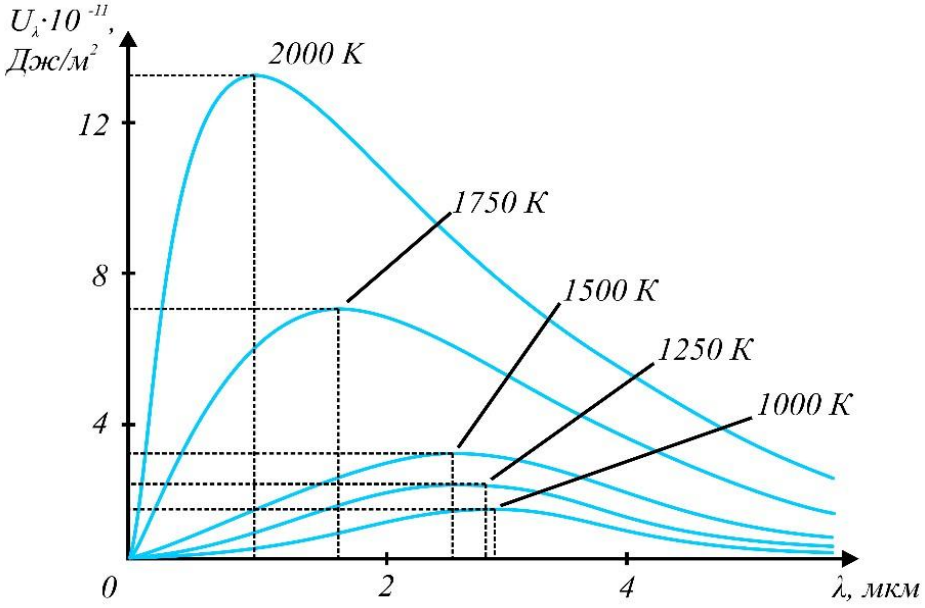

Рис. 2

При переменных λ и T формула Вина имеет вид:

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

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

Максимальная излучательная способность АЧТ возрастает пропорционально пятой степени:

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

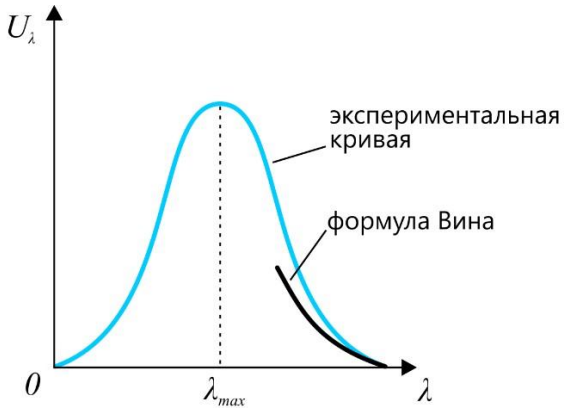

Рис. 3

Формула Рэлея-Джинса

В классической физике равновесное излучение в полости представляет собой систему стоячих волн с разными частотамиω, направлениями и поляризациями. При равновесии между стенками полости и электромагнитными полем на каждую колебательную степень свободы (т.е. на каждую элементарную волну) приходится средняя энергия ε=KT .

Количество энергии поля для данного интервала частот (ω,ω+*d*ω)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 ε=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***:

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

$$U_\omega = \frac{KT}{\pi^2 c^3}\cdot\omega^2 \qquad (2)$$ **-ф-ла Релея-Джинса определяющая испускательную способность абсолютно черного тела**

Распределение энергии по длинам волн λ дается выражением

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

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

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

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

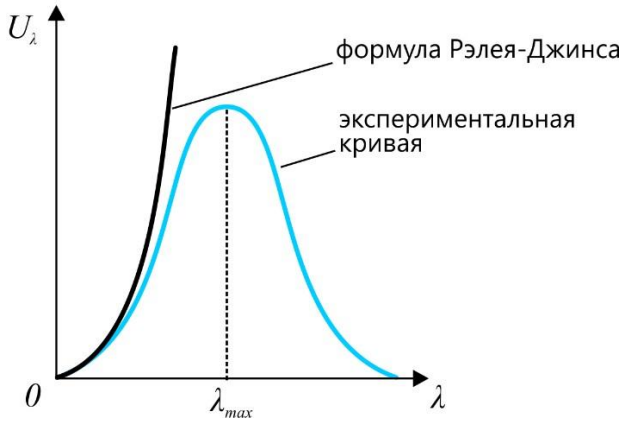

Рис. 4

Так как согласно формуле Рэлея-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 *:*

$\omega = 2\pi\nu$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot c$

$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot c$

Формула Планка имеет вид:

в переменных ω, T :

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

в переменных ν, T :

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

в переменных λ, T :

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

Следствия формулы Планка:

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

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

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 (≈ *1см*).

2. Включите измерительное устройство выключателем *«СЕТЬ»* на его задней панели (на индикаторах *«°С»* 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 °С*.

4. По мере нагрева печи снимите зависимость напряжения на термостолбике $U(T)$ от температуры (через каждые *50°* до *500° С*). 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 $R = \sigma T^4$ и постройте график *R(T)*

8. Определите λ_{max} из закона Вина и постройте график $\lambda_{max}(T)$.
9. Сделайте вывод.

Таблица

t , °C	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
T , K										
U , *мВ*										
R,Вт/м^2										

λmax, 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.